

PRESAS

OTTO

HORSKY

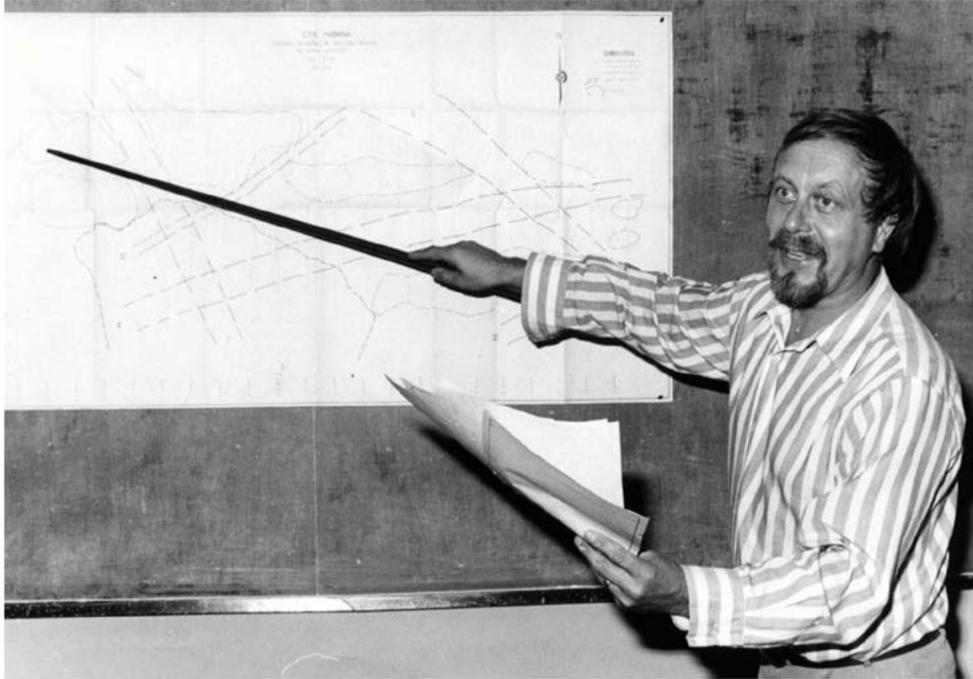
**OTTO  
HORSKY**

**PRESAS**

**INVESTIGACIONES INGENIERO  
GEOLÓGICAS PARA LAS OBRAS  
HIDROTÉCNICAS**

**EDICIÓN ELECTRÓNICA**

**2015**



*Una serie de conferencias de Otto Horský pronunciadas en el Ministerio de la Construcción de Cuba, en La Habana, 1980-1981.*

## **Otto Horský**

### **Investigaciones Ingeniero Geológicas para las Obras Hidrotécnicas Edición segunda, modificada y complementada**

Edición primera era publicada por el Buro Geológico Checo en el año 1983

Texto © 2003 Ing. Otto HORSKÝ, CSc

Título original en la lengua española

Anexo la utilización de los métodos geofísicos: © Prof. RNDr. Pavel Bláha, D.Sc.

Sugerencias al libro © Dr. Ingeniero Angel García Yagüe, Profesor Emérito de U.P.M.

Cuadros, dibujos © Otto HORSKÝ

Fotografías © Otto HORSKÝ y archivo

Diseño gráfico del libro © Otto Horský y archivo

Diseño de la cubierta © Otto Horský

Publicado e impreso por GEOtest Brno 2003

ISBN: 80-239-1679-3

[www.horsky.org](http://www.horsky.org)

### **PRESAS - Investigaciones Ingeniero Geológicas para las Obras Hidrotécnicas Primera edición como el libro electrónico © Lukáš Vik, 2015**

La edición ampliada complementada

ISBN del formato PDF: 978-80-87749-88-3

La conversión a formatos electrónicos: WEB Diseñador y Conzultor Lukáš Vik

[www.lukasvik.cz](http://www.lukasvik.cz)

## PRÓLOGO

El estudio Ingeniero - Geológico y Geotécnico del lugar del emplazamiento de una presa y de embalse es una tarea progresiva y continua, y sin ninguna duda, muy seria e importante. Comienza por el análisis de la documentación y termina con la auscultación de la obra en servicio. La progresión de tareas comprende etapas bien definidas, correspondientes con etapas del proyecto de la obra.

Precisamente para las etapas iniciales, los que son de mayor importancia para el desarrollo del proyecto, se propone por este instructivo una sistemática de trabajo, definiendo en general las tareas que forman parte de cada etapa, estableciendo las premisas y pormenorizando cada investigación en particular.

Aunque este instructivo he terminado en el año 1983 y era impreso por primera vez por el Bűró Geológico Checo, es decir, hay que calcularlo ya como el trabajo bastante viejo y en muchos aspectos superado, presentamos su nueva edición, agregando solamente algunos nuevos anexos. Es por la razón siguiente: los métodos y sistemática de trabajo de las investigaciones ingeniero geológicas y geotécnicas para las presas y embalses presentados en este libro son modernos e innovadores y no se han cambiado tanto. Lo que sí, lo que ha logrado mucho desarrollo gracias a la modernización de equipos y de técnicas de investigación, es geofísica aplicada a la construcción.

Métodos modernos de las investigaciones geofísicas para las obras hidrotécnicas presentados en este libro en el anexo, lograron el desarrollo tan exitoso gracias a colaboración muy estrecha entre geofísico e ingeniero geólogo y geotécnico. En este lugar hay que dar mucho agradecimiento al Prof.RNDr.Pavel Bláha, DrSc y a la Empresa GEOTEST BRNO, ya que el primero con mucho entusiasmo ya más que 30 años está desarrollando estos nuevos e inovadores métodos en la estrecha colaboración con los geólogos e ingenieros geólos y el segundo, GEOTEST BRNO, ha creado las condiciones ideales para este desarrollo.

En el libro presentamos además de muchos ejemplos prácticos de las repúblicas Checa y Eslovaca también ejemplos de trabajos concretos de Cuba, de España, Perú y de varios otros países. Es por la razón, que el autor del libro trabajó tres años en España y cuatro años colaboró con los especialistas cubanos como el Asesor Principal del Ministerio de las Construcciones de Cuba y los cuatro años más como el jefe de las investigaciones para la Hidroacumuladora en el Escambray. A la parte cubana hay que dar mucho agradecimiento, ya que crearon las condiciones ideales para que salieran las investigaciones para la Hidroacumuladora como muy exitosas, y seguro, como unas de las más grandes y más complejas en su época en todo el territorio de America Latina.

En Brno, República Checa, el día 13 de Abril de 2003

## **PRÓLOGO A LA EDICIÓN ELECTRÓNICA**

El libro “Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Obras Hidrotécnicas” es el fruto de los trabajos realizados por un ingeniero-geólogo en varias presas y distintas obras hidráulicas en la antigua Checoslovaquia y en muchos otros países más, en los que actuó como el ingeniero responsable de las investigaciones o como el asesor principal.

Este libro está destinado a los interesados en la problemática de las investigaciones a efectuar durante el proyecto, construcción y explotación de presas y embalses. Puede ser útil para la comprensión y entendimiento entre las entidades que los promueven y los proyectistas, y entre los ingenieros, geólogos, geofísicos, hidrogeólogos, geotécnicos y otros especialistas. Será igualmente útil a cuantos técnicos que intervengan en el mantenimiento de presas y en la explotación de embalses. También puede servir como el texto en en las universidades y en los centros de la enseñanza superior.

El autor del libro intenta hacer un esbozo de los problemas relacionados con las investigaciones ingeniero-geológicas durante el proyecto y la construcción de presas y embalses y proponer las soluciones y los procedimientos de los trabajos. Todos los capítulos se documentan con casos concretos. Consideramos, que el resumen de la experiencia práctica de muchos años del autor pueda servir como una ayuda e información no sólo para los profesionales, sino también para el público interesado por estas estructuras y su problemática. El anexo sobre los métodos geofísicos pueda servir como un guía para aplicar estos métodos durante de las investigaciones ingeniero geológicas.

Las ediciones del libro en forma de papel y por la última vez, en CD, fueron prácticamente desmanteladas a excepción de unos pocos ejemplares. Aunque ha pasado desde su segunda edición en el año 2003 mucho tiempo y autor del libro ganó muchas nuevas experiencias y muchos nuevos conocimientos, dejó la edición electrónica en su forma original, quedando así el libro como un documento de la utilización de técnicas de las investigaciones ingeniero-geológicas en el siglo pasado.

En Brno, República Checa, el día 21 de Marzo de 2015

## INTRODUCCIÓN

Las presas de cualquier tipo son estructuras de comportamiento muy complejo. Esto implica que los métodos para analizarlos y diseñarlos hayan progresado tan lentamente y que se haya tenido que pagar, algunas veces, el alto precio de una falla catastrófica y en otras muchas ocasiones, quizás el menos espectacular pero también alto, de un diseño muy conservador. En los tiempos pasados se construyeron presas en sitios geológicamente ventajosos y su altura fue moderada. La necesidad de predecir con detalle su comportamiento fue muy grande, pues para su diseño y su construcción era válido recurrir, en gran medida, a la experiencia.

Sin embargo, al terminarse los lugares ventajosos, fue necesario construir también en condiciones de geología cada vez más desfavorables y complejas, dependiendo el comportamiento de la estructura de las condiciones geológicas mucho más que otras estructuras del mismo género. Finalmente fueron creciendo también las alturas de las presas y el valor de las zonas en que debían localizarse, por lo que los costos de la presa se incrementaron notablemente. Todo esto llevó consigo la necesidad de mejorar los métodos de análisis y diseños de estas estructuras. El desarrollo de la mecánica de suelos y de rocas, de las técnicas de investigación ingeniero-geológica, del análisis experimental de los esfuerzos, de los métodos de análisis numéricos y, por último, de las computadoras digitales aportaron sucesivamente su contribución a ese fin.

Pero todo método de análisis o de diseño debe ser válido o confirmado mediante su confrontación con observaciones experimentales, preferiblemente en escala natural. Para dar validez a los métodos más elementales de análisis de presas, enfocados principalmente en la estabilidad global de la cortina, pudo bastar con observar si el prototipo era estable o no. Por el contrario la confirmación de métodos más refinados, orientados para predecir esfuerzos, deformaciones y posible deterioro interno requiere instrumentar cuidadosamente los prototipos.

En la evolución del diseño de presas, el momento actual puede caracterizarse precisamente por el predominio de la necesidad de confirmar los desarrollos más recientes. Solo si se satisface esta necesidad, será posible construir grandes presas en las más diversas condiciones geológicas con costos y riesgos aceptables. Para cumplir bien esta tarea muy seria e importante, la ingeniería geológica se fundamenta en los logros alcanzados por la mecánica de rocas y suelos, por la geofísica y otros métodos modernos, hasta el cálculo con método de los estados límites.

Los métodos matemáticos de cálculo necesitan datos, datos exactos sobre la estructura del maciso rocoso, caracterizando todo el sistema del ambiente estudiado por su deformabilidad, resistencia, permeabilidad y otros datos geotécnicos. Y aquí hay que tener en cuenta, que el maciso rocoso no lo podemos calcular como compacto, isotópico y elástico. La idealización del maciso rocoso como un medio compacto puede introducir grandes errores, aunque, en la práctica, cierta idealización, es decir simplificación del modelo del ambiente estudiado es necesaria, para que fuera posible utilizar un modelo matemático. Esto significa, en esencial, la división del maciso rocoso a bloques casi homogéneos y su característica por datos geotécnicos, necesarios para el cálculo del sistema cortina - fundamentos.

## ÚVOD

Knih je určena zájemcům o problematiku průzkumu při projektování a výstavbě přehrad. Může dobře sloužit ke vzájemnému pochopení a dorozumění mezi investory a projektanty na jedné straně, na druhé straně mezi inženýrskými geology, geofyziky, hydrogeology, geotechniky a dalšími specialisty. Další skupinou, kterou chce autor oslovit, jsou pracovníci organizací provozujících přehradu. Stejně tak může posloužit jako učební text pro studium na vysokých školách. Kniha je výsledkem prací a zkušeností inženýrského geologa na různých přehradách v České republice a na mnoha přehradách v zahraničí, kde pracoval jako zodpovědný řešitel nebo konzultant.

Autor klade v knize hlavní důraz na příklady z praxe, neboť nejlépe lze pochopit celou širší problematiku z konkrétních řešených úkolů. Snažil se, aby se kniha vyhnula teoretickým rozborům, a aby spíše než poučky a normy přinášela ukázky, se kterými se lze setkat v rámci projektové přípravy i provozu díla.

První kapitoly shrnují základní kritéria projekce přehrad ve vztahu k určujícím faktorům pro výběr místa a typu hráze. Hodnocena jsou hlediska geologická, morfologická, klimatogenní, ekologická a další vlivy mající význam při výběru přehradního místa. Jsou definovány základní úkoly a principy inženýrskogeologického průzkumu pro přehradu a jiné hydrotechnické stavby. Za důležité autor považuje rozdělení průzkumu na etapy, shodné s etapami projektování a na efektivitu průzkumu při zachování požadavku na bezpečnost stavby. Velká pozornost je věnována strategii provádění průzkumu s podrobným výčtem jednotlivých úkolů. Důležitou součástí je charakteristika a návod technického zadání průzkumných prací, kde investor, projektant nebo prostě objednatel průzkumu formulují základní požadavky, které by měly být průzkumem řešeny. V souladu s technickým zadáním inženýrský geolog tyto požadavky podrobně rozvádí a uplatňuje v projektu průzkumných prací, který zahrnuje jak kancelářské, laboratorní a terenní práce, tak rozpočet a podrobný harmonogram prací. Obsah technického zadání a projekt průzkumných prací jsou uvedeny v samostatných přílohách.

. Je definován úkol inženýrskogeologického mapování zájmového území vodního díla a v podrobnějším detailu zejména přehradního místa. Je uveden pracovní postup na sestavení účelové inženýrskogeologické mapy. Je popsán potřebný rozsah hydrogeologického průzkumu (předběžného i podrobného).

Ve druhé části knihy jsou uvedeny úkoly geofyzikálního měření v různých etapách průzkumu. Jsou rozebírány možnosti jednotlivých geofyzikálních metod pro konkrétní problémy. Důraz je kladen na spolupráci inženýrského geologa a geofyzika při definování úkolů k řešení a při jejich projektování a zpracování. Samostatná příloha v závěru knihy zpracovaná prof. RNDr. Pavlem Bláhou, D.Sc, uvádí na příkladech použití geofyzikálních metod pro různé typy staveb, tedy stavby hydrotechnické, podzemní, ale i stavby související s výstavbou přehrad a jiných vodních děl. V příloze č.III jsou na konkrétním příkladu uvedeny metody použití geofyzikálního průzkumu v předběžných etapách projektu díla.

Následuje rozbor rozsahu přímých průzkumných prací, zaměřený zejména na studium místa dotčeného výstavbou vlastní hráze a na vymezení oblasti a rozsahu průzkumu pro předběžný a

podrobný průzkum. Podrobně je zhodnocena metodika komplexní dokumentace průzkumných děl. Velká pozornost je věnována hodnocení obecných zásad, základních typů a metod geotechnického průzkumu. Jsou uvedeny základní typy geotechnických zkoušek, ať již polních či laboratorních. Pozornost je věnována na konkrétním příkladu inženýrskogeologickému průzkumu zátopové oblasti přehrady a jsou definovány základní typy svahových deformací.

Kniha je obohacena přílohami, které usnadňují pracovní postupy při projektování prací a při jejich realizaci. Z tohoto pohledu za nejcennější je třeba považovat přílohu o projektování a provádění geofyzikálních prací, které by vždy měly být nedílnou součástí inženýrskogeologického průzkumu pro přehrady. Jejím autorem je Doc. DNDr. Pavel Bláha, DrSc.



Vrtné práce v místě přehradního profilu Dalešice, Česká republika, 1971.  
Trabajos de perforación en el lugar de la Presa Dalešice, República Checa, 1971

# Capítulo I

## Criterios de diseño de una presa

### I.1. La introducción

El proyecto o diseño de una presa consiste en la determinación de todos los detalles referentes a localización, geometría y constitución de la cortina y estructuras colaterales o accesorias. Todo el proyecto debe complementarse con un programa de ejecución y una estimación de costos.

Una presa en operación es en cualquier caso un sistema cuyos elementos están interrelacionados y se afectan mutuamente. Su proyecto, por tanto, sólo puede enfocarse en conjunto. Sin embargo, en este trabajo mencionamos principalmente los aspectos relativos a la estructura de retención, el dique y su cimentación, la cual es, sin duda, más importante y no se discuten en detalle las estructuras colaterales como vertederos o las de toma.

La concepción general y los detalles de diseño de la cortina de una presa se deben determinar escogiendo entre las diversas alternativas de cortina y tratamiento de cimentación que se adaptan a las condiciones del sitio, aquella cuyo costo total es mínimo, sin correr riesgo de falla de la estructura.

### I.2. Selección del lugar de construcción de una obra hidrotécnica

El desarrollo de la construcción de grandes presas provoca la necesidad de seleccionar bien el lugar para una construcción uniforme, para eliminar al mínimo las influencias negativas al ambiente de la naturaleza y de la vida y para desviar al mismo los riesgos provocados por el cambio de las condiciones originales y debe construirse en límites económicos favorables. Con estas razones el problema de la selección del sitio para la construcción de una presa está influenciado por factores de índole económico y no solamente técnico.

No existen lugares que sean exactamente similares, cada uno presenta su propia problemática particular, diferente desde el punto de vista ingenieril así como desde el punto de vista socioeconómico y cultural. Por ejemplo, para construir una presa en el río Nilo en Egipto, fue necesario proteger algunos objetos de valor histórico inmenso (Abu Simbel cerca de Asuán), para la construcción de algunas obras hidrotécnicas en el Danubio (presa de "Puertas de hierro" en la frontera entre Rumania y Yugoslavia) fue necesario discutir antes cuestiones de índole político-social entre ambos países. Esto radica en que la problemática de selección entre sitios alternativos se ha de resolver mediante la evaluación comparativa de las características físicas del lugar, de las implicaciones sociales, económicas, políticas, ideológicas y legales de la construcción del embalse.

La selección de la zona para una presa está regida por los propósitos de desarrollo de los recursos hidráulicos, la conveniencia física de los lugares disponibles para lograr esos propósitos sin riesgos y en forma económica e sin afectar negativamente el ambiente de la vida y de la naturaleza. Los propósitos de desarrollo de los recursos hidráulicos pueden ser, entre otros, los siguientes:

- a) Desarrollo de energía eléctrica
- b) Almacenamiento y derivación del agua para uso industrial y doméstico.
- c) Almacenamiento y control de abastecimientos de agua para riego y para control de avenidas

- d) Incremento del tirante hidráulico para navegación
- e) Protección e integración al desarrollo de tierras bajas inundadas
- f) Recreación
- g) Control de sedimentos y cuerpos flotantes especialmente durante del tiempo de avenidas, lagunas de oxidación

Los propósitos mencionados, o mejor dicho, en la mayoría de los casos, algunas combinaciones de ellos influyen la selección del sitio para una presa. La utilización o destino de los volúmenes de agua almacenados deberán conformarse al planeamiento integral de desarrollo de los recursos hidráulicos de la cuenca y a los objetivos nacionales de desarrollo regional. Las obras y embalses propuestos deberán satisfacer necesidades inmediatas, mediatas y a largo plazo. Sería erróneo satisfacer demanda de agua inmediata y olvidar necesidades futuras. Los factores físicos más relevantes que afectan la selección del sitio para una presa son los siguientes:

- a) Posibilidades de cimentación de la obra en las condiciones geológicas y morfológicas del lugar sin riesgos y en límites económicos favorables
- b) Condiciones de impermeabilidad de la cimentación y del vaso
- c) Disponibilidad de los materiales de construcción
- d) Cuantificación de afectaciones originadas por la creación del vaso
- e) Relación del sitio con la obra beneficiada y valoración de los efectos adversos ocasionados aguas abajo por el embalse
- f) Disponibilidad de redes viales para la construcción y acceso al sitio
- g) Comparación y disponibilidad de otros sitios alternativos

La decisión de utilizar un sitio específico se basa en los factores de que se tenga conocimiento en el momento en que se autorice el proyecto, y no exista referencia de que la solución adoptada continúe siendo la mejor. Las condiciones consideradas en proyectos anteriores cuya construcción se ha visto retrasada durante varios años habrán variado notablemente y quizás tendrán que seleccionarse otros sitios.

Tales variantes pueden consistir en avances técnicos, en el diseño y construcción de presas, cambios en los intereses de utilizar la tierra, nuevos desarrollos socioeconómicos (nuevas industrias, poblaciones, economías etc.) y otras circunstancias no predecibles. Existen muchos ejemplos donde el desarrollo de la técnica de investigación, proyección y construcción nos dio la posibilidad de construir una obra hidráulica en lugares antes pensados como desfavorables (p.ej. en la región de rocas sedimentarias tipo Flysch en el norte de Moravia en la República Checa).

Con pocas excepciones, los proyectos de embalses de agua siempre causan algún dano. Los lugares que en otra forma son satisfactorios pueden en forma adversa afectar a zonas agrícolas extensas o importantes, minas, vías férreas, carreteras, ciudades, zonas boscosas etc. Por el contrario, toda presa una vez construida, ejercerá sin duda una influencia considerable en el desarrollo futuro de la región.

### I.3. Factores básicos que determinan la selección del tipo de la cortina

La selección del tipo de la cortina a construirse en un sitio previamente seleccionado está afectada directamente por las condiciones naturales del lugar, es decir:

- a) Características del eje, de la cimentación y del vaso

- b) Características geológicas y sismológicas regionales
- c) Disponibilidad y acceso a los materiales de construcción, su tipo, cantidad y la localización
- d) Clima y tiempo disponible para la ejecución de la obra

Además de lo mencionado afectan al diseño de una presa factores indirectos, como son función de la obra, su importancia, duración de las obras requeridas, métodos de proyección y construcción actuales y requerimientos de materiales, maquinarias y mano de obra. Tales factores indirectos están influenciados, a su vez, por los antecedentes económicos, políticos y sociales del país.

Las condiciones antes mencionadas se encuentran estrechamente interrelacionadas y son tan complejas que se requiere depender de los criterios y juicios de especialistas con experiencia cabal en cuanto a la economía y seguridad de la presa.

En ningún caso la solución adoptada será independiente de factores subjetivos, como la experiencia y preferencias del proyectista, o su interpretación personal del comportamiento satisfactorio o indeseable de otras obras en condiciones similares.

El estado actual de la ciencia y la técnica nos da la posibilidad de construir una cortina de un tipo definido en condiciones geológicas muy difíciles y muy complejas, pero siempre hay que tener en cuenta la armonía de las características básicas, es decir, la necesidad e importancia de la obra y su carácter relacionado con el ambiente de la naturaleza y del macizo rocoso.

De aquí sale :

De la importancia de un análisis cuidadoso de todas las partes del proyecto y de una evaluación apropiada de las condiciones durante de la construcción pueden surgir modificaciones benéficas al proyecto original. Es evidente, de que cuanto más cuidadosamente se analicen los detalles del proyecto, menos será el número de imprevistos que provoquen las modificaciones del diseño durante la ejecución de la obra, pero éstas generalmente no podrán eliminarse del todo. En cualquier caso, dichos cambios deben producirse oportunamente y ser tales que puedan adaptarse al criterio general con que se elaboró el proyecto.

### 1.3.1. Aspectos geológicos y tectónicos para elegir la cortina

Los aspectos geológicos y tectónicos del eje son, sin duda, los más importantes para elegir el tipo de la cortina. Mientras que en las presas de gravedad éstas soportan las presiones del agua por su propio peso, en las presas del tipo bóveda las presiones se transmiten al macizo rocoso, primordialmente hacia los estribos. Esto indica que las fallas, grietas y otras anomalías son de gran consideración en el diseño de presas de arcos, y pueden impedir que se considere una cortina de este tipo, ya que esas condiciones pueden producir deformaciones excesivas o problemas de estabilidad y de drenaje bajo presión. Estos defectos estructurales han tratado de remediarse de suerte que no sean causa de rechazo del lugar, aunque eso puede implicar en algunos casos elevados costos de la construcción de arco y muchas veces es más económico buscar otro tipo de cortina (de gravedad, rock-fill etc.).

La tectónica y estratificación a lo largo de las líneas de empuje deben estudiarse cuidadosamente, en especial cuando representan posibles problemas de deslizamiento o inestabilidad.

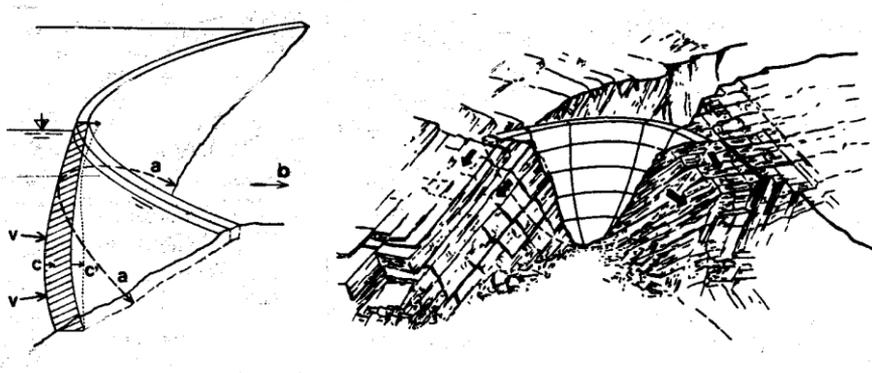


Fig.1: La transmisión de las presiones del agua embalsada a las laderas por medio del arco provoca la necesidad de estudiar detalladamente la estructura del maciso rocoso.

Si tales estructuras de rocas están orientadas de suerte que el empuje del arco las cierre, comprima o consolide, sus efectos pueden ser fácilmente incluidos en los cálculos para la deformación de la cimentación y, por consiguiente, del diseño de la presa. Si las juntas o fallas están orientadas de forma tal que los bloques de roca pudieran desplazarse por el empuje, esas condiciones deben reconocerse y tratarse según las circunstancias. De lo mencionado resulta que para la cortina de arco es indispensable estudiar muy detalladamente todos los sistemas de juntas, grietas, fallas y otras, apreciando como influyen éstas en la estructura de las rocas, la estabilidad de la excavación y de la cortina durante y después de construirla.

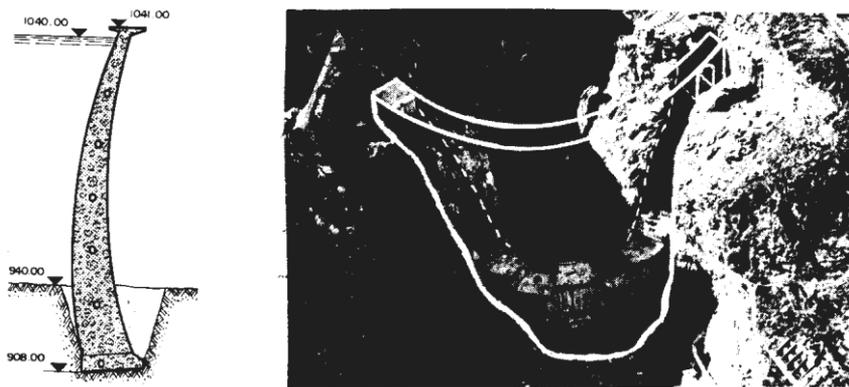


Fig.1ª: Presa de hormigón tipo arco en el río Aguas Blancas en España, Granada.

En condiciones geológicas muy difíciles, con muchas fallas de peligro, donde no sea posible construir una presa de arco o solamente con economía desfavorable, podemos utilizar la presa de contrafuerte debido al comportamiento independiente de sus elementos y a la libertad de elección del espaciamiento entre ellos, lo cual permite salvar en muchas ocasiones zonas deficientes de la cimentación. Para estas presas es por lo general satisfactorio el subsanar las deficiencias estructurales de la cimentación, mediante medidas como sustituir alguna porción de una falla con concreto, atravesar una falla mediante un puente de concreto macizo reforzado y proporcionar una pantalla impermeable. De lo mencionado resulta que este tipo de presa necesita roca buena debajo de los pilares (contrafuerte) con resistencia al cortante satisfactoria ya que se calcula con alta concentración de esfuerzos de los pilares.

También los módulos de deformación deben ser satisfactorios, para que no se provoquen asentamientos diferenciales de gran envergadura, los que pudieran afectar el elemento impermeable el que está unido con todos pilares.

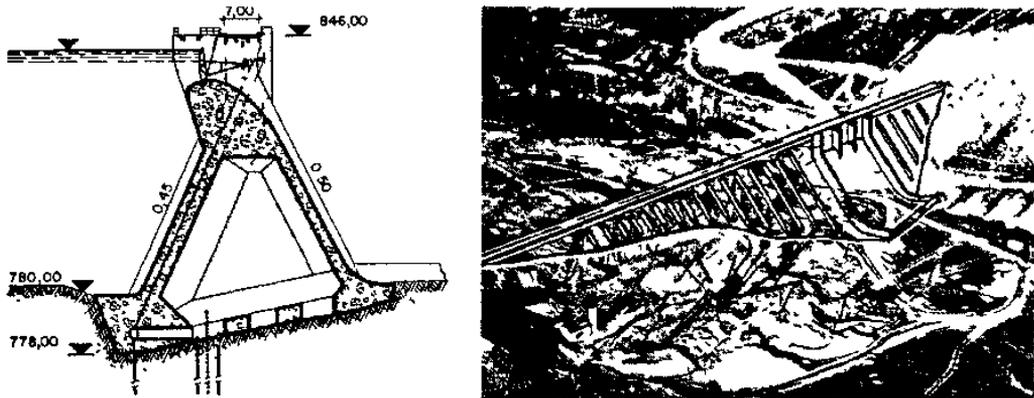


Fig.2: La presa de contrafuerte en el río Sorbe en España. La altura es de 68 metros, la longitud de la corona es de 472 metros.

Desde este punto de vista soporta mejor la presa de gravedad donde los bloques de hormigón tienen un poco de mayor libertad y trabajan más o menos independientemente (en la presa de Žermanice en la República Checa en la región de Flysh surgieron entre bloques asentamientos de hasta 15 cm sin afectación a la estabilidad de la presa) .

Es decir, una presa de gravedad que soporte las presiones del agua por su propio peso es la más segura, pero comparándola con presas de contrafuerte y de arco, es la más cara, ya que necesita hasta tres veces más hormigón.

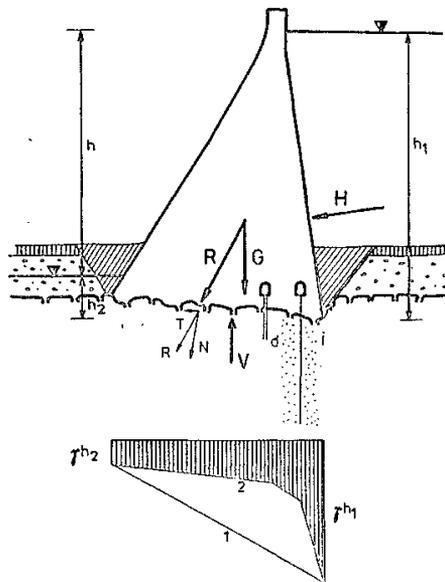


Fig.3: La presa de gravedad transmite las presiones del agua embalsada (H) a los cimientos gracias al peso de su cuerpo (G). La componente tangencial T de la fuerza final R no debería aumentar las subpresiones V, para que no bajen las fuerzas activas de gravedad. Por esta razón las subpresiones (línea 1) las disminuimos con la ayuda de la cortina de inyección "i" y drenaje "d" (línea 2).

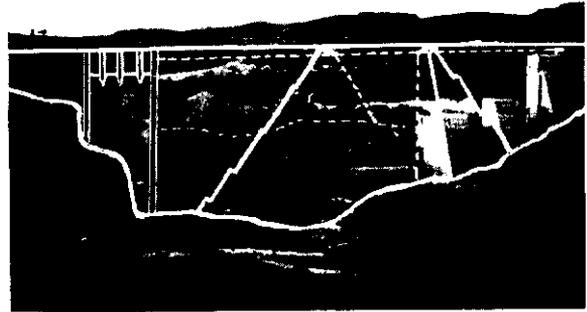
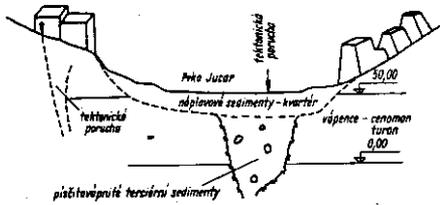


Fig.3ª: Ejemplo de mal ubicación de presa de gravedad en el macizo rocoso afectado por falla tectónica. Presa Tous en el río Júcar, España. Por tal razón era necesario cambiar el proyecto y construir el dique combinado.

Generalmente podemos decir que de los distintos tipos de roca, las sedimentarias son las menos aceptables para la construcción de una cortina de arco o de contrafuerte y entre ellas las más cuestionables son los esquistos arcillosos, lutitas y areniscos. Las rocas que se descomponen o deterioran al exponerse al agua, la atmosfera o la presión son totalmente inaceptables.

Para tales regiones es conveniente construir presas de materiales sueltos o de "rock-fill" (enrocamiento), los cuales soportan mejor los asentamientos diferenciales y donde tenemos limitaciones esencialmente provocadas por infiltraciones y por falta de materiales de construcción.

En cuanto a las características de la cimentación de presas de tierra y enrocamiento, su compresibilidad y resistencia pueden obligar a aumentar las dimensiones de la cortina en la base para evitar asentamientos diferenciales o fallas por cortante. En una cimentación constituida por suelos granulares susceptibles de compactación o de pérdida de resistencia bajo efectos dinámicos, una parte muy importante del proyecto será el mejoramiento de las condiciones de tales depósitos bajo la cortina y en sus cercanías, particularmente en regiones de alta sismicidad.

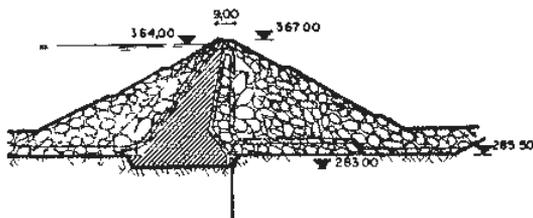


Fig.4: La presa de enrocamiento de la altura de 84 m en el río Guadalteba en España.

Cuando el problema más importante de la cimentación está ligado al flujo de agua a través de ella, su influencia en el proyecto puede ser también apreciable; por ejemplo, la posibilidad de que una pantalla impermeable de cualquier tipo pueda o no ser eficiente implica la necesidad de proporcionar un sistema de drenaje de la cimentación y del terraplén cerca del talud aguas abajo (filtros, pozos de alivio, galerías de drenaje etc.).

Generalmente podemos decir, que los detalles de geología (estratificación, fisuramiento), permeabilidad y compresibilidad son los básicos y determinantes en las condiciones de seguridad de toda la cortina o de la efectividad de ciertos componentes del proyecto. Principalmente en lo que se refiere al control del flujo de agua a través de la cimentación de una presa, no debe entenderse su completa eliminación ni su reducción a cantidades pequeñas, sino su manejo por el medio de pantallas impermeables o drenaje, de modo que no ponga en peligro la estabilidad ni el funcionamiento de la obra.

Cuando las propiedades mecánicas de la cimentación o el espesor de sus mantos con características desfavorables varían mucho en el sitio elegido, la economía resultante de la óptima localización del eje del dique, generalmente justifica estudios más detallados y el análisis de mayor número de alternativas.

### I.3.2. Aspectos geomorfológicos del eje.

Está claro que tanto las condiciones topográficas como las geológicas son factores que influyen la selección del tipo de la cortina en un grado mayor que cualquier otra condición natural. Las características topográficas que afectan la selección son la sección transversal del eje y las pendientes en ambas laderas. La primera tiene importancia en la determinación del volumen requerido de material en la cortina, en tanto que la última afecta principalmente la estabilidad de la presa.

Según la morfología del valle podemos pensar en forma orientativa, si el lugar es en esencial conveniente para la construcción de la presa. El eje lo ubicaremos, desde luego, en el lugar más estrecho, con pendientes bruscas y rocosas, ya que podemos suponer que este lugar ha soportado mejor la erosión, la denudación y otros procesos por tener rocas más resistentes que en el resto del valle, donde se encuentren pendientes poco inclinadas. Pero no siempre el estrechamiento del valle refleja el lugar más conveniente para construir una cortina, ya que puede suceder que estrechamiento fuera provocado por un derrumbe. (Vea fig. 5).

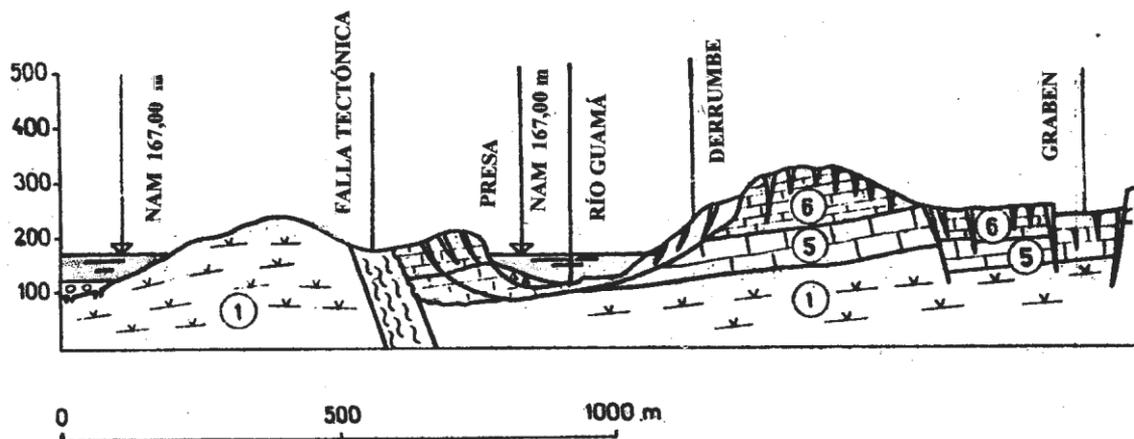


Fig.5: Perfil C - C' en COROJO en Cuba, poco conveniente por presencia del deslizamiento de las calizas (6) en ambas laderas del eje. Calizas afectadas por el deslizamiento son además de eso muy permeables.

1 - tobas porfiríticas de la serie COBRE, 5 y 6 - calizas de la serie Charco Redondo.

En general, se consideraría primero una cortina rígida de arco para un eje estrecho, rocoso, con pendientes bruscas, mientras que otros tipos de presas serían consideradas primero en el caso de sitios amplios. Debe considerarse la selección de presas de arco en aquellos sitios con relaciones cuerda - altura de la cortina "c/a" hasta 5, siempre y cuando la cimentación sea adecuada. En varios proyectos no se ha titubeado en diseñar presas de arco para ejes con relación "c/a" hasta 10, cuando no se especifique el uso combinado de comportamientos artificiales (espolones, rellenos etc.).

La relación "c/a" de la presa Moulin Ribou en Francia (1955) es cercana a 8, la relación más alta de una presa en Méjico (Presidente Calles, 1931) alcanza 4. Se considera teóricamente que, bajo condiciones adecuadas, una presa de arco con relación c/a igual a 12, requerirá el mismo volumen de concreto que una presa correspondiente de gravedad.

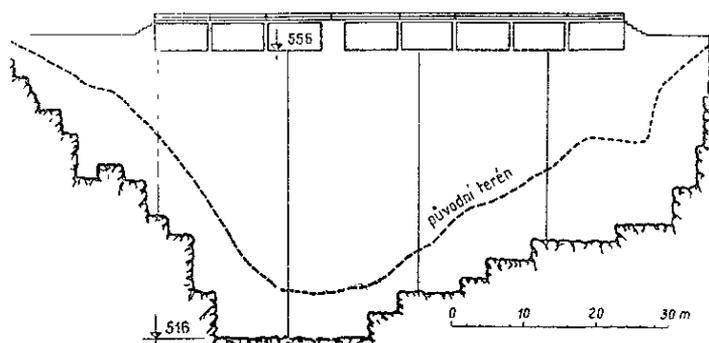


Fig.6 : Eje de la presa Bromme para el arco con relaciones "cuerda - altura" de 2,5.

Otro factor de importancia en el diseño de una presa es la forma del eje, suponiendo que la relación c/a sea adecuada. El factor de forma se define como la relación entre el perímetro de contacto de la cortina con la cimentación y la altura máxima de la cortina (p/a) . Al comparar dos presas con la misma relación c/a, se observa que los ejes tienen relaciones p/a distintas y, consecuentemente, las cortinas presentan características diferentes, y los volúmenes de concreto requeridos por cada cortina son distintos.

La ausencia del tipo ideal de eje de forma "V" no excluye la posibilidad de adoptar una presa de arco. Tanto en los ejes asimétricos en forma de "U" o la forma de "V-U" compuesta y en eje a-bierto se pueden ubicar presas de arco eficientemente. Sin embargo, las irregularidades excesivas pueden requerir de una estructura compuesta por una cortina de arco, arcos múltiples y otros tipos de presas.

La consideración de presas en arco es apropiada en aquellos ejes que tienen una relación "c/a" adecuada - hasta 5 - y una relación "p/a" entre 2 y 3,5. La relación "c/a" mayor de 5 y una relación "p/a" mayor de 5 es apropiada para las presas de contrafuerte. Por ejemplo, las presas de Svarthalsforsen, Balforsen y Krangede en Suecia presentan relaciones "c/a" iguales a 5, 16.2, 17.5. Las presas Athens y Nevers de Estados Unidos presentan relaciones "c/a" iguales a 15.6 y 58.8. Las relaciones "p/a" en las presas de contrafuerte son generalmente mayores que la relación "c/a" correspondiente.

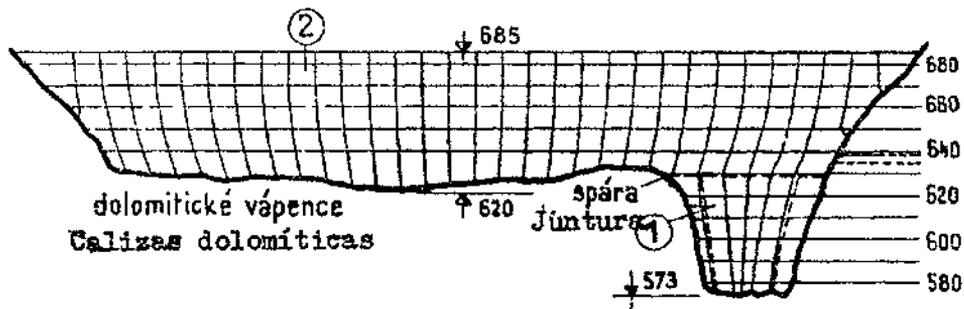


Fig.7: Estructura compuesta por una cortina de arco en la base de un valle estrecho, el resto del cuerpo es de otro tipo.

Las presas de enrocamiento y de tierra son adecuadas para aquellos ejes, en los que las características topográficas son favorables para la estabilidad de sus parámetros aguas arriba y aguas abajo y para la operación efectiva de maquinarias pesadas durante el movimiento de los materiales. Estos tipos de presas son más económicos si las características topográficas favorecen la inclusión de la obra vertedora. De lo contrario, la presa es a menudo muy cara porque la obra vertedora tiene que ser construida aparte de la cortina y debe tener una capacidad adecuada para evitar el desbordamiento del embalse sobre la corona de la cortina.

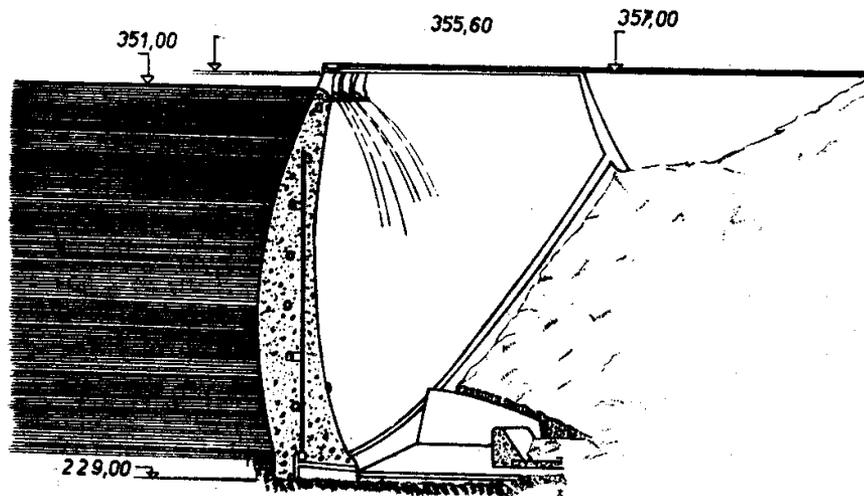


Fig.7<sup>a</sup>: Klenbová přehradní hráz Susqueda a řez stupátkovými oporami vysokými 30 metrů. Opory byly vybudovány jako ochrana proti možnému usmyknutí přehradní hráze.(Rebollo, 1967)

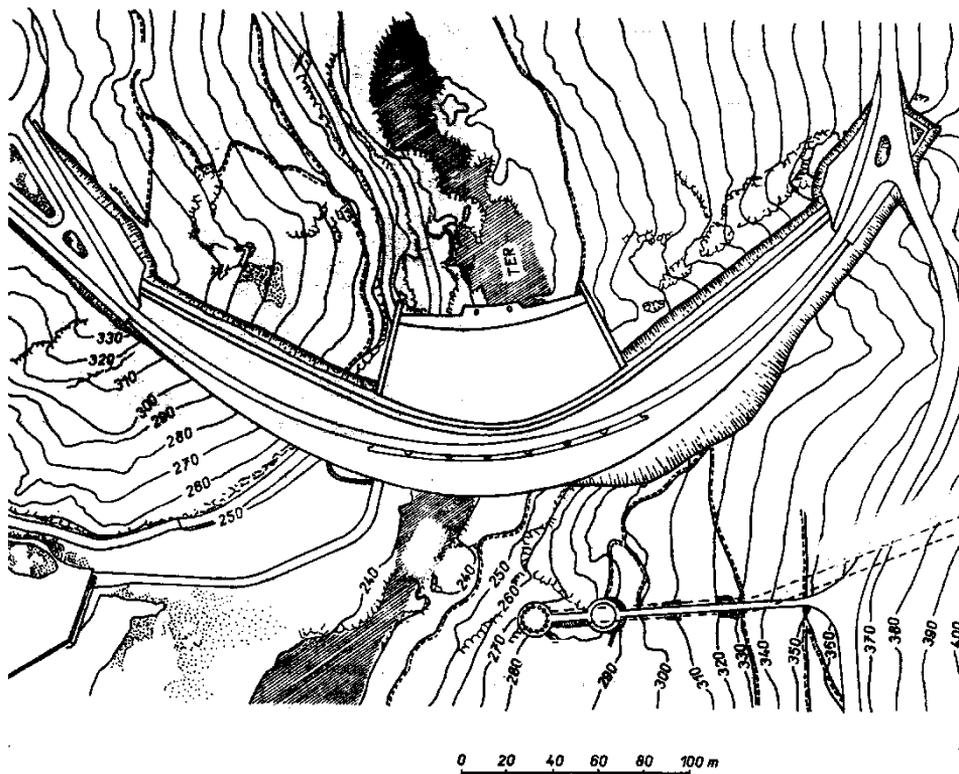


Fig.8: Esquema de la presa de arco Susqueda en el río Ter en los Pirineos, España.

Los problemas constructivos serán muy diferentes en un eje angosto (estrecho) que en un amplio.

En cuanto a la estabilidad de la cortina, siendo iguales todas las otras condiciones, un eje estrecho será siempre más favorable, si bien el efecto de los cimientos es difícil cuantificar en forma confiable. En este caso siempre se trata de lograr el diseño más simple posible que permita una ejecución libre de problemas de circulación y de espacio de trabajo.

Por otra parte, los valles estrechos suelen ser desfavorables porque ofrecen cimientos con taludes irregulares o muy empinados, los que favorecen la aparición de grietas por asentamiento diferencial (vea fig. 9).

Estas circunstancias se reflejarán en las características y distribución de los materiales en la cortina, por lo que habrá que incluir suelos impermeables capaces de comportarse plásticamente bajo grandes deformaciones, así como zonas granulares de transición de mayor espesor. El cuidado que se tenga en las condiciones de compactación en las zonas críticas deberá ser también mayor que el ordinario.

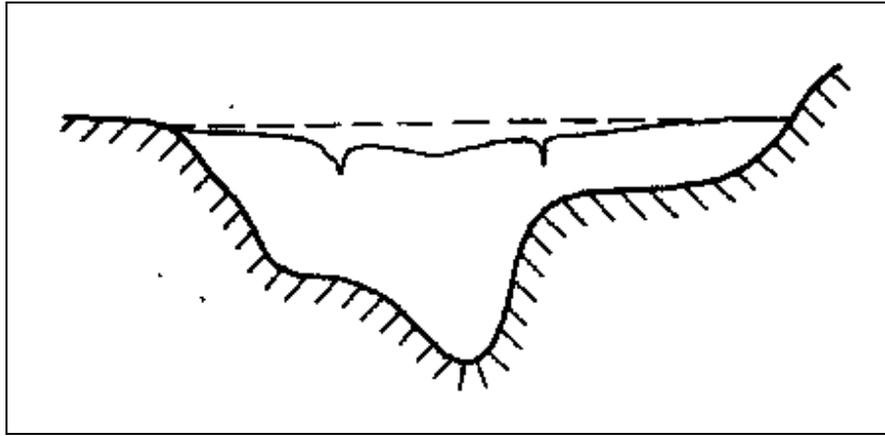
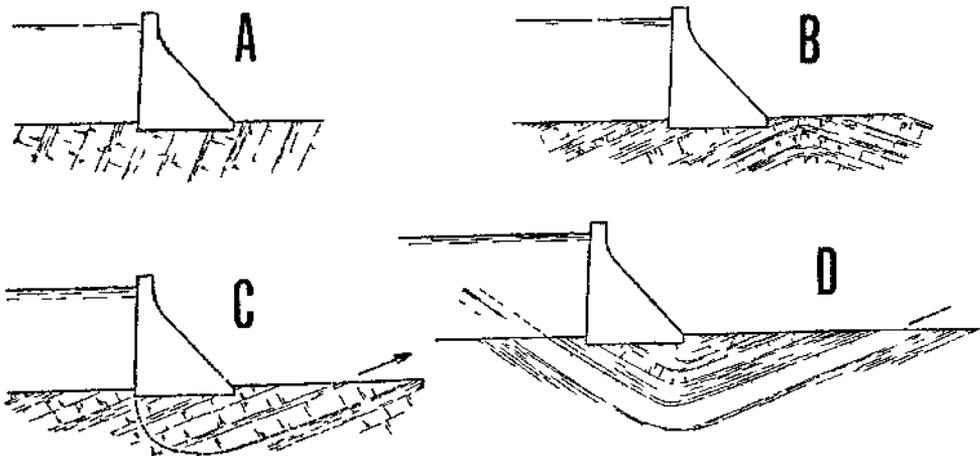


Fig.9: Agrietamiento transversal por el asentamiento diferencial del terraplén en un eje irregular.

Finalmente, en un eje estrecho, las economías que resulten de un análisis de la estabilidad muy exacto (refinado) pueden ser insignificantes. En cambio, si se trata de una cortina de cualquier altura en un valle muy abierto, la minimalización de la sección del dique es de mayor importancia desde el punto de vista económico.

Por otra parte, de una manera indirecta, las características topográficas y geológicas del sitio pueden también afectar el diseño, ya que influyen en el manejo del caudal del río durante el período de construcción. En efecto, si el río es desviado por medio de túneles con el objeto de trabajar simultáneamente en toda la longitud de la cortina, o si se utiliza una sección de cierre, ciertos aspectos del diseño pueden ser diferentes.

Si se hace una sección de cierre, deben tomarse medidas especiales para evitar grietas por asentamientos diferenciales del terraplén. Por ejemplo, se requerirán materiales más plásticos (mayor índice de plasticidad o mayor contenido de agua de riego) en las zonas impermeables, y mayor espesor de filtros y zonas de transición, especialmente aguas arriba, para prevenir una falla catastrófica en caso de agrietamientos.



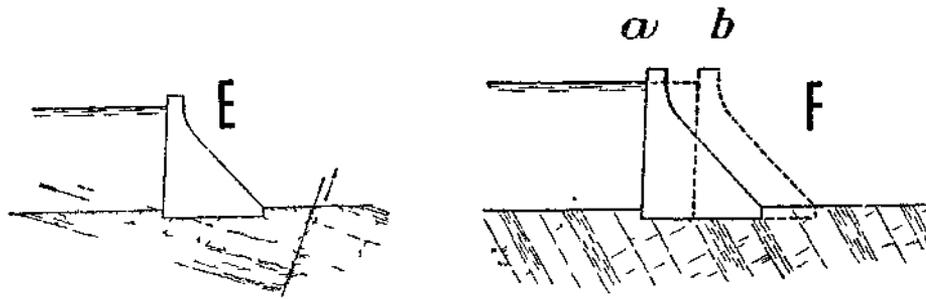


Fig.10: Esquemas clásicos del buzamiento de las capas en el lugar de la presa

- A - Buzamiento favorable de capas para un lugar de presa. Las capas pasan a través del valle y se hunden abruptamente contra el agua.
- B - Cortina adecuadamente colocada en el ala de un anticlinal, ladeado contra el agua.
- C - En caso de una inclinación suave de las capas contra el agua puede producirse un deslizamiento en la dirección del agua a lo largo del plano de una capa.
- D - Colocación inoportuna de la cortina en el ala de un sinclinal ladeado en la dirección del agua.
- E - En caso de un conjunto de capas tectónicamente alterado y ladeado suavemente a favor del agua, el agua puede penetrar las rocas permeables y a lo largo de las grietas.
- F - El efecto de empuje baja, si debajo de la cara expuesta al agua está una capa impermeable (b). La colocación de la cortina (a), donde la cara expuesta al agua se basa sobre rocas permeables, es menos oportuna.

### I.3.3. Factores climatológicos

Los factores climatológicos, aunque no de manera determinable, afectan la selección de la cortina de la presa. Los cambios de temperatura y temperaturas muy bajas afectan la selección del tipo de la cortina a causa de su relación con los esfuerzos de tensión que se generan en el concreto; la descongelación y el deshielo son particularmente importantes en el caso de una presa delgada, tal como una presa de contrafuerte, por el deterioro que pueda ocurrir.

En regiones de mucha precipitación, durante y después de la construcción, las presas de arco son más favorables que otros tipos de presas a causa de su gran capacidad para dar paso con seguridad a avenidas repentinas, sobre todo en el período de construcción. Para la construcción de presas de hormigón el clima puede afectar en menor grado la economía de la zona durante su construcción. Lo mismo no se puede decir construyendo las presas de tierra y enrocamiento, ya que las lluvias fuertes pueden afectar la calidad de los materiales de construcción y provocar la necesidad de proteger terraplenes compactados, y traen como consecuencia muchas más pérdidas de tiempo. También fríos excesivos (temp. bajo cero, mucha nieve) complican las posibilidades de trabajo permanente.

Si el clima es muy lluvioso y el tiempo para la construcción muy reducido, la posibilidad de una cortina de altura media o grande, de sección homogénea, quedaría prácticamente descartado, por las dificultades para el control del contenido de agua de compactación y por la magnitud de las presiones de paso que se desarrollarían en el terraplén durante la construcción. En estas condiciones, una sección mixta con núcleo arcilloso delgado o una de enrocamiento con pantalla impermeable de concreto serían alternativas mejores.

#### I.3.4. Aspectos sísmicos

No todos los países están afectados por el fenómeno de la sismicidad, o por lo menos los sismos no alcanzan un grado tal que pueda influir en el logro de la construcción.

Muchos otros países como Japón, Pakistán, Las Filipinas, Perú, Nicaragua y entre ellos también Cuba, especialmente en la región oriental, sufren por este fenómeno, aunque en escala diferente y hay que calcular en función de éste el tipo de presa.

Cada tipo, de presa tiene diferente comportamiento ante este fenómeno y por esta razón la probable actividad sísmica que puede tener un sitio influencia en mayor o menor grado la selección del tipo de la cortina.

Las presas de arco no son recomendables en zonas de alta sismicidad aunque se construyeron algunas en Japón, California y Centroamérica, y no son conocidas hasta el momento catástrofes provocadas por sismos. Estas estructuras son incapaces para admitir desplomes en su cimentación.

Por otra parte, las presas de contrafuerte y presas de gravedad son más estables bajo la acción de las fuerzas sísmicas por el comportamiento independiente de sus elementos, lo cual permite que ocurran pequeños desplomes sin afectaciones considerables de la estructura. En el sentido longitudinal a su eje, su estabilidad es menor, por lo que en sitios con disturbios sísmicos es necesaria la utilización de elementos rigidizantes.

Por lo que se refiere a las características de sismicidad de la región, debido a que las posibilidades de análisis del comportamiento de una presa de tierra sometida a tensión dinámica son muy limitadas, generalmente el criterio de diseño en una zona sísmica es más conservador; pero las medidas necesarias para reducir los riesgos hasta niveles aceptables, son difíciles de cuantificar.

En general se deberá tener en cuenta, al adoptar dichas medidas especiales, el tamaño y función de la presa, la ubicación del vaso, capacidad del embalse y la rapidez con que puede vaciarse en caso de emergencia.

#### I.3.5 Materiales de construcción

Los materiales de construcción para cortinas de hormigón deben tener la calidad necesaria para tales fines. Los parámetros geotécnicos de éstos están bien determinados según normas y generalmente no llevan problemas de gran envergadura.

Lo que se refiere de presas de tierra o de enrocamiento, cada cortina presenta sus peculiaridades, ya que siempre hay interés en construir con materiales locales o cercanos y cada lugar desde este punto de vista es diferente.

En general, cualquier material o conjunto de materiales no solubles y con propiedades estables puede servir para estos fines.

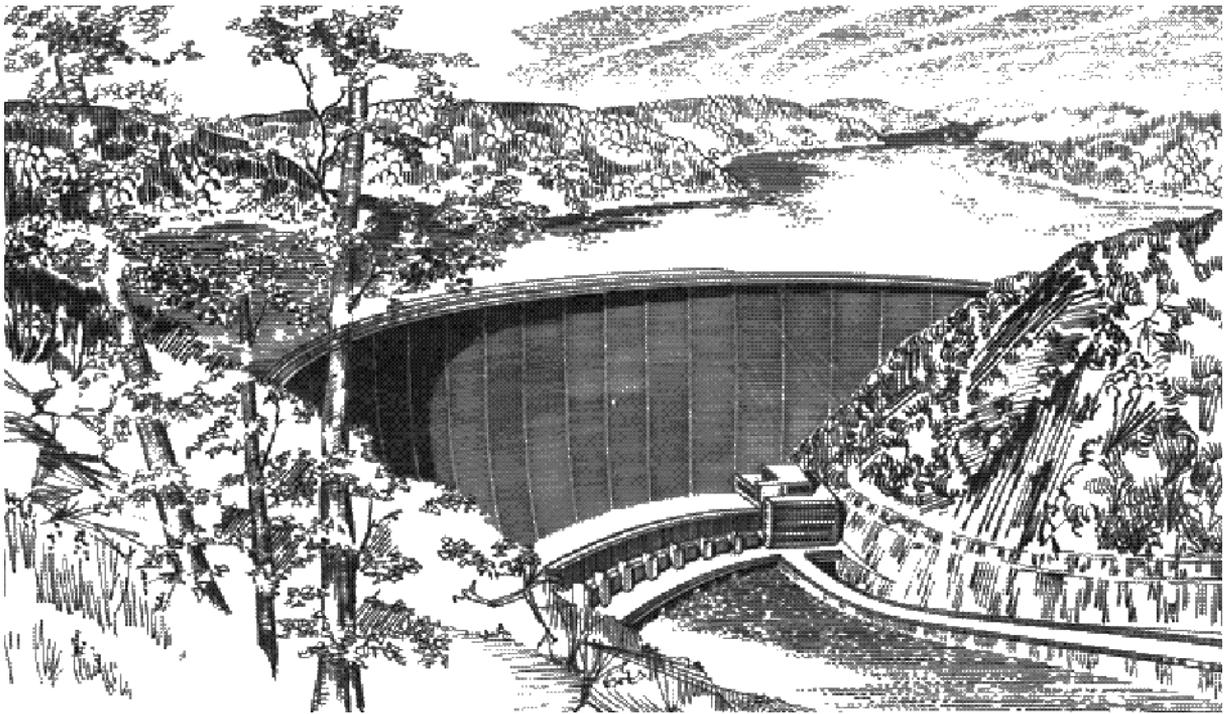
Sus propiedades mecánicas (resistencia, compresibilidad y permeabilidad) gobernarán la geometría de la cortina. Además, la cantidad y la colocación de los materiales disponibles afectarán la distribución y disminuciones de las diferentes rocas del dique.

En general, el diseño más económico de la cortina será aquel en que los materiales de menor costo se eligiesen en los mayores volúmenes, con una distribución que permita satisfacer simultáneamente las condiciones de impermeabilidad y resistencia de la cortina.

### I.3.6. Función de la obra

La función de la obra es un factor determinante de las dimensiones de la cortina y de las obras colaterales y también afecta las condiciones de diseño o tratamiento de la cimentación, de los empotramientos y las del talud aguas arriba, principalmente. En efecto las pérdidas de agua por flujo a través de la cimentación y de los empotramientos que son aceptables en un caso, pueden ser excesivos en otro, dependiendo de la finalidad de la presa (almacenamiento o derivación). Además, algunas veces se construyen cortinas, las cuales tienen como finalidad la protección de poblaciones o de la agricultura o de presas de recarga que sirven para alimentar el manto freático (p. ej. Paso Seco en Cuba).

La función de la obra, al determinar el régimen hidráulico de operación, influye en las medidas que han de adoptarse para el diseño del talud aguas arriba, en lo que respecta a su estabilidad durante y después del vaciado del embalse. Especialmente el régimen hidráulico de operación de las cortinas con estaciones de bombeo e hidroacumuladoras, donde hay gran movimiento del nivel del agua del vaso (diario, semanal etc.) puede provocar deslizamientos y derrumbamientos los que puedan afectar en gran medida el ambiente de la naturaleza o algunos objetos ingenieriles.



Una de las variantes de Presa Dalešice, en el río Jihlava, tipo de hormigón, bóveda, destinada para abastecer Central Atómica Dukovany por el agua y para que sirva como La Hidroacumuladora, utilizando por la noche energía producda por la Central Atómica para rebompear el agua de otra presa aguas abajo y por el día producir energía eléctrica..

## Capítulo II

### Bases metodológicas para el desarrollo de las investigaciones ingeniero-geológicas

#### II.1. Introducción

El presente instructivo sobre las investigaciones ingeniero-geológicas para las obras hidrotécnicas se ha realizado con el fin de establecer el volumen y contenido necesarios para las mismas y para que nos aseguren a su vez la mayor calidad de éstas con un mínimo de gastos y de tiempo para la realización.

Este instructivo nos da la orientación básica en lo que se refiere a las investigaciones ingeniero-geológicas para las diferentes etapas de proyección y los diferentes tipos de diques, pues no corresponde a este libro analizar su entorno: embalse y las estructuras colaterales.

Además nos permite elaborar los volúmenes óptimos y representativos de las investigaciones, para dar una respuesta suficiente y precisa al proyectista y constructor en diferentes condiciones geológicas.

#### II.2. Generalidades

El desarrollo actual de las construcciones de obras hidrotécnicas ha provocado la necesidad de estudiar detalladamente las condiciones ingeniero-geológicas del macizo rocoso donde va asentada la construcción misma. Una de las orientaciones básicas de la investigación ingeniero-geológica es, por esta razón, el estudio del macizo rocoso como fundamento de las obras hidrotécnicas de diferentes tipos. Mientras que para las presas de tierra, presas de enrocamiento (rock-fill) y presas de hormigón gravitacionales la mayor carga representa la propia obra, en la presa de arco la parte esencial de la carga es la provocada por la construcción misma y además por la presión del agua embalsada, transmitida a los bordes del valle, ésto representa la mayor resistencia que el macizo rocoso debe soportar. De ésto resultan también los diferentes volúmenes de las investigaciones ingeniero-geológicas, ya que para una presa de arco la presencia de capas con diferentes compresibilidades, líneas tectónicas y otras heterogeneidades juegan un papel mucho más importante que para las presas del tipo de gravedad y se estudian con mucho más detalle.

El volumen y metodología de las investigaciones ingeniero-geológicas para las obras hidrotécnicas es una cuestión muy compleja que depende de las condiciones geológicas y morfológicas del lugar, tamaño y tipo de la obra, objeto y empleo, importancia y de la etapa de proyección. Algunas veces, desde el punto de vista estatal, existen limitaciones en tiempo o en costos para las investigaciones, hay que respetar ésto, pero estas limitaciones no pueden influir esencialmente en la calidad de las investigaciones, para que no surjan después averías o catástrofes en la obra. La tarea del ingeniero-geólogo es encontrar para el dique, dentro de las limitaciones dadas, el lugar más conveniente, donde será la obra asentada en rocas poco compresibles, poco permeables y con la estabilidad suficiente. Durante las investigaciones hay que tener en cuenta los factores físico-geológicos desfavorables, los que puedan influir la obra negativamente, como son p. ej. deslizamientos y derrumbamientos, carso, zonas sísmicas activas etc.

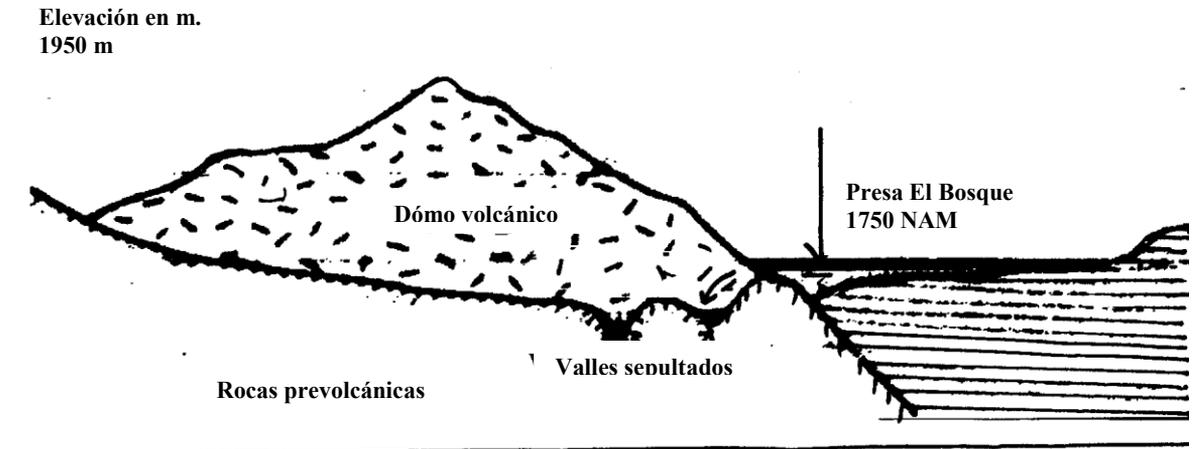


Fig.11: Geología muy complicada del eje "El Bosque" en México. Hay peligro de las infiltraciones del agua através de dómo volcánico a los valles sepultados.

La construcción y explotación de la obra hidrotécnica lleva consigo, generalmente, un cambio en las condiciones ingeniero-geológicas e hidrogeológicas originales. Desde este punto de vista hay que estudiar, por esta razón, la influencia positiva o negativa sobre la naturaleza de la obra hidrotécnica.

La tarea básica de la investigación ingeniero-geológica para una obra hidrotécnica es, pues, ofrecer los datos ingeniero-geológicos básicos que nos den la posibilidad de seleccionar la mejor variante para ubicar la obra y sus objetos (aliviaderos, toma de agua etc.) , ofrecer los datos necesarios para la elaboración del proyecto de una obra racional y segura y elaborar un pronóstico de los cambios de las condiciones naturales originales, causados por la intervención de la construcción misma. Partiendo de estas tareas básicas, la investigación ingeniero-geológica debe satisfacer las siguientes necesidades:

- a) Los resultados de las investigaciones ingeniero-geológicas deben ser suficientes para apreciar objetivamente las condiciones del lugar donde se va a construir la obra hidrotécnica. El proyectista debe obtener datos suficientes para que pueda apreciar las diferentes variantes de ubicación del hidroconjunto con sus objetos de obra, incluyendo la proyección de los métodos de trabajo de la construcción.
- b) La investigación ingeniero-geológica tiene que ofrecer las características físico-mecánicas y de filtración principales del macizo rocoso, que nos den la posibilidad de elaborar un proyecto de la obra óptimo y seguro, en las condiciones naturales existentes. Los resultados de la investigación ingeniero-geológica tienen que ofrecer además la base necesaria para proyectar medidas de seguridad durante la construcción y durante la explotación de la misma.
- c) Los resultados de la investigación tienen que ofrecer los datos que aclaren los posibles cambios en las condiciones ingeniero-geológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas durante y después de la construcción y para apreciar la posibilidad del desarrollo de fenómenos físico-geológicos en el área de la obra, embalse y sus alrededores.

- d) La investigación tiene que asegurar una cantidad suficiente de materiales para la construcción de la obra. Desde este punto de vista hay que utilizar también los materiales de las excavaciones que pudieran ser utilizados racionalmente para la construcción de la obra.

### II.3. Principios básicos de la investigación

El éxito de las investigaciones ingeniero-geológicas de una obra hidrotécnica depende de la utilización correcta de los procedimientos metodológicos durante la organización, realización y evaluación de éstas.

Actualmente se realiza la investigación ingeniero-geológica de las obras hidrotécnicas en varias etapas, lo que está de acuerdo con la necesidad de realizar un proyecto óptimo, racional y seguro. Este procedimiento de trabajo nos da la posibilidad de una transición progresiva, desde la solución de las cuestiones más generales referente a la ubicación del eje de la presa y otros objetos de la obra, elección del tipo de obra, su tamaño, ubicar las obras principales y el NAM (nivel máximo del agua), hasta la solución de cuestiones complejas y concretas relacionadas con el cálculo de los elementos básicos de la construcción misma y del embalse.

El principio de la realización de los trabajos por etapas, suele ser así una condición indispensable para realizar una investigación económica y de buena calidad. La misma importancia la tienen los principios de complejidad de la investigación ingeniero-geológica y la economía en la realización de los trabajos.

#### II.3.1. Principio de las etapas

La solución exitosa de las tareas complejas que surgen durante la proyección y construcción de una obra hidrotécnica depende de una estrecha coordinación y colaboración del ingeniero geólogo, proyectista e inversionista. Por eso es necesario e importante que la investigación ingeniero-geológica y la proyección formen un único procedimiento tecnológico, dividido en las etapas correspondientes de la proyección y de la investigación. Durante estas etapas el proyectista presenta sus tareas a resolver y el ingeniero-geólogo las solucione, e influye positiva y activamente en la proyección de la obra. La solución exitosa de cada etapa de investigaciones y proyección y la formulación de las tareas que hay que resolver, son la base indispensable para pasar a otra etapa más alta.

La magnitud y metodología de las investigaciones deben ser relacionadas con el carácter y fines de la etapa correspondiente.

Todos estos trabajos hay que realizarlos con el objeto de servir como parte de la investigación de la etapa siguiente. La magnitud de las investigaciones en general no debe sobrepasar los fines de la etapa, utilizando en la mayor escala posible los trabajos de investigaciones ingeniero-geológicas realizados anteriormente.

Según la necesidad, las etapas se pueden dividir en subetapas o fases, a su vez, si hay razones de peso, o si se trata de un lugar con condiciones ingeniero-geológicas simples y bastante investigadas anteriormente, es posible unir las etapas y realizar los trabajos en una sola etapa. Esta rectificación no debe afectar la calidad de las investigaciones ingeniero-geológicas.

### II.3.2. Principio de la complejidad

La aplicación del principio de complejidad debe asegurar el óptimo empleo de todos los métodos existentes de la ingeniería geológica para terminar con éxito una tarea definida. En el mismo momento debe ser asegurada la utilización compleja y efectiva de todos los costos destinados a la investigación y el empleo complejo de los resultados obtenidos.

Para que los resultados obtenidos sean representativos hay que asegurar una colaboración muy estrecha de los especialistas, principalmente del ingeniero-geólogo con el hidrogeólogo, geotécnico, geofísico, geoquímico y eventualmente con otros especialistas.

Los resultados de la investigación deben ser aceptables también para otras ramas de la ciencia, por ejemplo como base para el levantamiento geológico o hidrogeológico en las investigaciones de yacimientos etc. El principio de complejidad investigativa hay que mantenerlo en todas las etapas.

### II.3.3. Principio económico en las investigaciones

El cumplimiento consecuente de las etapas de investigación constituye un importante y básico eslabón para alcanzar el aprovechamiento efectivo de los costos y los resultados obtenidos. Para que la investigación sea económica hay que aprovechar todos los datos de archivo, trabajos anteriormente realizados, por ejemplo, con otros fines, y evitar la duplicidad de los mismos. Durante la realización de los trabajos hay que asegurar un control regular, lo que nos da la posibilidad de influir activamente en el desarrollo de los trabajos ingeniero-geológicos para que sean efectivos, racionales y correctos. Durante la investigación hay que utilizar todos los métodos modernos, los que harán más efectiva la investigación y posibilitarán mejor calidad en el trabajo.



La selección del lugar de la Presa es una tarea muy importante. En al foto, visita del eje de la presa Agabama, Escambray, Cuba, realizada comunmente por el proyectista e ingeniero geólogo. Foto Otto Horsky, 1976.

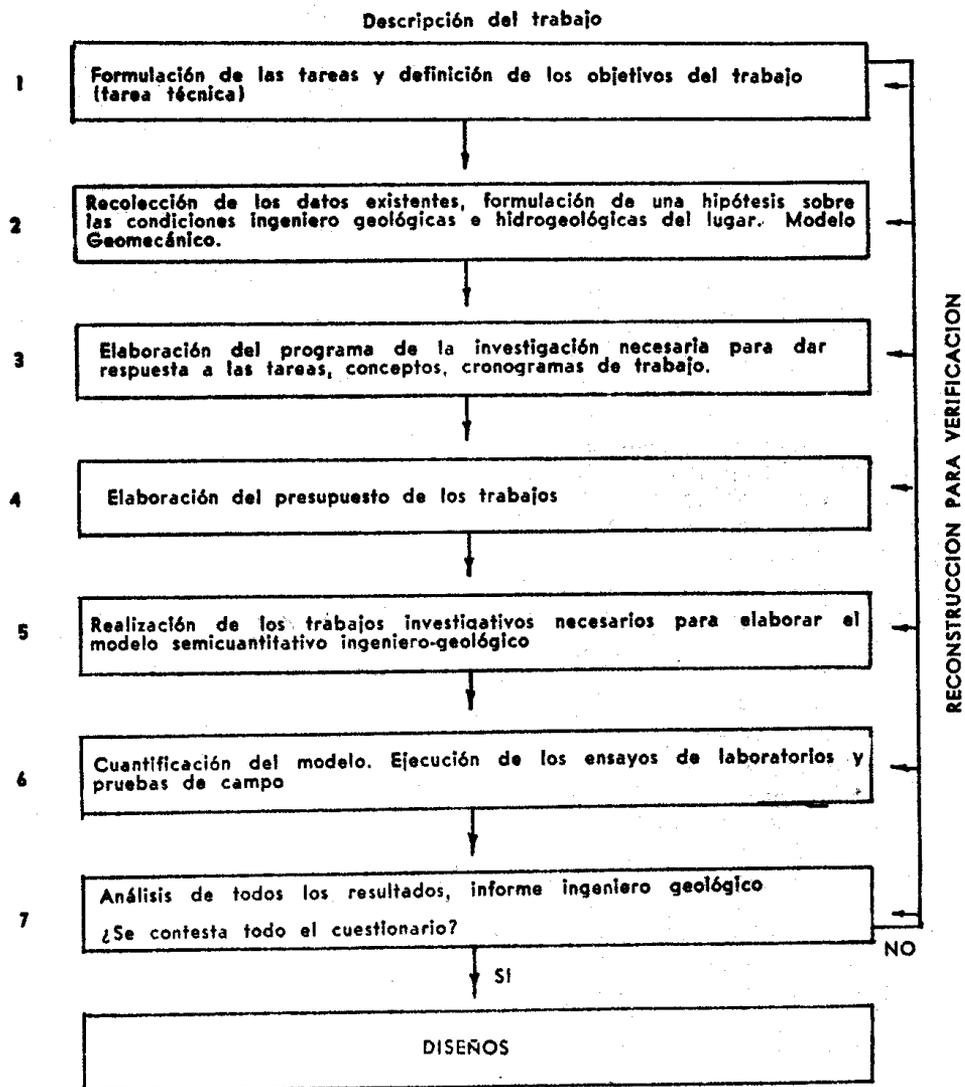
# Capítulo III

## Técnica de exploración ingeniero-geológica

### III.1. Introducción

Las técnicas de las exploraciones ingeniero-geológicas para obras hidrotécnicas aquí recomendadas no podemos tomarlas como normativas o standard. Estas representan solamente el conjunto de métodos que utilizamos durante las investigaciones ingeniero geológicas y pueden servir al ingeniero-geólogo o geotécnico como guía u orientación metódica.

Las tareas de investigaciones ingeniero-geológicas para obras hidrotécnicas es posible representarlas esquemáticamente de la siguiente manera:



Esquema orientativo de las tareas de exploraciones ingeniero geológicas para las presas.

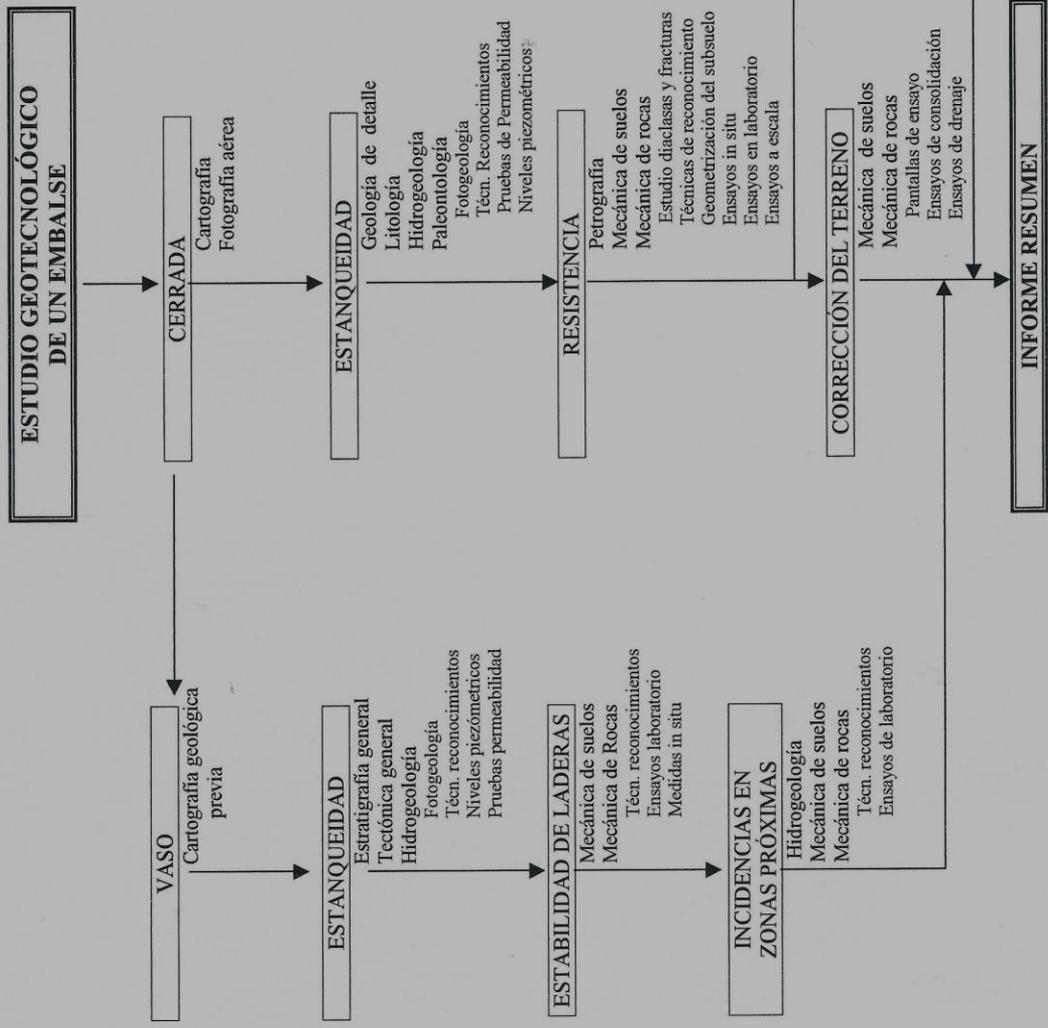


Figura 1.- Reconocimientos para un embalse.  
(A. García Yagüe, 1998)

Esquema de los estudios geotécnicos de un embalse según el profesor emérito, Angel García Yagüe, Departamento de Ingeniería del Terreno, Geología Aplicada, Madrid, España.

Los esquemas presentados tienen solamente validez orientativa y limitada y no se puedan considerar como una norma para la sucesión de las actividades sin cambiar su orden numérico. La función No 7 en el esquema de las tareas de las explotaciones hay que confrontarla después de terminar la investigación con las funciones No 1, 2 y 3, e si es necesario, en otra etapa se resolverán los problemas no aclarados (pendientes).

### III.2. Elección del método de investigación

El conjunto de métodos que utilizamos para la investigación ingeniero-geológica lo representamos en la tabla N<sup>o</sup>.4 . Para elegir el método más conveniente, hay que tener en cuenta tres factores básicos:

#### a) Modo de usar la construcción concebida:

Una diferente necesidad de un volumen determinado de las investigaciones y elección del método de investigación conveniente la tiene una obra aislada (aliviaderos, toma de agua, hidrocentral), otra la tiene una obra lineal (túneles, carreteras) y por fin otra necesidad la tiene una obra de grandes dimensiones superficiales (investigación de un embalse, conjunto hidráulico, préstamos, traslado de zonas urbanas).

#### b) Condiciones naturales del área o lugar de la construcción:

Es decir, condiciones geográficas y carácter morfológico, condiciones geológicas, hidrológicas y climáticas. En base a estos factores mencionados distinguimos tres categorías de complejidad ingeniero-geológica (tabla N<sup>o</sup> 1).

<b>Categoría según la complejidad</b>	<b>Características de la complejidad ingeniero-geológica según geomorfología, hidrogeología y procesos físico geológicos</b>
<b>A Simple</b>	Regiones con la estructura geológica y geomorfológica simple. Conjuntos de rocas sedimentarias y magnéticas homogéneos, sin complicaciones.
<b>B Media</b>	Regiones formados por diferentes rocas sedimentarias o magnéticas o regiones compuestas de rocas sedimentarias y metamórficas, estas últimas en correlación simple. Fenómenos físico-geológicos ( carso, deslizamientos, etc ) poco desarrollados. Aguas subterráneas coinciden con capas litológicas variables , su composición química heterogénea.
<b>C Compleja</b>	Regiones de estructuras geológicas y geomorfológicas complejas, conjuntamente con el complejo de las rocas sedimentarias, magmáticas. Desarrollo de los fenómenos físico-geológicos. Aguas subterráneas tienen relación recíproca y muy complicada.

Tab.N<sup>o</sup> 1: Categoría del lugar según la complejidad ingeniero-geológica.

c) Condiciones externas:

Son las limitaciones del tiempo para las investigaciones, posibilidades de acceso al terreno, limitaciones económicas, posibilidades del organismo que realiza la investigación y categorías de las obras según sus características técnicas (tabla No 2).

DENOMINACION DE LA OBRA DE RETENCION				
Presas de materiales locales				C A T E G O R I A
Presas de hormigón y hormigón armado, partes sumergidas de Est. hidroeléctricas, muros de contención y otras partes de hormigón armado que forman parte del frente de retención.				
TIPOS DE SUELO DE LA BASE				
Rocosos	No rocosos	Rocosos	No rocosos	
CARGA MAXIMA SOBRE LA OBRA (m)				
Más de 100	Más de 50	Más de 100	Más de 25	I
Entre 50 y 100	Entre 25 y 50	Entre 50 y 100	Entre 20 y 25	II
Entre 20 y 50	Entre 15 y 25	Entre 20 y 25	Entre 10 y 20	III
20 y menos	15 y menos	20 y menos	10 y menos	IV

Tabla N° 2: Categoría de las obras según sus características técnicas

La utilización del lugar de construcción y las condiciones externas deben ser consultadas con el inversionista y el proyectista ya que forman la base de elaboración del programa de trabajo.

Sobre los métodos que serán utilizados, la cantidad y profundidad de calas(perforaciones) y de calicatas, cantidad de ensayos de laboratorio y de campo, todo ésto lo decide el ingeniero geológico responsable de la investigación de acuerdo con las necesidades del proyectista e inversionista.

La forma y volúmenes de las investigaciones se seleccionan de tal manera para que se obtengan los conocimientos sobre la estructura geológica y las características geotécnicas y que sirvan como base suficiente para realizar un proyecto seguro, económico y para realizar los trabajos de construcción sin cualquiera dificultad. Los métodos que utilizamos para estos fines los podemos dividir en los siguientes grupos:

a) estudios geológicos, b) estudios geofísicos, c) perforaciones (calas), excavaciones (calicatas, tricheras, corte de ladera) y trabajos subterráneos (galerías), es decir laboreos de excavación, d) pruebas de campo, e) trabajos de laboratorio, f) trabajos especiales (carotaje, mediciones dentro de las calas etc.), g) trabajos topográficos y f) trabajos de gabinete.

Los grupos mencionados no representan todos los trabajos utilizados durante las investigaciones ingeniero-geológicas para las obras hidrotécnicas. El orden de éstos es así generalmente, pero no reflejan el orden de su importancia. Con respeto a las diferentes

posibilidades de estos métodos, es siempre asunto del ingeniero-geólogo que elija las necesidades de investigación ingeniero-geológica por una parte y las posibilidades de estos métodos en segundo lugar, para resolver el problema en el ambiente geológico existente.

### III.3. Incorporación de las investigaciones ingeniero-geológicas a otras investigaciones

Las condiciones geológicas del lugar a veces son tan complejas que para apreciarlas desde el punto de vista de los objetivos ingenieriles es muy importante la incorporación de otras disciplinas ingenieriles semejantes y el nivel profesional del especialista.

Una larga experiencia en las investigaciones ingeniero-geológicas para obras hidrotécnicas, obtenida por la experiencia de desastres, pérdidas de vidas etc., nos indica que algunas calas o calicatas hechas mecánicamente no pueden reemplazar la rica experiencia del ingeniero-geólogo que, al partir de un profundo conocimiento geológico y geomorfológico del lugar, puede formarse una idea de los procesos que tuvieron lugar durante la modelación del relieve y a base de ésta puede elaborar un programa de trabajo útil y racional, de las perforaciones y exploraciones y de otros trabajos de investigación.

La responsabilidad en la obtención de resultados correctos y exactos en las investigaciones ingeniero-geológicas la tiene, sin dudas, el ingeniero geólogo que debe elaborar los resultados de tal forma que sirvan al proyectista, constructor y colaboradores. De lo expuesto resulta que el ingeniero-geólogo debe orientarse no sólo hacia la geología, petrografía, tectónica, geología estructural y regional, sino también hacia la geofísica, mecánica de rocas y suelos, geoquímica, mineralogía de las arcillas, sismología y otras disciplinas.



Catástrofe de la Presa Vajont en Italia en el año 1963 causó muchas pérdidas de vida de la población humana. Era por el mal respeto de las condiciones ingeniero geológicas del lugar? O por la negligencia de los proyectistas y de los constructores? Pavel Blaha, 2008.

## Capítulo IV

### Etapas de las investigaciones ingeniero-geológicas

Como definimos en el capítulo II.3.1, las investigaciones ingeniero-geológicas las realizamos por etapas de proyección.

Las investigaciones ingeniero-geológicas están orientadas a dar respuesta a todas las interrogantes planteadas. En la primera etapa hacemos el análisis ingeniero-geológico, generalmente, a base del estudio de los afloramientos y la morfología (levantamiento ingeniero-geológico), utilizando investigaciones geofísicas en perfiles alternos con algunas calas de apoyo. Después de elegir el eje definitivo (o supuesto), profundizamos la investigación realizando trabajos superficiales (labores de exploración como calas, calicatas, trincheras) con un uso amplio de los métodos geofísicos y nucleares. Los ensayos de laboratorio y las pruebas de campo las hacemos ya en la estructura geológica propuesta como lugar de construcción de la obra hidrotécnica. Los resultados de estas pruebas nos dan no solamente datos técnicos, sino también nos ayudan a precisar la interpretación de la estructura geológica.

Finalmente, durante la construcción de la obra misma, continuamos los trabajos de documentación de los afloramientos y de las excavaciones, utilizándolos para profundizar los conocimientos sobre la estructura geológica del lugar y para hacer posible alertar a tiempo sobre posibles riesgos.

Esta documentación profundiza nuestros conocimientos sobre el lugar de la construcción, además es importante por las siguientes razones:

- a) nos ofrece una documentación de los factores geológicos que afecten toda la estructura ingenieril y nos da la posibilidad de rectificar los fines de la construcción;
- b) los datos obtenidos y la experiencia adquirida ofrecen datos muy valiosos para la proyección de construcciones parecidas en condiciones naturales análogas;
- c) los datos obtenidos sirven como aporte para el fondo de datos ingeniero-geológicos a la geología local y regional.

Para las obras hidrotécnicas es deseable hacer inspecciones ingeniero-geológicas después de terminada la obra. Esto nos da la posibilidad de evitar a tiempo el surgimiento de factores indeseables o riesgosos desde el punto de vista de la explotación de la obra.

Actualmente las investigaciones ingeniero-geológicas las hacemos en tres etapas de investigación:

#### IV.1. Etapa de tarea de proyección

Es la etapa de anteproyecto, sirve para la selección del eje y de los objetos de obra del conjunto hidráulico. El objetivo de la misma es ofrecer los elementos ingeniero-geológicos necesarios para realizar la evaluación técnico-económica más conveniente de las variantes estudiadas por parte de los proyectistas e inversionistas. Conjuntamente se estudian las posibilidades de materiales de construcción en forma preliminar. Algunas veces realizamos una subetapa (fase) anterior, que es la evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas de la cuenca del río desde el punto de vista de las posibilidades para la construcción de la obra hidrotécnica.

#### IV.2. Etapa de proyecto técnico

Es la etapa de proyecto que sirve para obtener todos los materiales necesarios en la selección definitiva del lugar de ubicación del conjunto hidráulico, así como la proyección de todas las obras en los límites del área de la construcción, para el trazado del aliviadero y el embalse.

Conjuntamente se estudian en forma muy detallada los materiales de construcción.

#### IV.3. Etapa de proyecto ejecutivo

Es la etapa de proyecto en la que se realizan los trabajos de investigaciones especiales, determinados por el desarrollo del proyecto y definidos por el proyectista de acuerdo con el ingeniero geólogo.

Desde el punto de vista del proyecto, para aquellas presas que tengan una carga hidráulica de hasta 20 metros de altura cimentados en roca y de hasta 15 metros de altura cimentada en suelos (categoría IV) podemos en condiciones ingeniero-geológicas simples (categoría A) unir todos los trabajos en una sola etapa de investigaciones ingeniero-geológicas. En esencia eso significa regiones con la estructura geológica y geomorfológica simple, donde en conjunto las rocas son homogéneas y sin complicaciones, con ausencia de tectónica disyuntiva, con ausencia, en una escala importante, de fenómenos físicos geológicos (carso, deslizamientos) y que las aguas subterráneas yaczan en capas litológicamente homogéneas y con un quimismo también homogéneo. No existen filtraciones, empantanamientos e inundaciones del área por encima de la altura del embalse ni erosión de las orillas importante desde el punto de vista económico.

De incumplirse los requisitos antes expuestos, la investigación ingeniero-geológica aumenta de categoría y se realiza por etapas.

CATEGORIAS					
	I	II - III		IV	
Complejidad geológica	A - B - C	A	B - C	A	B - C
Etapas de investigación	3	2	3	1	2

Tabla N<sup>o</sup> 3: Recomendación de etapas de investigación según la categoría y complejidad geológica. LYENDA : A - Poca complejidad , B - Mediana complejidad, C – Compleja

Los autores J.Cajus et al. (1982) recomiendan para las diferentes etapas de la investigación la siguiente progresión de estudios y de tareas geotécnicas correspondientes a cada etapa-ver Tab. No 4.

Etapas técnicas Tecnologías diversas (técnoeconómicas) Objetivos	1 Reconocimiento preliminar		2 Anteproyecto		3 Proyecto	4 Constructiva	5 Operativa o auscultación
	a Somero	b avanzado	a Somero	b avanzado			
Tareas (típicas o significativas)	Inventarios de recursos	Prefactibilidad Evaluación del cierre Selección de la variante	Alternativas de aprovechamiento	Factibilidad	Detalles constructivos	Adecuación del proyecto	Supervisión del comportamiento
Tareas (típicas o significativas)	Sensores remotos	Perforaciones, Ensayos en laboratorio	Perforaciones, Ensayos en laboratorio	Ensayos "in situ"	Confección de planos detallados, modelos, ensayos especiales	Confección de planos conformes a la obra	Medición e interpretación de datos
Desarrollo progresivo del conocimiento	Inicial	Somero	Avanzado		Detalle	x) Profundo	
Estudios a realizar	1	a	b		3	4	5
Recopilación de antecedentes. Imágenes satelitarias Control de Perfiles taquimétricos y cartas geológicas	Fotogeología detallada Relevamiento geológico Perforaciones de reconocimiento Geofísica Selección y ubicación de yacimientos y canteras Ensayos de suelos y rocas en laboratorio Ensayos "in situ"	Relevamientos de detalles Perforaciones con ensayos Geofísica Ensayos especiales de rocas en laboratorio Clasificación geotécnica Ensayos "in situ" Ensayos especiales y zonificación de materiales de construcción	Relevamientos de detalles Galería de reconocimiento con ensayos "in situ" Geofísica de detalle Ensayos especiales de laboratorio (terreno de fundación) Perforaciones complementarias (densificación) Estimación de rendimiento de máquinas Terreplén de pruebas Ensayos de voladuras en canteras	Relevamiento geológico - máximo detalle Adecuación del proyecto de acuerdo con excavaciones Ensayo experimental de inyecciones Geofísica de control Optimización y rendimiento de máquinas			Filtraciones Asentamiento y deformaciones Movimientos del terreno

Finalización de excavaciones x)

En esta tabla corresponden:

- Etapas de tarea de proyección = Anteproyecto somero  
- Prefactibilidad
- Etapas de proyecto técnico = Anteproyecto avanzado  
- Factibilidad
- Etapas de proyecto ejecutivo = Proyecto
- Subetapas (fase) de tareas de proyección anterior = Reconocimiento preliminar

Tab 4: Progresión de estudios y de tareas geotécnicas correspondientes a cada etapa.

## Capítulo V

### Tarea técnica y programa de las investigaciones

#### V.1. Tarea técnica

La tarea técnica es el documento de solicitud de las investigaciones, realizado por el proyectista principal de la obra, a base de trabajos o estudios anteriores de la obra hidrotécnica. El contenido de la tarea técnica depende, entre otros factores, de la etapa de proyección, tipo, tamaño de la obra proyectada y de la complejidad de las condiciones geológicas. De todos modos debe orientar al ingeniero-geólogo en la problemática que hay que resolver para fundamentar el proyecto y su contenido es, en general, el siguiente:

- a) denominación completa del objeto a proyectar, mencionando las posibles variantes de la ubicación de los diferentes objetos y de su estructura técnica;
- b) consideración sobre la etapa del proyecto solicitada y la categoría de las obras;
- c) condiciones jurídicas totalmente aclaradas del lugar (permiso de entrada de los equipos de investigación en el área seleccionada por la persona dueña del lugar o la institución a las cuales pertenecen las tierras) ;
- d) parámetros preliminares o definitivos (según la etapa de proyección) de los objetos de obra, como :

- altura de la corona de la presa y cota de la misma;
- longitud de la cortina;
- cota del nivel de aguas máximas y aguas normales;
- volumen del embalse;
- volúmenes y tipos de materiales de construcción.

Además de ofrecer éstos datos importantes, deben acompañar a la tarea técnica los anexos que presente el cliente en la escala que corresponda con una etapa definida y será la base para detallar los anexos a medida que la etapa sea alta. Entre los anexos los más importantes son:

- a) plano de microlocalización del conjunto hidráulico a escala 1 : 50 000;
- b) plano topográfico del embalse a escala 1 : 25 000 - 1 : 10 000, eventualmente 1 : 5 000 con curvas de nivel cada 1-2 metros;
- c) perfiles topográficos por las obras según las diferentes variantes a escala horizontal 1 : 2 000 - 1 : 1 000 y vertical 1 : 1 000 - 1 : 500;
- d) plano topográfico de las obras del conjunto hidráulico a escala 1 : 10 000 con curvas de nivel cada 5 metros (tarea de proyección), a escala 1 : 1 000 con curvas de nivel cada 1-2 metros (proyecto técnico), eventualmente a una escala más detallada (proyecto ejecutivo);
- e) realización de la topografía de las zonas de materiales de construcción a escala 1 : 2 000 cuando los mismos están definidos, con curvas de nivel cada 2-5 metros (tarea de proyección) a escala 1 : 1 000 con curvas de nivel espaciadas cada 1 metro (proyecto técnico).

Los planos que sirvan como base topográfica deben contener los elementos de localización claramente determinados, acotados y con la mayor cantidad de datos posible. Los elementos

de localización deben estar replanteados en el terreno (ambos extremos del trazado, en ambas márgenes del río y los ángulos de inflexión deben estar monumentados y entre ellos estacas a 100 metros de distancia) y reflejados en el plano con distancias y cotas.

## V.2. Confección del programa de investigaciones

La confección del programa de investigaciones ingeniero-geológicas es la base sobre la cual descansa todo el trabajo de investigación, permitiendo establecer el cronograma de ejecución y el costo de los trabajos. El contenido del programa y la magnitud de las investigaciones dependen de muchos factores, entre ellos: tipo y tamaño de la construcción, complejidad de la estructura ingeniero-geológica, factores naturales en general y de la etapa de proyección. Los parámetros principales que influyen en el contenido del programa son: Altura máxima de la presa, longitud de la cortina, longitud de las derivaciones del agua, tamaño y tipo de la hid-rocentral y de la presa misma.

El contenido del programa para la investigación del embalse depende básicamente de los siguientes factores: volumen y área del embalse, presencia de obras de gran importancia bajo la influencia del embalse que hay que proteger (posible empantanamiento, desarrollo de fenómenos físico-geológicos, como desplazamientos, derrumbes), presencia de carso, traslado del sistema de vías lineales (carreteras, ferrocarriles etc.).

En el volumen de las investigaciones también influyen la morfología, grado de conocimiento de la estructura geológica e hidrogeológica actual, número de afloramientos naturales y posibilidades de acceso al lugar.

Al confeccionar el programa de investigaciones hay que tener en cuenta:

- a) La confección del programa de investigaciones en base a la evaluación de todos los trabajos geológicos realizados anteriormente, de forma tal, que sirvan como base para confeccionar un programa racional, económico, bien fundamentado y para eliminar la duplicidad de cualquier trabajo. Por esta razón el geólogo responsable elabora una hipótesis ingeniero-geológica del lugar, presentará un esquema de la zona de interés que refleja la estructura geológica y tectónica y los cortes geológicos por los objetos de la obra importantes. Además ofrece una descripción ingeniero-geológica e hidrogeológica del lugar analizando todos los factores ingeniero-geológicos importantes desde el punto de vista de la construcción. Por esta razón el geólogo responsable está obligado a hacer uso de todos los materiales de archivos que le sean de utilidad y compararlos, a base de marcha rutas, reflejando en el programa sus observaciones. Se harán los recorridos por la zona a investigar con el proyectista, verificando la ubicación de los objetos de obras.
- b) A base del grado de confiabilidad del esquema anteriormente hecho y las tareas que hay que resolver para una determinada etapa de investigación, se calcula el volumen de investigaciones que debe asegurar todos los datos importantes para una etapa de proyección definida, y cumplir los fines técnicos, económicos y científicos de la tarea de la investigación.

Contando con estos elementos se confeccionará el programa que reflejará los trabajos siguientes:

- a) Volumen del levantamiento ingeniero-geológico, sus particularidades , definición de la escala del levantamiento a realizar y la metodología de los trabajos;
- b) Volumen de las investigaciones geofísicas que refleja los métodos a utilizar y por qué;
- c) Volumen y ubicación de los laboreos de excavación (calas,calicatas, trincheras etc.), reflejará la tecnología de estos trabajos y se agregará un esquema de su ubicación detallado;
- d) Modo de documentar los trabajos, que debe ser complejo y exacto para que cumpla los objetivos de la tarea de investigación y sirva en el futuro para otros fines, aunque no correspondan con la obra (interés científico etc.);
- e) Exigencias de las mediciones dentro de las calas, calicatas (galerías) , como por ejemplo: carotaje geofísica, inclinometría, análisis por sonda de TV o utilizando periscopio, pruebas presiométricas, de penetración etc.
- f) Magnitud de la toma de muestras para análisis petrográfico que refleje orientativamente los lugares de la toma;
- g) Criterios de la toma de muestras de suelos, de rocas y de agua para análisis en el laboratorio y su volumen correspondiente;
- h) Especificar que datos geotécnicos de suelos, rocas y del quimismo del agua hay que obtener en base a los ensayos de laboratorio;
- i) Criterios para la ubicación de las pruebas de campo, tipo y dimensión, y los datos geotécnicos exigidos;
- j) Criterios para la ubicación de diferentes pruebas hidrogeológicas, encamisado de calas (perforaciones) y observaciones correspondientes (observaciones sistemáticas, aforos, vertimientos, inyecciones de agua, pruebas con trazadores) definiendo el volumen de éstas;
- k) Los fines, volúmenes y tipo de las mediciones geofísicas detalladas que servirán para realizar una interpretación más exacta de la estructura geológica y facilitarnos la extrapolación de los datos geotécnicos recibidos del laboratorio, del campo y de los datos hidrogeológicos etc.;
- l) Programa de los trabajos especiales;
- m) Todos los datos que sirvan para el cálculo del precio (costos)de los trabajos (categoría de las rocas, del lugar y condiciones específicas del lugar);
- n) Orden de los trabajos y un cronograma de los mismos;
- o) Exigencias de los trabajos topográficos necesarios y en qué escala;
- p) Modo de elaboración de los resultados de las investigaciones realizadas (el informe).

Es necesario plantear que éste resumen no es completo; siempre se pueden agregar algunos trabajos específicos, aunque, en general, refleja las necesidades de las investigaciones ingeniero-geológicas para la obra hidrotécnica. Las particularidades del programa de investigaciones están relacionadas con la etapa de proyección correspondiente.

## Capítulo VI

### Tareas fundamentales a realizar en las investigaciones del Conjunto Hidráulico

Durante las investigaciones ingeniero-geológicas utilizamos diferentes tipos de trabajos, los que tienen sus peculiaridades y significación específicas. El éxito de las investigaciones depende de su complejidad y una correcta elección de los métodos a utilizar.

En las investigaciones para las obras hidrotécnicas empezamos generalmente con los estudios ingeniero -geológicos regionales para seleccionar la mejor variante de ubicación del hidroconjunto. La magnitud de estas investigaciones depende del volumen y calidad de las exploraciones hechas anteriormente. Sólo después de elegir la ubicación del hidroconjunto, procedemos a la investigación ingeniero-geológica detallada.

#### VI. 1. Estudio ingeniero-geológico regional

El objetivo del estudio ingeniero-geológico regional es aclarar la historia geológica del lugar, es decir, aclarar los procesos y fenómenos que tomaron parte en la formación de la situación geológica y geodinámica actual.

El estudio ingeniero-geológico regional corresponde con la etapa del anteproyecto, o sea, con la evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas de la cuenca del río con respeto a las posibilidades de construcción de la obra hidrotécnica (subetapa) y la tarea de proyección.

Especialmente hay que aclarar lo siguiente:

- a. Definir la estratigrafía regional, el desarrollo de los diferentes complejos rocosos y los contactos entre ellos ( fig. 12);
- b. Aclarar las condiciones geomorfológicas del lugar en relación con la historia del desarrollo geológico, estructura geológica, estratigrafía regional y en relación con la actividad del agua subterránea y superficial;
- c. Aprender las condiciones tectónicas en relación con los fines de la construcción;
- d. Evaluar desde el punto de vista regional las condiciones de yacencia del agua subterránea y la apreciación preliminar de su régimen;
- e. Evaluar la presencia de materiales útiles y las posibilidades de utilizarlos en la construcción. Necesidades de proteger los yacimientos importantes desde el punto de vista económico;
- f. Evaluar los fenómenos geodinámicos activos y potenciales, como son: la erosión, abrasión, sifonamiento, sedimentación, desplazamiento, deslizamientos, derrumbamientos, neotectónica, caídas actuales de bloques, actividad volcánica, sísmica;
- g. Evaluar la posible influencia negativa o positiva de los fenómenos geodinámicos observados durante la construcción y después de terminada (durante la explotación de la obra);
- h. Evaluar si la intervención humana en la naturaleza altera los procesos geodinámicos actuales, las tensiones naturales del macizo rocoso y el régimen del agua subterránea, de tal manera que sean necesarios algunos trabajos de protección;

- i. Evaluar la influencia de la construcción y exploración de la obra en el medio ambiente.

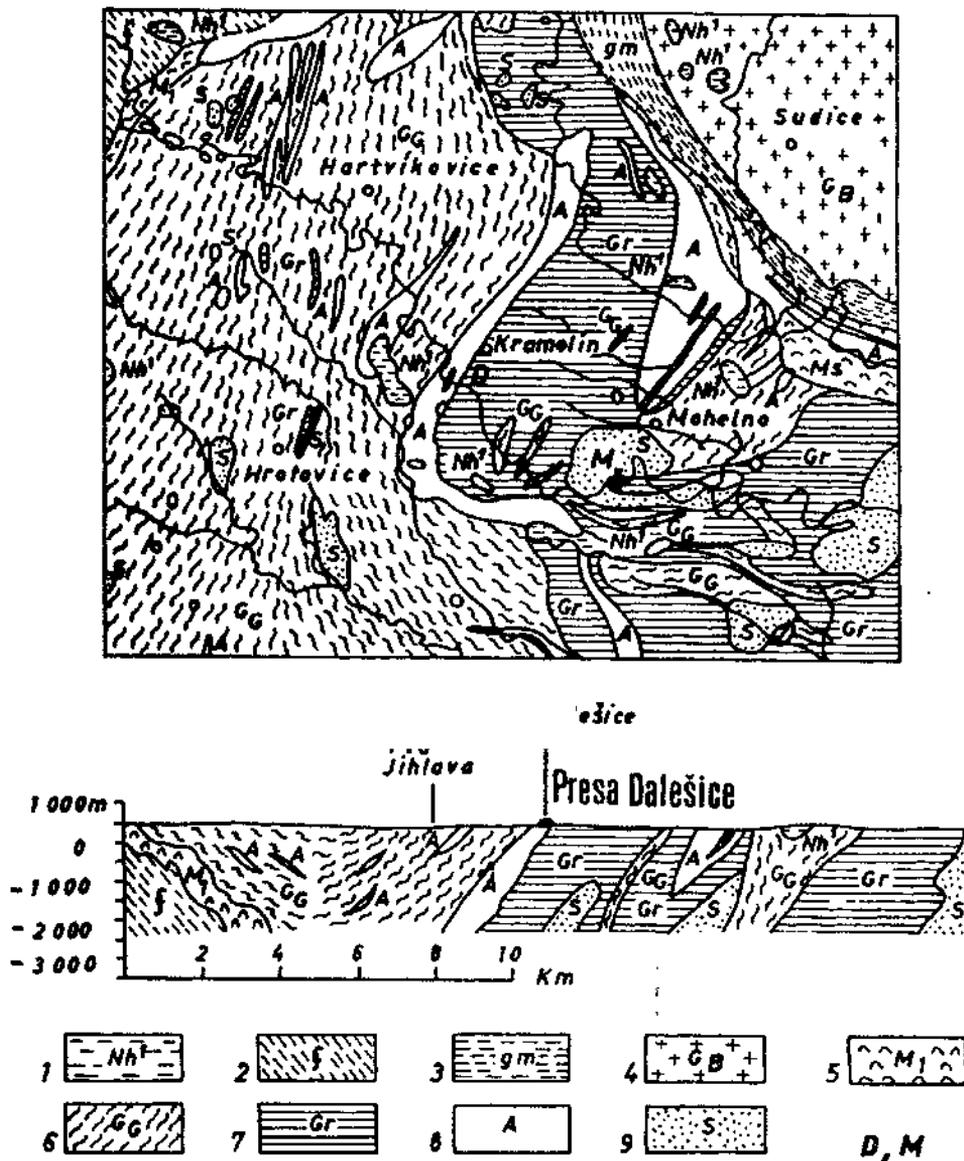


Fig.12: Ejemplo del mapa geológico regional hecha a base del estudio ingeniero-geológico regional con fines de elegir el eje para la presa DALEŠICE en Checoslovaquia. A base de este estudio elegimos como el lugar más conveniente el en anfibolitas A. (Según Horsky, 1974).

La cantidad de recursos financieros y las limitaciones de tiempo para realizar el estudio ingeniero-geológico regional están en dependencia directa de la calidad del fundamento, las informaciones iniciales en relación con la complejidad de la estructura geológica y de la construcción proyectada.

Para cumplir el estudio geológico regional se harán los siguientes trabajos:

- a) Reconocer y evaluar todos los datos de los archivos, como son: planos geológicos, perfiles, documentaciones de los laboreos de excavación, informes anteriores etc.;
- b) Realizar el estudio (interpretación) de las fotos aéreas o terrestres;
- c) Realizar itinerarios en las áreas levantadas, hacer una reevaluación más precisa de los materiales en los lugares de mayor interés (lugar de posible ubicación del hidroconjunto) ;
- d) Realizar el levantamiento ingeniero-geológico (con perfiles geológicos) en los lugares donde anteriormente no se realizó el levantamiento o donde la calidad que tuvo no es aceptable para nuestros fines.

Este levantamiento lo hacemos en una escala que corresponda con los planos ingeniero-geológicos esquemáticos o fundamentales (vea tabla No5).

El estudio regional ingeniero-geológico planteará una serie de cuestiones que deberán ser resueltas en la etapa del proyecto (proyecto técnico o ejecutivo), es decir en la etapa de la investigación detallada.

## VI.2. Estudio ingeniero-geológico detallado

Después de aprobada la tarea del proyecto, que fue hecha en base al estudio ingeniero-geológico regional, procedemos a realizar la investigación ingeniero-geológica detallada. Esta etapa de las investigaciones corresponde con las etapas del proyecto técnico (eventualmente hasta ejecutivo). Las tareas básicas son la investigación del lugar del hidroconjunto ya definido, del embalse, cimentaciones para la hidrocentral, obra de toma, túneles de derivación y exploraciones de materiales de construcción.

Los fines de esta etapa de investigación son parecidos a los definidos antes, sólo el grado de detalle es más profundo y la orientación de las investigaciones a un lugar definido más clara. Una atención principal hay que dedicarla a todas las zonas defectuosas de la construcción y a zonas definidas por estudio regional. La tarea básica de ésta etapa es realizar un modelo estructural que refleje las condiciones naturales y geológicas del lugar, expresando todos los elementos básicos, importantes desde el punto de vista técnico. El camino más seguro para obtener este modelo es evaluar todos los datos geológicos factibles obtenidos durante la investigación (afloramientos, calas, calicatas, galerías, etc.). Muy valiosos son, además, los datos indirectos, obtenidos a base del uso de los métodos geofísicos (eléctricos, sísmicos y otros), ya que éstos nos ayudan a interpolar los datos directos a todo el macizo rocoso. El modelo estructural ingeniero-geológico de las condiciones naturales es muy importante, ya que nos da la posibilidad mucho mejor plantear la toma de muestras para ensayos de laboratorio y ubicar las pruebas de campo y, en general, coordinar mejor todos los trabajos de la investigación.

Para cumplir los objetivos de la investigación ingeniero-geológica detallada para las obras hidrotécnicas, hay que realizar generalmente los siguientes trabajos:

A - Levantamiento ingeniero-geológico detallado de las áreas de interés, es decir, para el embalse a escala 1 : 10 000 -1:5 000, para el eje de la presa y objetos más importantes a escala 1 : 1 000 (1 : 500). El plano ingeniero-geológico es la unificación de los datos siguientes:

a,1 - Datos y características geomorfológicas para recibir una idea general del relieve del

área de interés, de la red fluvial, rasgos de su orografía, cotas absolutas y relativas, inclinación del terreno y densidad de su desmembramiento, delimitación de zonas con distintos tipos de relieve, propagación y relaciones mutuas del macro- y microrelieve, estudio del desarrollo del microrelieve (crecimiento y desarrollo de barrancos, deslizamientos, forma del valle, de las terrazas etc.).

Para hacer el análisis geomorfológico, la característica del relieve, definir las formas del relieve y sus relaciones mutuas, podemos utilizar las fotos aéreas.

a,2 - Características petrográficas y geotécnicas de los diferentes tipos rocosos y suelos, distribución y contacto entre los diferentes tipos, delimitación de las zonas de meteorización, descomposición de las rocas, de las zonas mineralizadas, inclusive de los datos sobre el estado de las tensiones naturales del macizo, de su permeabilidad y anisotropía.

a,3 - Características geológicas superficiales, es decir reflejar los diferentes tipos de sedimentos cuaternarios, como son: deluvios, aluvios, eluvios y su desarrollo, áreas deslizadas, áreas cubiertas por bloques rocosos etc. Además el mapa define las áreas o lugares donde las rocas precuaternarias afloran.

a,4 - Características de las estructuras geológicas, análisis estructural-tectónico del macizo rocoso, es decir descripción y carácter de los elementos estructural-tectónicos delimitando los diferentes tipos como son: grietas, estratificaciones, líneas tectónicas y zonas debilitadas (fallas), estructuras plegadas, zonas de desplazamiento etc.

a.5 - Características de las aguas subterráneas, como son definir la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas y el movimiento de su nivel, dirección del flujo, posición de los manantiales y delimitación de las áreas donde hay infiltraciones, apreciación de las cualidades del agua, o sea su quimismo, dureza, ph, temperatura etc.

El plano ingeniero-geológico representa el conjunto de los datos mencionados, expresados en una o más hojas, según la complejidad de las condiciones geológicas y según la escala del plano.

B - Para construir el modelo estructural de una zona definida, utilizamos la proyección estereoscópica. Si se refiere a un lugar de mayor complejidad geológica o donde por el carácter de la construcción proyectada se necesita una gran exactitud en la delimitación de los elementos tectónicos, debemos construir un modelo geotécnico espacial, por ejemplo se utilizarán para su construcción planchas de vidrio plástico ( para el modelo de la presa de arco es muy ventajoso ). Este modelo es muy útil, ya que nos ayuda durante la investigación a formarnos una idea sobre la estructura geológica y coordinar los trabajos de la exploración en los lugares donde todavía quedan dudas.

El modelo estructural nos da la posibilidad de definir exactamente las zonas defectuosas.

C - Para apreciar más objetivamente y más exactamente la estructura geológica, utilizamos con ventaja los métodos geofísicos y entre ellos, con mayor frecuencia, los métodos de la resistividad eléctrica y los métodos sísmicos, además el carotaje, menos usualmente utilizamos los métodos geomagnéticos, radiométricos, térmicos y gravimétricos. Además de los datos sobre la estructura geológica del macizo y sobre las condiciones hidrogeológicas, éstos métodos pueden ofrecernos algunos datos sobre el estado físico-mecánico del macizo rocoso.

D - Una parte muy importante de la investigación ingeniero-geológica son las perforaciones y otros laboreos de exploración (calicatas, trincheras, galerías) que nos dan la posibilidad de

una descripción directa de la recuperación y de las paredes de los laboreos de exploración. Por esta razón son las más importantes para obtener datos de absoluta necesidad para estudiar las condiciones ingeniero-geológicas del lugar. Nos posibilitan también hacer una clasificación detallada de las rocas y suelos, apreciar las zonas defectuosas (no homogéneas, sus continuidades etc.) y apreciar las características físico-mecánicas de las mismas, utilizando la terminología geotécnica.

Los laboreos de exploración directos nos dan la posibilidad de tomar muestras para el laboratorio y realizar pruebas de campo "in situ" en el subsuelo. Además podemos utilizarlos para la auscultación con métodos indirectos, como son los métodos geofísicos, carotaje, sonda de TV, periscopio, fotodocumentación de las paredes etc.

E - Finalmente realizamos la evaluación de todos los trabajos hechos (trabajos de gabinete), confeccionando los perfiles geológicos, el plano ingeniero geológico y, según la necesidad, el modelo geológico estructural tridimensional.

Este método nos facilita el análisis continuo de todos los datos obtenidos, facilita realizar la investigación en un orden lógico, completo y al nivel técnico necesario.

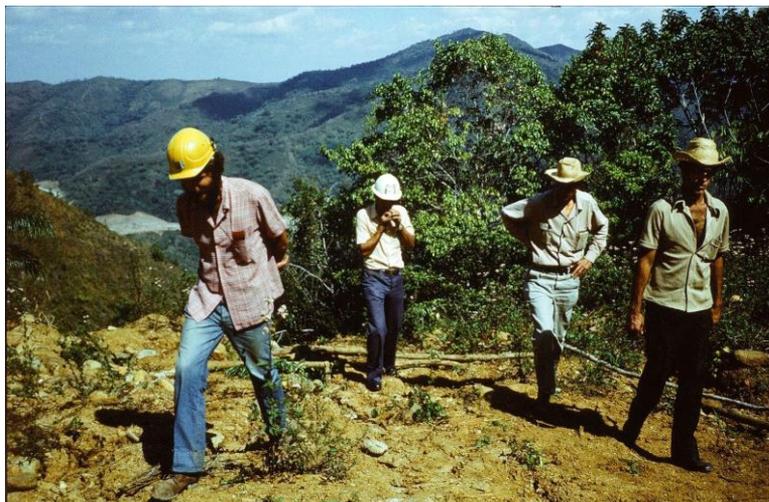
El modelo estructural nos da la posibilidad de interpretar las disduntinuidades, líneas tectónicas, fallas etc. con la exactitud necesaria.

El plano ingeniero-geológico, en tal sentido, representa uno de los productos finales de los trabajos de investigación, confeccionando además la memoria descriptiva (informe sobre las investigaciones ingeniero-geológicas).

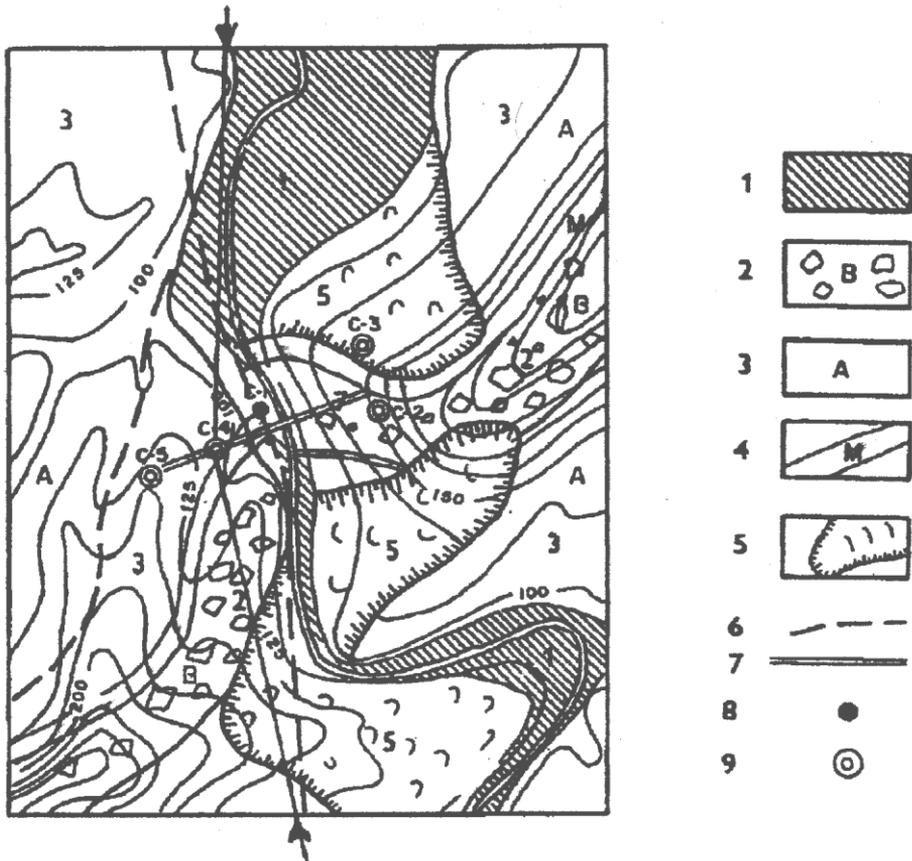
### VI.3 Itinerarios (marcharutas)

Los itinerarios (reconocimiento ingeniero-geológico) los hacemos con el fin de recibir una idea más exacta de las condiciones ingeniero-geológicas del lugar antes de confeccionar el programa de investigaciones.

El reconocimiento lo hacemos en la primera etapa de las investigaciones y conjuntamente con el proyectista principal o responsable; eventualmente puede estar presente otro especialista además del ingeniero geólogo, si es necesario (hidrogeólogo, petrografo, geofísico, topógrafo etc.). Durante los itinerarios hay que observar no solamente el lugar de los objetos de obra y embalse, sino también realizar la búsqueda orientativa de los materiales de construcción. (Fig. 13).



Marcha ruta por el área de la Hidroacumuladora en el Escambray, Cuba, durante de las Investigaciones. Foto Otto Horsky, 1984.



LINEA DEL PERFIL IDEALIZADO

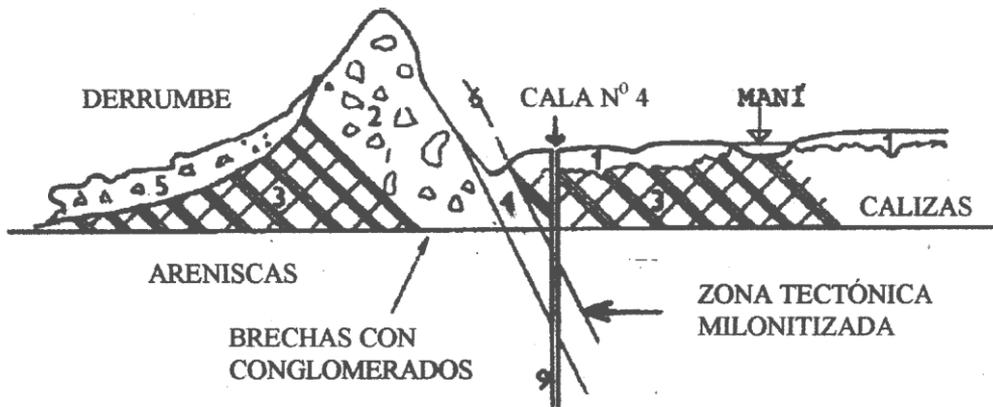


Fig.13: Esquema geológico orientativo de la zona del cierre del CH San Miguel en Cuba (1 : 10 000) hecho a base de marcharuta orientativa (según Horsky, 1980).

Leyenda: 1 - Sedimentos del río; 2 - Conglomerados y brechas; 3 - Areniscas; 4 - Zona tectónica; 5 - Derrumbe fósil; 6 - Línea tectónica supuesta; 7- Eje de la presa; 8 - Cala comenzada; 9 - Calas programadas.

## VI.4 Levantamiento ingeniero-geológico

El plano ingeniero-geológico sirve como base importante para la proyección de las obras hidrotécnicas, ya que nos ofrece una idea sobre la estructura geológica, sobre las condiciones hidrogeológicas y geomorfológicas y sobre los procesos físico-geológicos que se estén desarrollando en el área de los trabajos. El plano ingeniero-geológico en tal sentido es una base compleja, que refleja todos los factores importantes desde el punto de vista de la proyección y construcción de la obra hidrotécnica.

El levantamiento ingeniero-geológico debe apoyarse sobre otros trabajos de exploración, para que el plano sirva como apreciación compleja de las condiciones ingeniero-geológicas desde el punto de vista de la construcción y para que nos ofrezca una base sólida para elaborar el programa de investigaciones para todos los objetos definidos de obra.

La selección de la escala del plano depende de la complejidad de la estructura geológica y de las condiciones geomorfológicas, posteriormente de la significación (importancia) de la obra proyectada y de sus características técnicas (categorías I - IV) y, finalmente, depende de la etapa de proyección.

En dependencia de la escala del plano ingeniero-geológico se destacan tres tipos de planos:

- Esquemáticos      1 : 200 000 hasta 1 : 100 000
- Fundamentales    1 : 50 000 hasta 1 : 25 000
- Detallados        1 : 10 000 hasta 1 : 1 000

Los planos esquemáticos los expresamos, en general, en una hoja. Sólo si se refiere a las condiciones geológicas complejas, confeccionamos es plano de las condiciones ingeniero-geológicas y el plano de regiones ingeniero-geológicas aparte. Estas escalas las utilizamos para poder hacer una apreciación de la cuenca desde el punto de vista del estudio de las posibilidades de la construcción de presas general, ya que de otra forma el plano abarca complejos muy extensos.

Los planos fundamentales y los detallados los confeccionamos como un conjunto de varias hojas. Las hojas principales son el plano de las condiciones ingeniero-geológicas y el plano de regiones ingeniero-geológicas. Además de eso confeccionamos en general planos auxiliares que nos expresan algunos factores muy importantes desde el punto de vista técnico, como por ej. el plano de hidroisohipsas, de permeabilidad, de deslizamientos, de posibles abrasiones de orillas, et. A este grupo pertenece también el plano de la documentación donde reflejamos la ubicación de todos los afloramientos y todos los trabajos de la exploración (perforaciones, calicatas, puntos de ensayos de laboratorio y de pruebas de campo).

La metodología para reflejar las condiciones geológicas e hidrológicas en una hoja, para estas escalas es conveniente solo en condiciones simples. Si se refiere a condiciones complejas, es mejor reflejar las condiciones hidrogeológicas aparte.

Los planos fundamentales se utilizan, generalmente, para apreciar las condiciones ingeniero-geológicas para cierras y embalses ya definidos y no sobrepasar en general algunas docenas de km<sup>2</sup> ( o para apreciar las condiciones ingeniero-geológicas para obras lineales, como son canales de derivación, traslado de comunicaciones, carreteras, etc.

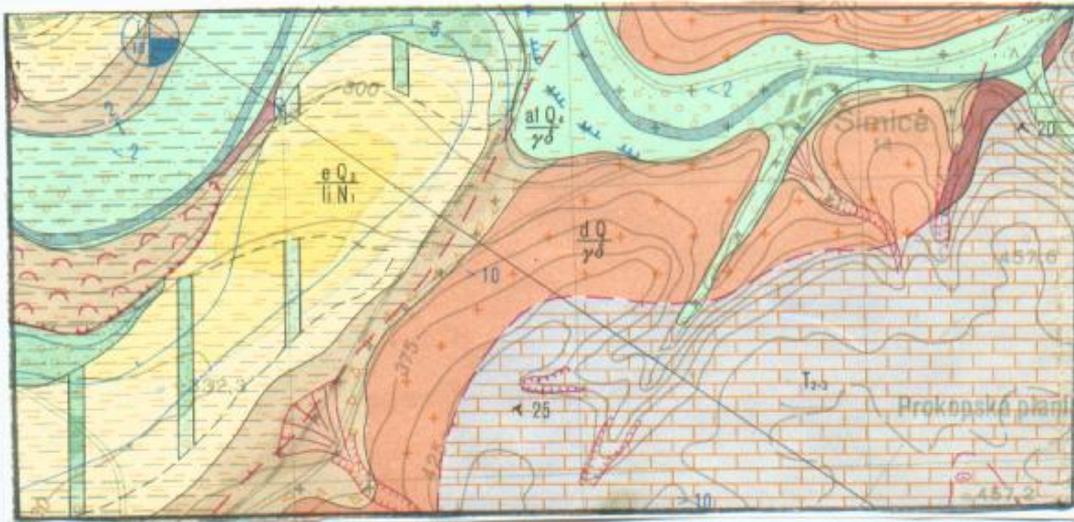
Los planes detallados los hacemos para un lugar donde esté definido el hidroconjunto y algunas veces, en condiciones geológicas complejas, para todo el embalse o para algunos

detalles del mismo (lugares de posibles infiltraciones al valle vecino, etc.). este levantamiento se apoya, a una escala mayor, sobre los traslados de exploración directa (laboreos de exploración).

En tabla N<sup>o</sup> 5 expresamos un resumen de las unidades taxonómicas expresadas en el plano ingeniero-geológico según la escala elegida.

Denominación	Escala	Unidades taxonómicas expresadas en el mapa Ingeniero-Geológico				Ejemplos
		Rocas	Condiciones hidrogeológicas	Fenómenos fisicogeológicos	Regionalización Ingeniero-geológica	
Esquemáticos	1 : 200 000 – 1 : 100 000	Formación geológica, complejos facial genéticos, eventualmente combinaciones de varios tipos petrográficos de las rocas de la misma génesis	Expresamos por un número por un símbolo la profundidad del nivel freático del primer horizonte más cerca de las superficies.	El área del fenómeno geodinámico se expres por un símbolo	Regiones Ingeniero-geológicas según la homogeneidad de la estructura geológica y de la evolución geotectónica, subregiones y zonas.	Por ej. región de rocas volcánicas del neógeno
Fundamentales	1 : 50 000 – 1 : 25 000	Combinaciones determinadas de varios tipos petrográficos de la roca de misma génesis, eventualmente tipos petrográficos de las rocas	Limitamos los horizontes freáticos más cercanos a la superficie marcando las profundidades : < 2 ; 2 – 5; 5 – 10; 10 – X m – 5	Limitamos las áreas de distribución de los diferentes tipos de fenómenos geodinámicos contemporáneos	Subregiones ingeniero-geológicas según la homogeneidad de las unidades geomorfológicas de alto orden ( según macrorrelieve ), zonas y subzonas	Por ej. subregión de llanuras premontañas
Detalladas	1 : 10 000 – 1 : 1 000	Tipos petrográficos, eventualmente tipos ingeniero-geológicos de rocas, es decir unidades de rocas que distinguimos en las normas y directivas	Anotamos hidroisohipsas, hidroisopiezas o hidroisobatas del primer horizonte freático en intervalos de 1 m (estado máximo del nivel freático)	Representamos los contornos de cada fenómeno geodinámico contemporáneo y según la posibilidad su intensidad	Zonas según la homogeneidad de la composición geológica de los suelos para la cimentación, subzonas según las condiciones hidrogeológicas	Por ej. zona de sedimentos deluviales

Tab.N<sup>o</sup> 5: Unidades taxonómicas expresadas en el mapa ingeniero-geológico.



GRUPO	FORMACION	SISTEMA	COMPLEJO GENETICO	INDICE ESTRATIGRAFICO	DETERMINACION DE LA ROCA						ESPESOR	CARACTERISTICA DE LAS ROCAS Y LOS SUELOS
					EN 1 COMPLEJ- ESPESOR EN M			EN 2 COMPLEJ- PROF. DE SU- PERF. EN M.				
					<2	2-5	5-10	2	5-10	>10		
SUPERFICIALES	CUATERNARIO	HOLOCENO	FLUVIAL	al Q <sub>4</sub>	[Pattern]						2-4	ARCILLA MEZCLADA CON ARENA COLOR GRISACEO.
				d Q <sub>3</sub>	[Pattern]						1-2	GRAVAS BIEN GRADUADAS.
				e Q <sub>3</sub>	[Pattern]						6-8	GRAVAS MEZCLADAS CON ARENA EN ALTAS TERRAZAS METEORIZADAS Y CON ARCILLA.
		PLEISTOCENO	EDICO	e Q <sub>3</sub>	[Pattern]						10-12	LODOS POROSOS DE COLOR AMARILLENTO GRIS.
				d Q <sub>2-4</sub>	[Pattern]						2-4	SUELOS ARCILLOSOS DEPOSITO DE LADERAS DE COLOR MARRON
			DELUVIAL	d Q <sub>2-4</sub>	[Pattern]						3-5	DETRITOS SUELOS MEZCLADOS CON PIEDRAS
ROCAS	TERTIARIO	NEOGENO	LACUSTRE	li N <sub>1</sub>	[Pattern]						50	ARCILLA DE COLOR GRIS CON INTERCALACIONES DE ARCILLA.
				T <sub>2-3</sub>	[Pattern]						400	CALIZAS Y CALIZAS DOLOMITICAS DE COLOR GRIS.
				δδ	[Pattern]							

Fig.14: Ejemplo del mapa ingeniero-geológico en escala 1 : 25.000.

A - MAPA DE REGIONALIZACION INGENIERO GEOLOGICA

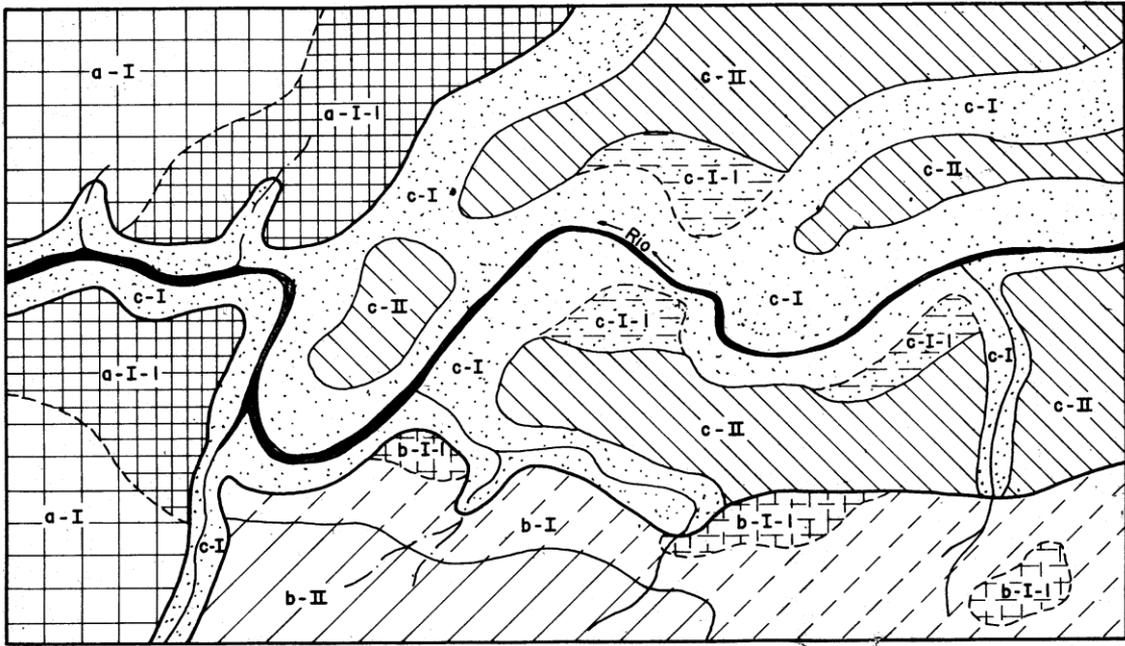


Fig.15: Ejemplo del mapa de regionalización ingeniero-geológica.

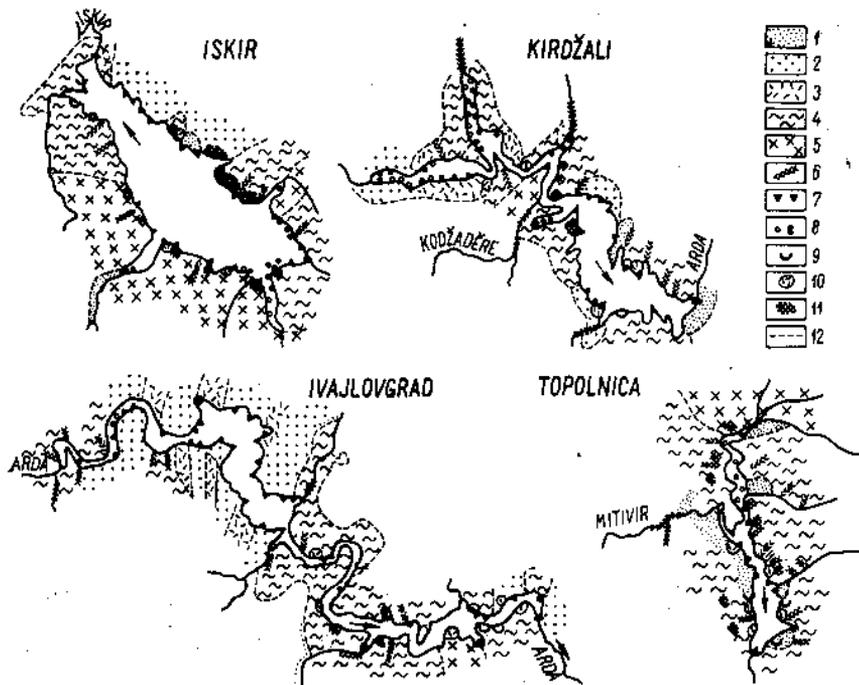


Fig.16: Ejemplo de la regionalización de las orillas de embalses en Bulgaria. Se han tomado en cuenta criterios de lavabilidad de rocas, de abrasión, erosión, acumulación de los sedimentos, deslizamientos, derrumbamientos, y de alteración (Horsky-Simeonova-Spanilá,1984)

B- TABLA DE REGIONALIZACION INGENIERO GEOLOGICA

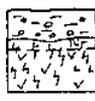
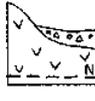
Subregión	Zona	Subzona	Corte Esquemático	Características Geológicas y Petrográficas	Características Hidrogeológicas	Procesos Geodinámicos
a - Calcárea	I - Cárstica	a-I		Caliza masiva, dura algo plegada y carbonificada superficialmente ondulada color blanco amarillento.	Agua de grietas no agresiva. El nivel freático no fué detectado.	Procesos cársticos poco desarrollados, grietas, acanaladuras y dientes de perro.
				Caliza masiva alterada a muy alterada carbonificada, cubierta por eluvios hasta 2,0 m. de potencia arcilla roja con gravas y arena.		Procesos cársticos muy desarrollados cavernas hasta de 6,0 m. de longitud, abundantes grietas y oquedades.
b - Volcánica	I - Eluvio Deluviales	b-I		Afloramientos de andesitas algo alteradas color gris carmelitoso.	Agua de grietas no agresivas. Nivel freático a 4 m. de prof.	Lotificación en las zonas superficiales.
				Andesitas muy alteradas color carmelita, cubierta por eluvios, arcilla arenosa con gravas.	Nivel freático a 2,0 m. de profundidad, agua no agresiva.	Erosión leve por las aguas superficiales, zonas de empañamiento.
				Andesita poco alterada color gris verdoso, en zonas alomadas, deluvios en las laderas, bloques, gravas y arenas.	Nivel freático a 10,0 m. de profundidad, agua no agresiva.	Erosión intensa por las aguas superficiales y derrumbes en algunas laderas.
c - Sedimentos Cuaternario	I - Depósitos de Terraza	c-I		Gravas arenosas de composición variable sobre arcillas arenosas.	Nivel freático de 1,0 a 2,0 m. de prof. agua no agresiva.	Erosión intensa durante las crecidas.
				Arena arcillosa de color carmelita, sobre arena gravosa.	Nivel freático de 2,0 a 4,0 m. de prof. aguas no agresivas.	
				Arcilla arenosa sobre grava arenosa.	Nivel freático a 5,0 m. de profundidad aguas no agresivas.	Zonas de empañamiento.

Fig. 17: Ejemplo del esquema de la regionalización ingeniero-geológica

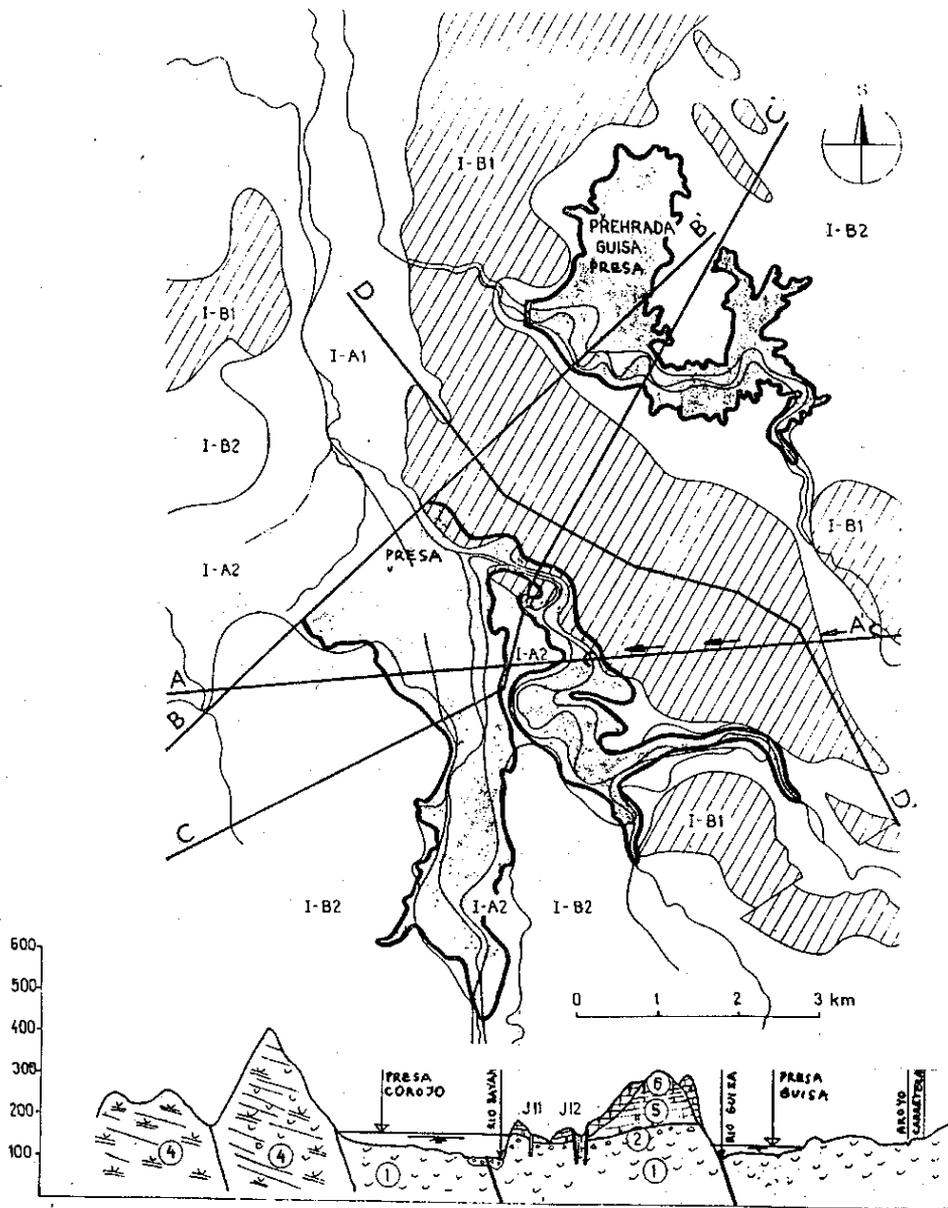


Fig.18: Regionalización ingeniero-geológica del embalse Corojo en Cuba (según Horsky – Reyes, 1980)

Según los fines del plano ingeniero-geológico para las obras hidrotécnicas, según se ha mencionado, podemos dividir su contenido en dos partes :

a/ Descripción de los factores objetivos verificados por trabajos de investigación, expresándolos en el plano de las condiciones ingeniero-geológicas con un anexo del plano de documentación;

b/ Evaluación de estos factores en el plano de regiones ingeniero-geológicas.

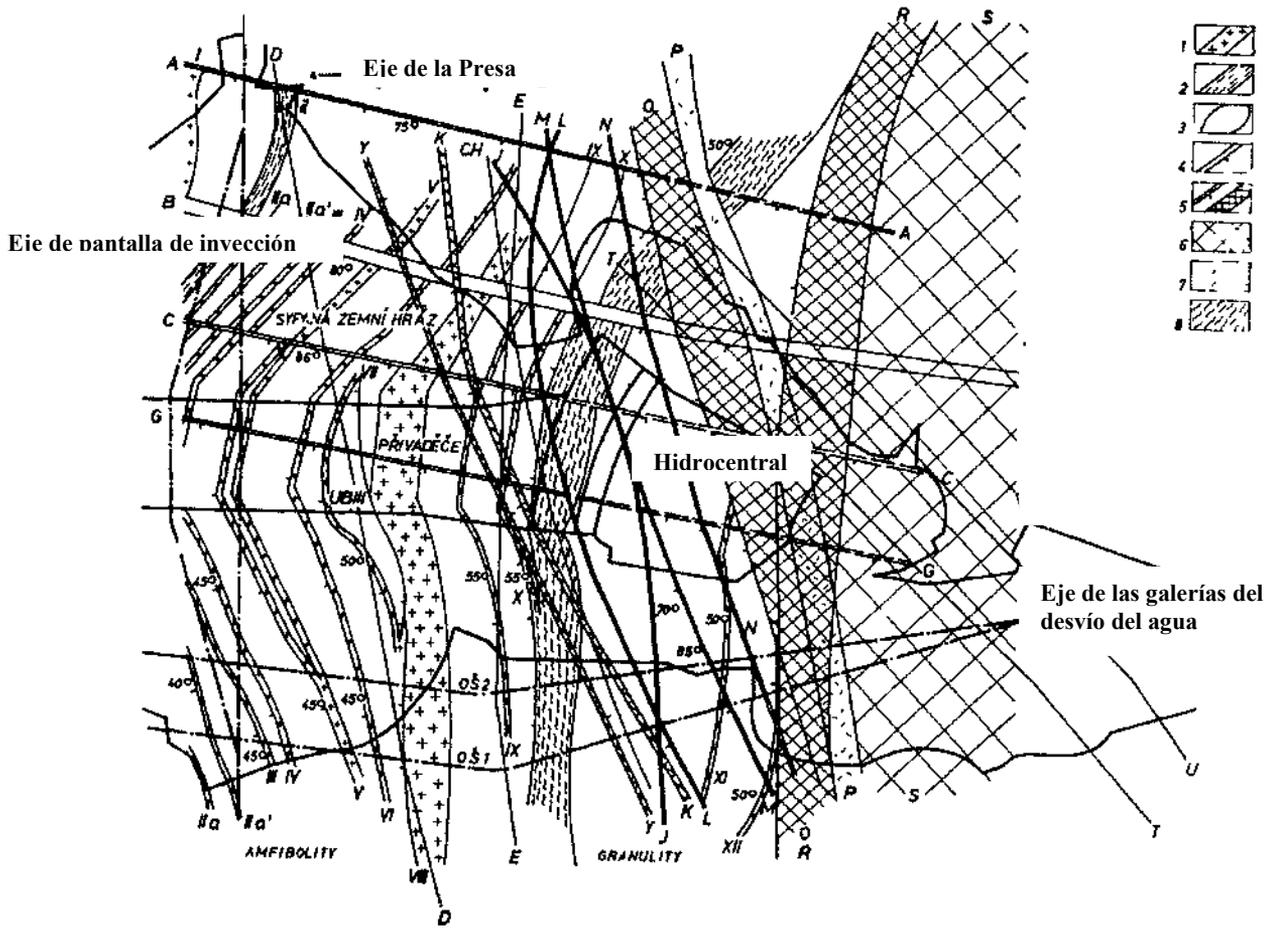


Fig.19: Mapa ingeniero-geológico muy detallado del lugar del eje de la Presa y Central Hidroeléctrica en Dalešice, República Checa (según Horsky, 1974).

El levantamiento ingeniero-geológico debe abarcar un área mayor que el NAM elegido por todo el embalse, pero no sobrepasarlo en 1 - 1,5 km en general. Sólo si hay que resolver algunos problemas específicos, como en la estabilidad de los taludes, posibles infiltraciones al valle vecino, carso, etc., hay que realizar el levantamiento hasta un punto exterior que nos dé la posibilidad de resolver el problema en cuestión.

Durante el levantamiento y elaboración del plano nos encontramos con dos criterios antagónicos. Uno de ellos es la necesidad de complicar el plano, es decir expresar en él todos los factores importantes desde el punto de vista de la construcción y del plano mismo, para que sirva para todos los fines. Otro criterio es elaborar este plano de tal manera que sea comprensible para el proyectista, utilizando la técnica de anotar lo que tenemos a nuestra disposición. De aquí surge la necesidad de cierta modificación durante la confección del plano, pero siempre respetando las bases importantes, dadas por la norma para el levantamiento ingeniero-geológico.

## Capítulo VII

### Investigaciones hidrogeológicas

Las investigaciones hidrogeológicas para las obras hidráulicas se ejecutan con volúmenes grandes y pequeños. Estos dependen de la carga de la presa y de las condiciones naturales, entre otros factores. En los lugares donde no hay peligros de filtraciones y donde no se encontrarán los objetos amenazados por la presión del agua se puede simplificar la investigación.

Generalmente la investigación hidrogeológica soluciona las siguientes tareas:

- a) Pérdidas por filtración, especialmente a los valles vecinos;
- b) Subida del nivel del agua subterránea hasta fuera de la obra e influencia de la misma sobre los objetos de explotación y drenaje de la agricultura;
- c) Proponer medidas contra las filtraciones (cortinas, drenajes etc.)
- d) Determinar los gastos o las afluencias a las excavaciones de los cimientos y proponer su drenaje;
- e) Evaluar la agresividad de las aguas subterráneas y superficiales;
- f) Ofrecer datos sobre las fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales en el embalse, y según las posibilidades en la cuenca del embalse.

#### VII.1. Estudio hidrogeológico regional

El estudio hidrogeológico regional corresponde a la etapa del anteproyecto, es decir con la evaluación de las condiciones hidrogeológicas de la cuenca del río desde el punto de vista de las posibilidades de construir una obra hidrotécnica (subetapa) y con la tarea de proyección.

En la subetapa de anteproyecto se evalúa la significación de las condiciones hidrogeológicas para la proyección, construcción y explotación de la obra hidrotécnica. El conocimiento de estas condiciones servirá para comparar diferentes variantes de cierre desde el punto de vista de la permeabilidad de las rocas debajo de la presa y de las posibilidades de filtraciones o los valles vecinos. En esta etapa se parte de los estudios de los datos de archivo y de los planos geológicos existentes.

Contando con estos datos se ejecuta el levantamiento hidrogeológico que es parte integrante del levantamiento ingeniero-geológico. Desde el punto de vista hidrogeológico se prestará atención a los siguientes fenómenos:

- a) Lugares donde aflora el agua subterránea (manantiales, pozos, objetos de exploración de las aguas subterráneas, calas hidrogeológicas y de observación, cuevas, grietas etc.), determinar el ph de agua subterránea y los gastos de los manantiales.
- b) Drenaje de las aguas subterráneas.
- c) Comportamiento de los suelos y rocas permeables especialmente con el respecto a las filtraciones debajo del cierre, ambos hombros y los valles vecinos.

Todos los datos mencionados más arriba se presentarán en un plano ingeniero-geológico con una explicación detallada en el texto del informe final.

En la etapa de la tarea de proyección ya conocemos la ubicación del eje o estamos estudiando diferentes variantes de su ubicación con el mismo nivel técnico.

El límite inferior de la investigación hidrogeológica del cierre está en función de la localización de una base relativamente impermeable, es decir con un coeficiente de filtración  $k = 10^{-7}$  cm/seg. Si la misma se encuentra a una profundidad considerable, hay dos criterios posibles para determinar la profundidad de la investigación:

- a) Se perfora hasta una profundidad que corresponda a 2 veces la potencia del agua embalsada (2 H);
- b) Se perfora hasta una capa que tenga una permeabilidad 10 veces menor que la capa sobreyacente.

Comparando las diferentes variantes de ubicación del cierre, hacemos las investigaciones hidrogeológicas más profundas si la selección de la mejor variante depende de las mismas.

En condiciones hidrogeológicas complejas (carso, rocas muy permeables) la profundidad de las calas y el volumen de los trabajos hidrogeológicos son lo suficiente grandes como para resolver un problema definido.

El límite superior de las investigaciones hidrogeológicas es el siguiente:

- a) Si no se encuentra en el hombro un acuífero, la profundidad de la cala debe corresponder con el nivel máximo del embalse (NAM) ;
- b) Si se encuentra en los hombros algún acuífero, la cala se ubica en un lugar que nos dé la posibilidad de alcanzar el nivel del agua subterránea a una cota correspondiente a la del NAM.

Conociendo la ubicación del eje o comparando diferentes variantes con el mismo nivel técnico, se hacen los trabajos hidrogeológicos siguientes :

- a) Determinar en forma orientativa las capas permeables y sus parámetros hidráulicos (coeficiente de filtración y eventualmente el coeficiente de almacenamiento) ;
- b) Determinar los distintos acuíferos y evaluar de forma orientativa las relaciones entre los mismos;
- c) Evaluar de forma orientativa si es necesario construir una cortina de inyección y hasta qué profundidad;
- d) Ofrecer datos sobre los niveles de las aguas subterráneas;
- e) Determinar la calidad de cada acuífero y evaluar la agresividad del agua subterránea y del río con respecto al hormigón, mezcla de inyección y obras de acero.

Para cumplir la tarea se ejecutarán los trabajos siguientes:

- a) Determinación de los coeficientes de filtración de cada tipo de roca y suelo en el laboratorio. En caso de capas muy permeables se determinan los mismos , además , por medio de aforos o vertimientos de corta duración (1-2 días);
- b) Por medio de la inyección de agua a presión se determina orientativamente como pueden inyectarse las rocas presentes en la obra;
- c) Durante la perforación se determina la aparición del agua subterránea y del nivel estabilizado del agua. Este nivel se medirá 24 horas después de perforada la cala. En

caso de utilizar agua durante la perforación se medirá el nivel 24 horas después de achicar la cala;

- d) Tomar muestras de agua de cada uno de los acuíferos.

Embalse - Tareas :

Evaluar la posibilidad de embalse en relación con la filtración y advertir sobre las posibles pérdidas hidráulicas. Prácticamente vale decir:

- a) Determinar orientativamente las capas permeables especialmente entre los valles y determinar sus parámetros hidráulicos y si éstos se pueden inyectar;
- b) Determinar los acuíferos y evaluar orientativamente las relaciones entre los mismos;
- c) Ofrecer datos sobre los niveles de las aguas subterráneas en los lugares de posibles filtraciones;
- d) Determinar las fuentes potenciales de contaminación;
- e) Construir plano hidrogeológico a un determinado objetivo del embalse y su alrededor.

La investigación se ejecuta en todo el embalse y su alrededor (mínimo 0,5 - 1,5 km fuera del embalse). En caso de diques que deban disminuir el área de embalse se ejecutará la investigación hasta fuera de los mismos.

La evaluación de la perspectiva del embalse en relación con la filtración a los valles vecinos se ejecuta basándose en el estudio de los materiales de archivo y del levantamiento, eventualmente basándose en la investigación geofísica. Si de estos datos resulta que existen posibilidades de filtraciones a los valles vecinos, se ejecutará en la primera etapa una investigación más detallada. Para cumplimentar la tarea se ejecutarán los trabajos siguientes (investigaciones más detalladas):

- a) En los lugares posibles de filtraciones a los valles vecinos hay que perforar algunas calas transversalmente, a distancia de 1 - 2 km, con 3 calas como mínimo. De estas tres calas perforar 1-2 calas hasta la capa impermeable. Si la capa impermeable yace a gran profundidad, es necesario perforar las calas hasta el doble o el triple de la altura de la presa. Si aparece agua subterránea, se recomienda perforarlo por debajo del nivel. Se recomienda encaminar el 50 % de estas calas. Si no se dispone de ningún dato sobre la geología del área del embalse y sus alrededores, se perforarán algunas calas cuya ubicación se deriva del levantamiento.
- b) En rocas de baja permeabilidad se determinan los parámetros hidráulicos en el laboratorio, en las rocas o suelos muy permeables se ejecutan aforos o pruebas de vertimiento de corta duración (1-2 días).
- c) Por medio de la inyección a presión se determina en forma orientativa como puedan inyectarse las rocas del fundamento;
- d) Los datos sobre los niveles durante las perforaciones se determinan en la misma forma que en el caso del cierre (fig. 20);
- e) En el levantamiento geológico se presta atención a los lugares donde aflora el agua subterránea con el objetivo de explorar las aguas subterráneas, el drenaje, las fuentes potenciales de contaminación (como depósitos de residuales industriales, basureros, almacenes de fertilizantes, depósitos de excrementos de animales, etc.).

Si no se esperan filtraciones a los valles vecinos, se ejecutará sólo el levantamiento hidrogeológico sin hacer laboreos de exploración.

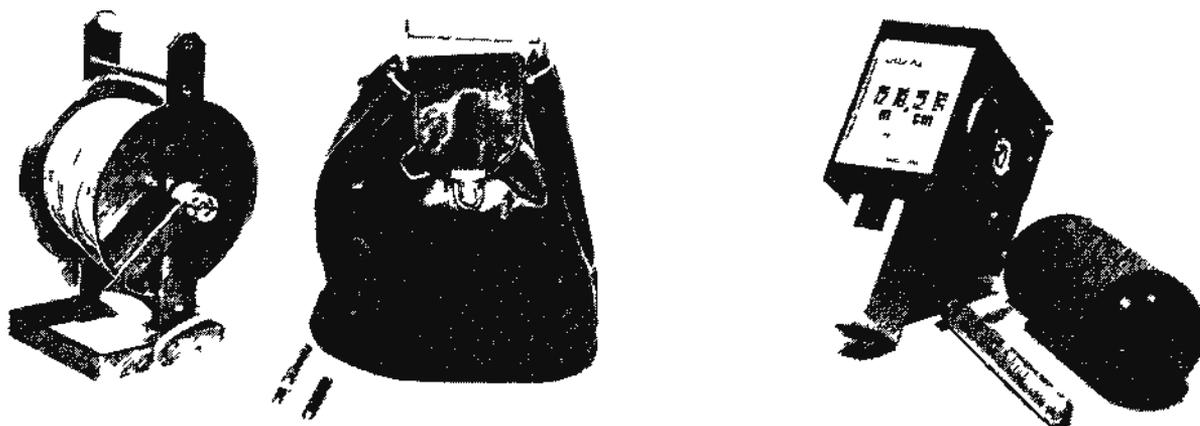


Fig.20: Dos tipos de aparatos para medir el nivel del agua en las perforaciones, los que trabajan a base de dar impulso eléctrico con el contacto del agua ( fabricación de GEOTest Brno, Checoslovaquia, 1980).

## VII.2. Estudio hidrogeológico detallado

Después de la aprobación de la tarea de proyecto realizamos las investigaciones hidrogeológicas detalladas. Estas investigaciones participan generalmente en dos etapas del proyecto (es decir el proyecto técnico y el proyecto ejecutivo).

### VII.2.1. Proyecto técnico

Las tareas básicas para la investigación hidrogeológica del cierre son las siguientes:

- Ofrecer los datos para los medios contra las filtraciones (cortina de inyección) y para las medidas de drenaje en todo el cierre;
- Determinar los parámetros hidráulicos de todos los tipos de rocas o suelos;
- Evaluar como pueden inyectarse las rocas;
- Evaluar el sifoniamiento mecánico y químico;
- Determinar el gasto de las afluencias a las excavaciones de los cimientos y proponer el modo de drenarlas;
- Determinar el régimen natural del nivel de las aguas subterráneas incluso evaluar sus relaciones con el río y los otros acuíferos (fig. 21);

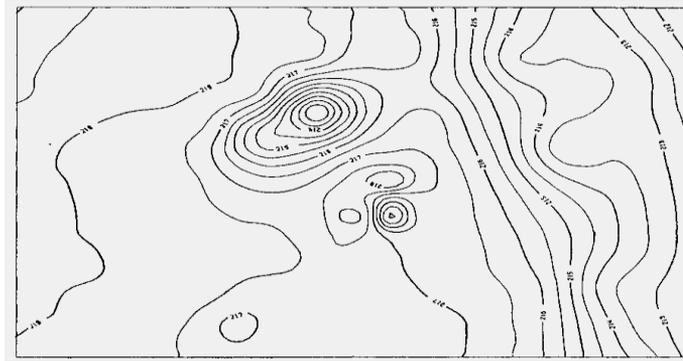


Fig.21: El mapa de hidroisohipsas hechas con la ayuda de la computadora (1983).

- g) Evaluar la agresividad de cada acuífero y del río con respecto a las construcciones de hormigón y de acero y a la mezcla de inyección y evaluar la conveniencia del agua para la obtención de mezcla de hormigón y para la cura de hormigón;
- h) Si se traslada el agua temporalmente durante la construcción a otro lugar, entregar los datos sobre el régimen presente de los niveles de las aguas subterráneas en el lugar del traslado del agua y pronosticar los cambios del régimen de los niveles de las aguas subterráneas como consecuencia del traslado.

Para cumplir la tarea se ejecutarán los trabajos siguientes:

- a) Ejecutar aforos y pruebas de vertimiento en todas las variedades de rocas que se encuentren en el cierre;
- b) Ejecutar pruebas de inyección;
- c) Observar la aparición del nivel del agua durante la perforación y determinar el nivel estabilizado;
- d) Integrar la red de observación de los niveles de las aguas subterráneas (con 1-2 calas de observación en el valle y 1-2 en cada margen como mínimo) y ejecutar observaciones sistemáticas. Hacer las observaciones como mínimo durante 1,5 años. Se recomienda lograr que se ejecuten las observaciones sin interrupción, sin considerar la etapa de investigación, hasta la construcción de la obra;
- e) Tomar muestras de agua de cada acuífero (además en la margen derecha e izquierda y en el valle) ; realizar el muestreo del régimen (como mínimo 2 veces, en el período seco y húmedo); se recomienda ejecutar en la mayoría de las muestras análisis completos.

Embalse - Tareas :

Si existiera la posibilidad de infiltración de las aguas del embalse a los valles vecinos, se ejecutará una investigación detallada con las siguientes tareas:

- a) Determinar las capas permeables y determinar sus parámetros hidráulicos;
- b) Determinar el régimen natural de los niveles de las aguas subterráneas incluso su relación con el río y con los otros acuíferos y en relación con los lugares de posibles filtraciones;
- c) Determinar las pérdidas por filtraciones a los valles vecinos;

- d) Determinar la subida del nivel de las aguas subterráneas alrededor del embalse (sin medidas contra la filtración y con medidas contra la filtración);
- e) Proponer medidas contra la filtración (cortina de inyección, etc.);
- f) Determinar las fuentes potenciales de contaminación;
- g) Determinar la calidad del agua de cada uno de los acuíferos;
- h) Determinar el sifonamiento mecánico y químico en las capas permeables;
- i) Confeccionar el plano hidrogeológico.

Si no existe la posibilidad de que se infiltren las aguas del embalse a los valles vecinos, se ejecutará una investigación con las tareas siguientes:

- a) Determinar las fuentes potenciales de contaminación;
- b) Determinar el sifonamiento químico;
- c) Determinar el régimen de los niveles de las aguas subterráneas o los datos sobre los niveles en lugares fuera del embalse que pudieran ser objeto de conflictos durante la explotación de la obra (por ejemplo: pozos públicos y particulares, fábricas, obras de transporte, ciudades, pueblos etc.);
- d) Confeccionar el plano hidroeléctrico.

Para cumplir la tarea se ejecutarán los trabajos siguientes:

- a) Ingeniero-hidrogeológicos; además elegir los objetos donde afloren las aguas subterráneas y los objetos para la red de las observaciones subterráneas;
- b) Perforar calas de observación y calas hidrogeológicas en perfiles transversales para los lugares donde se esperen infiltraciones hacia los objetos que puedan ser afectados por las infiltraciones. Para las distancias entre los perfiles transversales debe utilizarse la siguiente tabla:

- Embalse cerca de fábricas y ciudades	300 - 500 m;
- Poblaciones rurales	500 - 800 m;
- Zonas agrícolas	1000 - 1500 m

- c) En cada perfil perforar 3 calas con profundidades iguales que en las etapas anteriores;
- d) Aforos, vertimientos y pruebas de presión;
- e) Observar sobre la aparición del nivel durante la perforación y determinar el nivel estabilizado;
- f) Ejecutar las observaciones sistemáticas en los perfiles y en los alrededores del embalse en la red de observación elegida durante los itinerarios;
- g) Muestreo del régimen de las aguas subterráneas

Durante la evaluación del régimen de los niveles de las aguas subterráneas no se deben aislar los datos del cierre y del embalse.

## VII.2.2. Proyecto ejecutivo

### Cierre - Tareas:

- a) Se deben precisar los parámetros hidráulicos para tomar las medidas contra la filtración y el drenaje, así como determinar el gasto de la afluencia en las excavaciones de los cimientos para conocer los mismos en todas las variedades de rocas y suelos saturados y no saturados;
- b) Precisar los datos sobre las amplitudes de las oscilaciones de los niveles de las aguas subterráneas y sobre las frecuencias de los niveles característicos sobre la relación con otros acuíferos y con el río;
- c) Ofrecer datos para el proyecto de la cortina de inyección;
- d) Determinar las pérdidas por filtración;
- e) Determinar los gastos de las afluencias a las excavaciones de los cimientos y proponer el tipo de drenaje a utilizar;
- f) Precisar en el área y en el tiempo la calidad del agua subterránea, especialmente con respecto a la agresividad de las mismas y del río contra el hormigón, acero y la mezcla de inyección;
- g) Precisar la posibilidad de sifonamiento mecánico y químico;
- h) Proponer la red de las observaciones de los niveles de las aguas subterráneas durante la construcción y durante la explotación de la obra.

Para cumplir la tarea se deben realizar los siguientes trabajos:

- a) Afors, vertimientos y pruebas de inyección;
- b) Observaciones sistemáticas que continúan de la etapa anterior, ampliadas según la necesidad de los cambios del proyecto;
- c) Muestreo del régimen de las aguas subterráneas y del río (vea etapa anterior).

### Embalse -Tareas:

Precisar los datos de la etapa anterior.

## Capítulo VIII

### Labores de exploración

Las calas, calicatas, trincheras, galerías y otros labores de exploración los realizamos conjuntamente con otros trabajos de investigación ingeniero-geológica para aclarar la estructura geológica, las condiciones hidrogeológicas y para estudiar las cualidades geotécnicas de las rocas y de los suelos. El volumen de estos trabajos debe satisfacer las necesidades del proyecto según la etapa de proyección. En el cierre debe posibilitarnos la construcción de un perfil ingeniero-geológico, caracterizando la estructura geomorfológica y geológica de todos los elementos básicos, teniendo en cuenta la localización de todas las heterogeneidades del macizo rocoso (fallas, rupturas, grado de agrietamiento), profundidad de la base de erosión, caracterizando el carácter del techo de la misma, carácter litológico de las rocas y los suelos, caracterizando los horizontes estratigráficos más importantes (horizontes de apoyo), tipos genéticos y litológicos de las rocas y potencia y carácter de la zona de intemperismo. Hay que aclarar bien el carácter físico-mecánico de las rocas y de los suelos y sus permeabilidades, profundidad y carácter de las aguas subterráneas, haciendo el pronóstico de sus posibles variaciones relacionadas con diferentes niveles del agua embalsada y apreciando posibles riesgos provocados por el cambio de condiciones naturales iniciales.

La ubicación de las calas debe realizarse en el eje elegido del cierre que sea más perspectivo para la ubicación de todos los objetos de obra. En el área adyacente al cierre hay que hacer en la primera etapa de investigación labores de exploración, sólo si esperamos cambios básicos en la estructura geológica, de las condiciones hidrogeológicas o de la estabilidad de los taludes.

En aquellas rocas que tengan grandes filtraciones es necesario hacer calas extremas hasta el horizonte acuífero el cual se acerque por su cota a la del NAM proyectado. Se recomienda realizar una red de calas más densa para que nos posibilite aclarar el problema de las posibles filtraciones. Además hay que ubicar las calas extremas más arriba del punto de intersección del NAM con las rocas convenientes desde el punto de vista de las filtraciones, es decir detrás del límite de cobertura o rocas intemperizadas permeables. Si en el eje se presentan rocas o suelos no estables (deslizamientos, derrumbes etc.) o rocas cársicas, hay que realizar investigaciones especiales.

Para resolver los problemas mencionados con labores de exploración, la mejor medida es realizar algunos trabajos geofísicos antes de la ubicación de las calas (métodos geoeléctricos, sísmicos, radiokip).

Sin embargo, se recomiendan en la primera etapa de la investigación, para igual elemento estructural o geomorfológico, distancias entre labores de exploración en condiciones geológicas simples (A) de 250 - 400 m, de complejidad media (B) de 200 - 300 m y en condiciones geológicas complejas (C) de 150 - 250 metros.

Si se trata de valles anchos con la misma estructura geológica, la distancia entre los labores de exploración más grande puede ser de 400 metros.

Después de elegir el eje hay que hacer calas, no solo en el eje, sino también para todos los objetos de obra importantes (aliviadero, toma de agua etc.). Si éstos tienen diferentes variantes de ubicación hay que estudiar todas las variantes con el mismo nivel de investigación. Esta investigación debe utilizarse también para esclarecer mejor toda la estructura geológica del lugar, o mejor dicho, dará definir bien las condiciones ingeniero-geológicas.

En el eje elegido las perforaciones las hacemos en el eje y en líneas paralelas con el mismo; la cantidad de perfiles paralelos y la distancia entre ellos depende de la complejidad de la estructura geológica e hidrogeológica y del ancho de la base de la obra, pero como mínimo deben ser realizados 3 perfiles con distancias entre ellos generalmente de 100 metros.

La ubicación de las calas en los perfiles debe ser así, para que nos dé la posibilidad de construir los perfiles ingeniero-geológicos longitudinales y transversales a través de los lugares más importantes desde el punto de vista de la construcción de la obra.

La distancia entre las calas depende de la complejidad de la estructura geológica, del tipo de obra (presa) y de la altura (vea tabla 6). La red más densa se supone para las presas de hormigón (especialmente para las de arco) si se refiere a rocas o sedimentos no homogéneos, permeables (condiciones hidrogeológicas complejas) y los que llevan carga soportante pequeña (compresibles). Por ejemplo, en general para las presas de hormigón se recomienda una distancia entre 15 - 150 m, para las de suelos o de "rock-fill" entre 100 - 200 metros.

En lo que se refiere a los objetos del hidroconjunto (los que estén fuera de la presa), hay que hacer perforaciones en los ejes de aquellos y en perfiles perpendiculares al eje. Primeramente hay que estudiar el lugar desde un punto de vista más amplio que nos dé la posibilidad de estudiar diferentes variantes de ubicación del objeto (obra). Después de ubicar la obra, la distancia entre las calas para la obra de hormigón debe estar entre 75 y 150 m, para las obras de materiales sueltos de 100 y 200 m (vea tabla 6).

Categoría de la complejidad ingeniero geológica	Tarea de proyección						Proyecto técnico		
	Para elegir los alineamientos			En los alineamientos elejidos					
	Altura de la presa en metros								
	10-15	16-50	50 -X	10-15	16-50	50-X	10-15	16-50	50-X
A	400	300	250	250	200	150	150	100	80
B	300	250	200	200	150	100	100	80	75
C	250	200	150	150	100	75	75	60	40

Tab.6: Distancias recomendadas entre perforaciones (calicatas) para estudiar los alineamientos de la presa

Si las capas están inclinadas, hay que realizar (sin respetar la etapa de investigación) algunas calas inclinadas hasta que se aclare bien la estructura geológica del cierre.

La profundidad de los laboreos de exploración (especialmente de las calas) debe ser hasta las rocas que puedan servir de base para la cimentación de la obra hidráulica. Además deben aclarar la potencia de la zona de intemperismo, definir la profundidad y potencia de las rocas débiles, fácilmente solubles o hinchables, zonas de fallas, de posibles planos de deslizamiento y de otras heterogeneidades del lugar. Por lo que se refiere a la propagación de las tensiones provocadas debajo de los cimientos por la obra misma, hay que perforar hasta la profundidad influida efectivamente por las tensiones.

Hay que perforar hasta las rocas relativamente impermeables o, si no es posible, por encontrarse a gran profundidad (3 veces más que la altura de la presa), perforar hasta un horizonte estratigráfico que tenga una permeabilidad hasta 5 veces menor que el horizonte superior. Orientativamente podemos utilizar también el criterio de LUGEON (ev.JÄHDE), es decir si tres intervalos de 3 - 5 m de largo tienen pérdidas específicas de agua menores que la que define el criterio correspondiente (0,5 - 1,0 l/min/m) utilizando una presión de agua de

3 atm. (Jähde) o 10 atm. (Lugeon), es posible considerar la profundidad de la cala como suficiente si se cumplen los otros fines de la cala más arriba definidos.

Los laboreos de exploración deben aclarar la profundidad del nivel freático y de las relaciones mutuas entre los diferentes horizontes y entre el nivel freático y el río.

Para que podamos construir el corte ingeniero-geológico del eje hay que hacer todas las calas hasta una profundidad que nos dé la posibilidad de construir un perfil geológico continuo (especialmente si se refiere a capas importantes desde el punto de vista de la construcción).

Las calas extremas del eje, si se trata de sedimentos o rocas débiles (permeables), hay que perforar hasta una profundidad que corresponda con la cota de la base de erosión del río si esta profundidad no sobrepasa 50 metros.

La profundidad de las calas con fines especiales (calas estructurales, hidrogeológicas, de mediciones especiales, etc.) deben ser hasta que nos dé la posibilidad de cumplir los fines perseguidos.

Después de elegir el eje, la profundidad de los laboreos de exploración debe estar en relación con los fines de la investigación, es decir, para dar los datos importantes desde el punto de vista de la proyección y de la construcción de la obra.

Los laboreos de exploración hay que avanzarlos hasta una profundidad que nos asegure, en base a su evaluación, una explotación segura de la obra y una construcción de la obra sin dificultades (deformabilidad de las rocas debajo de la obra durante la construcción y después de terminarla, permeabilidad de las rocas y sus cambios después de embalsada la presa, difusión mecánica y química, subpresiones del agua, agresividad de las aguas, etc.).

La profundidad de las calas durante la investigación por el cierre ya elegido no es tan grande como en la etapa de elección del eje, ya que debemos conocer la estructura geológica e hidrogeológica, y estas calas sirven para fines definidos (pruebas presiométricas, pruebas de inyecciones de agua y de hormigón, aclarar los lugares menos conocidos, de zonas débiles etc.).

La tabla siguiente de profundidades de las calas puede servir de tabla orientativa indicando al ingeniero responsable de las investigaciones para qué fines cada cala sirve y relacionarla con estos fines definidos (tabla No. 7).

Categoría de la Complejidad ingeniero geológica	Altura de la presa hasta metros :											
	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
	Investigación para elegir el cierre – tarea de proyección											
A	15	20	25	30	30	40	40	45	50	55	60	65
B	20	25	30	35	40	50	55	60	70	70	80	85
C	25	30	35	40	50	60	70	80	90	90	100	105
	Investigación en el cierre elegido – proyecto técnico y definitivo											
A	10	15	20	20	20	22	24	26	28	30	32	35
B	15	20	25	25	25	25	26	28	30	32	34	40
C	20	25	30	30	30	30	32	35	37	40	42	45

Tab.7: Profundidad recomendada de calas (calicatas) para investigar los alineamientos

## Capítulo IX

### Investigaciones geofísicas

La cimentación exitosa de cada obra depende de apreciar bien las condiciones ingeniero-geológicas del lugar. Para que podamos cumplir esta necesidad, hay que utilizar los métodos que nos den la posibilidad de apreciar y valorar todos los elementos importantes desde el punto de vista del carácter de la misma construcción. Si nos referimos a obras hidrotécnicas, vamos a seguir el camino que lleva a la aclaración de la estructura geológica, determinada con todos sus elementos heterogéneos como son grietas, rupturas, fallas tectónicas, zonas debilitadas, capas diferentes litológicamente, etc. A base del estudio de todos estos elementos se construye después el modelo geotécnico del lugar con todas las características geotécnicas importantes. En casos específicos, si se refiere a grandes obras hidrotécnicas en condiciones geológicas complejas, hay que apreciar además del estado tensional del macizo rocoso actual el pronóstico de los cambios en los parámetros geotécnicos durante la construcción y después de terminada.

En el empleo de métodos clásicos como son: levantamiento ingeniero-geológico y documentación de los laboreos de exploración (calas, calicatas etc.), la realización de pruebas geotécnicas de campo y de laboratorio (pruebas de carga y esfuerzo cortante), son insuficientes, ya que en cada caso significan sólo pruebas puntuales que no podemos aplicar a todo el macizo rocoso sin realizar métodos modernos de la geofísica aplicada a la ingeniería de construcción.

Ya que la naturaleza es, desde el punto de vista ingeniero-geológico, un sistema muy complicado, el ingeniero-geólogo debe realizar un análisis del modelo que en esencia significa dividir el macizo rocoso en bloques casi homogéneos y estudiar los aspectos geotécnicos, para caracterizarlos a través de los parámetros necesarios. Para el ingeniero el conocimiento del carácter físico del ambiente es muy importante; así un geofísico puede ofrecer un modelo de los campos físicos a base de mediciones brindando de esta forma datos de mucha importancia. La geofísica resulta, de tal manera, un ayudante muy importante para el ingeniero-geólogo, hidrogeólogo y geotécnico, ya que estudia el ambiente natural del macizo rocoso como base para el proyecto- de una obra hidrotécnica.

Al confeccionar el programa de las investigaciones geofísicas hay que tener en cuenta que la geofísica no es un remedio para resolver cualquier problema. En tiempos pasados se cometieron muchos errores, ya que los ingenieros-geólogos pidieron solucionar algunos problemas a los geofísicos, que no se podían resolver con las herramientas de esta especialidad, y viceversa muchas veces los geofísicos no interpretaron bien los problemas ingeniero-geológicos. Por esta razón es necesaria una colaboración muy estrecha entre el ingeniero-geólogo y el geofísico la cual es de gran importancia y deben confeccionar el programa de investigaciones conjuntamente, en base a un análisis detallado de las posibilidades de los diferentes métodos para una estructura geológica determinada.

Después de terminada la investigación geofísica debe haber una colaboración aún más estrecha entre el ingeniero geólogo y el geofísico, y muchas veces con el proyectista de la obra hidrotécnica. Esta colaboración nos da la posibilidad de apreciar la estructura geológica y encontrar relaciones mutuas entre los parámetros físicos y las propiedades fisico-mecánicas.

## IX.1. Selección de los métodos geofísicos

Los métodos actuales de investigación geofísica están determinados por seis principios básicos: estudio de los campos gravitacionales, magnéticos, cambios de velocidad de las ondas elásticas, campos electromagnéticos naturales y artificiales, campos térmicos y radioactividad de rocas y suelos.

Con la geofísica aplicada, que opera en la parte superficial de la corteza terrestre, estudiamos los elementos de los campos físicos naturales y artificiales. Estos campos están influidos por diferentes cualidades físicas de los minerales y rocas y dependen de una gama de factores como son: intemperismo, cambios del quimismo del agua subterránea, magnetismo terrestre, estado de las tensiones naturales en el macizo rocoso etc.

Diferentes características físicas de las estructuras geológicas y elementos estructurales de macizo rocoso, como son rupturas, fallas tectónicas, zonas de debilidad etc., producen anomalías de los campos físicos. Estas anomalías se determinan utilizando los equipos geofísicos y los diferentes métodos de la geofísica. Determinando el carácter del campo físico en el área estudiada, obtenemos una imagen completa sobre su distribución, con lo cual podemos interpretar todos los elementos estructurales importantes para la construcción de la obra hidrotécnica.

En concordancia con lo expuesto más arriba, los métodos geofísicos para las investigaciones ingeniero-geológicas incluyendo las obras hidrotécnicas los podemos dividir en seis grupos: métodos gravimétricos , magnéticos, eléctricos, sísmicos, radioactivos y térmicos.

## IX.2. Tareas principales de geofísica en las investigaciones de las obras hidrotécnicas

La tarea principal de la geofísica aplicada para estos fines es ofrecer al proyectista de la obra parámetros importantes y necesarios para realizar un determinado proyecto. Además se pueden determinar correlaciones entre los parámetros físicos y mecánicos para aplicarlas al estudio de todo el macizo rocoso.

Por esta razón las tareas principales de la geofísica son las siguientes:

### 1 - Determinación de la estructura geológica y tectónica del área:

- a) determinación de los contactos verticales y horizontales entre varios tipos petrográficos de rocas;
- b) contornamiento de las líneas tectónicas y zonas de fracturación;
- c) búsqueda del material conveniente para la construcción;
- d) determinación de las condiciones hidrogeológicas;
- e) búsqueda, microlocalización y estudio de las estructuras cársticas en el área.

### 2 - Evaluación del estado físico-mecánico del macizo rocoso, es decir :

- a) desmembramiento (separación) del macizo rocoso en bloques (vea fig. 22);
- b) determinación de zonas débiles desde el punto de vista mecánico, zonas meteorizadas y sistemas de agrietamiento;
- c) localización de cavernas subterráneas, p.ej. carso sepultado, cavernas naturales jóvenes de varios tipos etc.;
- d) evaluación de las características físicas del macizo rocoso "in situ" (densidad,

porosidad, permeabilidad, humedad, módulos elásticos, agresividad del medio, categoría de excavación.

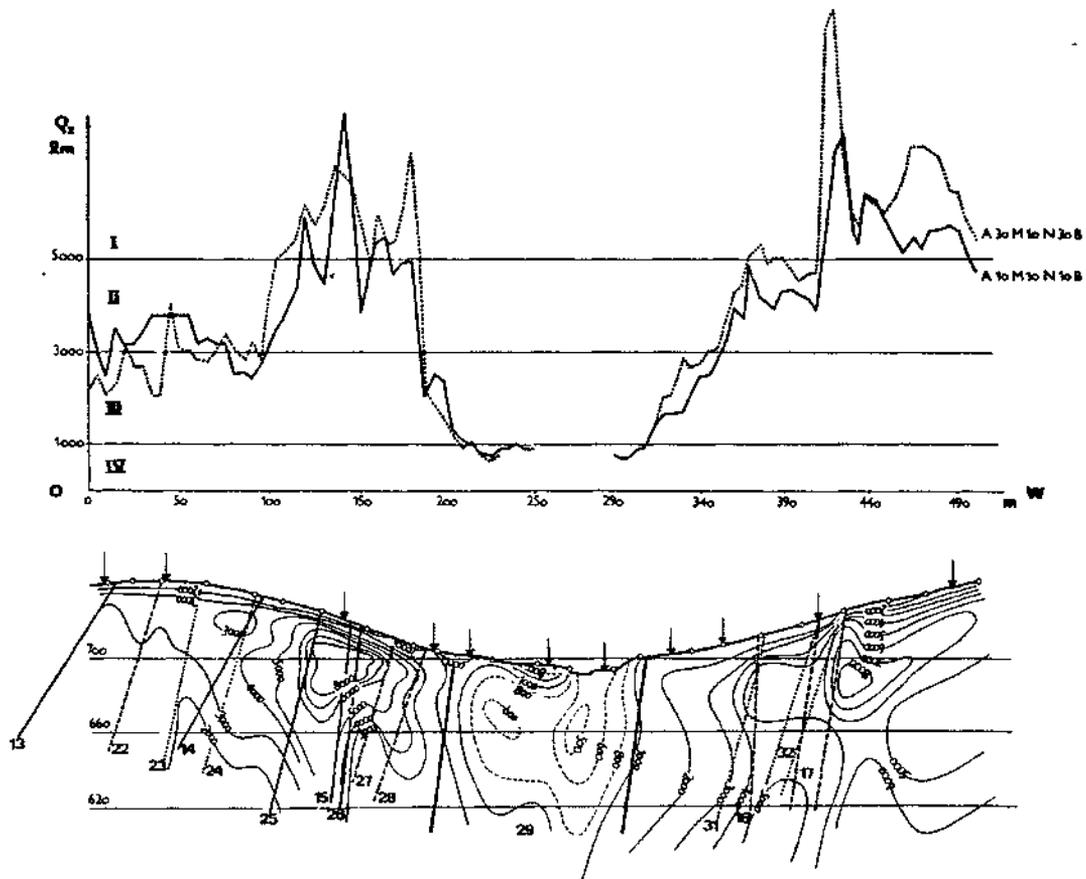


Fig.22: División del macizo rocoso (granitos) en bloques casi homogéneos a base de perfilaje eléctrico (PES) en el eje de la presa Josefův Důl en la República Checa (según Horský- Müller, 1978).

3. Evaluación de cambios de las tensiones naturales, movimientos y deformaciones del macizo rocoso, es decir:

- estudio de las deformaciones del terreno y deslizamientos de rocas;
- evaluación de la sismicidad del área;
- evaluación de la influencia de vibraciones y temblores en la obra;
- contornamiento de zonas diferentes desde el punto de vista de las tensiones naturales (fig. 23).

4. Evaluación de las características físico-mecánicas de los materiales de construcción y de la propia obra, es decir:

- control de la calidad en la compactación de terraplenes de tierra;
- apreciación de filtraciones por los diques;
- control de la permeabilidad en las crtinas de inyección;
- pruebas dinámicas en pilotes y cimentaciones.

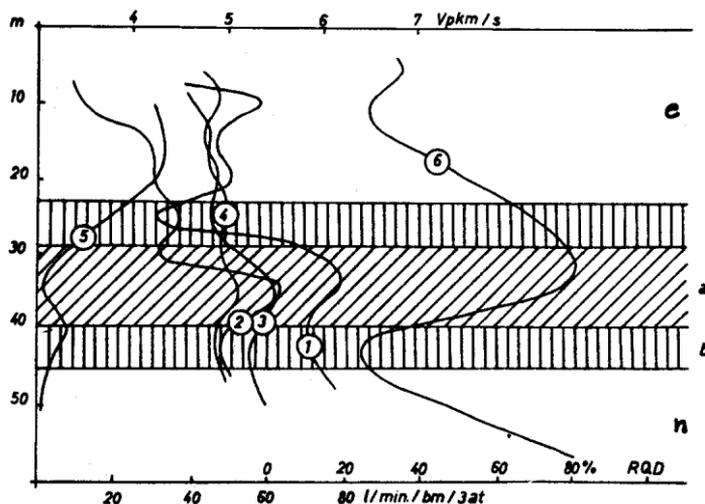


Fig.23: Determinación de la zona de las tensiones concentradas a base de correlación entre la velocidad de las ondas sísmicas, permeabilidad y RQD (según Horsky, 1974).

a – zona de las tensiones concentradas, b – zona de traspaso entre zona de tensiones liberadas (e), zona de tensiones normales (n) y zona de tensiones concentradas.

1,2 - Ultracarotaje en diferentes calas.

3 - Resultados de ultracarotaje como promedio de 5 calas.

4 - Curva hecha a base de mediciones sísmicas entre las calas.

5 - Pérdidas del agua a base de pruebas de inyecciones del agua.

6 - Parámetro RQD %.

### IX.3. Tareas de geofísica para el levantamiento ingeniero-geológico del embalse

Los métodos básicos para el levantamiento ingeniero-geológico son los eléctricos, y fundamentalmente el sondeo eléctrico vertical (SEV), así como las diferentes variantes del perfilaje eléctrico. Los métodos sísmicos son complementarios en este caso, sirviendo como básicos para determinar algunos parámetros geotécnicos "in situ".

A los métodos complementarios también pertenecen el perfilaje magnético, radiométrico, de bajas frecuencias o radioondas (VLK) y el método de la polarización inducida.

El éxito de los métodos eléctricos está relacionado con la existencia de diferencias marcadas en las resistividades eléctricas de las capas. La resistividad eléctrica depende de la composición litológica de la roca, de su granulometría, porosidad, grado de agrietamiento o alteración y de la profundidad de yacencia y quimismo de las aguas subterráneas.

El método de SEV nos da la posibilidad de determinar la profundidad y potencia de las diferentes capas y horizontes acuíferos. Por esta razón utilizamos este método para determinar el contacto entre los sedimentos cuaternarios y la roca de base, evaluar el desarrollo de estratos horizontales o subhorizontales en condiciones topográficas y tectónicas sencillas. Así por ejemplo, son muy útiles para contornear terrazas y sus niveles freáticos; suelen servir como complemento a la prospección sísmica y exploraciones directas. La exactitud en la determinación de lo mencionado depende de: la existencia de diferencias relativas suficientes entre los diferentes elementos, una buena elección del método de mediciones y principalmente de una correcta interpretación, la cual se debe relacionar con mediciones paramétricas.

Generalmente la exactitud en la determinación de los diferentes contactos alcanza a 10-20 %. La profundidad hasta la que se debe estudiar el área mapeada del embalse es de los 10 - 15 m. La distancia entre los puntos del SEV será elegida de acuerdo a las características ingeniero-geológicas de la región de estudio. Esta suele ser entre 100 - 300 m., si las capas tienen continuidad en el sentido horizontal. En caso opuesto (estructuras geológicas complejas), aquella disminuye hasta 50 m y menos. Si las capas están inclinadas o haya que determinar contactos inclinados de líneas tectónicas o erosivas, se realiza el SEV en cruz o radial para reflejar bien la anisotropía del medio. Este método es también conveniente para determinar el desarrollo de las direcciones del agrietamiento de las rocas, relacionado generalmente con horizontes más saturados de aguas. Ya para esta tarea se proyectan hasta 4 sondeos circulares en 4 azimutes (que formen 45° entre sí).

Utilizamos el perfilaje eléctrico para definir los contactos entre elementos estructurales en sentido vertical y el desarrollo de los mismos a diferentes profundidades. Así podemos determinar el desarrollo de estructuras geológicas sepultadas, valles enterrados, líneas y fallas tectónicas, zonas de debilidad, alteradas, agrietadas, etc. y también la frontera entre aguas mineralizadas y dulces. Este método puede servir también para estudiar el desarrollo del carso.

De los métodos del perfilaje el más conveniente es el perfilaje eléctrico simétrico (PES) con un paso entre 10 y 50 m y distancias entre perfiles generalmente 2-5 veces mayor que la distancia entre los puntos en el perfil.

La velocidad de propagación de las ondas elásticas que sirve como base al método sísmico por refracción es un parámetro relacionado con las propiedades elásticas y el estado de la roca y suelos. Además depende de los líquidos y gases que rellenen los espacios vacíos. Si existen diferentes capas, la propagación de la onda elástica refleja bien sus límites. Las mayores velocidades en las rocas intrusivas logran hasta 6 km/seg. Según la amplitud de la frecuencia se distinguen los métodos sísmicos (30-200 KHz), acústicos (1000-10 000 Hz) y ultrasísmicos (20 000 - 70 000 Hz).

Los métodos sismo-acústicos nos ayudan a estudiar la estructura del macizo rocoso y definir bien zonas debilitadas, fallas tectónicas, profundidad de la cobertura (techo de las rocas), etc. y se utilizan en lugares donde la aplicación de los métodos eléctricos sea dificultosa (p.ej. en arenas secas no conductoras).

En etapas preliminares de investigación estos métodos ayudan a precisar los resultados de los demás métodos geofísicos. Actualmente en los países desarrollados los utilizan como método rápido para investigar orientativamente el macizo rocoso, su estructura y cualidades geotécnicas. Estos trabajos se realizan utilizando una red de perfiles relacionados con la estructura geológica y con la tarea que se deba resolver. En la etapa de investigación detallada esta red es más densa utilizando además en mayor escala el carotaje ultrasónico en calas, radiación sísmica entre calas, documentación sísmica en calicatas y galerías. Después de excavados los cimientos, estos métodos tienen la mayor utilidad para precisar los resultados recibidos anteriormente, especialmente los geotécnicos (módulos elásticos, grado de compactabilidad de los terraplenes). Todas estas mediciones nos ayudan a precisar el plano ingeniero-geológico del embalse y a detallar el lugar del hidroconjunto.

Los otros métodos con carácter complementario los elegimos según las características individuales de las rocas, es decir magnéticas, donde utilizamos métodos magnéticos (perfilaje magnético), radioactividad natural, métodos radiactivos (por ejemplo en rocas ácidas, en complejos de arcillas marinas, en estructuras plegadas, sulfurosas, fallas tectónicas etc.), métodos de temperatura y métodos térmicos entre los otros. En los últimos tiempos se utiliza además, con muy buenos resultados, el método de ondas muy largas (RADIOKIP),

basado fundamentalmente en registrar las ondas emitidas por las emisoras de radio que están pasando por la superficie del terreno. Este método nos da la posibilidad de definir rocas conductoras (p.ej. fallas tectónicas etc.) - vea fig. 24. Una situación específica la tienen los métodos de polarización espontánea (campos naturales) que nos ayudan a definir los potenciales de filtración y de difusión-absorción.

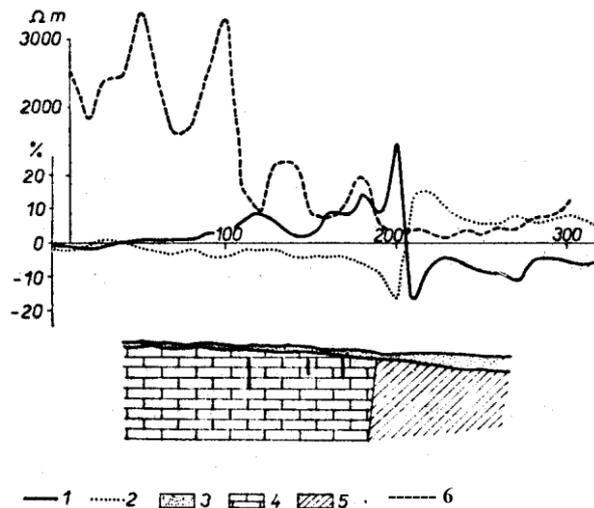


Fig.24: Aplicando el método de ondas muy largas podemos definir muy bien contactos tectónicos entre calizas y grauvacas (según Bláha, Tkaný, 1974).

La metodología de los trabajos geofísicos para el levantamiento ingeniero-geológico la podemos representar por el siguiente esquema:

- a) Mediciones paramétricas en calas, calicatas y afloramientos para definir diferencias en los parámetros físicos de tipos litológicos;
- b) Perfilaje eléctrico a lo largo de perfiles elegidos, determinando todos los tipos petrográficos y elementos estructurales que haya de investigar (fallas, zonas débiles etc.) hasta una determinada profundidad. El perfilaje eléctrico se debe complementar con otros métodos del perfilaje anteriormente mencionados (sísmico, de refracción etc.);
- c) Sondeos eléctricos verticales (SEV) a distancias definidas se aumenta la densidad de los SEV según sea necesario e investiga perfiles más cortos con un paso más denso para estudiar la estructura de interés;
- d) Carótaje sísmico (eventualmente eléctrico, gamma-gamma etc.) en calas, especialmente en los lugares de la toma de muestras para definir las correlaciones entre los parámetros físicos y geotécnicos.

Para realizar una investigación geofísica exitosa, hay que interpretar los resultados durante la investigación; esto nos dará la posibilidad de realizar mediciones complementarias, usar otros métodos geofísicos en caso de necesidad, rectificar la metodología de trabajo etc. Hay que tener en cuenta, además, los cambios meteorológicos influyentes en los parámetros de la resistividad eléctrica de las partes superficiales de la corteza terrestre.

#### IX.4. Tareas de la geofísica en la investigación del cierre

Las tareas de la geofísica para investigar el cierre son las mismas que para el embalse, sólo la escala es más detallada. Mientras que en el embalse estudiamos la estructura geológica en general, resolviendo problemas generales (posibles filtraciones a los valles vecinos, líneas tectónicas principales, fenómenos geodinámicos), en el cierre estudiamos el macizo rocoso detalladamente, poniendo atención a cada fractura, falla de orden primario o secundario, cada cambio litológico y petrográfico. Las características ingeniero-geológicas del macizo rocoso son determinadas por factores naturales y técnicos, como son:

- posición estratigráfica, estructura geológica, tectónica y composición litológica del macizo rocoso;
- estado físico-mecánico del macizo rocoso en un espacio y tiempo determinados;
- estado actual de las tensiones y deformaciones del macizo rocoso y sus cambios en el espacio y tiempo;
- permeabilidad del macizo rocoso y sus cambios provocados por la construcción de la obra y su explotación;

Para definir las características ingeniero geológicas del macizo rocoso, lo principal es determinar la estructura litológico-tectónica del macizo rocoso, definir bloques casi homogéneos desde el punto de vista geotécnico y caracterizarlos a través de sus parámetros físico-mecánicos más importantes desde el punto de vista de la construcción (fig. 25).

A partir de lo expuesto el macizo rocoso puede estar en diferentes posiciones estratigráficas, estructuras litológico-tectónicas y con diferente grados de alteración.

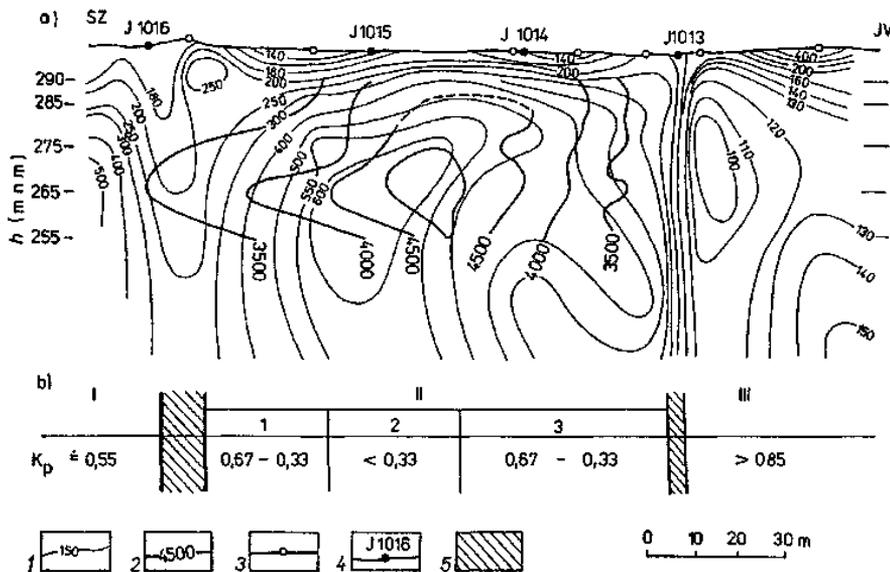


Fig. 25: División del macizo rocoso en bloques casi homogéneos a base de mediciones eléctricas (SEV) y radiaciones sísmicas entre las calas en la Hidrocentral Dalešice, República Checa (según Horsky, Müller 1974).

- 1 - isoohmas ( $\Omega m$ )
- 2 - líneas de la misma velocidad  $v_{ef}$  ( $m s^{-1}$ )
- 3 - ubicación de SEV,
- 4 - ubicación de las calas,
- 5 - fallas tectónicas.

#### IX.4.1. Macizo rocoso con rupturas y sistema de grietas muy desarrollado

Estos macizos rocosos generalmente están presentados por rocas sedimentarias duras o rocas cristalinas sanas. Para definir la estructura litológica y para definir bloques casi homogéneos por sus características ingeniero-geológicas utilizamos el conjunto de métodos geofísicos siguientes:

- a) Sísmica de refracción y mediciones microsísmicas que pueden dar buenos resultados si las grietas y rupturas están abiertas o se manifiestan con diferentes características elásticas. El drenaje del agua por estos elementos representa un factor positivo para determinar los sistemas de grietas y de rupturas existentes. Las mediciones sísmicas reflejan así las características elásticas de las zonas estudiadas y nos dan la posibilidad de calcular los parámetros dinámicos de las mismas.
- b) Métodos eléctricos que nos dan la posibilidad de definir los contactos entre diferentes zonas y aclarar su forma y dimensión. La influencia del agua intersticial y el drenaje por grietas y rupturas son factores positivos para definir los sistemas de grietas y rupturas y para evaluar orientativamente la permeabilidad y dirección del flujo (cuerpo cargado por ejemplo).
- c) Otros métodos geofísicos no utilizamos tan frecuentemente como los mencionados anteriormente, cierta información puede ofrecernos el método de ondas largas (RADIOKIP) reflejando las diferentes conductividades de las ondas emitidas por radio en rupturas y fallas tectónicas. Los métodos magnéticos podemos utilizarlos en zonas débiles, rupturas y fallas que se distingan por sus características magnéticas. Las mediciones geotérmicas nos ayudan en el análisis del movimiento del agua subterránea. También pueden ser útiles los métodos gravimétricos.

La tarea en cuestión también la podemos resolver utilizando una red detallada de SEV en combinación con el perfilaje eléctrico con dos o tres aberturas y sísmica de refracción. Muy eficaces se muestran las radiaciones sísmicas en calas y magnetometría.

Para evaluar el estado físico-mecánico del macizo rocoso, en la mayoría de los casos se usan métodos sísmicos. Para definir la alteración del macizo, podemos utilizar el coeficiente de alteración de la roca "Ca" - vea fig. 26:

$$Ca = \frac{V_{\max} - V_{is}}{V_{\max} - V_{\min}}$$

Donde:  $V_{is}$  es la velocidad „in situ“ en el lugar de la prueba  
 $V_{\max}$  es la velocidad máxima en el macizo  
 $V_{\min}$  es la velocidad mínima en el macizo

Para evaluar el grado de la alteración del macizo rocoso en forma cuantitativa, podemos utilizar la tabla siguiente (tab.8) :

Ca	Menos de 0,25	0,25-0,50	0,50-0,70	0,70-0,85	Mas de 0,85
Alteración del macizo	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta

Tab. 8 : Evaluación del grado de la alteración del macizo rocoso.

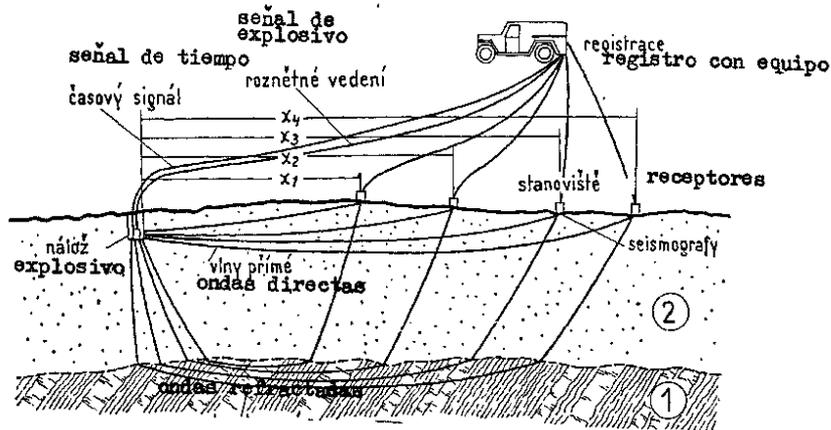


Fig.25<sup>a</sup> : Métodos geofísicos para evaluar el estado físico mecánico del macizo rocoso.

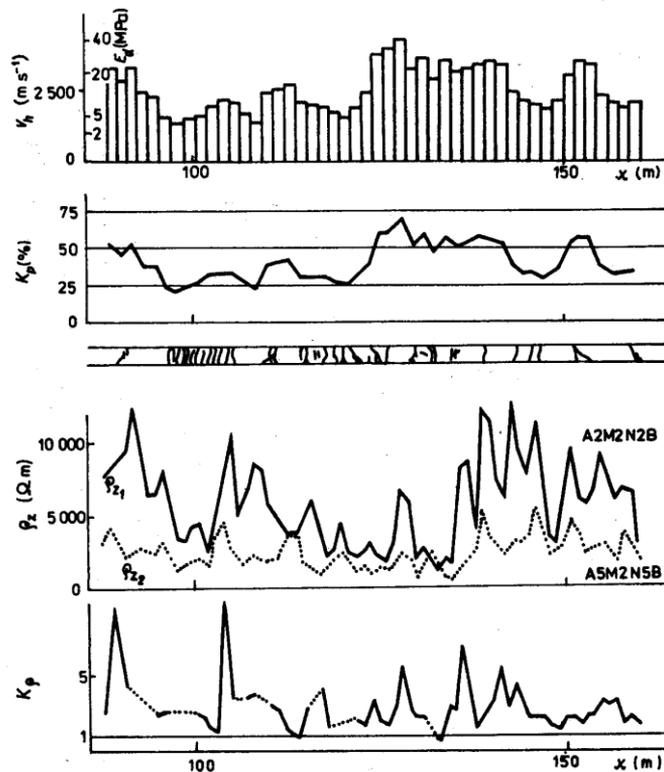


Fig. 26 : Documentación sísmica y eléctrica de la galería Viola en la CHA Hrhov en Eslovaquia, definiendo el coeficiente de la alteración de la roca  $K_p$  (Ca) y coeficiente de transmisión de la resistividad  $K$  (según Müller, Trávníček 1979).

$V_n$  – velocidad de la onda,  $E_d$  – módulos dinámicos,  $\rho_z$  – resistividad eléctrica.

El problema más serio y complicado es evaluar correctamente las tensiones naturales del macizo. Hasta ahora no existe un método conveniente para evaluarlas bien. El método de la radiación sísmica entre calas da ciertos resultados positivos y también el carotage sísmico.

Elaborando los resultados de estos métodos podemos definir las zonas de descompresión (tensiones liberadas) donde la velocidad de las ondas elásticas es muy baja, y las zonas de tensiones concentradas, donde la velocidad es máxima (vea fig. 27)

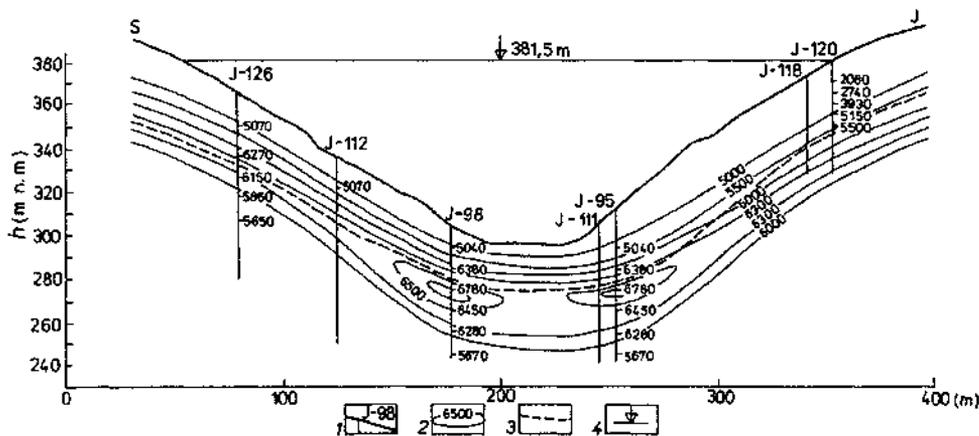


Fig.27 : Definición de las tensiones naturales en el macizo rocoso a base de radiación sísmica entre las calas en las anfibolitas en el eje de la presa Dalešice en la República Checa (según Horsky, Muller 1974)

1 - Superficie del terreno con calas; 2 — Isolíneas de las velocidades; 3 - Límite de la permeabilidad a base de inyecciones de agua; 4 - NAM.

Un estudio detallado del macizo rocoso nos facilita la metodología de la documentación geofísica de los laboreos de exploración, es decir calas, calicatas y galerías, completándola con el análisis de muestras rocosas en el laboratorio. Los métodos geofísicos más convenientes para realizar la documentación mencionada son el perfilare eléctrico de las paredes con diferentes aberturas (en la galería se documenta también el piso) y documentación sísmica. Además utilizamos otros métodos para definir la susceptibilidad magnética, intensidad de las radiaciones gamma y otros parámetros físicos.

En base a estas mediciones podemos dividir la galería en bloques casi homogéneos y relacionarlos con bloques determinados desde la superficie del terreno (fig. 28). Estos bloques son caracterizados por parámetros físicos, recomendándose en base a las mediciones, la toma de muestras para el laboratorio y ubicación de pruebas de campo.

Midiendo las velocidades de las ondas longitudinales y transversales es posible calcular los módulos dinámicos "Ed" y el coeficiente de Poisson "μ". La densidad de las rocas se define en el laboratorio o en el uso del carotage radioactivo gamma-gamma o con densímetros de campo especiales.

Para caracterizar la alteración del macizo rocoso podemos utilizar el parámetro "Relación de velocidad Qv",

$$Q_v = \frac{V_{is}}{V_{lab}} \cdot 100$$

donde Vis es la velocidad de la onda en la parte estudiada de la galería, y V lab. la velocidad en la roca compacta y sana determinada por el método ultrasónico en el laboratorio.

Según el valor del  $Q_v$  se puede evaluar cuantitativamente el estado de alteración del macizo rocoso y la calidad de la roca.

$Q_v$ %	100-90	90-75	75-50	50-25	25-0
Alteración	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Calidad de la roca	Excelente	Buena	Relativamente buena	Mala	Muy mala

Tab.9 : El estado de la alteración y de la calidad de la roca según el parámetro  $Q_v$

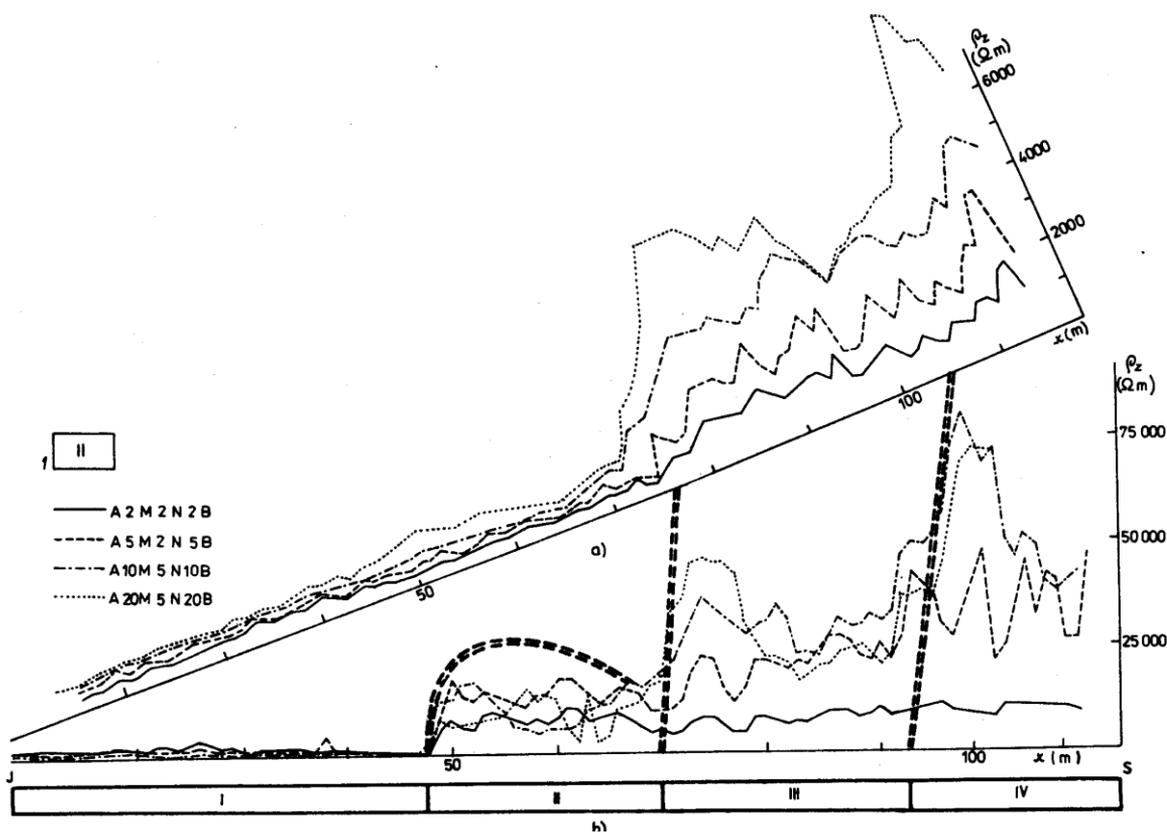


Fig.28 : Delimitación de los bloques casi homogéneos según mediciones eléctricas en la galería VIOLA en Hrhov en Eslovaquia (según Müller et al., 1976).

a – en la pendiente sobre la galería; b – en la galería.

1 – bloques casi homogéneos, I – derrumbios, II – calizas muy agrietadas, III – calizas poco agrietadas, IV – calizas con grietas provocadas por la liberación de tensiones naturales.

#### IX.4.2. Macizos rocosos poco agrietados

Las condiciones de falta relativa de agrietamiento en el macizo rocoso las encontramos generalmente en las zonas de rocas sedimentarias postorogénicas, fuera de la influencia de deformaciones contemporáneas (procesos neotectónicos, fenómenos geodinámicos), o en algunas plataformas no influidas por procesos técnicos desde la era paleozoica.

Aquí las investigaciones geofísicas son, en general, más fáciles ya que pódennos definir mejor el grado de casi homogeneidad. Los cambios en las tensiones naturales, principalmente liberación de tensiones naturales del macizo rocoso se limita en este caso al lugar mismo de la excavación. La densidad de las mediciones geofísicas puede ser menos detallada que para el macizo rocoso agrietado y suele ser más precisa y segura obteniendo conocimiento de la isotropía y anisotropía con mayor confiabilidad.

Las mediciones del estado natural de las tensiones del macizo rocoso son de la mayor importancia. Hay que estudiar las correlaciones mutuas entre las tensiones naturales y la velocidad de las ondas elásticas por la horizontal y la vertical. Estas correlaciones nos ayudan a definir la ubicación de diferentes zonas de tensiones (zonas de tensiones concentradas) y caracterizarlas con parámetros físico-mecánicos (módulos elásticos y módulos de deformación). En base a los métodos elásticos hay que estudiar bien todas las zonas débiles. Ya que las condiciones son más o menos uniformes, podemos obtener buenos resultados utilizando además métodos gravimétricos para definir cavernas y cavidades con y sin relleno, es decir formas cársticas.

La investigación geofísica en este tipo de macizo es conveniente para definir la potencia de cubierta, profundidad de rocas intemperizadas, delimitar zonas afectadas por deslizamientos, zonas agrietadas, rupturas y fallas tectónicas. La geofísica nos ayuda para ubicar correctamente los laboreos de exploración.

#### IX.4.3. Formaciones recientes poco consolidadas

Nos referimos a formaciones volcánicas, aluviales, preluviales, coluviales etc. poco consolidadas. Algunas veces encontramos estos sedimentos cementados o consolidados, teniendo carácter de rocas plásticas o frágiles con alta porosidad y poco peso volumétrico.

Las mediciones de las velocidades de las ondas sísmicas pueden ofrecer datos útiles para buscar parámetros mecánicos. Las mediciones eléctricas nos dan una idea sobre la humedad y sobre la profundidad y ubicación de los horizontes acuíferos.

Las anomalías eléctricas provocadas por horizontes acuíferos (o por capas acuíferas de diferente dimensión y desarrollo) nos dan la posibilidad de apreciar horizontes permeables o impermeables. La aplicación de métodos gravimétricos es muy difícil ya que la gravedad específica es muy variable. Los métodos magnéticos tienen sus limitaciones, pueden definir por ej. el desarrollo superficial y por la vertical de un cuerpo volcánico (capa volcánica). Los métodos eléctricos pueden definir diferentes capas y su desarrollo, si hay suficiente contraste entre sus resistividades. Además de los mencionados son muy útiles los métodos de carotaje como por ejemplo métodos nucleares (gamma, para definir capas arcillosas; gamma-gamma, para definir diferentes tipos de suelos según su peso específico; neutrón-gamma, para definir la porosidad de los materiales etc.).

El carotaje eléctrico nos ayuda a definir la estratificación, el flujo de agua y su dirección. El carotaje sísmico nos da la posibilidad de determinar los parámetros físico-mecánicos. El cuerpo cargado sirve para definir la dirección del flujo acuífero y su velocidad.

Los mejores resultados se obtienen cuando tenemos la posibilidad de combinar diferentes métodos del carotaje con los superficiales, buscando relaciones mutuas entre parámetros físicos y mecánicos.

#### IX.4.4. Macizos rocosos heterogéneos y rocas volcánicas

Son masas rocosas muy heterogéneas como por ejemplo brechas consolidadas, conglomerados, rocas volcánicas (cenizas y vidrios volcánicos), material eruptivo con las intercalaciones de lava fluida con ceniza, tobas volcánicas o hidráulicas, etc.

Los métodos a utilizar deben tener en cuenta el alto grado de heterogeneidad de los elementos estructurales. Por ello se deben aplicar redes densas de mediciones. Hay que comenzar con mediciones simples y después, a base a los resultados de estas mediciones, densificar en los lugares de necesidad. Es importante realizar principalmente tres mediciones en cada zona (capa estudiada) o, si es necesario, hasta diez mediciones y más. Estas mediciones resultan muy importantes para determinar el desarrollo de determinados complejos y para delimitar los contactos entre ellos. Es muy útil utilizar métodos estadísticos y de computación para obtener datos representativos.

Utilizando los mismos métodos como son el de la resistividad eléctrica, potenciales eléctricos, sísmica de refracción, magnético detallado, se debe aplicar una densificación de las observaciones 4 y hasta 10 veces mayor que en los macizos homogéneos.

Otros métodos como gravimetría, sísmica de reflexión y otros son de poca utilidad. Sin embargo, los métodos de la resistividad nos dan resultados suficientes sobre la estructura y composición espacial de estos materiales.

#### IX.4.5. Cambios de las características geotécnicas en el macizo rocoso en el tiempo

En la mayoría de los casos los cambios en el macizo rocoso son lentos, si los comparamos con la vida de una construcción. Sin embargo, en las pendientes abruptas o como consecuencia de procesos orogénicos, erosivos y de otros tipos, estos fenómenos provocan cambios muy importantes que pueden influir en la obra hidrotécnica (fig. 29).

La estabilidad del macizo rocoso está influida frecuentemente por las excavaciones, trabajos con explosivos o cambios de régimen hidráulico. Los trabajos mencionados pueden provocar rápidamente cambios del estado natural de las tensiones, lo que puede provocar dificultades durante la construcción de la obra como derrumbes, destrucciones en el túnel, etc.

Para pronosticar el desarrollo de estos fenómenos, podemos construir un sistema de control o de seguridad. Desde este punto de vista son útiles las mediciones repetidas de la resistividad eléctrica o las velocidades de las ondas sísmicas en calas, calicatas y galerías, que nos dan una idea sobre la intensidad de éstos procesos, como cambian las tensiones naturales, como se desarrollan las infiltraciones. De aquí podemos controlar la penetración de agentes químicos, aguas saladas, etc.

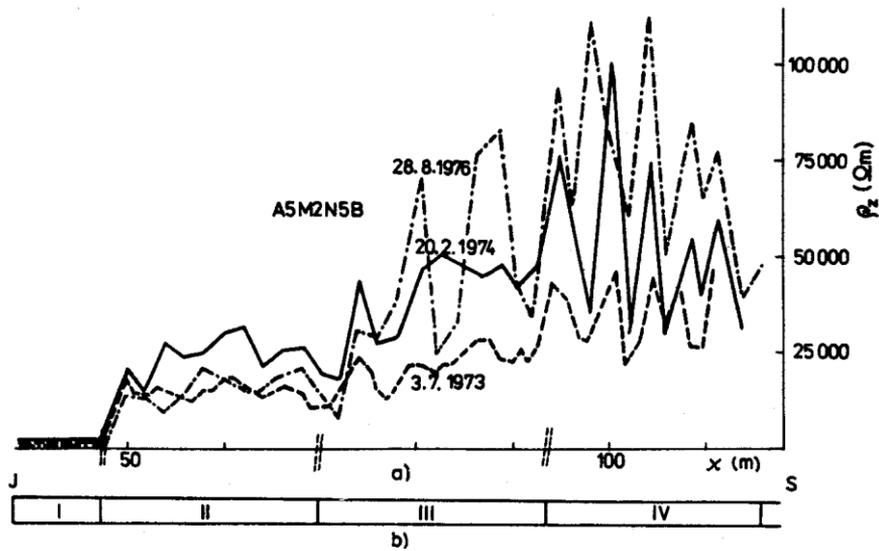


Fig. 29: Cambios de las características de la resistividad eléctrica aparente con el tiempo en la galería VIOLA en Hrhov, Eslovaquia (según Müller, Bláha, Nešvara 1976).

a) - mediciones de la resistividad repetidas; b) - bloques casi homogéneos.

Para estudiar los cambios en la deformabilidad del macizo rocoso, son muy útiles los métodos geoacústicos (estudiando la intensidad y cantidad de los impulsos en el macizo rocoso), radiación sísmica entre calas etc. (fig. 30).

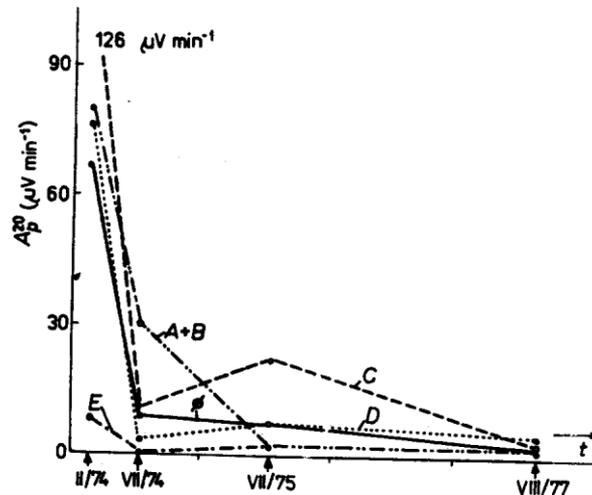


Fig.30: Cambios de la intensidad y cantidad de los impulsos geoacústicos  $A_p$  en la galería Viola en Hrhov – Eslovaquia (según Bláha, Nešvara 1978).

A, B, C, D, E – diferentes bloques casi homogéneos.

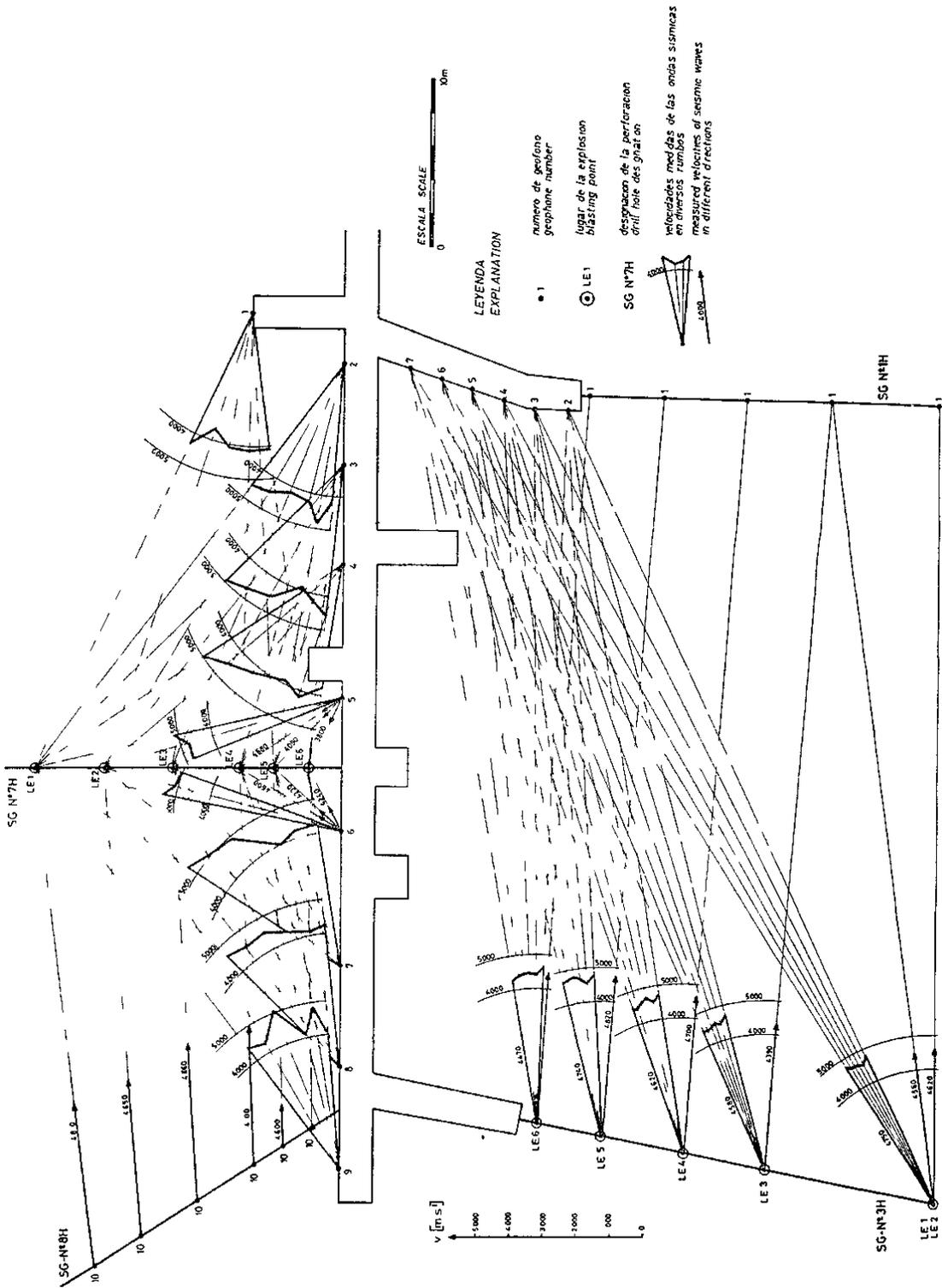


Fig.31: Medidas sísmicas entre las perforaciones en el socavón y los cruceros en la Central Hidroeléctrica de Machu Picchu (según R.Votoček, 1976).

## IX.5. Investigaciones de las deformaciones en los taludes

Una tarea muy específica, donde puede ayudarnos la geofísica, es la investigación ingeniero-geológica de derrumbes y deslizamientos. Las tareas principales son :

- b) Contornamiento de la deformación del talud en el plano y en el espacio y determinación de la zona de deslizamiento;
- c) Evaluación de las condiciones geológicas desde el punto de vista de la estabilidad del medio;
- d) Evaluación del movimiento del derrumbe, especialmente en su fase inicial;
- e) Contornamiento de los bloques deslizables y de las rupturas existentes entre ellos;
- f) Determinación de las características geotécnicas en la zona deslizable.

Para realizar esta investigación se utilizan paralelamente los métodos geofísicos superficiales y el carotaje en las calas (eventualmente documentación geofísica de calicatas y galerías) y los métodos y metodologías clásicas geológicas y morfológicas, geodésicas, foto-geométricas, trabajos explorativos, etc.

Entre los métodos eléctricos se usan principalmente el sondeo eléctrico vertical (SEV), el perfilar eléctrico (PES) y el carotaje eléctrico. Las rocas alteradas por derrumbes se caracterizan en la mayoría de los casos por presentar valores de la resistividad eléctrica grandes, comparándolos con las resistividades de las mismas rocas, pero aún sin deslizarse.

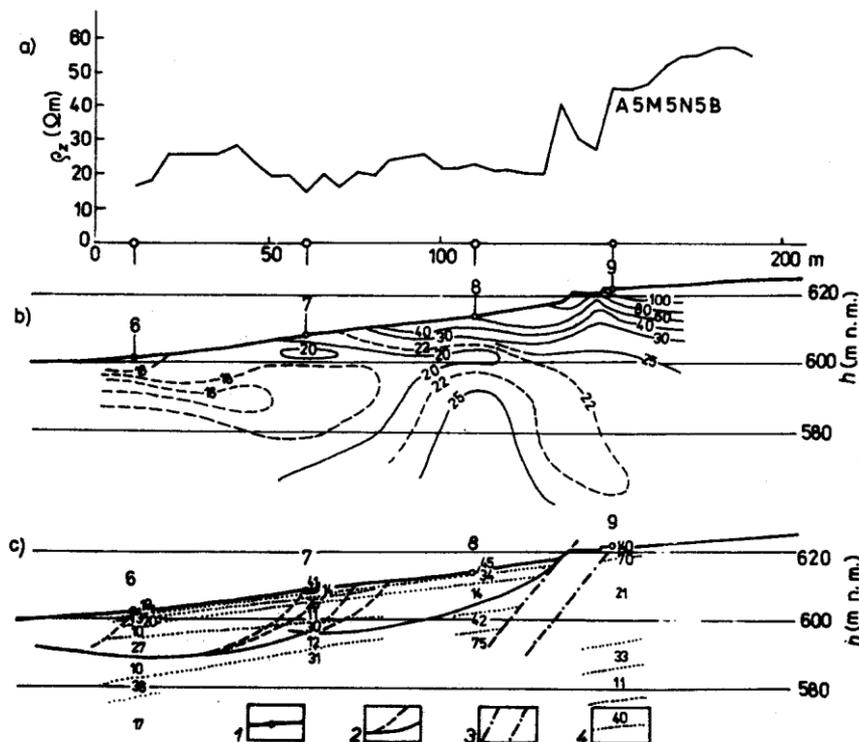


Fig. 32: Delimitación de los planos del deslizamiento en los sedimentos arcillosos del Neógeno en las orillas de la presa Orava en Eslovaquia a base del método eléctrico SEV (según Horsky – Müller, 1972).

a) perfil  $\varphi_z$ , b) perfil de isoohmas  $\Omega_m$  c) interpretación de las mediciones geofísicas; 1 - ubicación de SEV ; 2 - planos del deslizamiento; 3- fallas tectónicas; 4 - confines de la resistividad eléctrica según SEV.

Con el perfilare eléctrico es posible demarcar el área del derrumbe, limitar los bloques derrumbados y todas las grietas y rupturas surgidas. También es útil el método de la polarización espontánea, estudiando los cambios de potenciales en todo el talud deformado.

El campo eléctrico natural es más definido en las partes derrumbadas y en la zona deslizada., Usando los métodos sísmicos se utiliza ventajosamente el método sísmico de refracción. Las partes con material derrumbado se caracterizan por una disminución de las velocidades de las ondas elásticas. La misma zona de deslizamiento no es fácil determinarla con este método, pero es posible usar el método de radiación sísmica entre calas y el método de carotaje eléctrico y sísmico en calas. El método más conveniente es el geoacústico con el cual se manifiestan las zonas deslizadas por la gran cantidad de impulsos naturales de las rocas N (impulsos por minuto). Con éste método pódenos identificar bien las zonas en movimiento, realizando mediciones en calas; además es posible estudiar sus indicios, es decir los primeros movimientos de la roca después de desarrollarse la actividad del derrumbamiento y su actividad según los cambios del número de impulsos naturales (fig. 33).

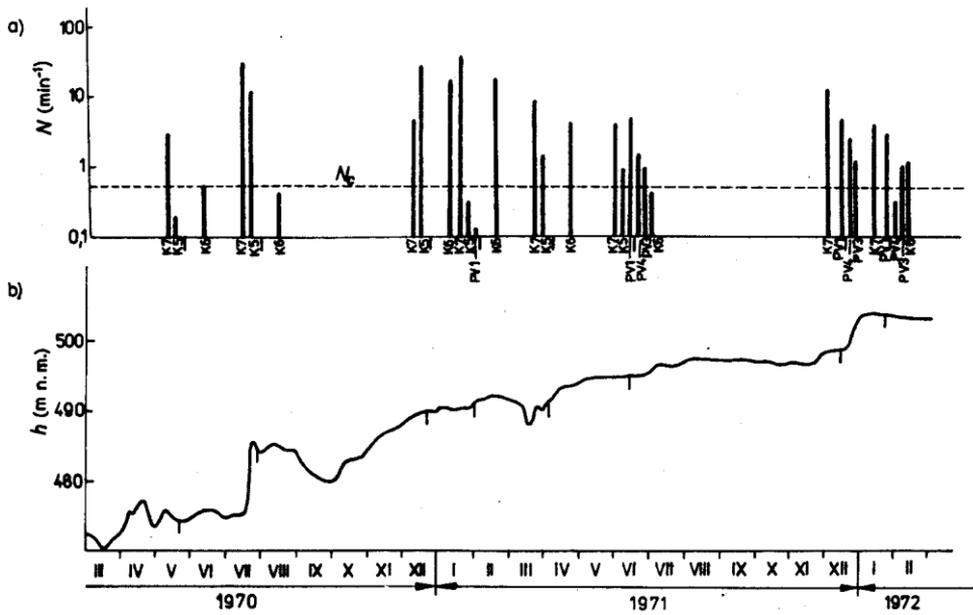


Fig.33: Actividad geoacústica en calas y calicatas en el derrumbe Sance en la República Checa ( según Novosad, 1974).

a – frecuencia de los impulsos N ( $N_c$  – límite crítico ), b – altura del agua embalsada.

Además de los métodos mencionados es posible usar para la investigación de las deformaciones de los taludes la magnetometría (derrumbe de rocas básicas y ultrabásicas), termometría (cambios de temperaturas y corrientes en las zonas derrumbadas),radiometría, carotaje, gamma-gamma, etc.

## IX.6. Estudio de la sismicidad del área

Cuando se construya en zonas afectadas por sismos, es necesario evaluar también la sismicidad del área de interés. La intensidad sísmica se expresa en la escala MCS (Mercalli-Cancali-Siebert) que tiene 12 grados según la aceleración en  $\text{cm/seg}^{-2}$ . Algunos países tienen confeccionado el mapa de sismicidad (entre ellos República Checa, Cuba y varios otros), el cual puede servir bien para tales fines.

Los métodos sísmicos, sobre todo los de vibración, es posible usarlos para evaluar influencia de las vibraciones en las construcciones, es decir fijar el límite hasta donde podemos llegar sin afectar la seguridad de la obra. Para tales fines existen varios criterios que se basan en las relaciones entre las velocidades de las oscilaciones, su frecuencia y entre la amplitud del desplazamiento y el derrumbe de las construcciones. Existen también dependencias entre la cantidad de explosiones, la longitud de onda y el grado de destrucción.

La evaluación de la actividad sísmica es muy importante ya que la propagación de las ondas sísmicas puede activar fallas tectónicas, derrumbes fósiles etc.

## IX.7. Investigación durante la construcción de obra y en su explotación

Los métodos geofísicos es posible usarlos también durante la construcción de la obra y después de terminada. En este caso se trata del empleo amplio de los métodos sísmicos y gamma-gamma, para apreciar la densidad y humedad en las construcciones de terraplenes (presa de tierra o núcleos para presas de enrocamiento).

Aquí se estudian los cambios de las velocidades de las ondas elásticas con la densidad y humedad, con el cambio de porosidad. Particularmente podemos utilizar los métodos mencionados para evaluar el asentamiento y desplazamiento de las presas de tierra o enrocamiento.

Se pueden obtener buenos resultados controlando la calidad de las cortinas de inyección con los métodos geofísicos. Para esto se utilizan los métodos de carotaje acústico, eléctrico y radiométrico.

Con el control de las construcciones de grandes obras hidrotécnicas podemos estudiar con la geofísica las infiltraciones de agua en los diques, evaluar la velocidad de la corriente del agua, estudiar los parámetros físico-mecánicos etc. Para ello usarnos los métodos superficiales (resistividad eléctrica, polarización espontánea y sísmica de refracción), en combinación con los métodos de carotaje en calas, utilizando diferentes tipos de soluciones del medio acuoso (sal, radionuclidos), colorante, cambios de la temperatura etc. Para tales fines es de gran utilidad el método del cuerpo cargado.

Midiendo las vibraciones artificiales o efectuando cargas dinámicas podemos prever las influencias de los temblores y terremotos en las construcciones hidrotécnicas. En base a estas mediciones es posible tomar medidas contra los efectos de estos fenómenos y construir un sistema de control.

Las investigaciones geoacústicas nos demuestran que las crecientes tensiones en el macizo rocoso antes de derrumbarse o fracturarse se manifiestan por el creciente número de impulsos naturales de la roca (crece la actividad acústica). Esto nos avisa de que las tensiones en la roca están acercándose al valor de tensiones en corte, lo que puede provocar la fracturación o el derrumbe. El registro de estos impulsos acústicos y su interpretación es una práctica ya corriente.

## IX.8.: Investigación del agua subterránea

Durante la investigación ingeniero-geológica nos encontramos muchas veces con el problema de verificar la profundidad de yacencia del agua subterránea y evaluar su dinámica. El nivel del horizonte acuífero es posible determinarlo estudiando los cambios de la resistividad eléctrica con el SEV, los parámetros de la polarización inducida y las velocidades de las ondas elásticas, usando sismica de refracción, con lo cual podemos estudiar el desarrollo del nivel del agua subterránea en los cuerpos de las presas y obras de tierra.

Para evaluar la dinámica del agua subterránea utilizamos los métodos superficiales de la geofísica en combinación con calas. Si el nivel del agua subterránea no está profundo, aplicamos el método del cuerpo cargado. Este método nos da la posibilidad de estudiar los cambios del campo eléctrico en los alrededores de la cala en el tiempo (si el agua es dulce, la saturamos de sal - NaCl). Es natural que este método no se puede aplicar en las proximidades de las costas donde el agua es salada. Este método en aguas dulces da buenos resultados y también es aplicable en medios permeables con agua de grietas y fisurales. Para evaluar la circulación de las aguas subterráneas a profundidades no muy grandes, es posible utilizar también el método geotérmico y el método de la polarización espontánea. Con la utilización del método geotérmico es posible diferenciar la temperatura de la roca sin agua y la de aquella influida por la temperatura de las aguas. Si el agua subterránea circula por un medio poroso o penetra por el cuerpo de la presa u otra obra de tierra, se forman potenciales de filtración los cuales podemos medir usando el método de polarización espontánea (campo natural).

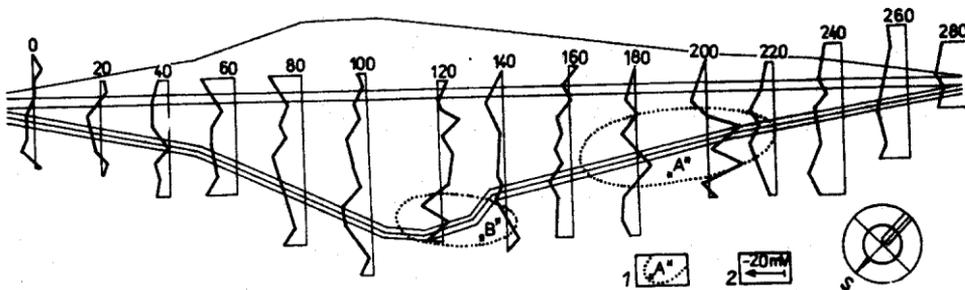


Fig. 34 : El transcurso de los potenciales de filtración y delimitación de las áreas de filtración en el eje de la presa Dolní Lístná en la República Checa (según K. Müller, 1983).

La dinámica de las aguas subterráneas se puede estudiar también con los métodos radioactivos, activando el agua con isótopos radioactivos.

Para evaluar las condiciones hidrogeológicas a mayores profundidades empleamos un complejo de métodos de carotaje. Estos métodos posibilitan estudiar la litología, presencia de capas permeables y porosas, zonas más arcillosas, dando también la oportunidad de investigar los parámetros del líquido en las calas (temperatura, transparencia del agua), dan una idea sobre la dinámica del agua, lugares de flujos y pérdidas de agua y sobre el abatimiento del agua en diferentes horizontes. Además posibilitan conocer los posibles coeficientes de filtración, velocidades de filtración e indican las direcciones del flujo. Un complemento de su absoluta necesidad es ofrecer parámetros sobre el estado técnico de la cala, es decir diámetro, inclinación etc.

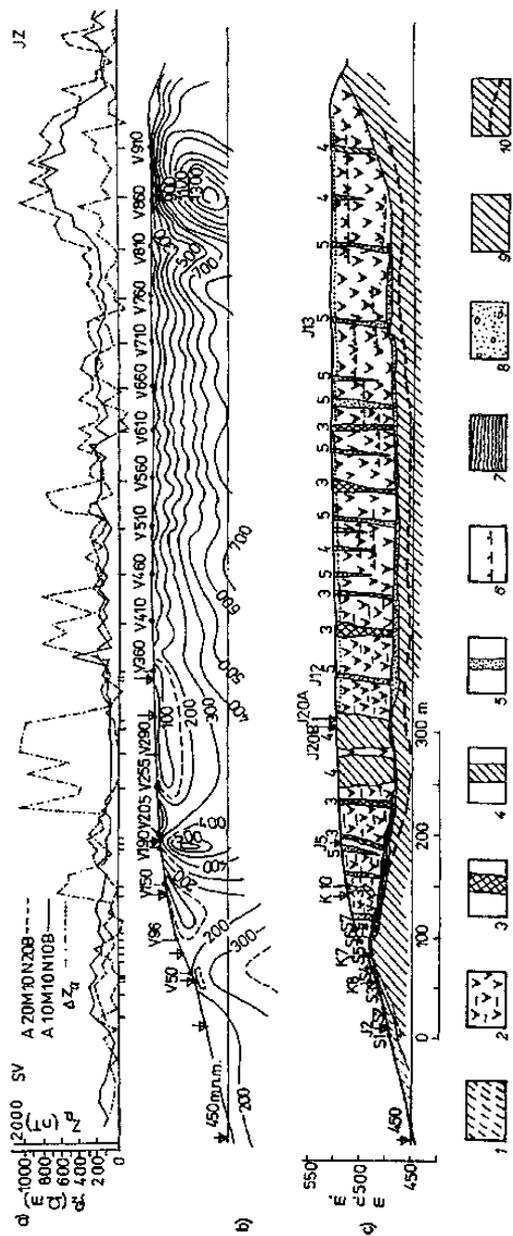


Fig. 35: La interpretación común Ingeniero-Geológica y geofísica en la presa Slezská Harta en la República Checa (según Horský, Müller, Trávníček, 1972).

METODO	PARAMETRO ESTUDIADO	ESQUEMA DEL DISPOSITIVO DE TRABAJO	EJEMPLO I	EJEMPLO II	CONVENIENTE
SISMICA SEGUN ONDAS REFRACTADAS	Velocidades de las ondas longitudinales directas y refractadas y profundidad del horizonte refractario. $V$ ms <sup>-1</sup>	SEÑAL DE TIEMPO SEÑAL DE EQUIPO SEÑAL DE EXPLOSIVO RECEPTORES ONDAS DIRECTAS ONDAS REFRACTADAS	EJEMPLO I EXPLOSIVO RECEPTORES INAM $V_1, V_2, V_3$ - diferentes velocidades	EJEMPLO II FALLA SISMICA EN GALERIA VH (ms <sup>-1</sup> ) 4000 3000 2000 1000 0 10 20 30 40 50 60 m	Para determinar contactos horizontales e inclinados entre diferentes capas. Conveniente para determinar potencia de cobertura, potencia de rocas meteorizadas, profundidad del agua subterránea. El método puede caracterizar el estado técnico de la roca. Conveniente para profundidades pequeñas.
SISMICA SEGUN ONDAS REFLECTADAS	Velocidades de ondas longitudinales y profundidades del horizonte de reflexión. $V$ ms <sup>-1</sup>	EXPLOSIVO EQUIPO RECEPTORES	EJEMPLO I EXPLOSIVO RECEPTORES INAM	EJEMPLO II FALLA SISMICA EN GALERIA VH (ms <sup>-1</sup> ) 4000 3000 2000 1000 0 10 20 30 40 50 60 m	Conveniente para buscar contactos horizontales e inclinados a mayores profundidades y cuando no es posible utilizar el método refractario. Además de determinar la profundidad de las capas, sirve para definir sus alternancias.
SISMOCAROTAGE Y RADIACIONES SISMICAS	Velocidades de ondas longitudinales y perpendiculares. $V$ ms <sup>-1</sup>	EXPLOSIVO EQUIPO RECEPTORES	EJEMPLO I EXPLOSIVO RECEPTORES INAM	EJEMPLO II FALLA SISMICA EN GALERIA VH (ms <sup>-1</sup> ) 4000 3000 2000 1000 0 10 20 30 40 50 60 m	Para determinar las velocidades de las ondas longitudinales (y perpendiculares) de diferentes capas. Posible utilizar para determinar profundidad de diferentes capas, profundidad de capas interpermeables y para calcular módulos sísmicos. Las radiaciones sísmicas nos dan la posibilidad de definir zonas debilitadas y de tensiones.

Fig.36 : Ejemplo de los métodos geofísicos para las investigaciones del cierre de Hidroconjunto .

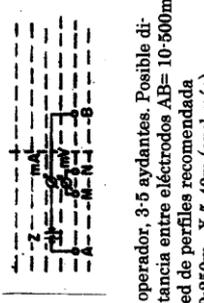
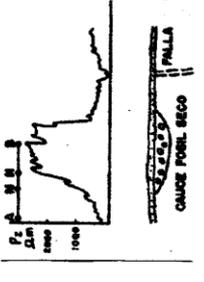
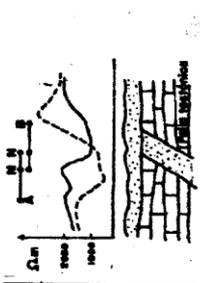
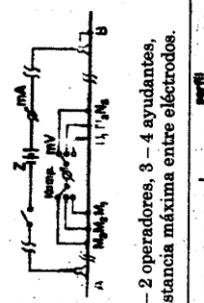
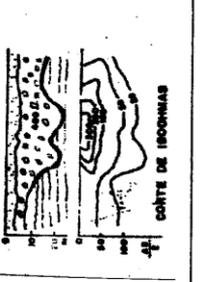
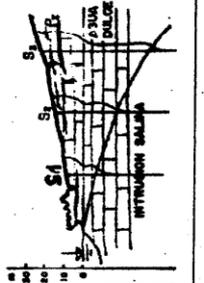
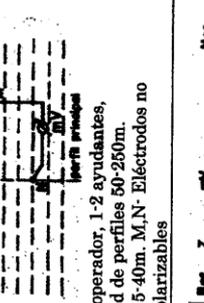
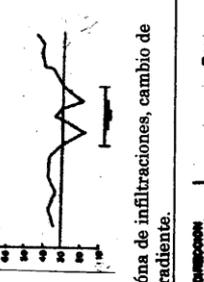
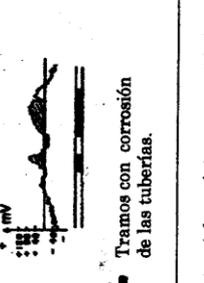
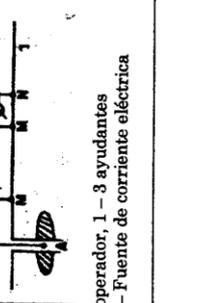
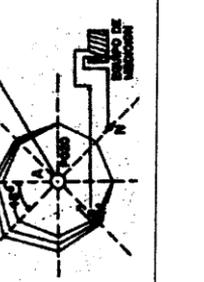
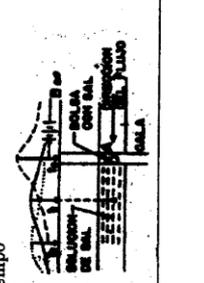
MÉTODO	PARÁMETRO ESTUDIADO	ESQUEMA DE DISPOSITIVO DE TRABAJO	EJEMPLO I	EJEMPLO II	CONVENIENTE
PERFILAJE ELÉCTRICO PE	Resistividad eléctrica aparente $\rho_a, \Omega m$	 1 operador, 3-5 ayudantes. Posible distancia entre electrodos AB= 10-500m. Red de perfiles recomendada 50-250m, X 5-40m (excl.más)			Para determinar capas conductoras y no conductoras verticales o inclinadas y los límites entre ellas, determinar fallas tectónicas, filones, contactos de diferentes bloques casi homogéneos, causas fósiles enterrados, bordes de cuencas sedimentarias, zonas débiles, agrietamientos, dirección, zonas cársicas vasías y rellenas.
SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL SEV	Resistividad eléctrica aparente $\rho_a, \Omega m$	 1 - 2 operadores, 3 - 4 ayudantes, distancia máxima entre electrodos.			Para determinar contactos entre diferentes capas, profundidad de la roca debajo de la cobertura, profundidad del intemperismo, alternancia de diferentes capas, profundidad del horizonte acuífero y del contacto entre agua dulce y salobre.
CAMPO NATURAL	Potencial del cuerpo natural V (mV) Gradiente $\Delta V (\mu V/km)$ $\Delta X m/V/m$	 1 operador, 1-2 ayudantes, red de perfiles 50-250m. X 5-40m. M,N: Electrodos no polarizables			Para determinar el campo natural del ambiente. Útil para determinar capas con contenido de grafito (pizarrae), y con la concentración de otros minerales conductores, para determinar el grado de corrosión y zonas de infiltraciones de agua.
CUERPO CARGADO	Potencial V (mV) Gradiente del potencial $\Delta V (\mu V/km)$ $\Delta X$	 1 operador, 1 - 3 ayudantes Z - Fuente de corriente eléctrica			Para demarcar cuerpos conductores. Útil para determinar lugares de infiltraciones de agua, definiendo la dirección del flujo y su velocidad. Posible demarcar así las cavidades rellenas con agua o arcilla.

Fig.36 : Continuación.

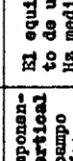
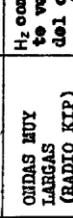
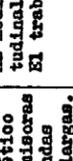
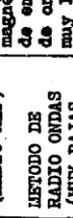
METODO	PARAMETRO ESTUDIADO	ESQUEMA DEL DISPOSITIVO DE TRABAJO	EJEMPLO I	EJEMPLO II	CONVENIENTE
ONDAS MUY LARGAS (RADIO KIP)	<p><math>H_z</math> componente vertical del campo magnético de ondas muy largas. El ángulo entre su vector fi- zual y plano horizontal.</p>	<p>El equipo de trabajo está compuesto de un receptor y antenas. Se miden en los perfiles longitudinales o en una red de perfiles. El trabajo lo hace un operador.</p>			<p>Para determinar cuerpos conductores verticales o abruptos lineales a pequeñas profundidades, como son líneas tectónicas, zonas debilitadas, contactos entre diferentes tipos petrográficos. Refleja también cuerpos conductores artificiales (líneas de transmisión de corriente eléctrica, etc.)</p>
LINEAS EQUIPOTENCIALES	<p>Líneas equipotenciales</p>	<p>Los electrodos están ubicados entre sí a 500-2000 m. puntuales o lineales.</p>			<p>Para delimitar zonas o cuerpos conductores. Nos ayuda a determinar cavidades con agua o con arcilla, filones minerales, etc. (cuerpo conductor), o cavidades vacías (cuerpo no conductor)</p>

Fig.36 : Concluye

## Capítulo X

### Documentación completa ingeniero-geológica y geotécnica de los laboreos de exploración

Los métodos de documentación de los laboreos de exploración (calas, calicatas, galerías) hacen posible llevar a cabo la correlación de las mediciones de elementos estructurales superficiales y subterráneos y con mayor exactitud construir el modelo ingeniero-geológico del lugar y brindar al ingeniero proyectista datos más confiables sobre las propiedades geotécnicas de las rocas.

La documentación clásica de los laboreos de exploración abarca la descripción geológica y petrográfica de las rocas y estructuras accesibles que dependen de la calidad de ejecución del trabajo y la experiencia práctica del ingeniero-geólogo.

Algunas veces la documentación no se puede llevar a cabo continuamente a lo largo de todo el trabajo, debido a una recuperación incompleta del núcleo o al rápido y continuo avance de los trabajos exploratorios en calicatas o galerías; pero los lugares "ciegos" hay que caracterizarlos también por datos geotécnicos, cosa esta muy importante ya que muchas veces representan los lugares más débiles, con pobre recuperación del testigo o necesidad de rápida entibación. Es por esto que recientemente se ha efectuado un desarrollo intensivo de otros métodos de documentación a través de métodos geofísicos, geodinámicos y fotográficos.

Sobre la base de nuestras investigaciones relacionadas con las exploraciones de las áreas o terrenos donde se va a construir una obra hidrotécnica se han hecho algunas conclusiones y recomendaciones debido a la compleja documentación de las aberturas mineras (calicatas, galerías) y de las calas, las que se aplican al llevar a cabo los trabajos de exploraciones para las construcciones mencionadas.

#### X.1. Documentación completa de galerías y calicatas

Estas brindan la posibilidad de estudiar en detalle la masa rocosa en las condiciones naturales de deposición. La documentación completa de estos laboreos puede dividirse en documentación geológica, geofísica, geomecánica y fotográfica.

La documentación geológica constituye el elemento básico de la documentación de la galería o de la calicata (fig.37).

Se lleva a cabo, además de la descripción, en forma de gráficos y de diagramas de bloque en los que se indican los límites petrográfico-litológicos, carácter y posición de las estructuras geológicas; grado de agrietamiento (fracturamiento o desprendimiento), grado de intemperismo y descomposición (zonas débiles) y la inclinación de todos los planos de discontinuidad mecánica (estratos, grietas etc.).

Se añade la documentación gráfica de las exploraciones con la descripción petrográfica de rocas individuales y con las mediciones de la foliación y alineamiento a lo largo del rumbo y buzamiento. Se procesan estadísticamente las cantidades medidas en diagramas estereográficos en los que se brindan datos específicos sobre las características de las discontinuidades. Sobre la base de las mediciones y descripciones efectuadas se realiza su clasificación geométrica y genética.

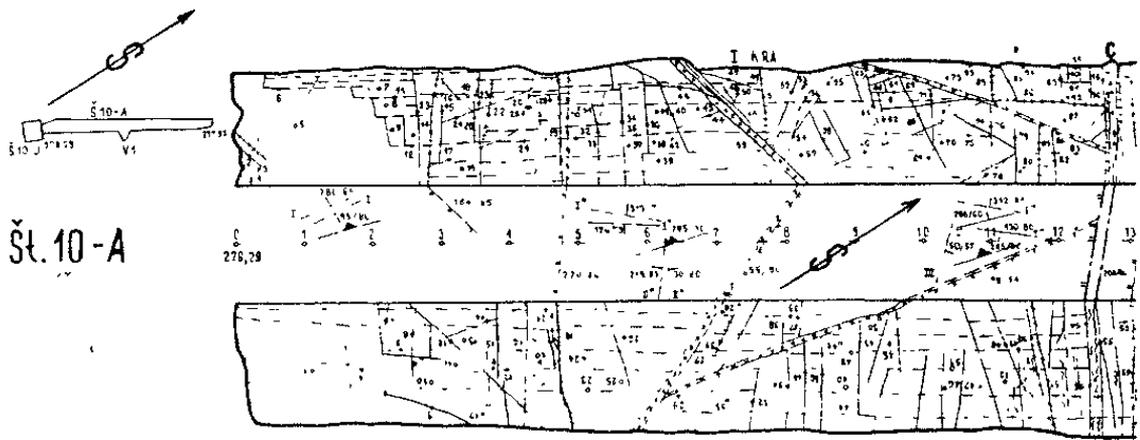


Fig. 37: Ejemplo de la documentación geológica de la galería “Št.10 A” del cierre Dalešice, República Checa (Horsky, 1970).

Clasificación geométrica - nos da la posibilidad de dividir una cantidad de sistemas de grietas en grupos característicos. La clasificación geométrica la podemos llevar a cabo por ej. a base de diferentes grados de inclinación: grietas verticales (grado de inclinación 70 - 90°), grietas abruptas (50-70°), grietas inclinadas (6 -50°) y grietas horizontales (0 - 6°). Más conveniente es dividir los sistemas de grietas según su orientación espacial relacionándolos con estratificaciones o con ejes de estructuras rugosas (por ej. el sistema longitudinal, inclinado o perpendicular a la estratificación).

Clasificación genética - el tipo genético de las grietas representa la cantidad de grietas que se formaron (surgieron) por la misma influencia geológica o tectónica (grietas litogénicas, tectónicas, exógenas etc.).

Según la norma IARM (Asociación Internacional de Mecánica de Rocas) dividimos las discontinuidades del macizo rocoso en dos grupos:

- grietas ("joints")
- fallas tectónicas ("faults").

Sí se nota un movimiento según planos de discontinuidad, hablamos sobre falla, si no se nota, hablamos sobre grieta.

El grupo de grietas representan también las estratificaciones de la roca, las foliaciones y todos los sistemas de grietas los que surgieron como consecuencia de tensiones del macizo rocoso. Las grietas pueden ser cerradas, abiertas, vacías o con relleno. Las fallas pueden acusar movimientos desde algunos kilómetros hasta centímetros o milímetros. Como producto del movimiento, las paredes presentan ranuras, espejos y material milonítico y mayormente también cierto grado de la meteorización y descomposición.

Las discontinuidades las evaluamos según los criterios siguientes :

1. Orientación espacial : esta medimos utilizando una brújula geológica. La calidad de las mediciones depende de muchos factores, como es la calidad y exactitud de la brújula, dimensión areal de la discontinuidad medida, si es llana o lisa. Además depende de las

anomalías magnéticas y del factor humano. Es suficiente medir con una exactitud de 5°. Las mediciones después las evaluamos utilizando diagramas de bloques, diagramas de rosas o utilizando la proyección estereográfica.

2. Distancia entre grietas (Spacing) : se mide como la distancia perpendicular entre las discontinuidades de un mismo sistema; la exactitud debe ser de 5 % por lo menos. La distancia entre las discontinuidades puede ser extremadamente pequeña (< 20 mm) , muy pequeña (20 - 60 mm), pequeña (60 - 200 mm), media (200 -600 mm), grande (600 - 2000 mm), muy grande (2000 - 6000 mm) y extremadamente grande (> 6000 mm).

La cantidad de discontinuidades por 1 m unitario la llamamos frecuencia de las discontinuidades.

3. Persistencia (Persistence) : caracteriza el área o tamaño (continuidad) de la discontinuidad en el plano geométrico. Este parámetro es muy importante desde el punto de vista técnico ya que puede influir por ej. en la estabilidad. Según la extensión de la discontinuidad distinguimos: Persistencia muy pequeña (<1 m) , pequeña (1 - 3 m) , media (3 - 10 m) , grande (10 - 20 m) , muy grande (> 20 m). La persistencia de las discontinuidades es muchas veces muy variable, por lo cual usamos los términos “persistente”, “parcialmente persistente” o “no persistente” sin cuantificación más detallada.

4. Rugosidad (Roughness) : se caracteriza por dos parámetros : ondulación de las discontinuidades y desigualdad del plano. Las rugosidades de los planos influyen en la dilatación del macizo y la resistencia al cortante. El grado de trituración de la roca depende de su resistencia y del grado de las tensiones que actúan. Las ondulaciones influyen en el grado del esfuerzo a cortante y pueden influir ocasionalmente en la dirección del corte.

Para medir la altura de las ondulaciones se utilizan diferentes discos estándar con diámetros de 5, 10, 20 y 40 cm y se recomienda hacer en un plano de discontinuidad 100, 75, 50 o 25 mediciones.

Se miden las diferencias entre ondulaciones y un plano geométrico idealizado. La rugosidad es posible medirla también con la ayuda de métodos fotogramétricos, construyendo después curvas de desigualdades del plano. Existen clasificaciones de rugosidad que nos dan la posibilidad de definir a base del grado de rugosidad ("Joint roughness coefficient") y a base de la resistencia de la pared de discontinuidad ("Joint wall compression strength") orientativamente la resistencia extrema.

5. La resistencia de la pared de discontinuidad ("Wall strength") : tiene importancia sólo si se refiere a discontinuidades sin relleno. Se estudia el estado de meteorización de la roca en la superficie del plano de la discontinuidad, es decir de trituración mecánica hasta desintegración química. El estado de meteorización de la pared puede ser de diferentes grados:

- I. Roca fresca, sin huellas de meteorización.
- II. Roca débilmente meteorizada (se manifiesta por el cambio de color y disminución de la resistencia).
- III. Medio meteorizada : La roca tiene localmente carácter del suelo (menos que la mitad de la superficie) .
- IV. Roca muy meteorizada : La desintegración de la roca afecta más de la mitad de la superficie.

- V. Roca descompuesta : Superficie de la discontinuidad completamente desintegrada.
- VI. Suelos : residuos.

A base de métodos muy sencillos, como son rayando con la uña o un cuchillo, descantillando con un martillo etc., se aprecia orientativamente la resistencia de la pared.

En la tabla se dan también los valores de la resistencia axial.

Si queremos apreciar la resistencia de la pared con un método más preciso usamos el martillo de Schmidt (se mide la altura del rechazo del martillo después del golpe) .

Existen gráficos (correlaciones) entre el rechazo del martillo, el peso volumétrico de la roca y su resistencia. Otros gráficos nos dan la posibilidad de apreciar orientativamente en dependencia del rechazo del martillo los módulos de deformación.

6. La abertura (Aperture) de las grietas se define como la distancia perpendicular entre las paredes de los diferentes bloques vecinos. El espacio entre bloques se puede encontrar vacío o relleno con agua.

Si el espacio de la abertura lleva relleno de diferentes materiales rocosos (u otros) es necesario referirse al ancho de la misma.

División de las discontinuidades según el ancho de la abertura		
Ancho de la abertura	Descripción	Carácter
Menor de 0,10 mm	Completamente cerradas	Discontinuidades cerradas (closed)
0,10 – 0,25 mm	Cerradas	
0,25 – 0,50 mm	Parcialmente abiertas	Discontinuidades medio abiertas ( gapped)
0,50 – 2,50 mm	Abiertas	
2,50 – 5,00 mm	Medio abiertas	
5,00 – 10,0 mm	Ampliamente abiertas	Discontinuidades abiertas (open)
1,00 – 10,0 cm	Muy abiertas	
10,0 – 100 cm	Cavernas	

Tab.10 : División de las discontinuidades según el ancho de la abertura.

7. Relleno (Filling) : se refiere del material el que rellena todo el espacio de la discontinuidad definida. Este elemento es muy importante, ya que el comportamiento de estas discontinuidades depende del carácter del relleno. Por esta razón se estudian: Composición mineralógica, granulometría, tamaño de granos (partículas), grado de consolidación del relleno, volumen o contenido del agua, permeabilidad, grado de hinchamiento, señales de movimientos, ancho de relleno, señales de trituración en las paredes de la discontinuidad etc. El grado de información se puede obtener a base de pruebas de laboratorio, especialmente si se refiere a rellenos volumétricamente inestables.

Al apreciar el tamaño de los granos dentro del relleno, se recomienda utilizar la siguiente escala: Bloques de piedra (200 - 600 mm) , guijarros y piedras (60 - 200 mm) , grava gruesa (20 - 60 mm), grava medio gruesa (6 - 20 mm) , grava fina (2 - 6 mm) , arena gruesa (0,6 - 2 mm) , arena medio gruesa (0,2 - 0,6 mm) , arena fina (0,06 - 0,2 mm), arcilla, polvo (menor de 0,06 mm) .

El contenido de agua y la permeabilidad se aprecian según la escala:

$W_1$  - el material del relleno es consolidado, seco, las infiltraciones son poco probables por ser el material poco permeable;

$W_2$  - el material del relleno es humedecido, no hay señales de presencia de agua libre;

$W_3$  - el material del relleno es húmedo, se notan gotas de agua;

$W_4$  - el relleno es inestable, el agua provoca difusión del material, las infiltraciones se estiman en l/min;

$W_5$  - dentro del relleno se notan vías libres por donde circula el agua, se nota también una cierta presión del agua;

$W_6$  - se nota gran presión del agua, relleno completamente erosionado (sufusionado).

La descripción del relleno abarca su anchura, rugosidad, composición mineralógica, tamaño de las partículas, el grado de meteorización, hinchamiento, estimación de la resistencia (según escala  $R_1 - R_6$  de tabla 15), grado de consolidación, estimación del grado de permeabilidad según la escala antes mencionada ( $W_1 - W_6$ ) con datos orientativos sobre las infiltraciones.

8. Permeabilidad (Seepage) : Se distingue permeabilidad primaria de matriz rocosa y la secundaria por las discontinuidades. Las clasificaciones actuales distinguen:

- a) discontinuidades sin relleno , b) discontinuidades con relleno, c) macizo rocoso en general.

Las discontinuidades sin relleno se agrupan en 6 clases:

I - completamente cerradas, secas, sin posibilidades de infiltraciones ;

II - secas, sin notar infiltraciones;

III - secas, pero se notan señales de infiltraciones anteriores, p. ej. manchas de óxidos etc.;

IV - discontinuidades humedecidas, no se nota agua libre;

V - se notan infiltraciones, pero el flujo no es continuo;

VI - flujo continuo, hay que evaluar la cantidad y la presión del agua.

Las discontinuidades con relleno las clasificamos ya en el punto 7 con los índices  $W_1 - W_6$ .

El macizo rocoso (la matriz rocosa), por ejemplo en las paredes de túneles, se evalúa por cinco categorías:

I - Paredes y techo secos, sin señales de infiltración;

II - Pequeñas infiltraciones, algunas gotas de agua se notan según las discontinuidades;

III - Infiltraciones medias, por algunas discontinuidades hay flujo continuo;

IV - gran infiltración, por algunas discontinuidades pasa mucha agua;

V - Infiltraciones extraordinarias.

Las categorías (clases) III hasta V se caracterizan por infiltraciones en litros por un tramo de 10 m del túnel.

9. La cantidad de sistemas de discontinuidades (Number of sets) : Influyen directamente en la estabilidad de los taludes, excavación de túneles, construcción de obras subterráneas y obras hidrotécnicas etc. Se utiliza una clasificación que tiene 9 clases: Clase I caracteriza un

macizo compacto con discontinuidades ocasionales, clase IX representa un macizo rocoso que tiene ya carácter de suelo. Las clases II, IV y VI las podemos caracterizar por uno, dos o tres sistemas regulares, las clases III, V y VII representan macizos con las cantidades de sistemas regulares antes mencionados y con otros sistemas irregulares. El grado VIII representa un macizo con cuatro y más sistemas regulares.

10. Índice de bloques (Block size) : Representa el tamaño de los bloques separados por las grietas. Se aprecia también la forma de los bloques. El tamaño de los bloques se evalúa por el índice  $J_V$  (Volumetric joint count), es decir, representa la cantidad de discontinuidades en  $1 \text{ m}^3$  del macizo. Si  $J_V$  es menor que 1 = bloques muy grandes,  $J_V 1 - 3 =$  bloques grandes,  $J_V 3 - 10 =$  bloques medios,  $J_V 10 - 30 =$  bloques pequeños,  $J_V$  mayor de 30 = bloques muy pequeños y  $J_V$  mayor de 60 = roca triturada.

Existen ecuaciones para calcular el índice de bloques exactamente (p. ej. en Rusia) y existen clasificaciones que nos dan la posibilidad de evaluar en base al índice de bloques y en base al índice de agrietamiento otras características como el coeficiente de permeabilidad, módulos etc.

El macizo rocoso se supone como masivo si se notan algunas discontinuidades con una distancia grande entre ellas; el macizo tiene carácter de bloque si está dividido por discontinuidades en tres direcciones con casi igual distancia entre si; si la distancia entre grietas de una dirección es pequeña y otras dos la tienen grande, se habla de un macizo tabular, si al contrario la distancia entre grietas de dos direcciones es pequeña y la tercera la tiene grande, hablamos sobre un macizo columnar. Si hay variación entre las distancias de diferentes sistemas, hablamos de una separación de grietas irregular. Si el macizo tiene un carácter muy agrietado con grietas muy cercanas (carácter de cubos pequeños), hablamos de un macizo triturado. Si el macizo rocoso tiene el carácter de tamaño de los bloques lo podemos apreciar también a base de la documentación de la recuperación obtenida en las calas según el parámetro RQD.

Actualmente para la documentación de estos factores se usan letras o números antes mencionados (p.ej.  $W_1 - W_6$ , I - VI etc.) , lo que rinde una gran racionalización del trabajo.

Además de la documentación geológica mencionada llevamos a cabo la documentación geofísica de las galerías y de las calicatas, la que nos da la posibilidad de estudiar más detalladamente el macizo rocoso.

Los métodos geoelectricos y sísmicos resultan los más eficaces cuando es necesario determinar fundamentalmente el estado fisico-mecánico de las rocas afectadas por el trabajo minero.

<b>Intervalo cm</b>	<b>Símbolo L</b>	<b>Diaclasas</b>	<b>Estratificación y foliación</b>
Menor de 6	L 5	Muy próximas	Muy delgadas
6 - 20	L 4	Próximas	Delgadas
20 - 60	L 3	Moderado próximas	Medias
60 - 200	L 2	Separadas	Gruesas
Mayor de 200	L 1	Muy separadas	Muy gruesas

Tab. 11 : Espaciamiento de diaclasas, estratificación y foliación de las rocas.

Como el método básico se recomienda el de perfiles de resistividad, o sea mediciones de la resistencia aparente de las paredes y pisos de las galerías con electrodos de presión o penetrados con cercanos intervalos de perfiles. Este método permite demarcar los límites litológico-petrográficos y especialmente las zonas debilitadas por la acción mecánica que se caracterizan por su marcada reducción de la resistencia aparente. El método de perfiles de resistencia permite extender los datos geológicos obtenidos al espacio, o sea debajo del suelo de la galería y por los lados hasta una distancia correspondiente a la profundidad de la penetración de las ondas eléctricas.

El método de perfilaje de resistencia puede ser útil para la documentación de las calicatas donde es necesario realizar estas mediciones en las paredes interiores de las mismas con una correcta colocación de los electrodos.

Utilizando el método de perfilaje eléctrico en la galería podemos expresar con el coeficiente de cambio de resistividad  $K\rho$  la alteración del macizo rocoso alrededor de la galería:

$$K\rho = \frac{\rho_z 1}{\rho_z 2}$$

donde los índices 1 y 2 representan un alcance de las ondas eléctricas.

Si  $K\rho$  es menor de 1, se refiere de la alteración del macizo rocoso por el sistema de grietas abiertas, sin relleno e sin agua.

Si  $K\rho \cong 1$  y los valores absolutos de  $\rho_z$  son pequeños, se refiere del área de la alteración crítica, si  $K\rho$  es mayor de 1, se refiere del macizo relativamente compacto.

Queda claro que hay que apreciar, además, los valores absolutos de la resistencia eléctrica.

Las mediciones sísmicas en las galerías y calicates tienen básicamente dos modificaciones :

1 - El método de sondaje y perfilaje sísmico refractorio midiendo la velocidad de la onda limitante  $V_h$  en la línea de frontera entre la zona influenciada y la que no lo está.

Las velocidades limitantes en la superficie de la zona no influenciada pueden caracterizar mejor el estado mecánico de la masa rocosa. Partiendo de la determinación de las velocidades de las ondas transversales y longitudinales y del conocimiento de la densidad de las rocas es posible entonces derivar el valor del módulo dinámico de elasticidad  $E_d$  del perfil de la galería exploratoria.

2 - La medición de la velocidad de onda aparente  $V_z$  (método de perfilaje sísmico a lo largo del piso y paredes de la galería, mientras la fuente de la propagación de onda es guardada a una distancia constante del geofono). Este método durante el perfilaje cerrado hace posible registrar todo cambio instantáneo en la velocidad de onda y delimita todas las zonas de debilidad mecánica, contactos petrográficos y planos tectónicos.

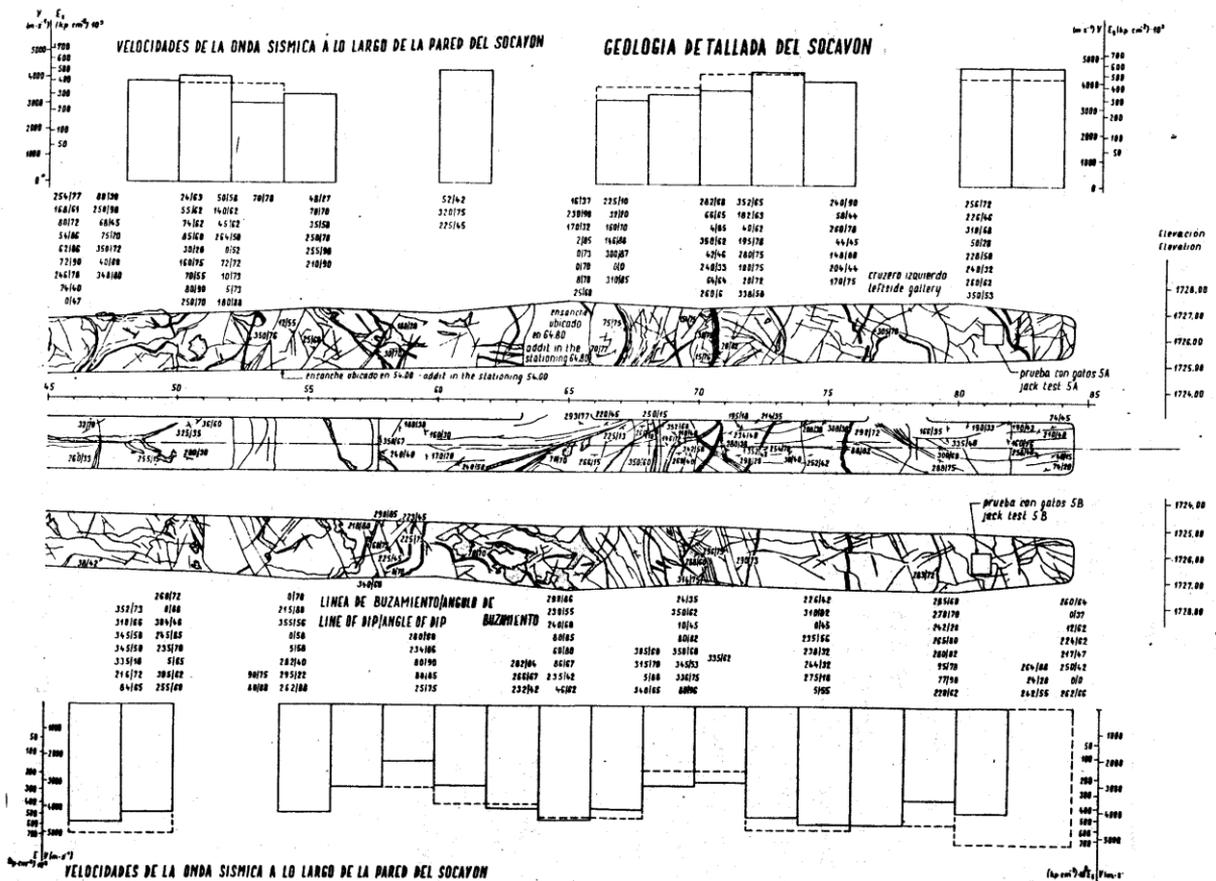


Fig.36: Documentación geológica y geotécnica de la galería en la Hidrocentral Machu Picchu. (según K.Drozd, 1976).

La documentación sísmica de pozos de exploración está basada principalmente en el segundo método de medida, i.e. observación de la velocidad de onda aparente  $V$  a lo largo de las paredes de las calicatas.

La documentación geofísica básica, es decir métodos sísmicos y de resistividad, puede complementarse con mediciones de susceptibilidad magnética ( $K$ ) y con el método de rayos gamma-gamma a lo largo de las paredes, piso y techo de las galerías. Estas mediciones detalladas de chequeo, por ser muy simples, ofrecen al especialista que realiza la exploración ingeniero-geológica datos complementarios.

De acuerdo a los cambios de susceptibilidad magnética es posible distinguir las rocas acidas de las básicas, delimitar zonas de tensión tectónica con una alta cantidad de minerales ferromagnéticos etc. De nuevo, según los cambios del coeficiente o de los rayos gamma es posible diferenciar rocas acidas de las básicas, demarcar zonas intemperizadas y determinar alteraciones tectónicas rellenas con arcilla.

En galerías exploratorias es posible conducir (utilizar) una serie de mediciones geofísicas además de las mencionadas bajo condiciones geológicas típicas. Se pueden incluir unos cuantos métodos geoelectrónicos, i. e. polarización espontánea e inducida, métodos electromagnéticos, termales, gravimétricos y radiométricos, i. e. gamma-gamma, neutrón-gamma, métodos de emanación etc.

Por el análisis de  $\rho_z$ ,  $V_z$ ,  $V_h$ ,  $K$  e  $I$  es posible dividir la galería documentada o la calicata en bloques físicos cuasi homogéneos y determinar los parámetros físicos más destacables de los

bloques individuales.

También la documentación geofísica permite al investigador escoger la muestra más representativa para el análisis de laboratorio y el lugar para la determinación de parámetros mecánicos in situ.

El espesor de la zona de influencia alrededor de la galería se puede determinar utilizando métodos geofísicos microsísmicos, ya que la velocidad de la onda sísmica  $V$  está influida por liberación de las tensiones naturales alrededor de la galería (surgen grietas nuevas, se abren más las existentes etc.). Obtuvimos algunos resultados positivos utilizando métodos de resistividad eléctrica, gamma - gammamétrica  $\alpha$  y de medición acústica. Además de la posibilidad de verificar las zonas de inestabilidad y de tensiones liberadas tenemos la posibilidad de definir - utilizando los mismos métodos - la zona de tensiones concentradas, la que se produce alrededor de la galería excavada y sirve como arco natural muy importante.

Comparando los resultados de las mediciones geofísicas en galería con las pruebas del campo (pruebas de placas) podemos precisar más módulos de deformaciones y ampliar los resultados a todo el macizo rocoso.

El perfilare geomecánico se obtiene de la rápida determinación de las propiedades de resistencia y elasticidad de las rocas según el duroscopecio y el martillo de Schmidt.

El perfilaje mecánico está basado en la combinación apropiada de los ensayos in situ y de laboratorio de las rocas. La resistencia a la compresión axial se determina rápidamente con el martillo de Schmidt y sus características se chequean comparando los valores de rechazo con los resultados de los ensayos de laboratorio de compresión axial.

Los trabajos investigativos fueron ejecutados para la transformación de los resultados del chequeo de los ensayos in situ y luego aplicarlos al total de la masa rocosa. Estos trabajos permiten al investigador determinar la influencia del estado físico y de deformación de las masas rocosas y las características de compresibilidad de las rocas. El resultado es la transformación de la envolvente de Mohr para las rocas; una envolvente para las masas rocosas tiene una gran influencia en la transformación que se expresa en términos del número específico de grietas. (Vea fig. 39)

La documentación geológico geofísica y geomecánica de galerías se complementa propiamente con fotoperfilaje de las mismas lo que permite recoger ordenada y objetivamente todos los elementos documentados del perfil de las galerías, especialmente el carácter de la estructura geológica. La fotodocumentación es especialmente importante para la determinación del número específico de grietas en las zonas individuales del perfilare mecánico.

Al fin podemos definir tareas básicas las que podemos resolver haciendo documentación de las galerías con el conjunto de los métodos mencionados. Estos métodos nos ayudan a :

- a) determinar características petrográficas de la estructura geológica determinada;
- b) dividir el macizo rocoso a bloques casi homogéneos, definiendo además el carácter del contacto entre los mismos;
- c) caracterizar contactos entre bloques casi homogéneos por sus características físico-mecánicas;
- d) en bloques casi homogéneos determinar el grado de la alteración del macizo rocoso;
- e) estudiar diferentes zonas de tensiones alrededor de la galería (o calicata) excavada y seguir desarrollo de sus cambios por el tiempo.

KOMPLEXNÍ DOKUMENTACE ŠTOLY ŠT 14

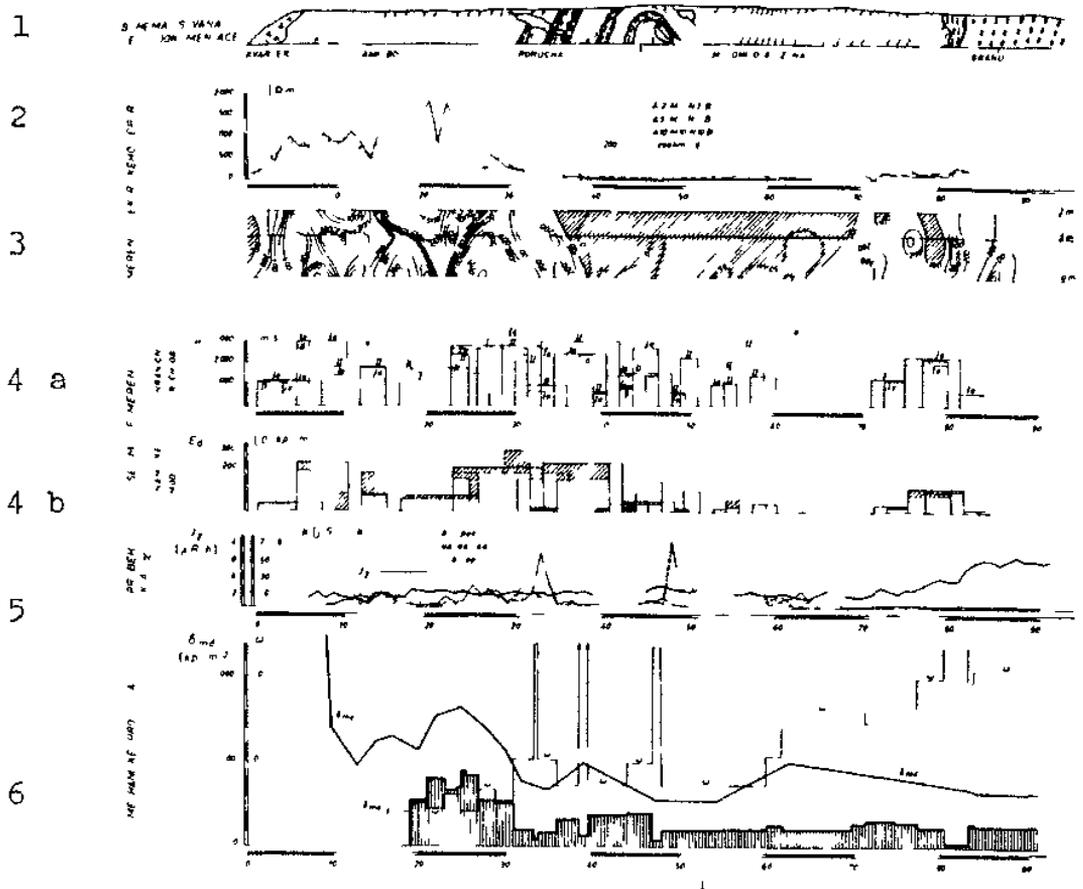


Fig. 39: Ejemplo de la documentación completa de una galería en el eje de la presa Dalesice, República Checa, utilizando métodos de la documentación geológica, geofísica y geotécnica (según Horský, Müller, 1973).

Leyenda :

- 1 - Documentación geológica esquemática : Cuaternario, anfíbolitas, dislocación L, zona milonítica, granulitas;
- 2 - Medición de la resistencia eléctrica
- 3 - Isolíneas de resistencia (isohmios)
- 4 - Mediciones sísmicas : a) velocidades límites, b) módulos dinámicos
- 5 - Transcurso de "K" : junto al piso, en el centro, junto al techo y de J
- 6 - Perfilaje mecánico

Para cumplir estos fines definidos, se recomienda el siguiente esquema de trabajo:

- a) Documentación geológica gráfica y textual (clásica) del piso y de las paredes de la galería (calicata), con mediciones de las grietas y de todas las no homogeneidades (discontinuidades);
- b) Fotodocumentación de las paredes (del piso y del techo si es necesario);
- c) Documentación geofísica de las paredes y del piso, utilizando métodos de perfilaje

eléctrico, perfilaje y sondas de la sísmica de refracción y mediciones gamma-gammamétricas, capamétricas (susceptibilidad magnética), perfilaje microgravimétrico (especialmente en el censo), además mediciones térmicas, gamma-gamma, neutron-gammamétricas en las calas cortas (1 m) hechas dentro de la galería.

- d) Documentación geomecánica, utilizando métodos rápidos del perfilaje mecánico mencionado y pruebas del campo (placas, cortante) .

## X.2. Documentación de pozos de exploración

Es posible realizar una documentación compleja de pozos rotarios similar a la de las galerías.

La descripción geológica de los pozos de exploración comienza con la descripción litológica de los mismos con atención especial en los alineamientos y exfoliación. El testigo recuperado es también un factor importante como índice cualitativo de la fracturación mecánica de las partes de las masas de rocas perforadas. En años recientes la medición del tamaño del fragmento mayor del testigo ha sido abandonada porque el índice RQD ofrece una idea más objetiva de la fracturación de la masa rocosa. Este es la relación del largo total de los fragmentos del testigo (mayores de 10 cm) y el largo total de la parte evaluada de la cala, expresada en tantos por ciento.

La documentación geofísica de las calas mediante métodos individuales de registro, acerca de los cuales son más importantes los acústicos, geoelectrónicos y radiométricos. Estos métodos son complementados con el registro de desviación del agujero y la calibración del circuito cerrado (cavernometría) para una determinación precisa de la forma del pozo.

Para los propósitos ingeniero-geológicos entre los métodos acústicos el más utilizado es el registro ultrasónico en el cual la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales es medida a lo largo de las paredes del pozo.

Del cambio de la velocidad de las ondas es posible detectar el tipo de roca desde el punto de vista petrográfico así como las zonas de debilidad en el perfil de la cala. Con el conocimiento de la densidad de las rocas y los valores de la velocidad de onda es posible calcular el módulo dinámico de elasticidad  $E_d$ . El registro eléctrico es usado en forma de registro de resistividad cuando la resistividad aparente de las rocas debe ser determinada y entonces en forma de microregistro a lo largo de la pared de la cala. Para la determinación de horizontes porosos y permeables los métodos utilizables de registro son el método de la polarización espontánea y el método de la infusión y dilución. Para los propósitos ingeniero-geológicos han probado su eficiencia los métodos radiométricos gamma-gamma, para la determinación de los cambios de densidad de las masas rocosas y el registro gamma para la detección de rocas con un alto contenido de elementos radioactivos y zonas con contenido alto de arcilla. Es posible usar otros métodos especiales de registro para solucionar problemas especiales de ingeniería geológica e hidrogeología.

El perfilaje geomecánico puede ser obtenido por las muestras de los testigos de calas tal como se hace en el caso de las paredes de las galerías. Los ensayos de compresión de los testigos son hechos por prensas de campo. Los parámetros obtenidos de estos ensayos son la resistencia a la compresión axial  $\sigma_d$ , tomando en cuenta el grado de agrietamiento, la compresión axial reducida  $\sigma_{red}$ , los módulos estáticos  $E_s$  y de deformación  $M_o$  al momento de la fracturación.

Los métodos de registro mecánicos son muy útiles para la documentación mecánica de las calas de exploración. Esto está esencialmente basado en el registro complejo de la relación de

la perforación, los parámetros tecnológicos de la perforación y del rango de uso de las partes laborantes de las herramientas individuales de perforación.

El resultado del registro mecánico es un registro continuo de la compresión reducida  $\sigma_{rd}$ , lo cual es la caracterización del parámetro de la compresión-deformación compleja que caracteriza el estado mecánico de la masa de roca perforada.

Equivalente a la fotodocumentación de las galerías es el examen y fotografía de las paredes de las calas a través del periscopio de calas y tomando fotografías de las paredes con una cámara de televisión.

En los años pasados se han obtenido en la República Checa buenos resultados con estos métodos para la solución de problemas ingeniero-geológicos e hidrogeológicos.

El carotaje de las calas y el perfilare mecánico hay que complementarlos con ensayos de laboratorio de muestras representativas. Generalmente hay que estudiar la densidad de las muestras, velocidad de ondas y coeficiente de reflexión, la resistencia axial etc. Han sido encontradas buenas relaciones entre resultados de las pruebas del laboratorio, del carotaje, del perfilare mecánico y del registro mecánico.

La experiencia de la exploración ingeniero-geológica actual de los grandes trabajos hidrotécnicos muestra que sólo el método de documentación compleja de los trabajos exploratorios puede rendir resultados objetivos para la correcta interpretación de sus condiciones geológicas. Es obviamente importante llevar adelante investigaciones ulteriores para encontrar la relación mutua entre las propiedades físico-mecánicas de las rocas determinadas in situ y en el laboratorio para la posible combinación mutua de métodos como una ayuda para aportar al proyectista los parámetros más reales sobre la base de métodos óptimos de investigación de las propiedades geotécnicas de las masas de rocas. (Vea fig. 40).

La descripción correcta del macizo rocoso en los laboreos de exploración debe tener generalmente :

- a) el nombre de la roca con su descripción geológica;
- b) características estructurales del macizo rocoso, como carácter de estabilización, de desmembramiento ( índice de bloques) y de agrietamiento;
- c) características mecánicas del macizo, resistencia axial de la roca y ángulo de fricción interna de las discontinuidades especialmente.

El nombre de la roca y su descripción geológica nos da la primera información sobre el carácter mecánico del ambiente.

Los parámetros de estratificación, de fracturación y agrietamiento son muy importantes ya que nos dan una idea sobre:

- a) comportamiento mecánico del macizo rocoso;
- b) relación de estos parámetros con aspectos morfológicos básicos.

La valorización estadística de estos parámetros es fácil (véa párrafo XI.2) y sirve como la base.

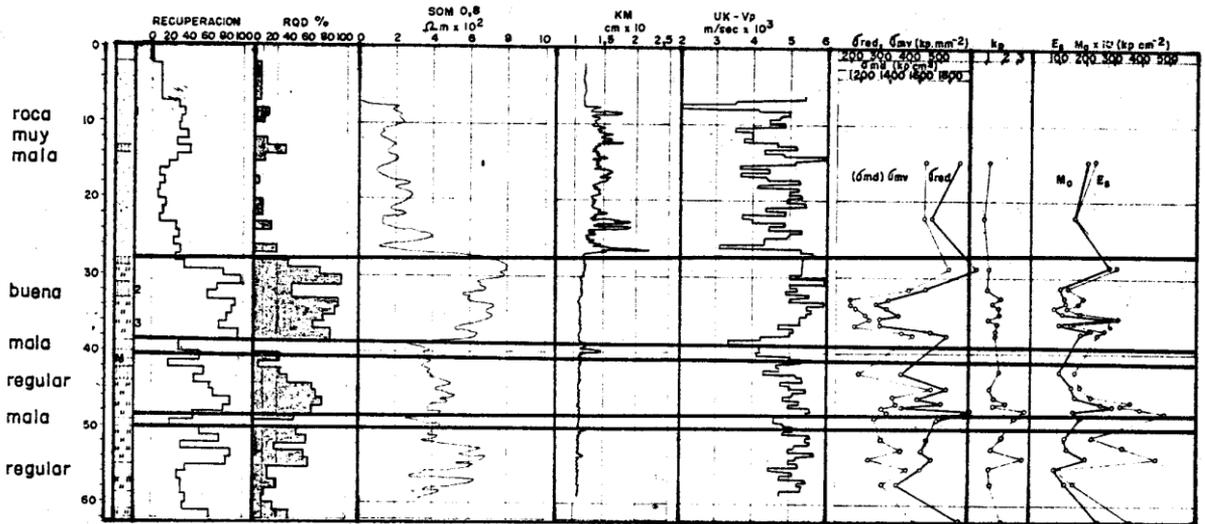


Fig.40: La documentación geológica y geotécnica de la cala rotaria J-1016 en la presa Dalešice en la República Checa.(Según O.Horsky – V.Valter, 1970).

1 – roca mecánicamente triturada, localmente químicamente alterada, 2 – roca mecánicamente triturada, 3 – roca no alterada, de buena calidad, RQD – Índice de Calidad de Roca, SOM – resistividad aparente, KM – cavernometría, UK – ultracarotaje,  $\sigma$  - resistencia simple,  $K_p$  – resistencia por método de Schreiner,  $E_s$ ,  $M_0$  – módulos.

Caracterizar parámetros de resistencia y de ángulos de fricción es muy importante ya que éstos ejercen un rol básico en el comportamiento del macizo rocoso, además a base de estas características es posible derivar ostentativamente otros aspectos inportantes del macizo rocoso y nos sirven además para precisar la descripción geológica antes mencionada.

La roca tiene su nombre según la composición mineralógica y petrográfica; para tales fines existen clasificaciones.

La exactitud y pormenores de la descripción geológica dependen de la cociple jidad de la formación y de los requerimientos del proyecto. Generalmente debe contener la descripción siguiente:

- a) la estructura geológica ( posición, fallas tectónicas , estructuras rugosas) ;
- b) fracturación y agrietamiento (mediciones);
- c) composición mineralógica y petrográfica;
- d) el grado de meteorización.

La descripción geológica puede ser acompañada con fotos. Si se refiere a paredes de laboreos de explotación de gran envergadura o a plegamientos, se recomiendan fotos estereoscópicas.

X.3. Índice de calidad de la roca RQD - uno de los parámetros básicos para la clasificación de rocas

Uno de los métodos que reflejan el grado de debilitamiento del macizo rocoso se basa en la recuperación modificada del testigo que a su vez depende indirectamente del número de fracturas y del grado de debilitamiento o alteración del macizo, según se puede observar por los testigos extraídos de un sondeo.

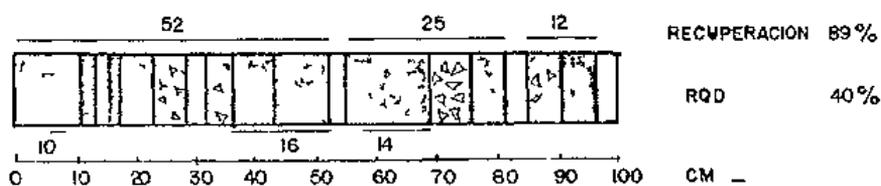
En lugar de contar las fracturas se obtiene una medida indirecta sumando la longitud de los testigos, pero considerando únicamente aquellos trozos del mismo de longitud igual o superior a 10 cm en estado sano y compacto. Si el testigo se ha roto por el manejo o por el proceso de perforación (p. ej. cuando se aprecian superficies de fracturas recientes y regulares en lugar de diaclasas naturales), se juntan los trozos partidos y se cuentan como una pieza única, siempre que alcancen la longitud requerida de 10 cm como mínimo.

A base de gran práctica utilizando el indicador de calidad de la roca (RQD) se hicieron varias tablas caracterizando el estado técnico de la roca. La más conocida es :

R Q D	Estado técnico de la roca
Mayor de 90 %	Excelente
90 – 75 %	Bueno
75 – 50 %	Regular
50 – 25 %	Mal
Menor de 25 %	Muy mal

Tab.12: Estado técnico de la roca según RQD.

Hay que destacar que esta tabla la podemos utilizar si el procedimiento de la perforación tiene buena calidad, es decir si la recuperación total es máxima y el estado técnico de los testigos es perfecto.



La recuperación total representa el 89 %, RQD solamente el 40 %, ya que se calculan solamente testigos mayores de 10 cm.

Utilizando máquinas de perforación no convenientes, con pequeños diámetros o con poca experiencia de los perforadores, puede suceder que el RQD en una cala resulta relativamente bajo aunque la roca misma sea buena. En tales casos hay que pensar bien, hay que comparar los datos de RQD obtenidos con otros datos que también caracterizan el estado técnico de la roca del lugar. Es decir, si la recuperación de la cala por lo menos sirve y no es producto defectuoso, siempre se puede utilizar el parámetro RQD como parámetro comparativo relacionado con otros parámetros técnicos. Claro que en éste caso nuestra tarea es más difícil y necesitamos pensar aún más, ya que el parámetro comparativo solamente refleja el estado técnico de la roca y no define ningún parámetro físico-mecánico. Para hacer el cálculo de

RQD podemos elegir también otra longitud del testigo como máxima, por ejemplo 5 cm (en rocas sedimentarias estratificadas etc.) en vez de 10 cm. Lo utilizamos por ejemplo durante la investigación para la central termoeléctrica en Santa Cruz del Norte en Cuba, donde a base de valorar todas las calas y comparando el RQD con otros parámetros característicos, definimos la siguiente tabla para las calizas cuaternarias y miocénicas:

R Q D	Estado técnico de la roca
Mayor de 50 %	Bueno
50 – 25 %	Regular
25 – 10 %	Mal
Menor de 10 %	Muy mal

Tab.13: Estado técnico de la roca según el RQD en las calizas cuaternarias.

Las experiencias recibidas de las investigaciones en obras hidrotécnicas nos demostraron que es posible también buscar relaciones mutuas entre parámetros físicos y RQD, como entre la resistividad eléctrica y RQD, entre los módulos de elasticidad y de deformación y RQD, entre RQD y parámetros de carotaje (ultracarotaje, electrocarotaje, cavernometría etc.). Encontramos también buenas relaciones entre RQD y resistencia de la roca determinada en el laboratorio, entre RQD e inyecciones de agua etc., pero hay que acentuar que todos los resultados - aunque desde el punto de vista de los fines ingenieriles muy útiles - tienen su validez solamente para el macizo rocoso estudiado y no son transferiales a otro lugar.

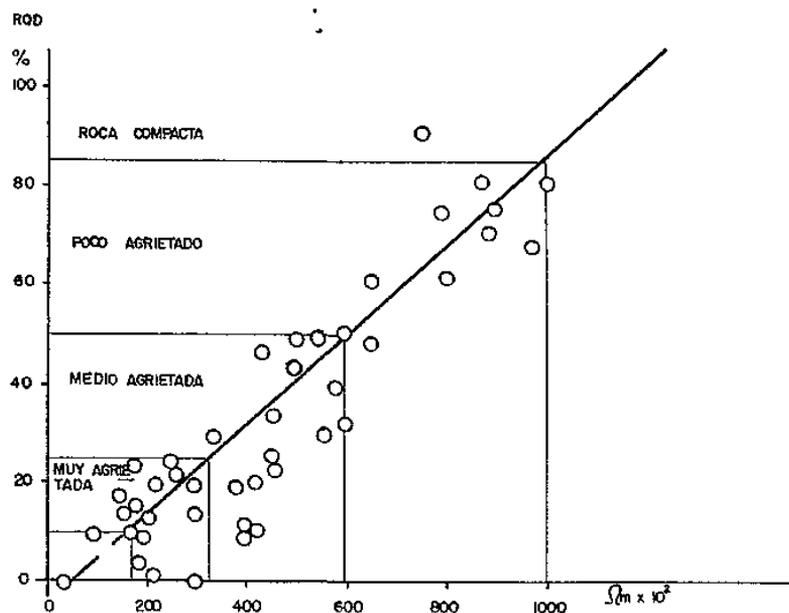


Fig.41: Correlación entre Índice de Calidad de Roca - RQD y entre la Resistividad Eléctrica Aparente en granulitas - Dalešice (según Horsky, 1974).

El parámetro RQD es muy útil para definir la frontera entre roca en diferente estado mecánico y entre la capa de eluvios. Durante los estudios ingeniero-geológicos para la termoeléctrica en Santa Cruz del Norte en Cuba este parámetro sirvió como el más valioso

para definir muy rápidamente y exactamente el límite entre capa de las calizas superficiales y los subyacentes precuaternarios enterrados. Además según los parámetros RQD sería posible definir cavernas con relleno, líneas tectónicas, zona carsificada relacionada con el nivel freático de las aguas subterráneas y con la intrusión salina.

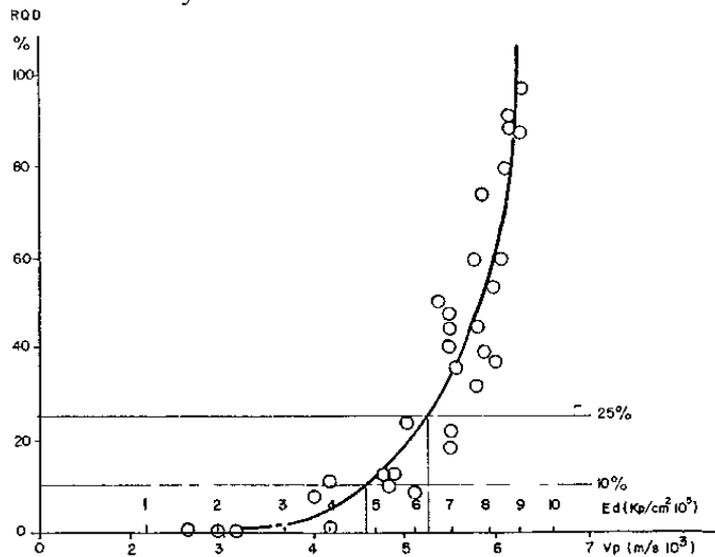


Fig.42: Correlación entre Índice de Calidad de la Roca RQD y entre Módulos Dinámicos  $E_d$  en granulitas (según Horsky, Dalešice 1974).

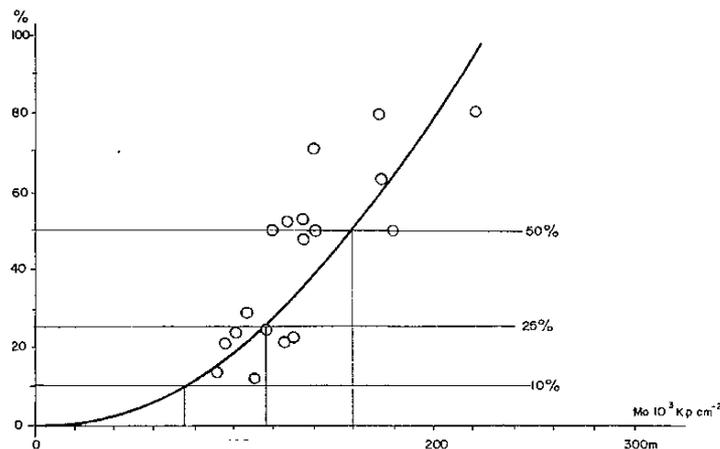


Fig.43: Correlación entre RQD y entre módulos de deformación  $M_0$  en granulitas en la presa Dalešice. ( según Horsky, 1974 ).

Además de lo antes mencionado se hicieron en Santa Cruz del Norte en Cuba estudios comparativos del RQD a diferentes profundidades en plano, los cuales permitieron regionalizar toda área desde el punto de vista del estado natural actual de la roca y nos dieron la posibilidad de definir las zonas debilitadas. (Vea fig. 44).

En fin hay que decir que los parámetros RQD - aunque muy valiosos - no pueden reemplazar o excluir la necesidad de hacer la descripción de los testigos o mejor dicho de la recuperación muy detallada y precisa, ya que es un parámetro comparativo, el que puede servir solamente unido con otros métodos de la clasificación de las rocas. Sin embargo, los

resultados mencionados nos abrieron nuevas posibilidades del estudio de zonas debilitadas, o mejor dicho del macizo rocoso afectado por fenómenos tectónicos, por procesos cárnicos etc.

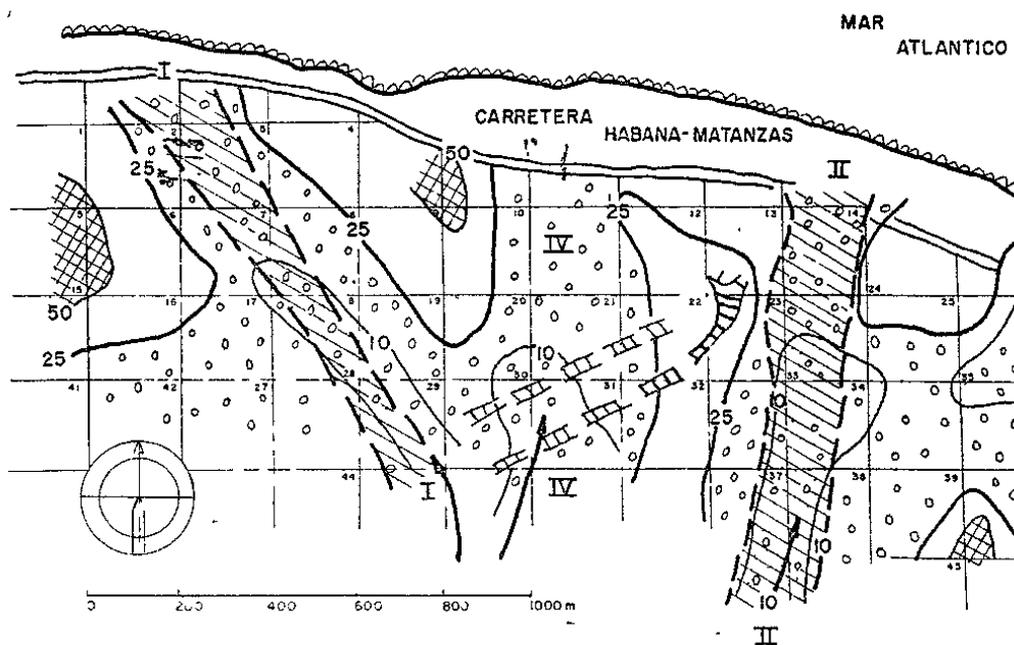


Fig.44: Estudios comparativos del RQD en cortes horizontales de diferente profundidad permitieron regioanalizar el área cárnica y definir zonas debilitadas I, II, y IV (según Horský 1982). Termoeléctrica Santa Cruz del Norte en Cuba.

# Capítulo XI

## Estudio de mecánica de las rocas

### XI.1. Introducción

Al elaborar el modelo ingeniero-geológico del lugar, la mecánica de rocas nos ayuda a cuantificar las características físico-mecánicas del mismo. Para lograr este objetivo será necesario realizar las mediciones, pruebas de campo y laboratorio; la secuencia de estas actividades será según el programa conceptual ilustrado en la figura No 45.

A partir de la concepción del modelo ingeniero-geológico del lugar será posible determinar las características que deberán cuantificarse y sobre todo la localización de los lugares específicos donde deberán realizarse las mediciones y las pruebas de campo. El estudio de la mecánica de rocas generalmente se realiza en el eje y en el área de influencia de la obra, en algunas ocasiones se extiende hacia las laderas del vaso.

Los parámetros que hay que estudiar son numerosos y presentan gran dispersión en lo que se refiere a sus valores.

Las variedades de rocas en su manifestación físico-mecánica corresponden con su característica mineralógico-petrográfica y con las condiciones de su formación. La misma roca desde el punto de vista petrográfico se puede manifestar de diferentes modos en lo que se refiere a sus manifestaciones mecánicas, ya que refleja las condiciones complejas de los procesos geodinámicos de la corteza terrestre como son por ejemplo : las diferentes presiones en tiempo y espacio, los procesos de intemperismo y otras influencias . Podemos decir en general que en la naturaleza un macizo rocoso inalterado prácticamente no existe ya que la corteza terrestre está afectada por procesos geodinámicos; por eso el macizo rocoso es heterogéneo y anisotrópico. Por esta razón el estudio del ambiente del macizo rocoso está todavía lejos de pretender alcanzar el rigor que han logrado otras especialidades; por lo cual las construcciones de obras hidrotécnicas no las podemos calcular en un ambiente homogéneo del macizo rocoso.

Pero los métodos modernos de proyección que utilizan por ejemplo el método del cálculo por elementos finitos exigen definir el ambiente del macizo rocoso en todos sus puntos, por parámetros cualitativos y cuantitativos.

Desde este punto de vista es una tarea muy complicada para los ingenieros geólogos, geotécnicos y otros especialistas como son hidrogeólogos, geofísicos, topógrafos etc. y especialmente significa la división del macizo rocoso en bloques casi homogéneos los que en la escala de observación desde el punto de vista de la apreciación estadística de su manifestación mecánica se comportarán igualmente.

La heterogeneidad y la anisotropía de un macizo rocoso del mismo tipo petrográfico son provocadas por los siguientes factores :

- a) Factores primarios que condicionan el surgimiento de las rocas, tales como son: estructura, textura, estratificación, diferenciación del magma etc.;
- b) Factores secundarios no-diastróficos, tales como; contracción y dilatación provocadas por cambios físico-químicos del ambiente rocoso , procesos exógenos etc.

Factores diastróficos son los que representan manifestaciones de las tensiones y deformaciones del macizo rocoso tales como estructuras de plegamiento, grietas, fallas, fracturas etc.

Por influencias de estos factores primarios y secundarios se puede dividir el macizo rocoso en cuatro tipos, desde el punto de vista de su homogeneidad y anisotropía mecánica:

- a) Macizo rocoso donde calculamos solamente con heterogeneidad y anisotropía de la roca misma lo que lleva consigo diferentes manifestaciones mecánicas de ésta.
- b) Macizo rocoso influenciado por los factores primarios y secundarios (principalmente no diastróficos) de la heterogeneidad. Por el macizo pasan planos de debilidad mecánica, pero según estos planos no surgieron interrupciones de su continuidad. Estos planos se caracterizan por cambios cualitativos de la resistencia.
- c) Macizo rocoso influenciado por la actuación de factores secundarios de la no homogeneidad (diastróficos) los que provocan la interrupción de la continuidad del macizo rocoso. Las cualidades mecánicas del macizo de éste tipo dependen de la frecuencia y del carácter de los planos de discontinuidad (grietas, planos de estratificación etc.) y del carácter del relleno entre ellas.
- d) Macizo rocoso afectado por fracturas, fallas, rupturas y otros fenómenos tectónicos suscitando movimientos a lo largo de éstos. Estas dislocaciones se caracterizan por sus diferentes cualidades mecánicas y forman límites entre los diferentes bloques casi homogéneos.

En los macizos rocosos donde se intenta construir una obra nos encontramos casi siempre con todos los tipos mencionados.

De lo mencionado surge la tarea muy importante del ingeniero geólogo de división del macizo rocoso en bloques casi homogéneos limitados por fronteras entre los diferentes tipos petrográficos y por dislocaciones continuas en general.

Estos bloques casi homogéneos ya definidos es necesario, después de apreciarlos desde el punto de vista de su heterogeneidad, determinar lo siguiente:

- a) Desde el punto de vista de la existencia de planos de discontinuidad mecánica, los que son continuos solamente en los límites del bloque definido (rupturas, fracturas etc.);
- b) Desde el punto de vista de su agrietamiento lo que condiciona (provoca) dentro del bloque casi homogéneo su carácter casi discontinuo; los sistemas de agrietamiento hay que apreciarlos en el espacio y el tiempo desde el punto de vista de su frecuencia, continuidad, carácter de los planos, del relleno entre ellos, la separación entre las grietas etc. Es decir, realizar un análisis estructural del macizo;
- c) Desde el punto de vista de la resistencia de los bloques rocosos y de los planos de discontinuidad derivados de las pruebas de resistencia de las rocas;
- d) Desde el punto de vista de la deformabilidad del macizo rocoso, derivada de las pruebas de placas, o de pruebas sísmicas de deformación etc;
- e) Desde el punto de vista de la permeabilidad y de sus posibles cambios después de embalsar en el vaso.

Podría considerarse conceptualmente que son dos los problemas básicos:

- 1) Los esfuerzos en la cimentación y las deformaciones asociadas a los mismos.

## 2) Las filtraciones y las subpresiones.

Es obvio que para apoyarse en la mecánica de rocas para la solución de los problemas mencionados, éstos deberán estar planteados en términos mecánicos y las aplicaciones solo podrán realizarse satisfactoriamente cuando los casos que se analicen están geométricamente bien definidos. Si estas condiciones no se cumplen, enfrentamos situaciones de análisis cualitativo.

El ingeniero deberá tener siempre presente que las condiciones de carga, presión y saturación a que se verá sujeta la cimentación de una presa serán nuevas y por lo tanto el comportamiento futuro de la cimentación y de la estructura que se superpongan no es del todo perceptible, sobre todo en lo que respecta al tiempo. Esta condición hace necesario integrar en el diseño un sistema completo de observación y verificación de la hipótesis de trabajo.

En el diseño de la cimentación se ha intentado siempre la aplicación de los métodos experimentales y analíticos. Más - no obstante los avances logrados en ambas tecnologías - no puede decirse que se haya llegado a las soluciones definitivas con cualquiera de las dos.

Esto se debe a que ambos métodos deben ser alimentados con datos que representen las propiedades de los materiales, características estructurales de los macizos rocosos y las leyes que definen o reproducen el comportamiento en función de diversas condiciones satisfactorias y el tiempo.

Mucho se ha comentado el hecho de que mientras el cuerpo de la cortina se construya con los materiales cuyas propiedades sean especificadas en el diseño y sobre las cuales el ingeniero pueda ejercer un control, en la cimentación tiene que tratarse con materiales cuyas propiedades en principio desconoce.

En términos generales el diseño de una estructura y su cimentación debe tender a lograr que ambas formen una sola unidad. Para la planeación del estudio de cimentación de presas proponemos un diagrama de actividades en la figura N<sup>o</sup> 45.

## XI.2. El macizo rocoso y su análisis estructural

La descripción del macizo rocoso (génesis y estructura de las discontinuidades tales como fallas, fracturas, grietas) servirán al ingeniero investigador y al proyectista de base para establecer las direcciones predominantes del flujo del agua y efectuar un análisis de estabilidad y una primera calificación de la resistencia y deformabilidad. (Vea fig. 46)

El procedimiento usual para definir la estructura de un macizo rocoso consiste en un levantamiento ingeniero-geológico, midiendo el rumbo y el grado de inclinación de los planos de estratificación y de las grietas y la frecuencia con que se repitan.

Debería establecerse la correlación entre las observaciones de superficie y los datos que se obtengan de las exploraciones mediante perforaciones con máquinas, las excavaciones de calicatas, trincheras y galerías.

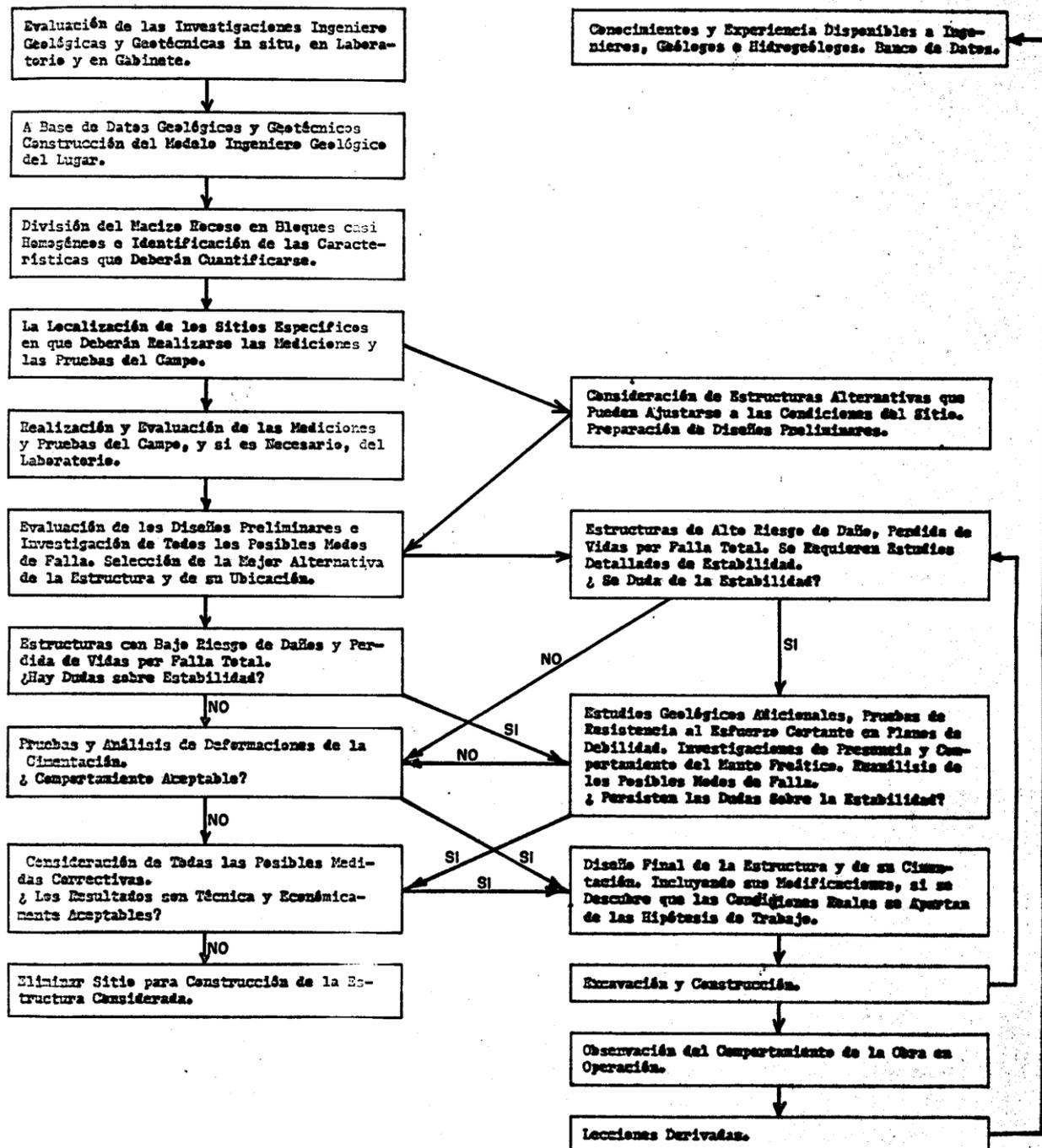


Fig.45: Diagrama de actividades para la planeación del estudio geotécnico de la cimentación de presas.

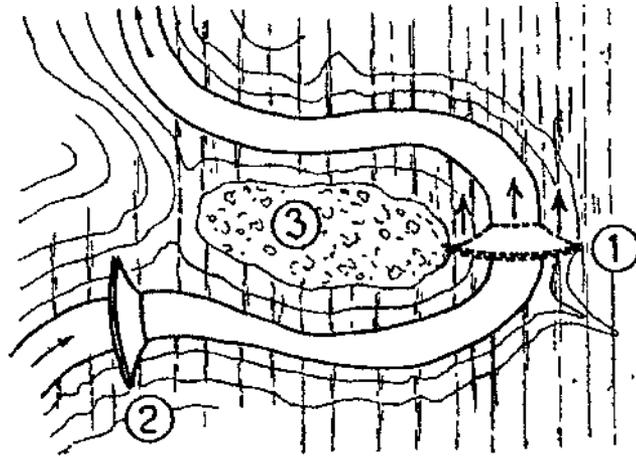


Fig. 46: Después de definir las direcciones predominantes de las grietas resulta recomendable ubicar el eje de la presa en la posición 2; la posición 1 daría lugar a infiltraciones del agua.

La representación de la información puede hacerse mediante mapas que ilustren la posición y extensión de los detalles mayores como son las trazas de las fallas y su posición con relación a las formaciones geológicas existentes en el medio y la posición de la estructura. Además es conveniente, especialmente en el lugar de ubicación de la presa, caracterizar cada bloque casi homogéneo por sus sistemas de agrietamiento característico. En muchos proyectos se ha reconocido la utilidad de construir modelos de un material transparente como el plexiglás en tres dimensiones que permitan interpolar las características estructurales del lugar, es decir construir un modelo geotécnico en base a todos los datos geológicos y geotécnicos. (Fig. 47).



La ubicación del eje de la presa al lugar del valle el más estrecho, no siempre significa que se va a construir sin los problemas. Deslizamiento de las calizas del paleógeno en el eje de la presa Guisa, Cuba. Foto Otto Horsky, 1980.

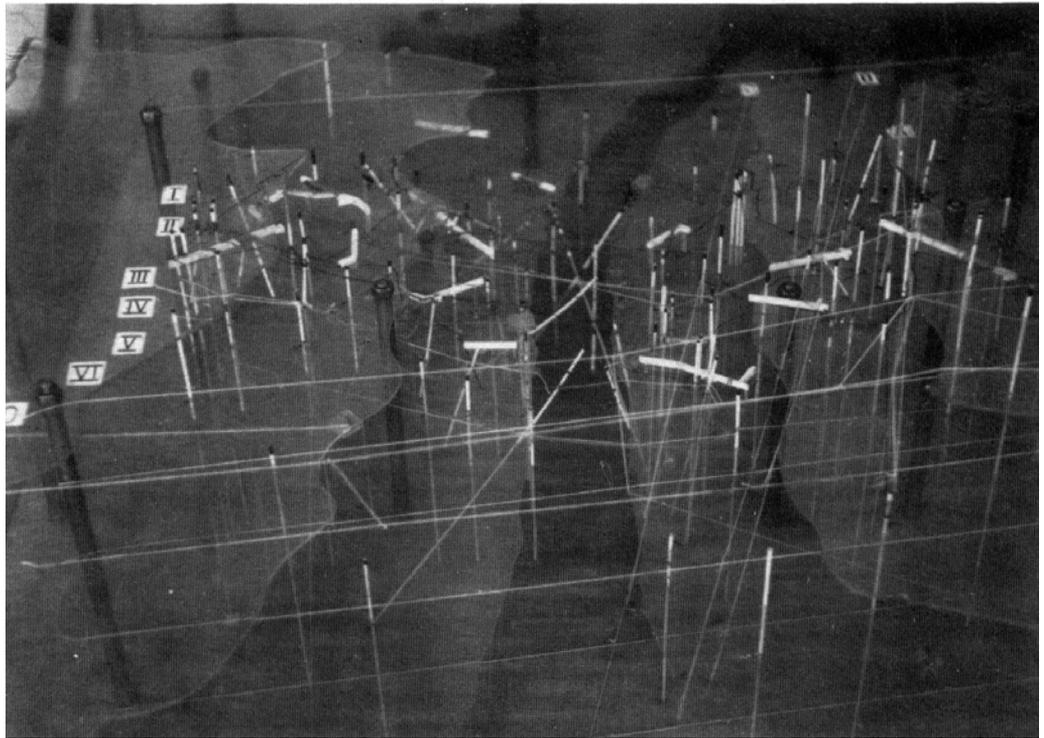


Fig. 47: Modelo geotécnico de plexiglás del eje de la presa Dalešice, República Checa, en escala 1: 500 (autor O.Horsky, 1970).

Tanto en los mapas como en los modelos a escala resulta difícil representar todas las familias de grietas, plano de estratificación, etc. Por esta razón se recurre a la representación gráfica de la frecuencia de estos elementos estructurales. La forma de la representación que se va haciendo más usual, por ser práctica, es la de los diagramas polares usando como parámetros el rumbo y el de inclinación del elemento (fig 48).

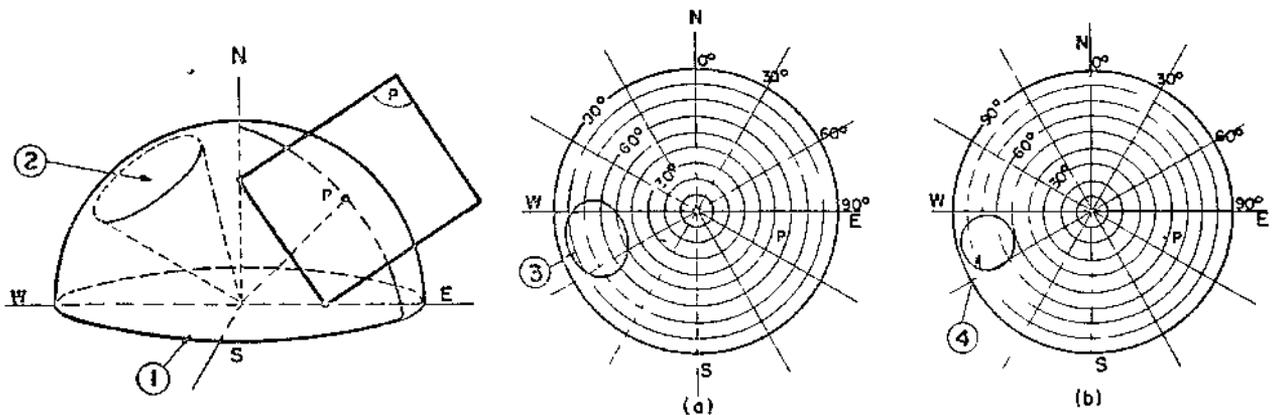
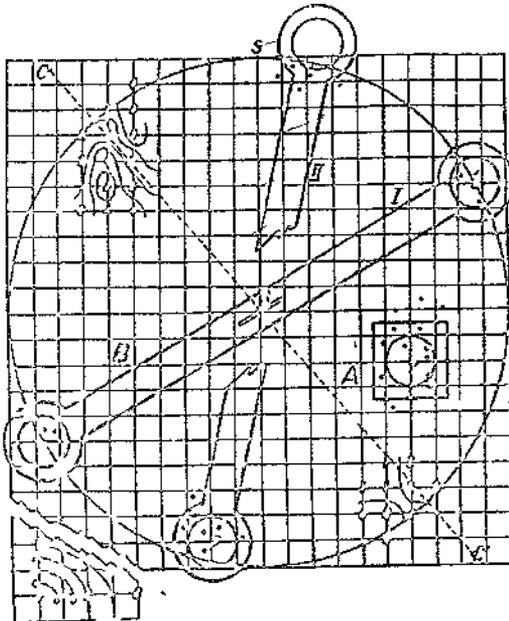


Fig. 48: Diagramas polares:

- (a) Proyección de igual área (Schmidt), (b) Proyección de igual ángulo (Wulf)
- (1) Hemisferio superior (2) Círculo en la esfera (3) Proyección del círculo (no circular) (4) Proyección del círculo (circular)

Para el tratamiento estadístico de los elementos estructurales utilizamos generalmente la representación de los datos en la red estereográfica de Schmidt. Todas las mediciones del

rumbo y de la inclinación, las ubicamos primeramente en el diagrama de puntos. Cada punto refleja la arista de la línea de inclinación del elemento en el hemisferio. Del diagrama de puntos construimos después las isolneas de la misma densidad de los puntos, es decir un diagrama de los contornos. En base de eso podemos estudiar regularidades de yacencia de las capas o grietas y las condiciones tectónicas de la región. (Vea fig. 49, 50, 51 y 52).

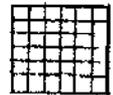


Hay que tener :

1. Papel con red angular



2. Papel transparente con red cuadrada



3. Papel transparente para construir diagrama de contornos

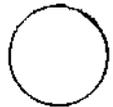


Fig.49: Método de cálculo de los puntos por el calculador céntrico (A) y el calculador circunferencial (B).

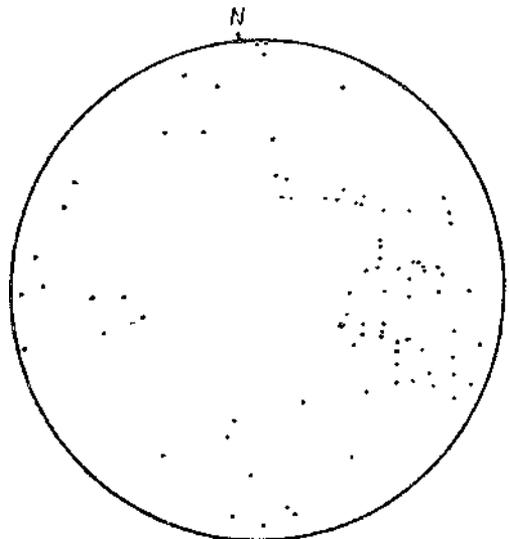


Fig. 50:

Diagrama de puntos. Cada punto representa una medición del elemento estructural.

En base de las mediciones de los rumbos (e inclinación) podemos construir, además, un histograma de frecuencia de las grietas de diferentes rumbos.

Los sistemas de las grietas más representativos los ubicamos después en el mapa ingeniero-geológico en forma de tectonógramas.

Deberá tenerse en cuenta que estas representaciones son parciales ya que los parámetros que determinan las características de la fracturación son muy numerosos e incluyen: el espaciamiento entre los planos de discontinuidad, continuidad, ancho de la abertura, rugosidad de las paredes y tipo de relleno en las aberturas.

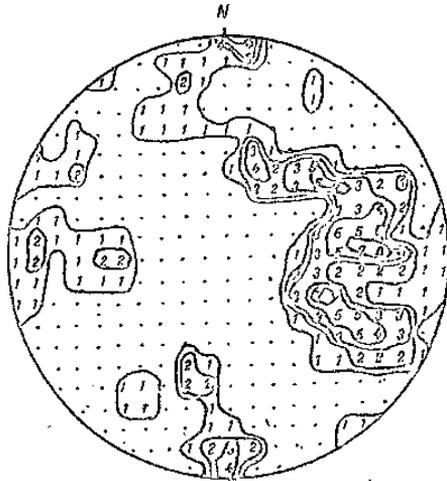


Fig. 51: Del diagrama de puntos construimos después el diagrama de contornos, es decir, las isóneas de la misma densidad de los puntos.

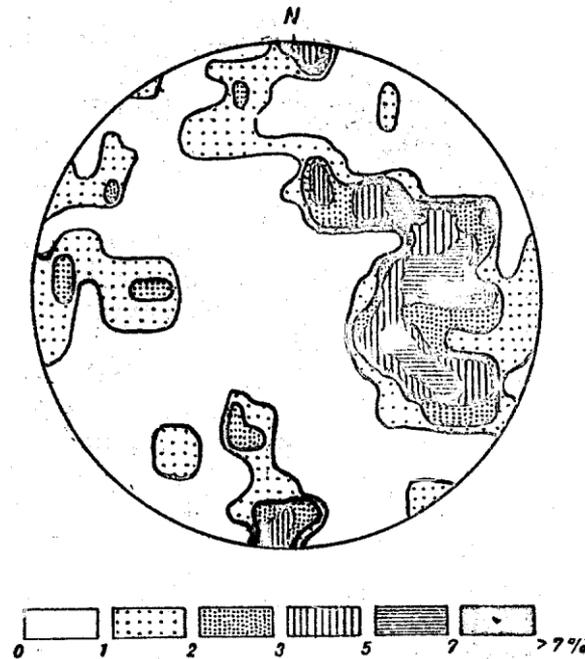


Fig.52: Valorización del diagrama de contornos. La cantidad de las mediciones era 90 , lo que representa 100% de las mediciones. Es decir, 1% de isóneas = 0,9 mediciones.  
 Dirección de grietas prevalecientes : 257/52; 290/41; 240/45.

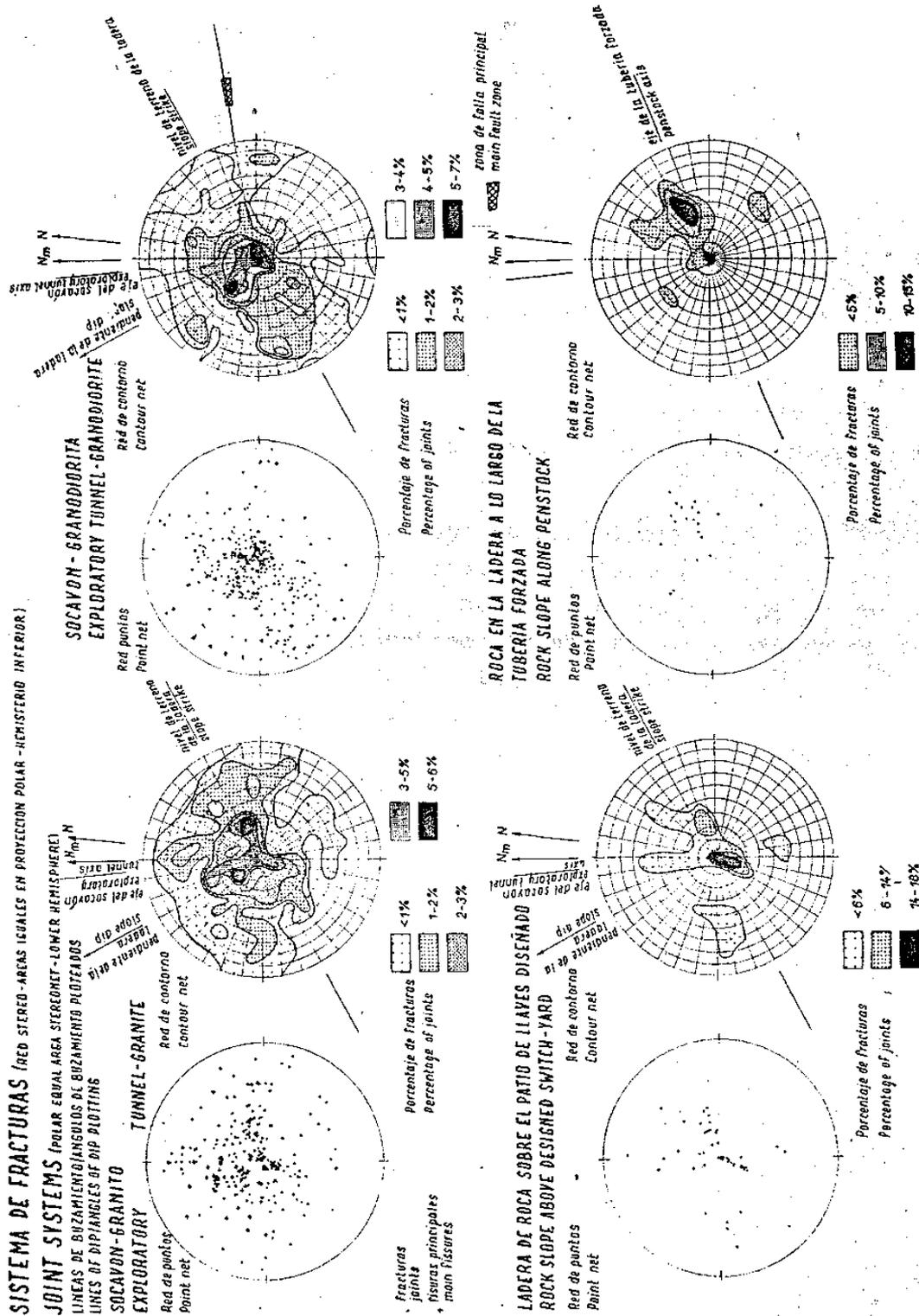


Fig.53: Tectonogramas de fracturas y fisuras en el sistema de proyección polar. Investigación ingeniero-geológica para la central Hidroeléctrica de Machu Picchu (según K. Drozd, 1976).

Se han hecho intentos para establecer un sistema de clasificación que tome en cuenta estas características. Entre otros DEERE propuso una clasificación del grado de fracturación en

función del espaciamiento entre juntas o planos de discontinuidad (vea cap. X.3).

Se ha intentado establecer correlaciones entre la velocidad longitudinal con la que se transmite una onda en un macizo rocoso y su grado de fracturamiento o módulo de deformabilidad. Aunque hasta ahora los métodos geofísicos se aplican como recursos complementarios y en muchos países no gozan todavía de gran confianza, en la República Checa hemos obtenido los resultados excelentes (vea cap. X.3).

Una prueba simple que da buenos resultados es el ensayo LUGEON el cual hace posible calificar el grado de fracturación de un macizo rocoso. Ese consiste en inyectar agua a presión ( $10 \text{ kg/cm}^2$ ) en un tramo aislado de una perforación (3 - 5 m), manteniendo la presión durante de 5 y 10 minutos. No ha sido posible establecer una correlación entre los resultados del ensayo LUGEON y el coeficiente de permeabilidad. Sin embargo sí se ha creado una considerable experiencia empírica que permite calificar el estado de fracturación y la permeabilidad a partir de las unidades LUGEON (vea capítulo XV).

XI.3. Objetivo de las investigaciones de las propiedades mecánicas del subsuelo de las obras hidrotécnicas.

Después de construir la estructura de la obra hidrotécnica, su subsuelo forma parte integrante de un sistema único "estructura - subsuelo" en el cual la distribución de las tensiones y de las deformaciones correspondientes se influyen recíprocamente en dependencia de la disposición espacial, rigidez y otras propiedades mecánicas de los elementos particulares de todo el sistema.

Para poder prever el comportamiento total de dicho sistema "estructura - subsuelo", es decir para poder dimensionar y elegir los materiales convenientes de la parte superior de este sistema, hace falta conocer bien las propiedades mecánicas del subsuelo. Es decir, hace falta conocer la respuesta mecánica del macizo rocoso a los incrementos de carga cuasados por una construcción nueva.

La evolución de la técnica en presas buscando y consiguiendo estructuras más avanzadas implicaba la adopción de unos parámetros que definieran el comportamiento del cimiento. El deseo de cuantificar tales parámetros provocó el desarrollo de prospecciones y ensayos que dieran la respuesta concreta a las necesidades del cálculo.

Los cimientos suelen ser el elemento más débil de todo el sistema "estructura - subsuelo" condicionando la seguridad y función perfecta de la obra.

Por esta razón es evidente que la determinación de las propiedades mecánicas del subsuelo tiene una importancia básica para un proyecto de cualquier obra seguro y económico. Pero para que tengan valor los resultados de los ensayos, hay que ubicarlos bien, en las estructuras características a base de un imprescindible reconocimiento ingeniero-geológico serio y detallado. Además, para que la estructura y el subsuelo formen un sistema mecánico único, es necesario que el geólogo y el proyectista colaboren muy estrechamente desde el inicio de la investigación ingeniero-geológica hasta el fin de la realización de la obra.

La determinación petrográfica de la roca, por sí sola, no puede servir para la apreciación de las cualidades mecánicas del macizo rocoso, ya que cuanto mayor es el tamaño del macizo que estamos estudiando, tanto más actúan los fenómenos de la estructura de las rocas, lo cual nos obliga a ver el ambiente como no homogéneo y anisótropo. Estos fenómenos de la estructura de las rocas provocan que no podemos definir las leyes generales del comportamiento del macizo rocoso, por lo que es necesario incluir en el cálculo datos estadísticos de los elementos estructurales de la roca, muy necesarios para una exacta definición de las cualidades mecánicas de dicho macizo.

Es por esta razón que paso a paso se han limitado las pruebas de laboratorio que reflejan de forma aproximada los elementos petrográfico-estructurales y se han ido incrementando las pruebas de campo o "in situ" de gran dimensión, las que ya reflejan elementos estructurales de la roca y del macizo rocoso.

Cuanto mayor sea la muestra de la roca examinada, tanto mayor será la homogeneidad estadística de los elementos estructurales del macizo rocoso, por lo cual podremos representar mejor un mayor volumen del ambiente del macizo rocoso.

Aumentando el volumen del macizo rocoso disminuye la importancia de las microdiscontinuidades, mientras que empieza a prevalecer la importancia de discontinuidades de un orden más alto. Eso tiene gran importancia con respecto a la metodología de las pruebas en el campo, la evaluación del tamaño de las placas de carga y la evaluación de los resultados.

Para poder caracterizar bien el comportamiento de la roca en el subsuelo de la estructura se introduce en la mecánica de rocas el concepto de la sustancia rocosa y el de macizo rocoso. La sustancia rocosa es la fase firme de la roca sin discontinuidades técnicamente importantes. Sus propiedades se pueden determinar en el laboratorio sobre las muestras inalteradas. Ya que casi cada macizo rocoso representa un ambiente discontinuo donde las discontinuidades influyen de manera decisiva en el comportamiento mecánico del macizo rocoso, las propiedades de la sustancia rocosa misma tienen la influencia relativamente pequeña.

Exacta y completamente definir el macizo rocoso es bastante difícil porque su concepción no es absoluta ya que se cambia con la escala del problema. Si se cambia el volumen del macizo rocoso se cambian también los parámetros de su homogeneidad, de su anisotropía y de su discontinuidad, es decir su respuesta mecánica a la carga.

Ya que las discontinuidades en el macizo rocoso son de diferente tamaño y de diferente orientación espacial, sus propiedades mecánicas dependen no solo de la escala en la cual se soluciona el problema geomecánico, sino también de la orientación espacial mutua entre fuerzas aplicadas y discontinuidades del macizo rocoso.

El geólogo austríaco L. Müller, el que ha estudiado las cualidades geotécnicas de los diferentes macizos rocosos, hizo una tabla para esbozar el tamaño de la muestra a utilizar en relación con los elementos de la estructura que influyen en ella (tabla No 14). En esta tabla podemos ver que si queremos caracterizar bien el ambiente del macizo rocoso, la muestra examinada tiene que ser por lo menos diez veces más grande que el tamaño medio del elemento estructural de la roca pero en este caso también hay que tener en cuenta que el resultado solo tiene validez en las dimensiones de homogeneidad estadística del macizo rocoso. Si queremos ampliar los resultados a todo el macizo rocoso, para que la prueba de campo no quede solo un dato local muy costoso, tenemos que usar junto a ella otros métodos de investigación ingeniero-geológica, los cuales nos ayudan a ampliar la validez de la prueba a todo el macizo rocoso en relación con su grado de homogeneidad e isotropía.

#### XI.4. Métodos básicos para investigar las propiedades mecánicas del subsuelo.

La elección del tipo de prospecciones o ensayos en función de cada problema concreto y la ponderación del conjunto de resultados obtenidos por distintos métodos o sistemas son elementos básicos en el enjuiciamiento del tema. En definitiva este planteamiento implica el conocimiento de las posibilidades y también de las limitaciones de cada ensayo o método de ensayo, para utilizarlo donde convenga y ponderar comparativamente con el resto, la representatividad de sus resultados.

Antes de entrar en el tema conviene subrayar que nos referimos fundamentalmente a los ensayos utilizados para cimentaciones en macizos rocosos entendiendo que los relativos a

suelos han sido objeto de análisis exhaustivos dentro de la actualmente bien estructurada mecánica del suelo.

Clase de material	Masas cristálicas, mezclas de grano fino	Mezclas de grano grueso	Ambiente discontinuo (agrietado)
Ejemplo	Metales, piedras de construcción, suelos	Hormigón, conglomerados, mezclas de grano grueso	Rocas
Compuesto de	Cristales, partículas finas	Partículas gruesas	Ambiente del macizo rocoso agrietado
Tamaño medio de elementos gruesos en cm	0,01 - 1	2 - 10	5 - 50 (100)
Tamaño práctico de la muestra examinada en cm	1 - 7	20 - 30	80 - 400
Tipo de pruebas	Laboratorio	Laboratorio	De campo "in situ".

Tab.14: Tabla de L.Müller – Tamaño de cuerpo examinado en relación con la materia investigada.

Para determinar las propiedades mecánicas del subsuelo, contamos con los métodos siguientes:

- a) Ensayos de laboratorio;
- b) Pruebas de campo;
- c) Instrumentación del subsuelo y de las estructuras de tierra;
- d) Evaluación y acumulación de las experiencias adquiridas en la práctica de las construcciones, es decir método de analogía.

#### XI.4.1 Ensayos de laboratorio

Durante mucho tiempo el método básico o principal de valorar las propiedades mecánicas del subsuelo de una obra hidrotécnica eran las investigaciones de laboratorio, cuya técnica incesantemente se ha ido perfeccionando hasta alcanzar un alto nivel, suficiente para dar respuesta a muchas preguntas del comportamiento mecánico del macizo rocoso. Sin embargo, los resultados de laboratorio no siempre reflejan correctamente las propiedades mecánicas del macizo, ya que los ensayos de laboratorio se realizan sobre muestras de pequeñas dimensiones y por esta razón no pueden contener todos los elementos estructurales básicos y representativos que influyen sobre el comportamiento del macizo rocoso.

Además, la muestra puede estropearse durante la torna de la misma, el transporte, almacenamiento y preparación del ensayo. Existen además otros inconvenientes, por ejemplo la manera de cargar la muestra en el laboratorio no puede jamás modelarse exactamente al modo de carga de la naturaleza que provocará la obra.

Como consecuencia de la significativa destrucción o alteración de la estructura de los suelos y de las rocas varían sus propiedades físico-mecánicas, determinadas en el laboratorio, y muchas veces se diferencian en gran medida de las reales. Una muestra ensayada en el

laboratorio no puede reflejar todas las heterogeneidades y anisotropías y muchas veces una muestra representa la parte más sana del macizo, mientras que las partes más débiles, varias veces por un error del investigador, faltan.

#### XI.4.2 Pruebas de campo

Las pruebas de campo eliminan parcialmente las insuficiencias de los ensayos en el laboratorio ya que la muestra investigada es muchas veces mayor y prueba, una vez realizada, respetando los elementos estructurales que determinan el comportamiento mecánico del macizo, que es representativa.

Además tiene una gran ventaja: la muestra se encuentra en su estado natural, afectada en grado mínimo solamente al preparar la prueba. El modo de carga y las condiciones de límites modelan el modo de carga real con mayor fidelidad.

A pesar de lo mencionado, en comparación con el tamaño de la obra, al ensayar el macizo rocoso por medio de las pruebas de campo nos limitamos a ensayarlo en puntos aislados y en la mayoría de los casos en la parte superficial del mismo. El resultado de estas pruebas no puede darnos, entonces, una respuesta completa sobre el comportamiento mecánico del macizo rocoso; da sólo informaciones limitadas. Su seguridad y representatividad dependen de la cantidad y calidad de los ensayos, de la relación de su tamaño con respecto a la dimensión de los factores estructurales de la roca y de la obra.

Las pruebas de campo, aunque sin dudas son muy importantes, tienen además de lo mencionado una desventaja: son muy caras y necesitan gran experiencia para realizarlas. Por esta razón se recomienda ejecutarlas solo en estructuras ya elegidas para ubicar una obra hidrotécnica grande.

#### XI.4.3. Instrumentación

El comportamiento mecánico en su conjunto se puede determinar solamente por medio de la instrumentación perfecta de la obra y de su subsuelo. Este método consiste en la medición de las deformaciones y presiones reales que se desarrollan como causa de la carga creciente de la obra y de otros campos en el estado natural del macizo rocoso. También se pueden medir las direcciones de las deformaciones, sus velocidades y aceleración de su desarrollo, asimismo como el desarrollo de las presiones en diferentes rumbos, todo eso en puntos convenientes en la superficie e interior del macizo rocoso.

Este método por supuesto no se puede utilizar para la predicción del comportamiento del subsuelo, sino para su control, sobre el cual es posible modificar el procedimiento de la construcción de la obra o controlar su función y seguridad.

Además por medio de este método es posible comprobar conclusiones de otros métodos de investigación geotécnica y de esta manera sirve como fuente importante de conocimiento y experiencia.

Hace falta destacar que el desarrollo en la mecánica de rocas va desde los ensayos en el laboratorio a través de las pruebas “in situ” a la instrumentación.

#### XI.4.4. El método de analogía

El último método para la determinación de las propiedades mecánicas de la roca es la acumulación continua de las experiencias ganadas en la ejecución de las obras individuales, analizándolos, comprobándolos y generalizándolos, aplicando según el caso todos los

métodos descritos anteriormente. Éste método lo llamamos el método de analogía.

#### XI.5. Tipos básicos de las pruebas de campo

##### 1) Ensayo de deformabilidad :

Se realiza para obtener el modelo de deformación y de elasticidad de las rocas sobre los cuales se fundamentan estructuras pesadas. Distinguimos pruebas superficiales con placas rígidas, pruebas en calicatas y calas con gatos radiales, pruebas hidráulicas en túneles con gatos aplastados.

Lo esencial de todos esos ensayos consiste en aplicar la carga al macizo rocoso y medir su deformación así provocada. El resultado del ensayo es la curva de dependencia entre carga y deformación, interpretada matemáticamente por medio de la técnica de semi-espacio elástico.

##### 2) Ensayo de cortante :

A este se someten los planos de discontinuidad del macizo rocoso como son: grietas, planos litológicos, planos de foliación etc. Su objetivo es conseguir información sobre la estabilidad del sistema cardado por el peso de la estructura. Consiste en aplicar carga normal que se mantiene constante durante todo el ensayo y sucesivamente o continuamente se aumenta la carga horizontal tangencial hasta el valor máximo. Los resultados se evalúan por medio de “círculo de Mohr”.

##### 3) Ensayo de resistencia axial:

Sirve para evaluar la capacidad de carga de pilares de roca que soporten estructuras pesadas aisladas. Consiste en cargar las rocas hasta su rotura (presa de contrafuerte) .

#### XI.6. Condiciones generales para realizar pruebas de campo

Todas las pruebas deben cumplir varias condiciones, las más importantes de las cuales son:

- a) Las condiciones de las pruebas deben estar acomodadas cuanto posible a la teoría según la cual sus resultados se evaluarán e interpretarán.
- b) La dimensión de la roca ensayada debe ser tal que actúen iguales factores estructurales de las rocas a como actuarán bajo la estructura futura misma.
- c) La orientación de las cargas, con respecto a los factores estructurales de las rocas, debe ser igual a la orientación de las resultantes de las cargas de la futura obra.
- d) Las pruebas deben reproducirse con fidelidad al estado de tensión bajo la futura obra.
- e) La medición de las deformaciones debe efectuarse con respecto a un punto firme, ubicado fuera de la zona afectada por la prueba.
- f) El sistema de carga y otro equipamiento necesarios deben ser simples y fáciles de manejar. La medición de deformaciones y tensiones no debe ser afectada por cambios de humedad y temperatura. Se recomienda revisar los sistemas de medición.
- g) El sistema de carga (puente de carga, reacción de carga) debe ser bastante ligero. Es conveniente que se pueda instalar (montar) elementos no pesados más de 50 - 60 kg , especialmente para ensayos en túneles donde no pueden entrar grúas.

- h) El precio del ensayo debe ser adecuado.
- i) El tiempo para preparar y realizarlos ensayos debe ser aceptable para el procedimiento de la obra.

## XI.7. Selección de lugar y cantidad de pruebas de campo

La selección del lugar y de la cantidad de las pruebas representan un paso muy importante que pueda influir bastante en la evaluación final de los resultados. No se puede resolver sin conocer bien la estructura del macizo rocoso del lugar estudiado (método estructural geológico). (Vea Fig. 54).

Buscando los lugares convenientes para la prueba, hace falta tener en la mente la cantidad de pruebas que se puedan efectuar; generalmente ésta estará limitada y casi nunca alcanzará el número deseable teóricamente.

Por ser muy caras, las pruebas “in situ” suelen efectuarse en etapas de las investigaciones ingeniero-geológicas avanzadas o durante de la construcción de la obra.

### XI.7.1. Selección del lugar de la prueba

Para seleccionar los lugares de pruebas más representativos es necesario aplicar todos los resultados de la Investigación ganados en las etapas precedentes.

En base a la evaluación de la investigación precedente el área investigada se divide en zonas relativamente homogéneas y para cada zona se determina la cantidad conveniente de ensayos (bloques casi homogéneos).

Este criterio se completa por el de la conveniencia de ensayar la roca directamente en el lugar de la futura obra.

Generalmente el lugar de la prueba debe reproducir, es decir representar, iguales condiciones que las que estarán bajo la futura obra.

El volumen del macizo rocoso debe ser tal que sean afectados por la prueba todos los factores estructurales de la roca como por el incremento de la carga causado por la obra misma.

El lugar de la prueba debe además facilitar la orientación de la carga en sentido igual a la causada por la futura obra.

Seleccionados los lugares convenientes para las pruebas hay que analizar los siguientes factores de influencia sobre el resultado de la prueba:

- a) Orientación espacial e intensidad de las cargas aplicadas al macizo rocoso por la obra;
- b) Tipo de macizo rocoso, su estructura y volumen relativo que efectuará a la obra;
- c) Orientación espacial de los parámetros estructurales del macizo rocoso (estratos, planos de estratificación, foliación y fallas) con respecto a la orientación de las cargas de la obra;
- d) Continuidad y densidad de los planos de debilitamiento de las rocas;
- e) Estado de alteración;
- f) Condiciones hidrogeológicas de la obra;
- g) Descripción detallada geológica y mineralógica del macizo rocoso en el área de la obra.

Para zonificar el área de la obra hay que valerse de los resultados de los métodos geofísicos, del índice RQD y de otros métodos de investigación.

Fig. 54 :  
Ubicación de las pruebas  
in situ en la galería  
para la hidrocentral  
MANTARO en Perú (según  
K. Drozd, 1977).

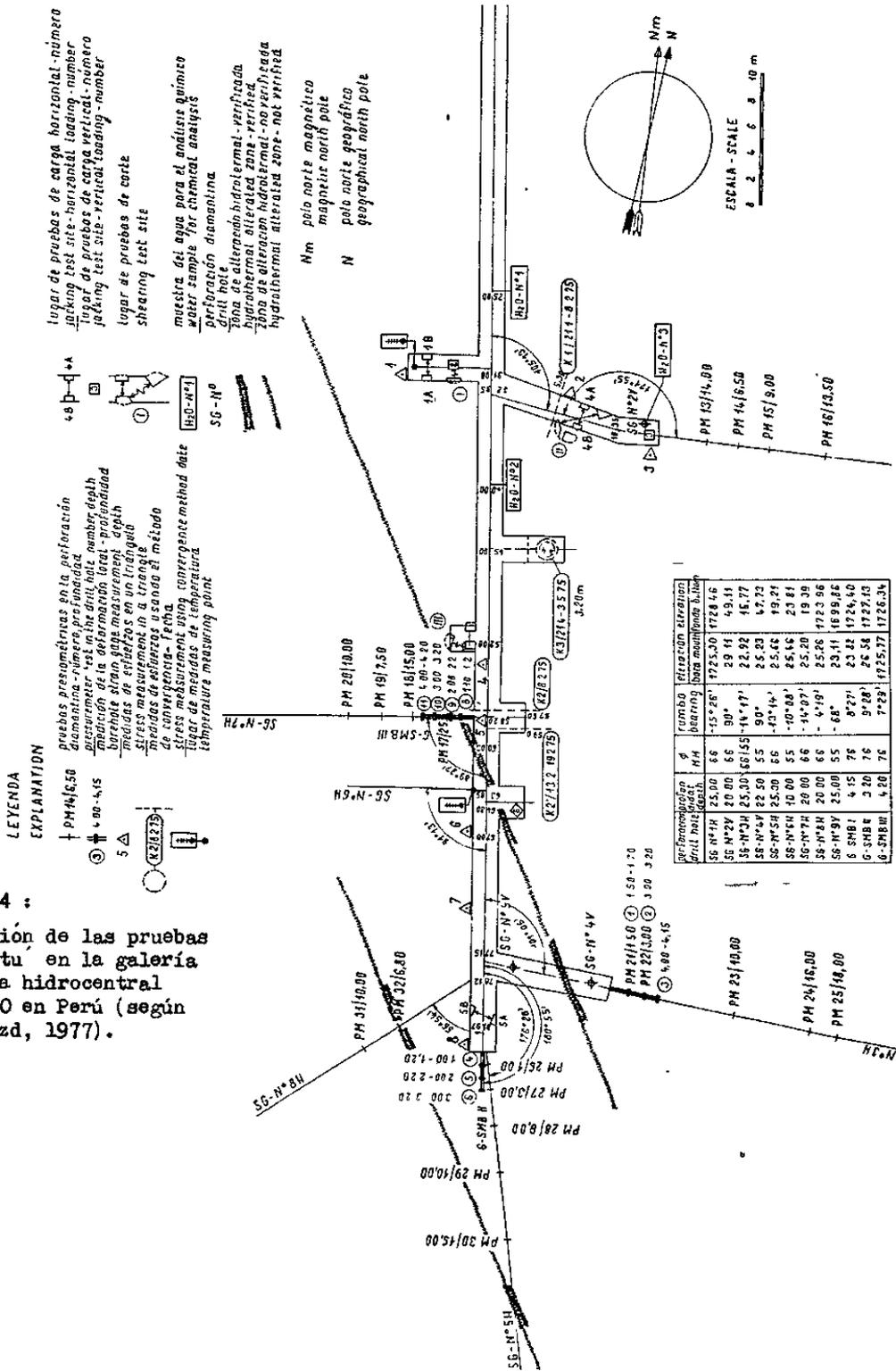


Fig.54: Ubicación de las pruebas „in situ“ en la galería para la Hidrocentral Mantaro en Peru. (según Karel Drozd, 1977).

### XI.7.2. Cantidad de pruebas

La cantidad de pruebas para cada zona depende de la sensibilidad de las estructuras, de la homogeneidad relativa de la zona investigada y de los valores de los módulos de deformación del subsuelo en la zona (Vea Fig. 55).

Por otra parte entran factores económicos, del tiempo disponible para la ejecución y evaluación de la prueba y problemas tecnológicos.

No siempre es necesario efectuar pruebas en el campo. Generalmente si el valor del módulo de deformación del lugar investigado es mayor que  $100\ 000\ \text{kg/cm}^2$ , no es de mucha importancia y no sería económico para las obras corrientes realizar pruebas de deformación en el campo.

Cuando se supone un valor menor para cada zona de las obras grandes se recomienda realizar de dos hasta seis ensayos.

La resolución de efectuar pruebas in situ y cuantas se hace en base a la evaluación de la sensibilidad de la estructura (obra) con respecto a algún parámetro especial del macizo rocoso, que desempeñe un papel importante en la influencia recíproca "obra - subsuelo".

Por ejemplo, para presas de hormigón la relación entre los módulos de deformación del macizo rocoso y del hormigón llega a ser importante solo cuando es menor de  $1/4$ .

Para valores mayores el módulo de deformación del subsuelo desempeña un papel despreciable, mientras que para un valor menor de  $1/16$  el comportamiento de la presa es controlado casi totalmente por módulos de deformación del subsuelo. En tal caso resulta necesario determinar las propiedades deformativas del subsuelo muy detalladamente y ante todo en los casos de su no homogeneidad. Entonces se aplicará una cantidad de ensayos elevada mientras que en el primer caso, cuando dicha relación es mayor que  $1/4$ , no se realizará prueba ninguna.

### XI.8. Principios de preparar lugar de prueba de campo

Por medio de pruebas "in situ" verificamos las propiedades del macizo rocoso en su estado inicial, no afectado por la intervención del hombre.

Cada intervención al estado natural del macizo rocoso, formado por el desarrollo geológico a largo plazo, influye en sus propiedades mecánicas. Por eso es necesario que los trabajos preparatorios afecten el estado natural del macizo rocoso lo menos posible.

Por ejemplo, la zona de afectación del macizo rocoso por los trabajos con explosivos, que se efectúen para facilitar la excavación en la roca, alcanza como mínimo hasta la profundidad de 0,5 m detrás de la zona aflojada por la explosión.

Por eso en las galerías de investigación determinadas especialmente para la descripción de las condiciones geológicas, abiertas por medio de explosivos, no se recomienda realizar ensayos "in situ".

Mejor es situar los lugares de pruebas en galerías laterales excavadas de una manera que no haya afectado el macizo rocoso. La aplicación de explosivos debe ser limitada, debe prevalecer trabajo a mano, como mínimo un espesor de 50 - 80 cm por encima de la superficie del lugar ensayado.

Además la superficie del terreno determinado para el ensayo debe ser protegida ante una meteorización rápida, influencia de agua pluvial y sol y de influencias tecnológicas.

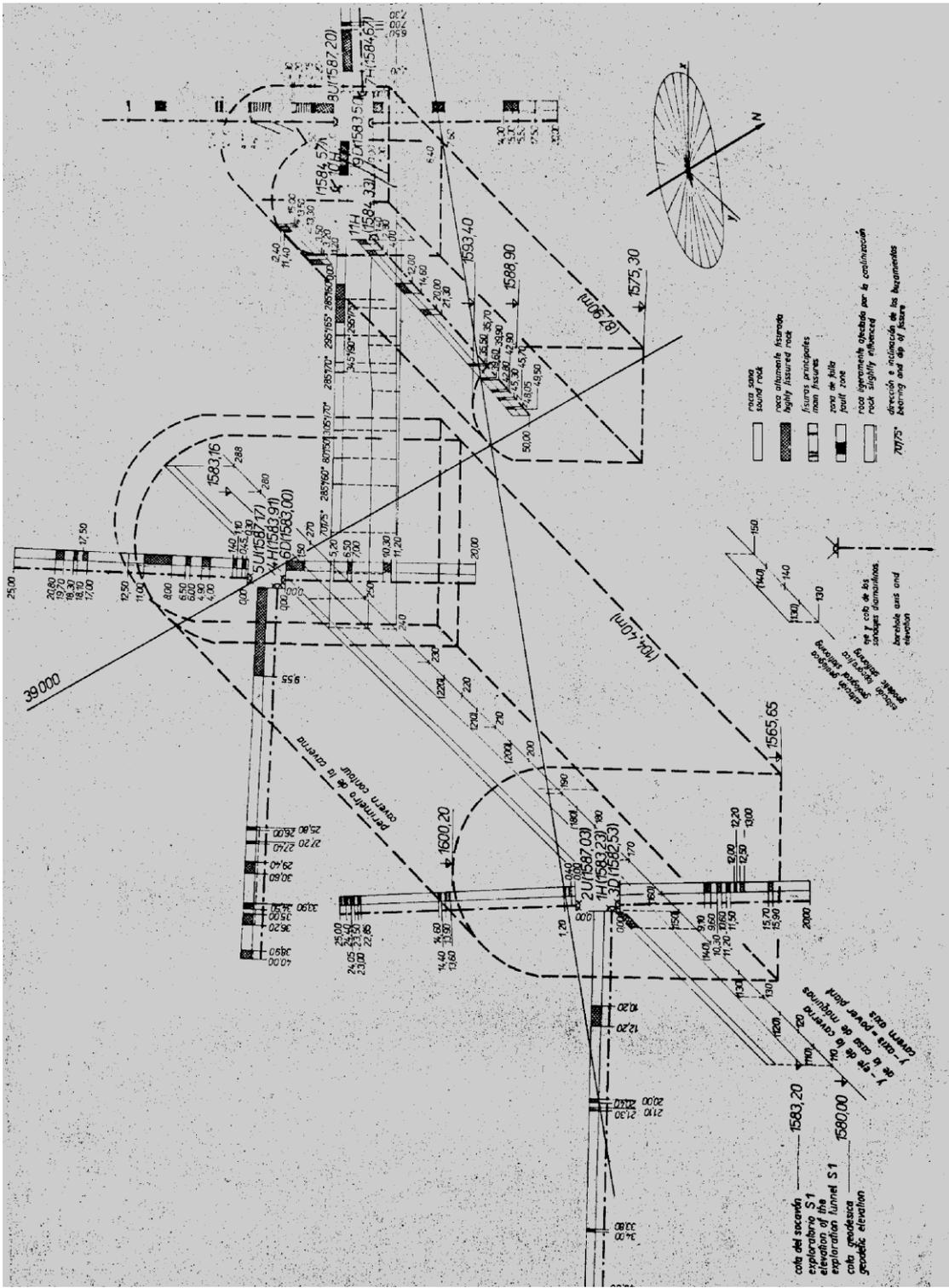


Fig.55: Para definir la cantidad de las pruebas "in situ", es necesario estudiar muy detalladamente la estructura geológica del lugar (según K. Drozd 1971 — Plano geológico de la Hidrocentral Mantaro en Perú).

La superficie de la roca ensayada debe prepararse muy cuidadosamente a mano y de tal manera que el contacto entre la roca y la placa que distribuye la carga sea perfecto y continuo. No pueden permitirse concentraciones de tensión en puntos de irregularidades sobre la superficie de la roca. Por eso se forma algunas veces entre la placa y la roca un estrato transitorio de hormigón de un espesor lo más pequeño posible. Su módulo debe ser mucho mayor que el módulo de la roca ensayada.

## **Capítulo XII**

### **Resistencia a la compresión**

La prueba de compresión simple proporciona fácil y económicamente un índice de identificación de la matriz rocosa que constituye un macizo rocoso. Los resultados de esta prueba como los de muchas otras pruebas siempre muestran una gran dispersión. Esta dispersión está ligada a la naturaleza discontinua de la roca, lo que viene a corroborar el concepto de que las propiedades mecánicas de la roca están regidas por la presencia de superficies de discontinuidad, ya sean las fronteras entre cristales, microfisuración en las probetas o las juntas, planos de estratificación o planos de fallas al nivel de fenómenos geológicos. Además hay que tener en cuenta:

- a) La muestra es muy pequeña y no puede, por esta razón, contener todos los elementos estructurales que influyan sobre el comportamiento de las rocas;
- b) La muestra se puede estropear durante la extracción, transporte, almacenamiento y preparación del ensayo;
- c) La carga que se aplica en el laboratorio jamás puede modelar exactamente el modo de carga provocado por la construcción de la presa;
- d) La muestra de la roca que se investiga en el laboratorio representa generalmente la parte más sana del macizo rocoso y por esta razón no siempre es la representativa.

Más, pese a todas las objeciones contra esta prueba, lo siguiente argumenta en su favor:

- a) El valor medio de la resistencia a la compresión simple permite una primera clasificación del lugar;
- b) Las variaciones de una zona y otra de un mismo lugar proporcionan la información sobre su heterogeneidad;
- c) La anisotropía de la resistencia medida en las probetas es la indicación de una posible anisotropía a gran escala;
- d) La dispersión de los resultados obtenidos en las pequeñas probetas es un índice del fracturamiento de la matriz rocosa que depende de la historia tectónica del macizo rocoso;
- e) La correlación de valores de la resistencia simple con módulos elásticos, RQD etc. en dependencia con la profundidad puede darnos cierta información sobre la distribución de diferentes zonas de tensiones.

Con el propósito de facilitar la realización de este tipo de pruebas, minimizando a la vez tiempo y costo, se ha ideado la realización de pruebas de carga de aplicación puntual o

brasileña. En esta prueba se elimina la necesidad de preparar las cabezas de las probetas. En la fig. 56 presentamos la correlación obtenida entre la prueba de carga puntual y la de compresión simple.

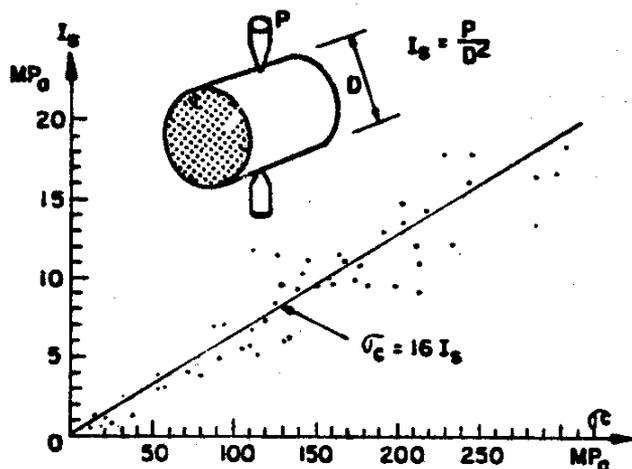


Fig. 56: Relación entre el índice de resistencia bajo carga puntual ( $I_s$ ) y la resistencia a compresión simple ( $\sigma_c$ ).

Existen varias clasificaciones de resistencia axial. Se puede recomendar la clasificación según ISRM (1977) :

Clase de resistencia	Roca y clasificación de su resistencia	Resistencia axial $\text{kg.cm}^{-2}$
R 1	Extremadamente baja	2,5 – 10,0
R 2	Muy baja	10,0 – 50,0
R 3	Baja	50,0 – 250
R 4	Media	250 - 500
R 5	Alta	500 - 1000
R 6	Muy alta	1000 - 2500
R 7	Extremadamente alta	Más de 2500

Tab.15: Clasificación de resistencia según ISRM.

Las rocas que tienen resistencia más baja que  $2,5 \text{ kg/cm}^2$  se clasifican como suelos con índices  $S_1 - S_6$  (suelos).

## Capítulo XIII

### Ensayos de resistencia al cortante

Los esfuerzos a que se ven sometidas las cimentaciones o los taludes en roca son débiles generalmente, por tanto la ruptura de estos macizos raramente se presenta por fracturamiento de la roca intacta o matriz rocosa. El comportamiento mecánico de las cimentaciones está regido por los desplazamientos por cortante sobre las superficies de discontinuidad geológica, tales como fisuras y juntas. Por tanto, la determinación de la resistencia al cortante en estas superficies de discontinuidad geológica es fundamental para el estudio de comportamiento de cimentaciones de presas.

Para el estudio de la resistencia tangencial en las superficies de debilidad del macizo se han desarrollado los ensayos de corte “in situ”, que consisten esencialmente en aplicar a una probeta tallada in situ una carga normal al plano, cuya resistencia queremos medir, y otra fuerza inclinada. (Vea fig. 57)

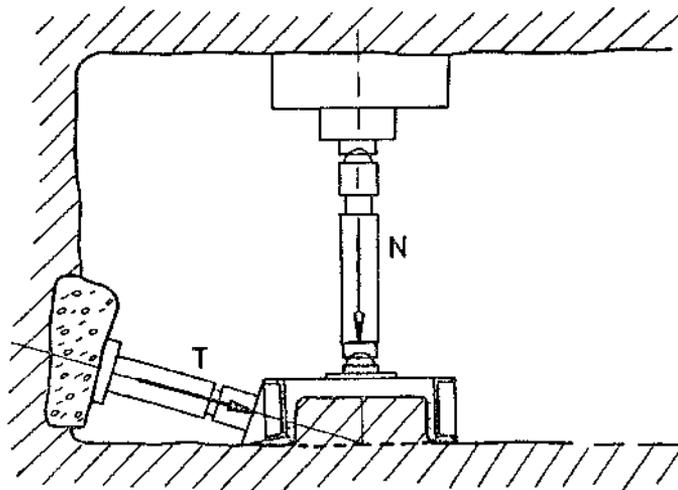


Fig. 57: Dispositivo de la prueba de resistencia “in situ”.

El ensayo se realiza manteniendo la presión en el gato normal e incrementando continuamente o sucesivamente la carga horizontal tangencial hasta su rotura. El estado tensional que provoca la rotura está caracterizado por los valores de las tensiones normales y tangenciales que representan un punto de la curva de resistencia. Con varios ensayos se puede interpolar dicha curva. Tras alcanzar la rotura puede obtenerse un valor del coeficiente de fricción al cortante manteniendo la presión del gato normal y registrando cual es la precisa para proseguir el corte. Con este proceso se intenta apreciar primero la resistencia máxima y luego la residual.

Las superficies de discontinuidad (estratigráficas o tectónicas) tienen por lo general una resistencia nula a la tensión y una resistencia al cortante que depende de la rugosidad de las paredes, del material de relleno y de la trabazón entre bloques. Desde el punto de vista de la estabilidad son evidentemente más peligrosas las superficies planas, lisas, rellenas de material blando, de gran extensión y sin trabazón entre bloques. Las superficies de separación menos peligrosas son aquellas que no han sufrido en su vida geológica

desplazamientos por cortante y por tanto tienen una rugosidad, carecen de relleno y tienen una fuerte trabazón entre bloques.

Los dos tipos de superficies de separación descritos tienen comportamiento mecánico diferente. En el caso de las superficies rugosas (curva A, fig. 58) la probeta se comporta de manera aproximadamente lineal elástica para pequeños desplazamientos a causa de la trabazón de las irregularidades de la superficie. Para un cierto valor del desplazamiento la resistencia al corte de la superficie es sobrepasada a causa de la ruptura por cortante de las irregularidades y se observa una disminución rápida de la resistencia al corte y las deformaciones continúan aumentando. Finalmente, cuando la superficie esté completamente lisa, se obtiene la resistencia residual.

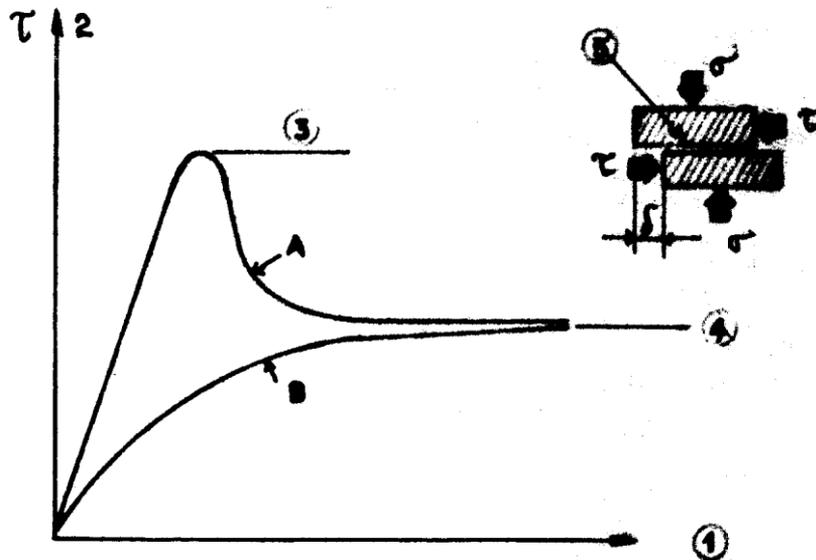


Fig.58: Variación de la resistencia al cortante de una discontinuidad en función del desplazamiento.

1 - desplazamiento; 2 - esfuerzo cortante; 3 resistencia en el pico; 4: resistencia residual; 5 - discontinuidad preexistente; A : superficie rugosa que no ha sufrido desplazamiento con anterioridad; B: superficie lisa que ha sufrido previamente grandes desplazamientos.

El comportamiento típico de las superficies de discontinuidad en un macizo rocoso lo representan las curvas de la fig. 59. En ocasiones aparece una cohesión C, debida a cementación a lo largo del plano de discontinuidad. Para bajos niveles de esfuerzo cortante se ha observado que las probetas sufren expansión provocada por la dilatación entre fisuras. Esta dilatación se debe a que las rugosidades no fallan al cortante a estos niveles de esfuerzo y las deformaciones son desplazamientos de unas irregularidades respecto a otras. Al aumentar los esfuerzos normales se impide la dilatación y entonces ocurre la falla por cortante en las rugosidades; posteriormente se confirman aumentando los esfuerzos, ya que solamente se tendrá la fricción entre dos superficies alisadas.

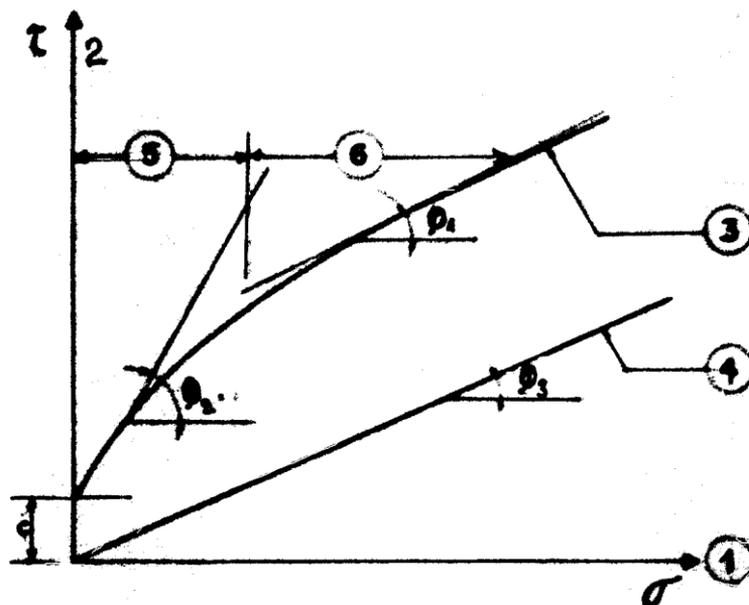


Fig. 59: Variación de la resistencia al cortante en función del esfuerzo normal, para la resistencia en el pico y la resistencia residual.

1- Esfuerzo normal; 2 - resistencia al cortante; 3 - resistencia en el pico; 4 - resistencia residual; 5 - distancia; 6 - corte

Un punto sumamente importante que surge de la fig. 59 es que la resistencia residual de las superficies lisas no está influenciada por la escala de la prueba. Esto es debido a que el ángulo de fricción  $\phi_r$  es un número adimensional y previene que no exista ninguna cohesión, por lo que su valor puede ser determinado por pruebas en muestras pequeñas (Londe, P., 1973). Por otro lado, cuando los desplazamientos en las superficies lisas no han ocurrido en movimientos geológicos antiguos y las muestras presentan una resistencia pico (curva A, fig. 58), la cohesión  $C$  y el ángulo de desigualdad  $\phi_i$  dependerán de la escala del espécimen probado.

Por lo antes mencionado, la pregunta básica que se debe considerar es:

¿Pueden los valores de la cohesión y del ángulo de desigualdad ser determinados en una escala menor en pruebas de laboratorio para el diseño de las grandes estructuras ingenieriles?

Sobre los inconvenientes que tienen las pruebas en el laboratorio ya hablamos en párrafos anteriores. Para responder esta pregunta, hay que plantearla unida con la representatividad de los ensayos y ante esta duda se han establecido dos corrientes de solución:

La primera tiende a aumentar las dimensiones de la superficie ensayada, tratando de eliminar los efectos locales. No cabe duda que, aumentando la dimensión de la prueba, nos acercamos mucho mejor a las condiciones de la naturaleza, abarcando todos los elementos estructurales de la roca que determinen su comportamiento mecánico. Más, este tipo de pruebas presenta un inconveniente básico - un costo elevado, que impide la realización de un volumen de ensayos tal que permita su análisis estadístico.

Por esta razón no hay que rechazar la otra corriente, la que trata de aumentar el número de ensayos, dentro de unos límites económicamente admisibles, utilizando ensayos de laboratorio. La gama de posibilidades que ofrece el laboratorio para estos estudios es amplia,

pero, naturalmente, como siempre, la elección, en consonancia con los requerimientos, es imprescindible. El primer problema que se plantea es el análisis de la constitución de la discontinuidad o familia de discontinuidades que hay que estudiar. En este sentido cabe establecer una clasificación de las discontinuidades con diferentes tipos y espesor del relleno hasta el caso de una amplia superficie de contacto roca-roca.

Evidentemente, para el primer grupo el elemento condicionante de la resistencia es precisamente el relleno, y han de ser sus características de resistencia al corte el objeto de la investigación. Estos rellenos, producto de la alteración de la roca circundante o de la deposición del agua que ha circulado por la discontinuidad estudiada, suelen ser de tipo limo-arcilloso y, por tanto, susceptibles de analizarse mediante ensayos triaxiales o de corte directo.

En estos casos el punto quizás más delicado consiste en la obtención de muestras de relleno. Cuando el relleno tiene suficiente potencia y su constitución es sensiblemente isotrópica, resulta relativamente fácil obtener probetas inalteradas. Si el espesor del relleno de la discontinuidad es débil, se puede trabajar con muestras remoldeadas, cuya representatividad es evidentemente discutible, pero opinamos que en muchos casos será suficiente.

En cuanto a otro grupo - el de discontinuidades limpias - hay que anticipar que generalmente las superficies de discontinuidad no suelen ser planas sino que corresponden a superficies rugosas más o menos entretejidas. Esta constitución implica un posible acomodamiento que se refleja en una cierta resistencia tangencial a esfuerzo normal nulo. Es decir un efecto similar al de la cohesión, pero conceptualmente distinto. Resulta, por tanto, que la rugosidad de los labios origina la existencia de una cohesión ficticia que debe ser vencida para iniciar el corte.

El laboratorio permite analizar estas particularidades estadísticamente, aunque presente como dificultad la obtención de muestras representativas.

Por las dificultades mencionadas y por los altos costos de las pruebas de campo elaboró MENCL (1968) una tabla que refleja las macrotexturas básicas de la roca y sus parámetros  $\phi_0$  y  $\delta$  característicos para las discontinuidades cerradas y con relleno arcilloso (vea tab. 16).

A base de los estadios hechos por la comparación de datos del laboratorio con la realidad - estudio de estabilidad de los taludes - se proponen las siguientes reglas generales:

a) Cuando se trata de una estructura muy grande que haya sido diseñada para las condiciones de una larga vida útil (más que 100 años), se recomienda que el diseño tenga cero de cohesión y el ángulo de fricción residual  $\delta_r$  puede ser determinado en una escala menor por pruebas de laboratorio, sin abandonar la posibilidad de realizar pruebas de corte "in situ" bajo ciertas circunstancias especiales.

b) Donde se diseñan estructuras temporales y de tamaño limitado, es permisible admitir alguna cohesión y ángulo de fricción según analogía, utilizando la tabla 16.

En ocasiones, en que la dificultad de tomar probetas haya resultado insuperable, acudimos a "fabricar" superficies de discontinuidad. El proceso consiste en tomar testigos de roca sana y someterlos a ensayos de rotura. Cuando estas roturas se produzcan por tracción o corte, prácticamente se ha reproducido a escala el proceso geológico de formación de las superficies de discontinuidad y ciertamente en probetas rotas así se observan las rugosidades y escalonamientos antes comentados. Sobre la superficie así obtenida se realizan ensayos de corte directo.

Resistencia de las fragmentas /máximas de fragmentas/ en la presión axial		100 kpc/cm <sup>2</sup>										500 kpc/cm <sup>2</sup>									
Orientación de las plamas al plano principal de los esfuerzos $\sigma_1$		30°		45°		60°		75°		90°		105°		120°		135°		150°			
Tipo del orden geom.		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Y	cerradas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
	abiertas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
M	cerradas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
	abiertas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
K	cerradas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
	abiertas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
SM	cerradas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
	abiertas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
X	cerradas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
	abiertas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
I	cerradas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
	abiertas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
O	cerradas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
	abiertas	1	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°
		2	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°	2,5 33°

Explicación de d. 

1) Los valores son dados solamente por resistencia por resistencia según planos. Sería útil averiguarlos pgr las pruebas. Al definir los valores entre  $\alpha = 30^\circ$  y  $\alpha = 60^\circ$ , no es conveniente interpelarlos. De  $\alpha = 40^\circ$  bajan valores en dirección al  $\alpha = 60^\circ$  más rápidamente. El mínimo de los valores puede ser el  $\alpha < 60^\circ$ .

Explicación: el primer número significa  $c' \text{ kpc/cm}^2$   
 el segundo número  $\phi$   
 el tercer número la presión en el plano de deslizamiento, donde la dilatación está suprimida.

Tab.16: Tabla de las macrotexturas básicas de la roca y sus parámetros  $\phi_0$  y  $\phi$  característicos para las discontinuidades cerradas y con relleno arcilloso. (según Mencl, 1968).



## Capítulo XIV

### Ensayos de deformabilidad

Para el análisis de la deformabilidad del macizo rocoso se utilizan, en general, prospecciones sísmicas y ensayos de carga directa.

La prospección sísmica de refracción se basa en la medición de la velocidad longitudinal de la onda sísmica. Obteniendo además la velocidad transversal, y el coeficiente de Poisson, se puede calcular el módulo de deformación (vea fig. 60).

Entre los módulos dinámicos y los estáticos proporcionados por los ensayos de carga existen correlaciones que, creemos, no son factibles, precisamente; sin embargo, la abundancia de resultados sísmicos y de las pruebas de carga directa nos permiten hoy una buena identificación comparativa (vea fig. 61). Generalmente los módulos dinámicos son dos hasta cinco veces superiores a los elásticos.

Actualmente utilizamos con mucha frecuencia registros geofísicos en calas, es decir carotaje sísmica, la que nos da la posibilidad de definir módulos dinámicos por tramos de la cala y definir correlaciones entre módulos dinámicos y el estado de fracturación, grado de meteorización etc. y buscar y definir por módulos lugares débiles.

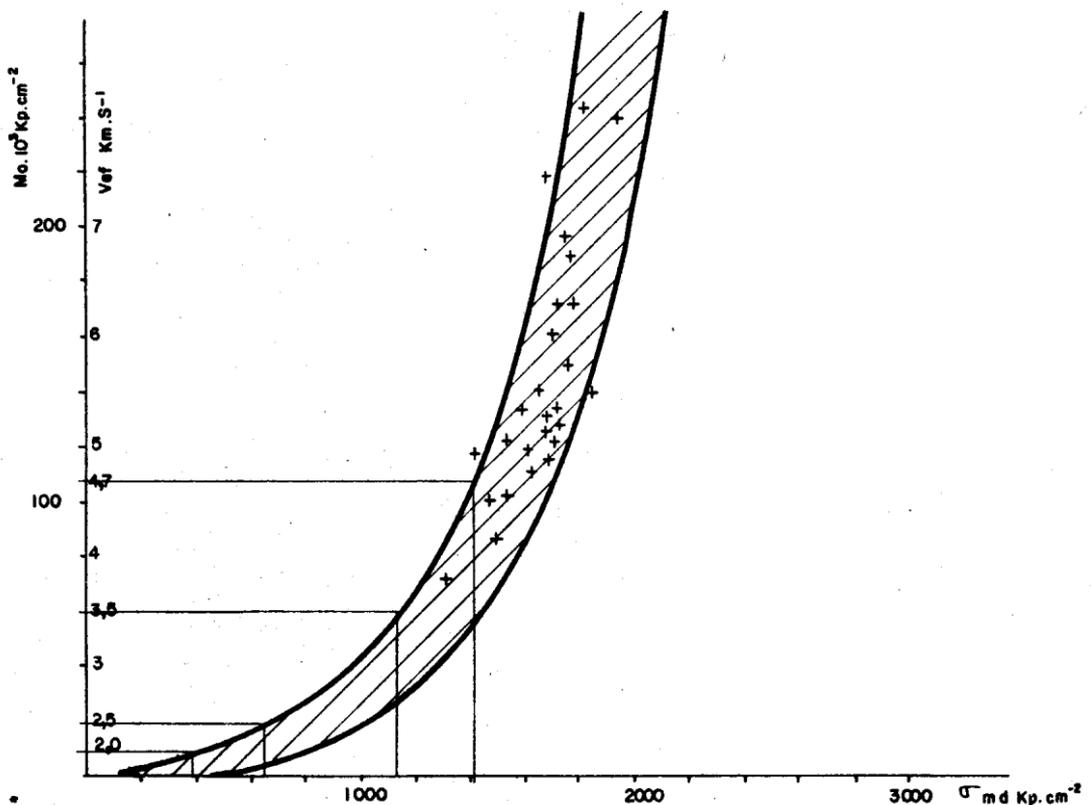


Fig. 61: Correlación entre resistencia simple ( $\delta_{md}$ ), velocidad de ondas sísmicas "in situ" ( $V_{ef}$ ) y módulos de deformaciones estáticos ( $M_o$ ) en un macizo de granulitas (Horsky 1972)

A base de mediciones de la velocidad de la onda sísmica entre las calas en diferentes profundidades era posible definir isolíneas de velocidades de las ondas sísmicas en los cortes diferentes y calcular módulos dinámicos para diferentes zonas en plano. (Vea fig. 62)

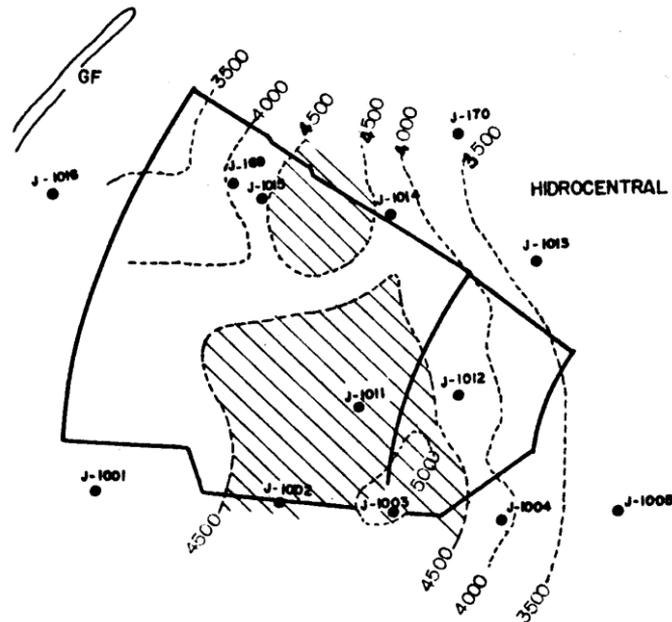


Fig.62: Isolíneas de velocidades de las ondas sísmicas en el corte horizontal en las granulitas a la profundidad de 30 m; al pie de la pendiente derecha e izquierda se notan zonas de tensiones concentradas, las que se caracterizan con velocidades de ondas máximas.

Leyenda : J-1001- cala rotaria; GF; geófono ubicado en la galería;| 4000; velocidades de las ondas sísmicas en  $\text{ms}^{-1}$ .

Todos estos métodos citados no son, en absoluto, exclusivistas. Últimamente buscamos relaciones entre otros métodos y parámetros, como por ej. entre la resistividad eléctrica y velocidad de onda sísmica, tratando de descorrer más detenidamente cada detalle del macizo rocoso por su módulo, (Vea fig. 63).

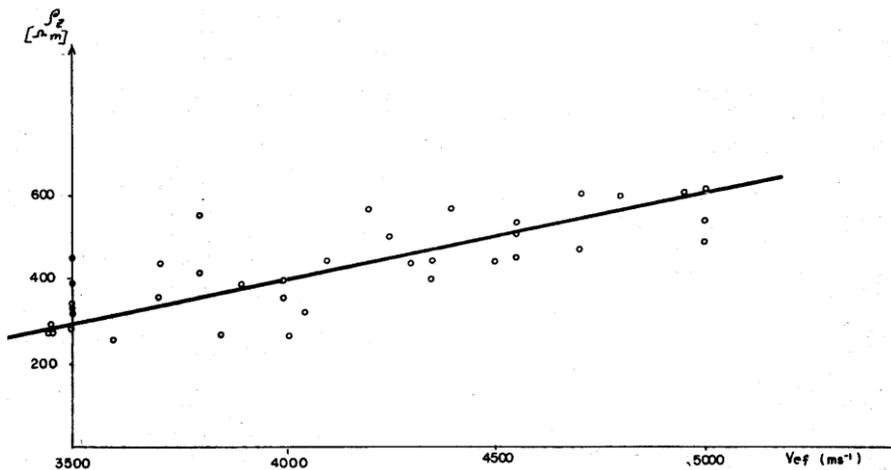


Fig.63: Gráfico de correlación entre  $\rho_z = f(V_{ef})$  (Müller 1972).

Los ensayos de carga directa permiten la obtención de un modulo de deformación estático, al que antes nos referimos para subrayar sus diferencias con el dinámico obtenido por geofísica. Los primeros ensayos de carga fueron una extrapolación de las placas de carga convencionales en mecánica del suelo. Así se trabajaba con placas de 300 a 500 mm de diámetro colocadas diametralmente en las paredes de una galería de reconocimiento. La constatación de unos valores siempre comparativamente bajos hizo pensar en la decisiva influencia de la corona afectada por la excavación de la galería.

Dicho en otras palabras, los resultados se consideraban bajos debido a que la zona afectada por la carga, dado el reducido tamaño de la placa, quedaba enteramente dentro de la corona de estabilización. Tratando de salvar este inconveniente se adoptaron dimensiones cada vez mayores; placas flexibles del orden de 1 a 2 m<sup>2</sup> de área de apoyo y utilización de grandes gatos planos con superficie de apoyo de 4 m<sup>2</sup> y empuje total de 3 600 t.

Tratando de aproximar cada vez más la escala se han realizado ensayos de puesta en carga de una galería. Sin embargo, los valores de los módulos estáticos siempre resultan comparativamente bajos cualquiera que sea la superficie ensayada, si bien, como se suponía, aumenta en general el valor del modulo al ampliar la superficie ensayada.

Todo ello hace pensar, como decíamos al principio, que el problema no puede reducirse a una simplista aplicación de las formulas de Boussinesq, tanto porque éstas responden a una hipótesis de medio homogéneo e isótropo, que en todo caso es una bruta primera aproximación, como por el hecho de la profunda extrapolación que representa la aplicación de los valores numéricos del ensayo al comportamiento global del cimiento.

Los ensayos de carga suelen llevarse a efecto mediante la aplicación de sucesivos ciclos de carga y descarga, con presiones máximas en cada ciclo crecientes. Las curvas presiones - asientos bajo la placa de carga presentan diversas formas, tanto en el aspecto de cada ciclo (linealidad o no del tramo de carga e histéresis respecto a la rama de descarga), como en la envolvente del conjunto de ciclos.

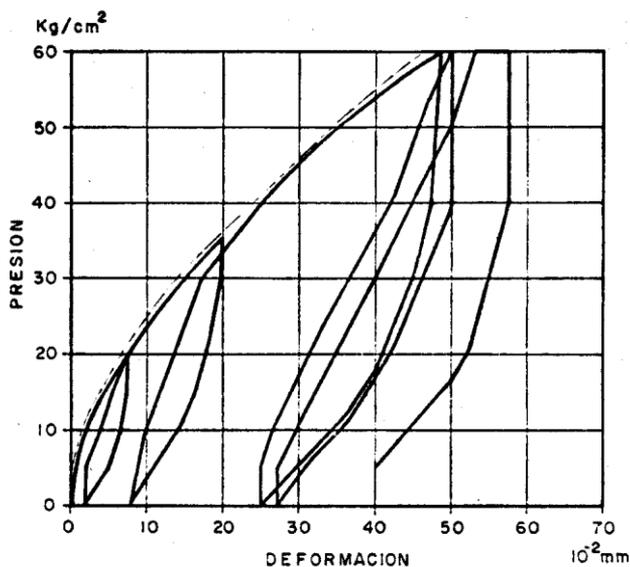


Fig. 64: Curva de presiones – asientos.

La forma de este envolvente general parece estar relacionada con la constitución del material ensayado. Así, una envolvente con concavidad hacia el eje de presiones parece que

debe responder a un macizo fisurado que se va cerrando por efecto de las presiones aplicadas. Por el contrario, las envolventes con concavidad hacia el eje de asientos (vea fig.64) parecen indicar una propagación de las zonas plásticas irrogadas por las presiones de las placas rígidas en los bordes o también los deslizamientos o microdeslizamientos de bloques pétreos.

Realizadas en el lugar del eje muchas pruebas de carga directas en diferentes profundidades (en galerías y pozos), es posible definir como se cambia el módulo de deformación con la profundidad (véa fig.65).

Aunque las pruebas de carga directa nos dan buenos resultados, hay que utilizar métodos sísmicos como complementarios para poder extender su validez a todo el macizo rocoso.

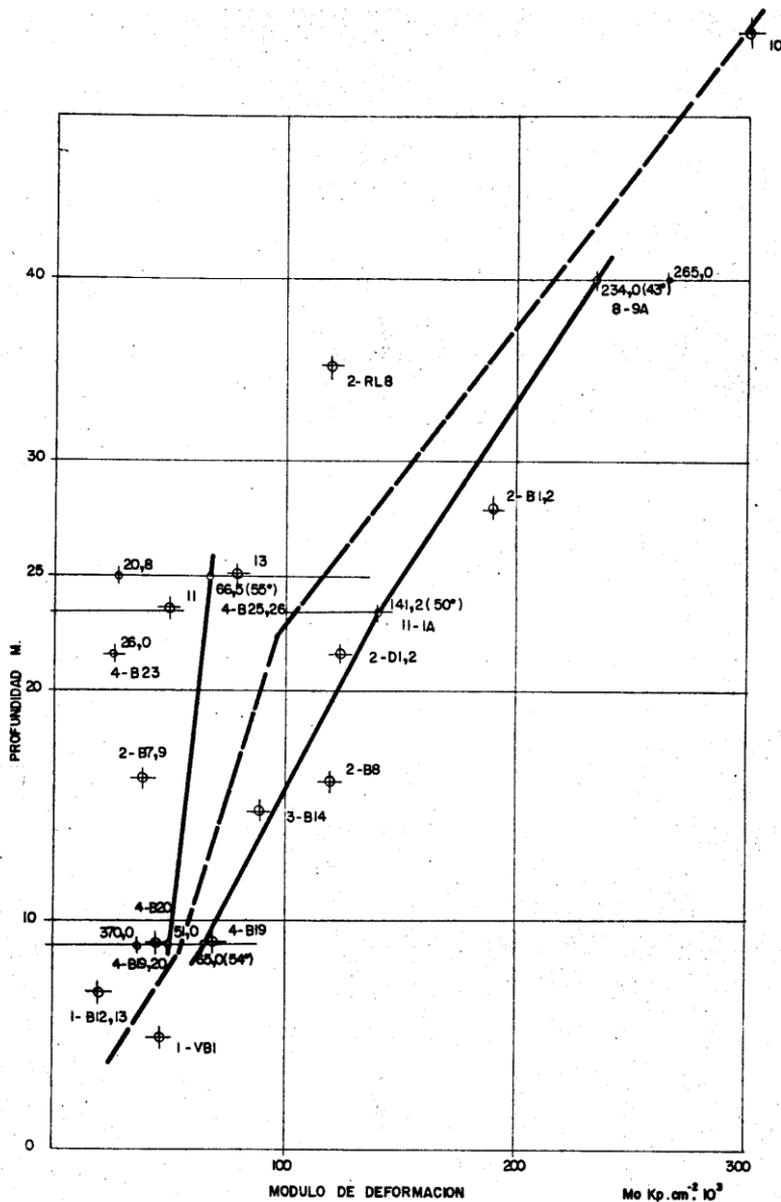


Fig.65: Desarrollo del módulo de deformación con la profundidad en eje de la presa Dalešice, República Checa (según Horsky, 1972)

## Capítulo XV

### Criterios de permeabilidad de la roca y problemas relacionados con la cortina de impermeabilización

Uno de los primeros autores que estaba estudiando la problemática relacionada con la permeabilidad de la roca debajo de la presa, había sido LUGEON. La permeabilidad estaba investigándose en un tramo de la perforación de 5 m tapado con obturador simple. Valores de la presión habían sido medidas en la boca de la perforación /Fig.66/.

La prueba de inyección duraba 10 minutos. A base de este definió pérdidas del agua permisibles de 1 litro por minuto por tramo de un metro unitario ( 1 l/min/m ) de la cala para las presas más altas que 30 m. Para las presas de la altura menor de 30 m permitió pérdidas del agua hasta 3 l/min/m. Las pruebas se han realizado con una presión de 10 atm.

Otro criterio conocido es de Jähde (0,1-0,5 l/min/m) ejerciendo presión de 3 atm. y de Terzaghi (0,05 l/min/m) ejerciendo presión de 0,1 atm.

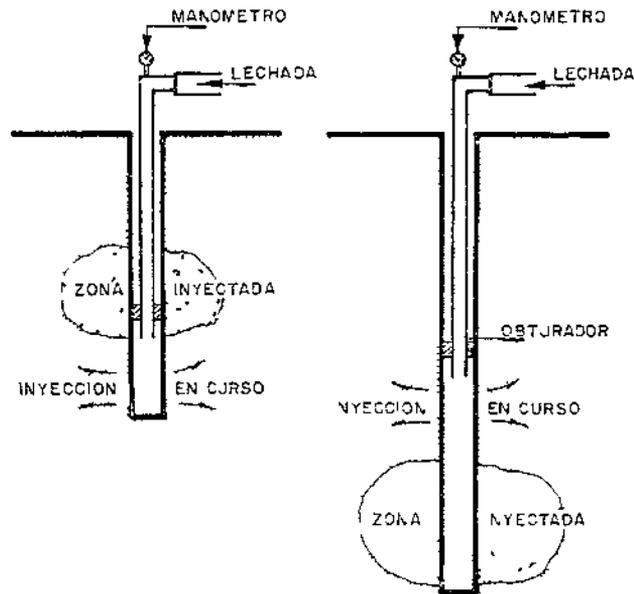


Fig.66: Esquema de ubicación del obturador durante de prueba de inyección del agua.

Si conjugáramos el criterio de LUGEON según ecuaciones de Veriguin y Altovski, obtendremos el coeficiente de permeabilidad  $K = 4$  hasta  $9 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} = 0,0034 - 0,0078 \text{ m/día}$ , lo que significa la roca impermeable.

Aunque estos criterios se utilizan en muchos países y reflejan una gran experiencia en la construcción de presas, no reflejan hoy las necesidades básicas de una obra hidrotécnica. Hay que tener en cuenta que la problemática de las infiltraciones debajo de una presa representa una cuestión muy compleja, lo que depende de muchos factores, entre ellos de las tensiones naturales en el macizo rocoso, de cargas inducidas por la obra y de la resistencia a la destrucción y socavación de las variedades litológicas y del relleno de las grietas y cavernas.

Las formas de destrucción del suelo y de la roca son diferentes, así como sufusión mecánica, socavación del contacto, enjuagadura /lavamiento/ del relleno de grietas etc. A menudo este problema no se estudia detalladamente, aunque por su importancia para la seguridad de las instalaciones hidrotécnicas, no cede al problema de infiltraciones. Hay que decir que no solamente la permeabilidad, sino que también la resistencia a la filtración sirve como una determinación muy importante para el tipo y el volumen de los trabajos contra la filtración.

Por ejemplo si la filtración por debajo de la construcción sobrepasa las normas, pero no existe peligro para la resistencia y la seguridad de la obra, depende del balance hidroeconómico, si o no construir una cortina impermeable. Al contrario cuando la filtración es pequeña, pero los gradientes son tales que exista un peligro para la resistencia y la seguridad de la obra, la construcción de un dentellón y de cortina es obligatoria para prolongar las distancias de filtración y disminuir el valor de los gradientes de cargas. (Fig.67 y 68).

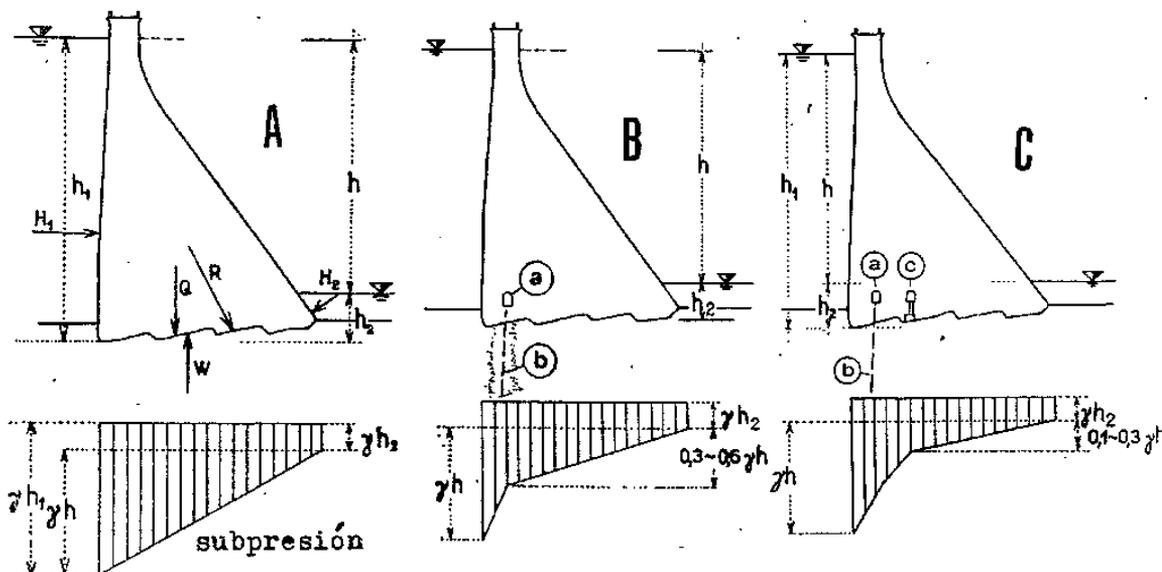


Fig.67: Las fuerzas principales los que actúan en la presa de gravedad /A/ y posibilidades como disminuir las subpresiones en los fundamentos (B y C).

a - galería de inyecciones; b - cortina de inyección; c - galería del drenaje

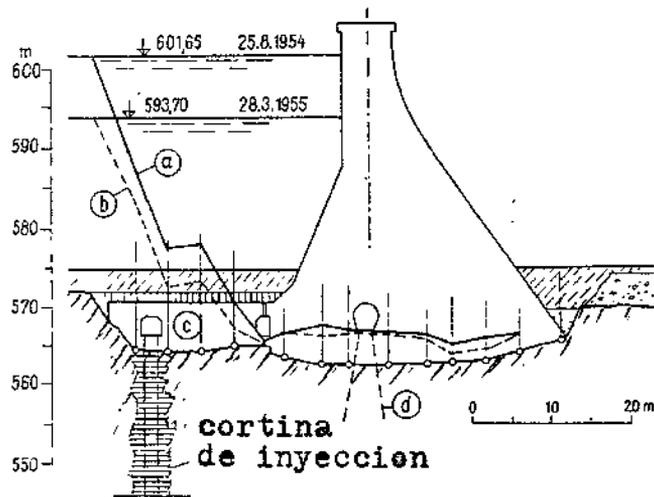


Fig.68: Para disminuir las subpresiones hemos realizado en la presa ORAVA de Eslovaquia una cortina de inyección realizada desde una galería de inyecciones ubicada en el bloque de hormigón (c) aguas arriba.  
a - subpresiones medidas en el año 1954; b - subpresiones medidas en el año 1955;  
c - bloque de hormigón; d – sondas del drenaje (según Cermak, 1955).

El gradiente hidráulico creado por la presencia de un vaso de agua o por un manto freático hacen circular el agua a través de las fisuras de un macizo rocoso, ejerciendo como mencionábamos antes los efectos mecánicos del flujo. Además la presión del agua creada por el cambio del gradiente hidráulico ejercerá sobre la estabilidad del macizo rocoso. Esta influencia puede ser frecuentemente muy importante y en ocasiones llegar a ser un factor determinante de todo el proyecto de cimentación de una presa. Este problema lo habían estudiado en la república Checa (Verfel, 1959) en algunas presas, donde construyeron cortinas de impermeabilidad según criterios de LÜGEON y de Jähde. Para controlar la función de la cortina, se realizaron tres escalones de las calas con mediciones de presiones provocadas por el gradiente hidráulico, un escalón en la cortina, otro antes de la cortina aguas arriba y el último aguas abajo. Estas mediciones y explotaciones de las obras en los años próximos nos dieron la razón que la cortina heha estrictamente a base do los criterios es muy severa, ya que el gradiente hidráulico en la cortina desciende con la profundidad de 15 m más de cuatro veces y en la profundidad de 30 m más de ocho veces. Es decir con la profundidad el gradiente hidráulico en la cortina desciende rápidamente y el desarrollo del gradiente nos da razón de que hubiera sido posible construir la pantalla no tan compleja y profunda (véa fig.69) y ahorrar las inversiones.

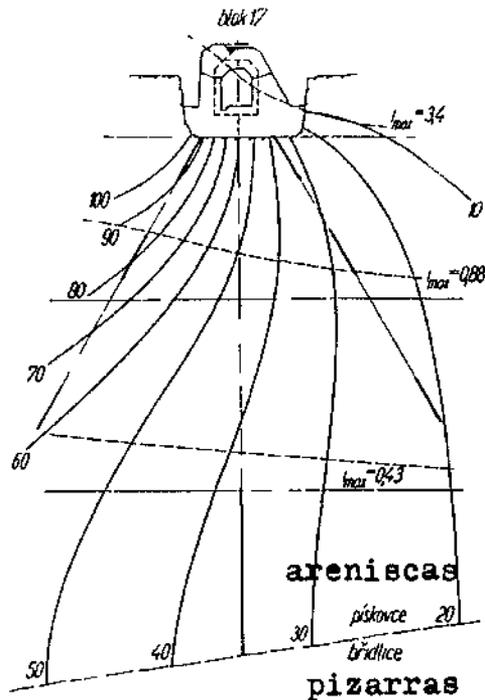


Fig. 69: El trancurso de líneas de las iguales subpresiones (equipotenciales) y del gradiente hidráulico en la presa Morávka ( según Verfel, 1959).

En base a lo mencionado se recomienda hoy dedicar especial atención a los cimientos y a la roca hasta la profundidad de 10 - 15 metros. Hasta esta profundidad hay que conservar estrictamente el criterio de LUGEON o de Jähde. Más abajo, donde el gradiente hidráulico desciende unas cuatro veces, es posible permitir como un criterio aceptable 2 l/min/m ejerciendo la presión de 3 atm.

Debajo de la profundidad de 30 m, donde el gradiente hidráulico desciende unas diez veces, es posible permitir pérdidas del agua 4 l/min/m ejerciendo la presión de 3 atm., en la profundidad mayor de 50 m 6 l/min/m. Los valores recomendados valen para las presas de hasta 30 m de altura. Al proyectar una cortina impermeable, hay que tener en consideración además de lo mencionado el carácter de la estructura geológica, con su fracturamiento y agrietamiento natural, estudiando el grado y la dirección de inclinación de estos elementos. El flujo de agua depende también de las deformaciones a que se ve sujeto el macizo rocoso, al verse sometido a los esfuerzos que le transmite la estructura lo que provoca que en algunas zonas se cierren las fisuras y en otras se abran. Este punto se complica todavía más si se considera, que algunas de las filtraciones son provocadas por las mismas fuerzas de filtración, incluyendo el factor del tiempo y de los cambios del gradiente hidráulico. (Por ejemplo en condiciones de una hidroacumuladora, donde se está cambiando el nivel del agua cada día).

Finalmente, las mediciones de la permeabilidad o conductividad hidráulica del macizo rocoso, son sencibles a los efectos de escala y el estado de esfuerzos de la formación, por lo que prácticamente es imposible hacer mediciones en el cause en condiciones representativas, ya que el estado de esfuerzos es variable al canstruir la estructura, ya que generalmente calculamos con el ambiente heterogéneo. El problema está que hasta el momento actual sin una solución completa que sea aplicable a cualquier lugar y que tome en cuenta todas las

complejidades que puedan presentarse. El ingeniero debe basar su solución en consideraciones generales que le permitan establecer modelos simplificados que ayuden a estimar la probable influencia del flujo de agua en la estabilidad de la cimentación y le sirva de una guía para escoger la solución adecuada.

De lo antes mencionado resulta, que definir la profundidad de la cortina de impermeabilidad, es un problema complejo, que no depende solamente de la permeabilidad permitida, sino que también de la velocidad del flujo de los gradientes máximos en la base de la obra y principalmente del valor del gradiente crítico de destrucción. La aplicación de una u otra medida contra la filtración en la base de la cortina de la presa la que se determina solamente por el valor de la absorción relativa ( a base de inyecciones del agua ) resulta como insuficiente. La necesidad de los trabajos contra la infiltración está argumentada solamente después de un análisis complejo de las propiedades de filtración de las rocas de los gradientes admisibles en la base de las obras, de la resistencia hidráulica de los suelos, del relleno de las grietas y del valor de las pérdidas por filtración.

La mayoría de las variedades rocosas y semirocosas agrietadas prácticamente no sufren lixiviación por el tipo de filtración, excepto algunas semirocosas poco permeables, tales como tobas volcánicas, rocas sedimentarias de cemento areno-arcilloso o calcáreo-arcilloso, areniscas, conglomerados, aleurolitas poco permeables, todas las variedades rocosas y semirocosas de la zona de destrucción y meteorización intensa.

En las variedades semirocosas poco resistentes al derrumbe de las paredes, de las grietas y su relleno es posible calcular con el desarrollo de la lixiviación por el flujo de filtración, si el gradiente es próximo o menor de diez.

Si las grietas están llenas de material silíceo, óxido de hierro u otros materiales que son impermeables, el macizo rocoso se considera resistente y el problema de la lixiviación del resultado no se plantea.

Si las grietas están llenas de material areno-arcilloso, la circulación del agua por los poros del relleno a gradientes más altos de la presión y heterogeneidad del material, puede ocasionar la sufusión mecánica o tubificación del relleno.

El agua al filtrarse a través de las fisuras de la roca tiene una cierta carga hidráulica en todos los puntos de tal manera que es posible aplicar el concepto de gradiente potencial tal como se considera en el estudio de flujo de agua en un medio poroso. Las fuerzas de filtración actúan en todos los puntos dentro del macizo rocoso, son proporcionales al gradiente del potencial y son acumulativas con las fuerzas debido a la subpresión.

La conductividad hidráulica de un macizo rocoso puede agitarse aunque esté gobernado exclusivamente por las discontinuidades geológicas cuya permeabilidad es mucho mayor que los de poros del macizo rocoso, aún cuando representan un menor volumen de valores. Por lo mencionado la anisotropía estructural de la roca da lugar a una conductividad anisotrópica y también da lugar a direcciones referenciales del flujo a lo largo de las cuales actuaron las fuerzas de filtración.

Estas fuerzas son nocivas a la estabilidad en muchos casos, puesto que pueden alcanzar valores que son del mismo orden de la magnitud de otras fuerzas tales como el peso de la roca, el empuje del arco y pueden estar dirigidas hacia la superficie libre del macizo rocoso. La determinación del tensor de la conductividad hidráulica pertenece actualmente al dominio de la irreflexión y para definir el posible modelo del comportamiento, hay que utilizar su imaginación. Las fuerzas que resultan de ciertas redes de flujo esquemáticas, pueden introducir de alguna manera al cálculo de la estabilidad.

Se han propuesto diversos modelos para la integración del flujo de agua a través de macizos rocosos, en general podría decirse que cada autor presente su propio modelo. El modelo que

se usa con más frecuencia por su simplicidad y por que ya se cuenta con las soluciones metamórficas, es el que se basa en la aplicabilidad de la ley de DARCY. Las consideraciones básicas de este modelo son las siguientes:

- a) La permeabilidad de un macizo rocoso es función de la fragmentación y abertura de las fisuras, presión del agua y estado de esfuerzos en la roca;
- b) La mayoría de las rocas naturales contienen agua y si existe un gradiente hidráulico, el agua fluye a través de las fallas, grietas y poros de la roca;
- c) Con la profundidad aumenta la presión, la cual en ocasiones determina el comportamiento del macizo rocoso.

Si se supone que el flujo de aguas por las fisuras de la roca obedece a la ley de DARCY, según la cual la velocidad del flujo es proporcional al gradiente hidráulico:

$$V = K \cdot I$$

donde "K" es la permeabilidad de la roca o coeficiente de filtración, e "I" es el potencial hidráulico.

El método de trazado de las redes de flujo aunque es el más utilizado, no es fácil de realizarlo en el ambiente rocoso heterogéneo. Por esta razón se utilizan por ejemplo métodos de analogía eléctrica que permiten resolver estos problemas con las condiciones de fronteras complicadas.

Los estudios hechos en diferentes países demostraron que la permeabilidad de un macizo rocoso depende del estado de esfuerzos al cuál está sometido. En muchos ejes de presas en la República Checa hemos confirmado que existe una correlación directa entre la disminución de la permeabilidad y entre la zona de las tensiones concentradas, lo que podemos caracterizar con el menor grado de la discontinuidad mecánica (Polasek, 1971; Horsky, 1972). Esta zona se encuentra generalmente en la profundidad desde 10 hasta 40 metros. Al revés la zona superficial de las tensiones liberadas, la podemos caracterizar por el mayor grado de la permeabilidad como producto del desarrollo más intenso de la discontinuidad mecánica (separación de las discontinuidades, surgimiento de las grietas tectónicas, liberación de bloques diferentes, etc. (vea Fig. 70)

La profundización de los valles relativamente rápida lleva consigo no solamente la redistribución de las tensiones naturales en el macizo rocoso y surgimiento de diferentes zonas de tensiones (zonas de las tensiones liberadas, concentradas y normales), sino que también producen la alteración del equilibrio de las fuerzas a favor de componentes activos, provocando el desarrollo de debilitamientos. El resultado de deslizamiento es la nueva estructura de la masa rocosa caracterizada por la destrucción completa y el aumento de la permeabilidad total. Renovación del estado de equilibrio fue posible también por el camino no destructivo y eso es suponiendo que fuerzas activas como producto de profundización del valle no sobrepasaron el valor de las fuerzas pasivas movilizadas durante este proceso, lo que en esencia signifique la resistencia máxima. Esta movilización de las fuerzas pasivas lleva consigo ciertos desplazamientos de las rocas en la zona de esfuerzos cortantes máximos (es decir en el plano de deslizamiento potencial) y el aumento del volumen como consecuencias de los fragmentos.

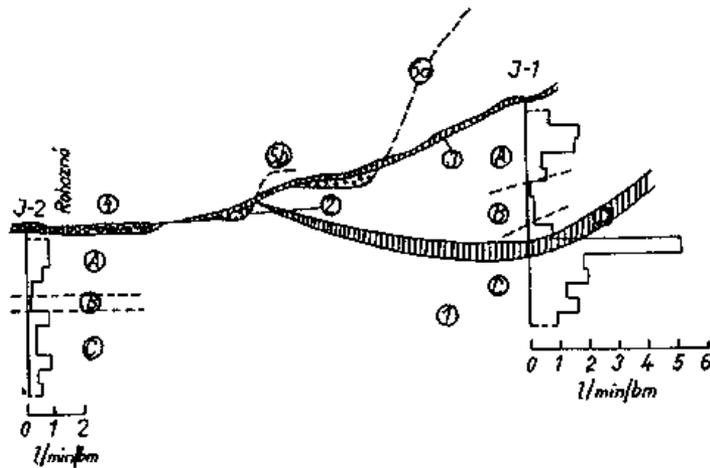


Fig.70: Influencia del estado de tensiones naturales en el macizo rocoso a la permeabilidad.

1-rocas, 2-gravas, 3-derrubios, 4-aluvios, 5-a, 5-b- la inclinación de las pendientes antiguas.

A - zona de las tensiones liberadas, B - zona de las tensiones concentradas, C - zona de las tensiones normales, D - zona de las deformaciones no destructivas, caracterizada por el aumento de permeabilidad.

En la zona de esfuerzos cortantes máximos surgirá así un área caracterizada por el mayor grado de la discontinuidad mecánica, lo que podemos relacionar con el aumento de la permeabilidad en esta zona. La variación del grado de la permeabilidad está provocada también a causa de introducir la presión externa radial (véa Fig.71).

La significación práctica de los fenómenos mencionados es el siguiente:

1 - Zona de las tensiones concentradas (el intervalo medio entre zona de las tensiones liberadas y normales ) representa en el eje de la presa una cierta cortina de impermeabilidad natural, con la que es ventajoso unir la cortina artificial.

2 - La zona de las tensiones liberadas representa al revés una zona con la permeabilidad relativamente alta e inestable. Si no se conoce bien la profundidad de esta zona y realizamos una cortina artificial muy corta (sin alcanzar la zona de las tensiones concentradas)/ puede provocar las infiltraciones de agua desagradables.

3 - La resultante de las fuerzas en el apoyo de la cortina crea una zona de compresión en la cual se disminuye el espesor de las grietas y así la permeabilidad del macizo. Al revés de la parte de la roca aguas arriba de esta zona la presión del agua en las fallas y grietas aumenta su espesor y a veces llega a romper la pantalla de inyección (véa Fig.72).

Los puntos mencionados no los podemos recibir esquemáticamente, sirven como cierta orientación, ya que cada lugar es el único y su formación se desarrollaba bajo otras condiciones geodinámicas.

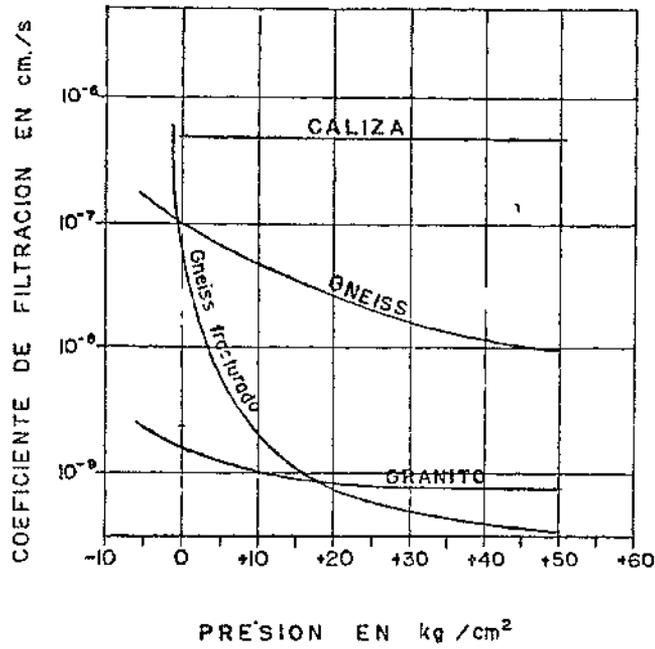


Fig.71: Variación de los coeficientes de filtración de la roca en dependencia de la presión externa.

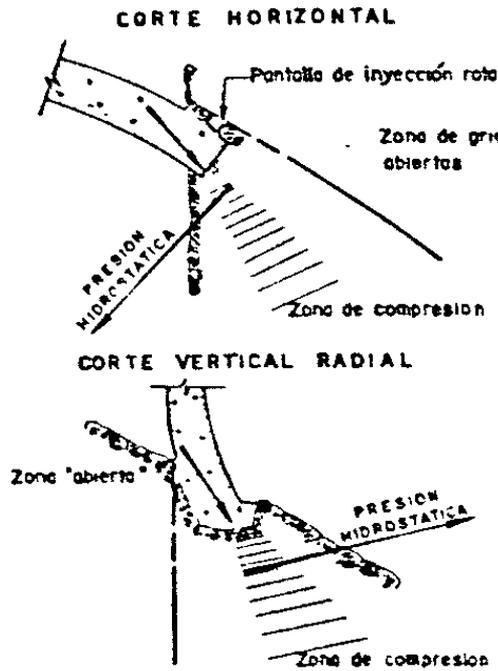


Fig.72: La resultante de las fuerzas crea una zona de compresión con las grietas cerradas y una zona de de-compresión con las grietas abiertas

## Capítulo XVI

### Movimientos de las laderas en las áreas del estudio de obras hidrotécnicas

#### XVI.1. Introducción

Los movimientos de las laderas en los futuros embalses son unos fenómenos, que pueden poner en peligro la obra hidrotécnica durante la construcción o después de terminarla. Cada año se utilizan muchos recursos económicos para elaborar medidas contra el movimiento provocado por la actividad humana durante la construcción de la obra; es decir realizando enormes cortes de tierra, aplicando cargas en lugares débiles desde el punto de vista de estabilidad del talud etc. Los movimientos de las laderas pueden surgir también como producto de la inundación del vaso, ya que el agua embalsada produce un cambio brusco en las condiciones naturales originales (subpresiones del agua después de llenar el vaso o presiones de agua después de vaciados rápidos). Los movimientos de las laderas resultan de esa forma un fenómeno muy importante, que debe ser estudiado y resuelto por el ingeniero-geólogo durante los estudios ingeniero-geológicos para la obra hidrotécnica.

Muchas deformaciones de las laderas son antiguas (fósiles), provocadas por condiciones naturales (como profundización y erosión de los ríos, movimientos sísmicos o tectónicos etc).

Como ejemplo, donde la investigación nos motivó el cambio del eje de la presa nos sirve la deformación de la ladera en el eje de la presa Orlik en La República Checa (véa Fig.73). La superficie de la ladera derecha del eje estaba ya tan transformada, que no fue posible definir la existencia de la deformación sin realizar las investigaciones. Además, faltaba todavía la experiencia con estos fenómenos, la que tenemos hoy. En base de experiencia recibida, apoyándose en marcha-ruta, podemos muchas veces definir el carácter del movimiento y la posible profundidad del plano de deslizamiento y demarcar el área deslizada, sin realizar laboreos de exploración; claro, que en forma muy orientativa. Si necesitamos definir este fenómeno exactamente, hay que realizar el complejo de trabajos y mediciones, como trabajos de exploración directos (calas, calicatas, galerías etc.), mediciones geofísicas, geodésicas, geoacústicas y mediciones especiales (inclinometría exacta etc).

#### XVI.2. La estabilidad de las laderas

El estudio de la estabilidad de las laderas comprende problemas relacionadas con la resistencia al corte de los materiales. Por esta razón es indispensable el estudio detallado del eje desde el punto de vista de los tipos de las rocas y de los suelos existentes, de su estructura, de la disposición de las grietas y de la presencia de materiales que puedan ser causa de problemas de la estabilidad. Con esta información, obtenida mediante levantamiento ingeniero-geológico y mediante las exploraciones directas y métodos modernos de investigación (geofísica etc.) es posible prever si ocurrirán problemas con la estabilidad durante de la construcción y después de llenar el embalse.

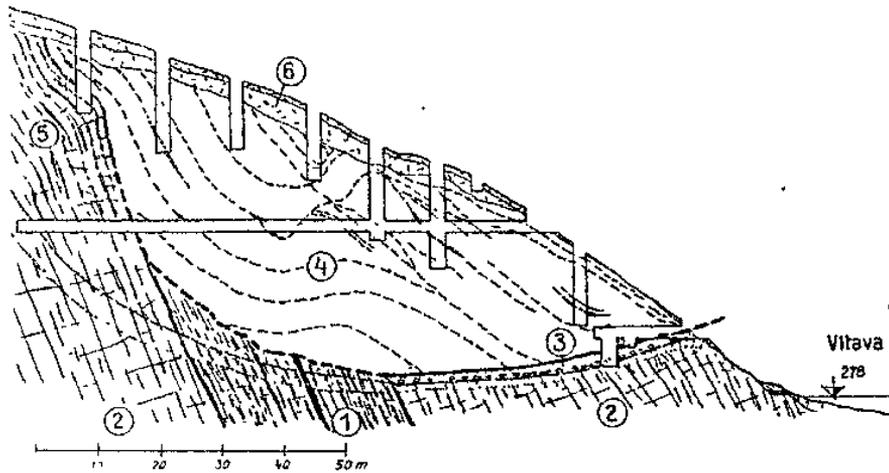


Fig.73: El corte geológico por la ladera del cierre en el río Vltava en La República Checa (según Zoubek,1953). 1 - porfyritas, 2 - epidioritas, 3 - gravas del pleistoceno, 4 - porfyritas derrumbadas, 5 - zona de decompression con grietas abiertas, 6- derrubios.

Si sobre la base de las investigaciones mencionadas notamos el peligro de inestabilidad, es necesario determinar la resistencia al corte de los materiales en cuestion, para evaluar, si la estructura o la ladera está en peligro de fallar. Depende del tipo de formación y a veces de pequeños detalles descubiertos en ella, que deba recurrirse a métodos de laboratorio o a pruebas de campo, para encontrar las propiedades que interesan en dichos cálculos.

Una observación de carácter general que debe tomar en cuenta el ingeniero, es que los taludes naturales probablemente se encuentran en una condición de equilibrio límite, provocado naturalmente por las condiciones de la formación del valle (erosion, meteorización, movimientos neotectónicos.)

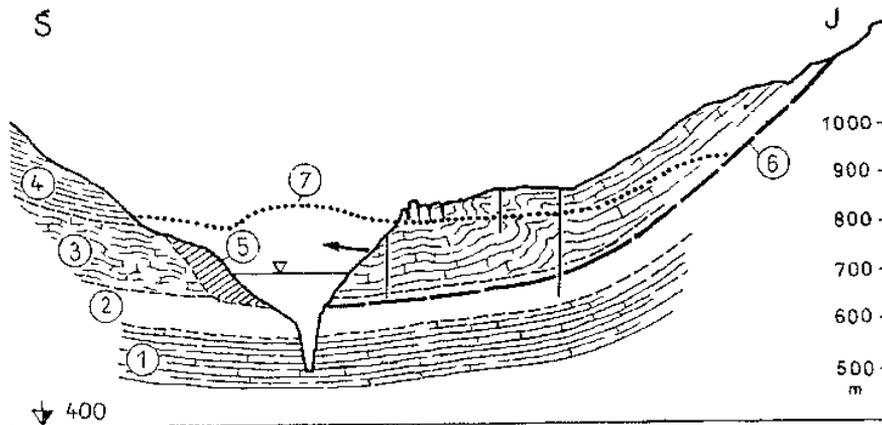


Fig.74: Perfil esquemático por el deslizamiento de las calizas en el vaso de la presa VAYONT en Italia en el año 1963. (según Selli,Trevisan et al.1964).

1 - caliza – dogger, 2 - caliza con arcilla – malm, 3 - caliza cretásica, 4 - caliza y arcilla cretásica, 5 - deslizamiento fósil, 6 - plano de deslizamiento actual, 7 - deslizamiento caído.

Especial atención hay que dedicar a las laderas cubiertas por suelos cohesivos, derrubios y

materiales granulares, como gravas y arenas, especialmente, si estos sedimentos se encuentran desarrollados en capas muy potentes y en el peor de los casos, inclinadas hacia el valle.

Especial atención hay que dedicar también al estudio de posibles cambios de las orillas del próximo embalse por la abrasión y por los deslizamientos como producto de la misma. La abrasión puede alcanzar dimensiones enormes y además, pérdida del material al pie de la ladera puede provocar la anulación de la estabilidad inicial. Como ejemplo podemos mencionar la presa ORAVA en Eslovaquia, donde la abrasión provocó retrocedimiento de los lados en una profundidad mayor de 100 m y en algunos lugares se provocaron por esta causa deslizamientos enormes. (Horsky, 1972).

Aunque muchas veces no es fácil definir exactamente el plano de deslizamiento, después de determinarlo y después de determinar la resistencia al corte de los materiales, el cálculo de la estabilidad actual y sus cambios después de embalsar el agua no es difícil (por el método de Petterson, Felenius etc).

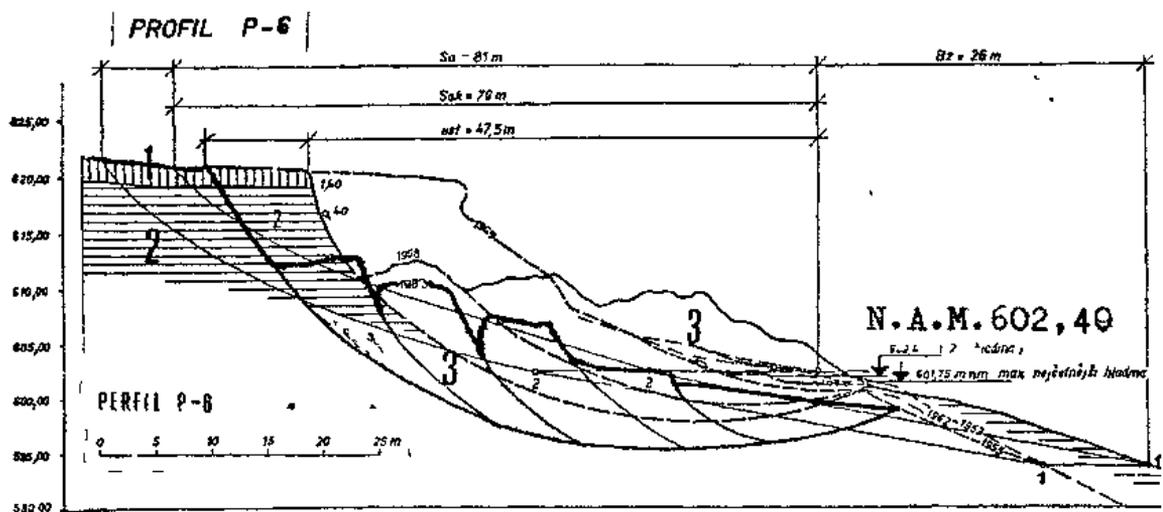


Fig.75: Deslizamientos de las orillas del vaso Orava en Eslovaquia Norte provocaron gran retrocedimiento de las laderas y pusieron en peligro casas y áreas cultivadas. Se puede ver el desarrollo del fenómeno en diferentes años. (según Horsky, 1972).

1- eluvios del neógeno, 2 - arcillas del neogeno, 3 - deslizamiento

Ust = retrocedimiento de la ladera en metros, Sa = prognosis del retrocedimiento final.

El análisis de la estabilidad de masas rocosas, en general, presenta ciertas dificultades. Debe considerarse el tipo de roca, la disposición de las fracturas, los rellenos de las grietas, la alteración surgida por el intemperismo etc. Para investigar la estabilidad de las laderas, se requiere estudiar cuidadosamente los defectos o partes débiles más que los elementos sanos de la masa pétreo. Por ejemplo en la provincia de Oriente en Cuba es muy frecuente el contacto de capas de caliza y tobas subyacentes. Es claro, que el ingeniero-geólogo debe interesarse por la geometría de este contacto y estudiar bien la resistencia al corte de las tobas, aunque esta tarea no es fácil. Los estratos de tobas, por efecto de descargas en el cause o en las laderas, pueden sufrir alteraciones que reducen notablemente su resistencia. Esto ocurre en la frontera con la caliza de modo que es difícil obtener muestras inalteradas. Entonces hay que estudiar en forma indirecta, investigando en muestras remoldeadas, con el mismo contenido de agua que tiene el citado estrato blando, su resistencia residual.

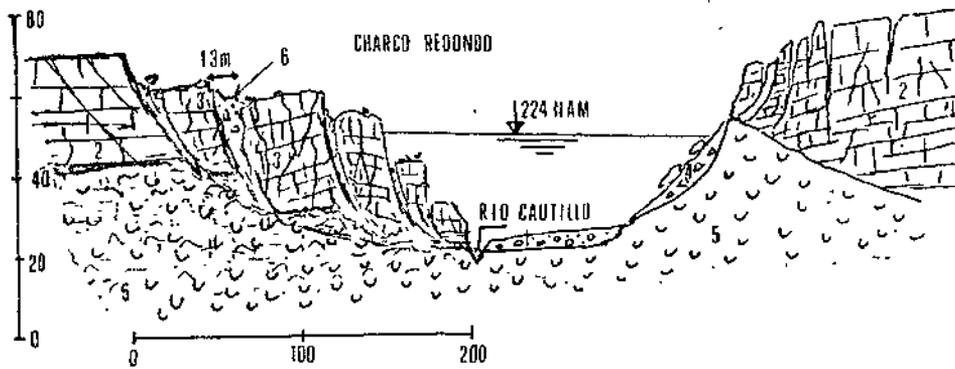


Fig.76: En el eje de la presa Charco Redondo, la variante II-II se descubrió que toda la margen izquierda estaba derrumbada en forma de escalones, existiendo grietas de 10-40 m de profundidad y de 2-20 m de ancho que borden todo el macizo, alcanzando una longitud de unos 200 m. Un cuidadoso recorrido por encima de la zona derrumbada nos permitió descubrir grandes grietas abiertas y masas rocosas aisladas, que están en constante actividad y próximas a deslizarse por laderas (según Horsky-Reyes,1981). 1 - gravas, 2 - calizas, 3 - calizas derrumbadas, 4 - derrubios deslizados, 5 - tobas y areniscas, 6 - grietas rellenas con deluvios hasta el grado de arcillas con gravas y bloques de calizas. (Horsky, 1080)

Variación de la resistencia por efecto del deslizamiento se debe físicamente al fenómeno de deformación y abrasión de la roca en las superficies de falla, o a la orientación de las partículas de arcilla que constituyen el relleno de las fracturas. Para analizar la estabilidad de los taludes afectados por una falla geológica que pueda reactivarse a consecuencia de una obra de ingeniería, es necesario considerar los parámetros de resistencia residual.

### XVI.3. Clasificación de los movimientos de las laderas

Para facilitar el estudio del fenómeno tan importante para la obra hidrotécnica, como son los deslizamientos y derrumbamientos, presentamos una clasificación de los movimientos de las laderas según varios autores Checos y Eslovacos (Pašek, Rybář, Nemčok, Novosad, 1973) la que fue utilizada como una base para la clasificación de este fenómeno a escala internacional.

Los movimientos de las laderas se incluyen entre los procesos geodinámicos muy complicados. Su origen depende de las condiciones naturales y de muchos otros factores, por lo cual resulta difícil definir las bases generales para su clasificación. Un criterio muy importante es el objetivo de la clasificación dada.

Todo esto ha llevado a diversos autores clasificar estos movimientos desde diferentes puntos de vista, como son : Geomorfología, Ingeniería-Geológica, Mecánica de las Rocas y del Suelos, etc. Por ello, la mayoría de las clasificaciones son incompletas y no incluyen todos los tipos conocidos y las formas de las deformaciones surgidas. Otras clasificaciones se basan en criterios mal elegidos.

La idea de "Movimientos de ladera" es muy amplia y supone cada movimiento de las partículas de la ladera. Desde el punto de vista ingeniero-geológico asumimos el grupo de movimientos caracterizados por Penck (1924) y Hutchinson (1968), en dos tipos básicos : Movimientos y transporte de las masas por las laderas y movimientos de gravitación. En la

naturaleza estos fenómenos son muy complicados y muchas veces es difícil definir la frontera entre movimientos de gravitación y los de masas transportadas por las laderas. Además en la clasificación no podemos mezclar cosas diferentes :Una cosa es el movimiento de la ladera y otra la forma surgida después de deslizarse (Spurek, 1966).

Para formar la base de la clasificación hemos escogido dos criterios básicos :

- Mecanismo del Movimiento
- Velocidad del Movimiento

En cuerpos idealizados es más fácil definir el mecanismo del movimiento que en la naturaleza, la cual es muy complicada. Este fenómeno debe ser aun muy estudiado y nuestra clasificación se define por ello en forma muy general. Según bases que tienen validez general es posible dividir el movimiento de las laderas en cuatro grupos grandes:

<b>Español</b>	<b>Checo</b>	<b>Inglés</b>	<b>Francés</b>	<b>Ruso</b>	<b>Alemán</b>
Desplazamiento	Ploužení	Creep	Fluage	Polzučest	Kriechen
Deslizamiento	Sesouvání	Sliding	Glissement	Opolzanie	Gleiten
Corrimiento	Stékání	Flow	Ecoulement	Tečenie	Fliesen
Derrumbamiento	Řícení	Fall	Ecroulement	Obruščení	Fallen

Esta clasificación básica es conocida en todo el mundo y comprende los fenómenos que se pueden observar en la naturaleza muy frecuentemente. Claro que no es posible incluir todos los tipos dados por las particularidades regionales.

Entre el mecanismo del movimiento y su velocidad no existe una relación idéntica. No podemos por ello excluir la presencia de distintos tipos de movimiento en la misma ladera en el mismo lapso de tiempo o cambios de la velocidad durante distintos estadios del desarrollo del derrumbe. Por ejemplo si la superficie de deslizamiento está muy clara, pueden surgir en el mismo tiempo desplazamientos y corrimientos : Mientras en la parte arriba, donde la presión normal es pequeña, surgirán movimientos de tierra relativamente grandes, en las partes más profundas y por los bordes se producen movimientos más pequeños con el carácter de desplazamientos.

En la superficie del deslizamiento pueden actuar al mismo tiempo o localmente corrimientos de tierra y derrumbamientos. Como se ve a definir bien el tipo de movimiento no es fácil y en cada caso será necesario definir el tipo de movimiento predominante.

### XVI.3. 1 . Tipos básicos de los movimientos de tierra.

Los tipos básicos de los movimientos de tierra son los siguientes :

- a) Desplazamiento : Se trata de un movimiento de mucha duración que generalmente no se acelera. La frontera entre las rocas desplazadas y la roca-madre generalmente no es clara. Si comparamos la dimensión del movimiento con la dimensión del macizo rocoso afectado, aquella es pequeña. Se supone que en muchos casos es característico del desarrollo de este movimiento el corrimiento plástico de las masas rocosas. Si el movimiento se aceleraría sobrepasaría el desplazamiento a otro tipo de movimiento. Desde este punto de vista podemos considerar a los desplazamientos como la primera fase de los demás tipos de movimientos.

- b) Deslizamiento : Este movimiento de tierra es relativamente rápido y se desarrolla en el talud según uno o más planos. Es característico que una parte de las masas deslizadas se desplaza por la superficie del terreno, debajo del deslizamiento. Durante el deslizamiento pueden actuar en las partes más profundas los desplazamientos y en las partes superiores los corrimientos o derrumbamientos.
- c) Corrimiento de tierra : Este proceso es muy rápido y se refiere a las masas en estado viscoso. La masa inicial fluye del lugar de origen a otro muy lejano, separándose bien de las rocas. La forma definitiva de este movimiento es el "corriente". En la última fase el corrimiento puede sobrepasar al desplazamiento. En casos especiales juega un rol el transporte por medio del agua (huaycos en Peru). Puede producirse también el corrimiento de las rocas clásticas por la ladera sin necesidad de agua.
- d) Derrumbamiento : Es el proceso muy rápido en las laderas de pendiente fuerte, cuando las masas afectadas se separan de la roca madre y en poco tiempo pierden el contacto con la misma. Se produce la caída libre de las rocas, pero también actúan otros tipos del movimiento como los desplazamientos y deslizamientos (antes de separarse la masa rocosa) y corrimientos y deslizamientos (después de caer la roca a ladera). La distancia del transporte del material caído puede ser bastante grande, en relación con la dimensión del macizo afectado.

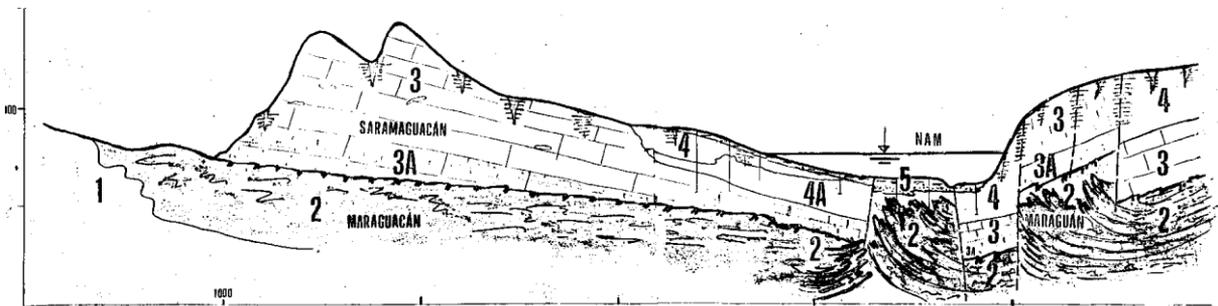


Fig.77: El perfil esquemático del eje de la presa Amistad Cubano – Búlgara, con desplazamiento plástico de las margas de la serie Maraguán (2) . (según Horsky, 1982) .

1 – rocas volcánicas, 2 – margas y calizas de la serie Maraguán, 3 – calizas y margas del miembro Santa Rosa (carsificadas), 3<sup>a</sup> - las mismas calizas y margas sin la carsificación, 4 – margas y calizas del miembro San Jacinto, 4<sup>a</sup> - las mismas margas y calizas sin carsificación, 5 – arcillas aluviales, ∇ - lugares de la caesificación intensa.

### XVI.3.2. Otros criterios de clasificación de los movimientos de las laderas.

Podemos caracterizar también los "movimientos de ladera" por otros criterios, en dependencia del grado de conocimiento del fenómeno. Existen actualmente los siguientes criterios:

a) Según la edad.

Contemporáneos : El movimiento ocurre en condiciones climáticas y morfológicas actuales.

Fósiles : El movimiento se provocó en otras condiciones climáticas y morfológicas.

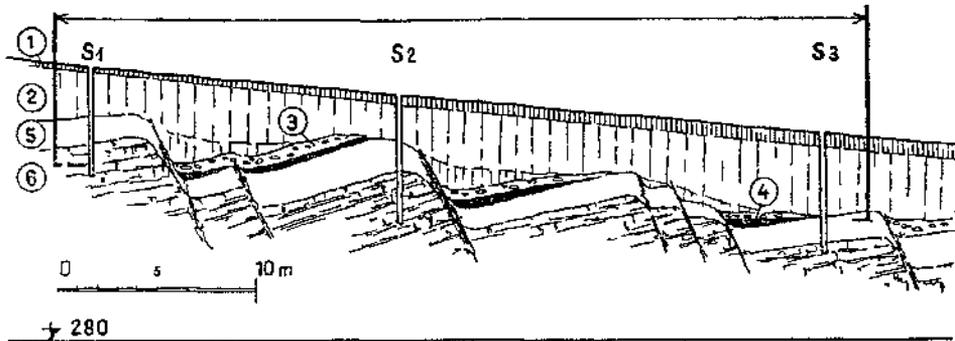


Fig.78: Ejemplo del deslizamiento fósil cerca de TURNOV en la república Checa (según Záruba, 1974).

1- suelo, 2 - loes, 3 - grava, 4 - arena, 5-arenisca, 6- arenisca arcillosa.

b) Por su actividad.

Activos : Las masas de tierra están actualmente en movimiento;

Potenciales : El movimiento está "temporalmente tranquilo", pero puede recomenzar de crearse las condiciones convenientes.

Estabilizados : Las causas del movimiento desaparecieron o fueron eliminados por la actividad humana.

c) Por su génesis.

Movimiento natural : Surgió sin la ayuda de la acción del hombre.

Artificial (antropógeno) : Surgió en las laderas naturales como producto de cortes, terraplenes etc., generados por el hombre.

d) Según el estadio del desarrollo del movimiento.

Fases : Inicial, Desarrollada, Final

e) Según la repetición del movimiento.

Aislados : Surgió una sola vez;

Periódicos : El movimiento se repite de vez en cuandos dependiendo de la periodicidad del factor primordial del mismo.

f) Según la dirección del crecimiento del derrumbe.

Progresivos : El área afectada se desarrolla en la dirección del movimiento.

Regresivos : El área afectada se desarrolla contra la dirección del movimiento.

g) Según la forma en el plano

Con la forma de la corriente : La longitud del área afectada en forma general sobrepasa en muchas veces su anchura.

En forma superficial (areal) : La longitud del área afectada es aproximadamente igual a su anchura.

En forma frontal : La anchura sobrepasa muchas veces la longitud.

h) Según la morfología.

Claros : Formas claras del movimiento, sin afectación por procesos recientes o el hombre.

Cubiertos : Afectados por procesos geomorfológicos jóvenes de modelación del terreno o por la actividad humana.

Sepultados : Cubiertos por sedimentos jóvenes, por ej. loess, o por la acumulación de los sedimentos fluviales.

### XVI.3.3. Ejemplos de movimientos de tierra.

Los ejemplos del 1 al 8 representan movimientos de desplazamientos subsuperficiales, el ejemplo 9 es un desplazamiento superficial.

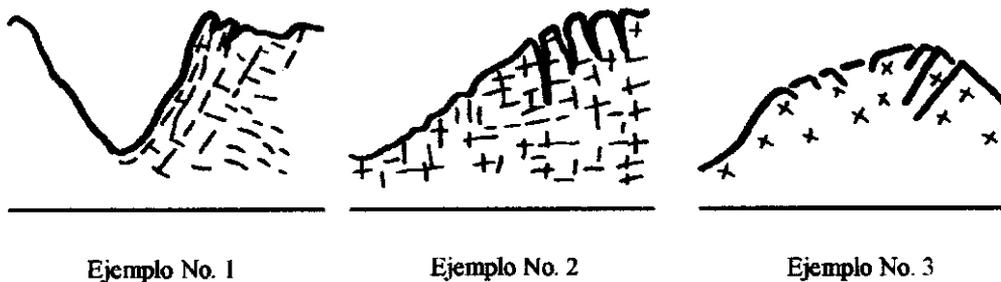


Fig.79: Ejemplos de desplazamientos subsuperficiales (1, 2, 3).

Ejemplo 1 - El talud rocoso se desplaza por medio del surgimiento de varias grietas, como fenómeno de liberación de la presión natural, que existe en un macizo rocoso después de la erosión del valle por un río. Es un fenómeno típico para rocas frágiles como granitos, marmoles, etc. Las grietas pueden llegar a profundidades hasta de decenas de metros y provocan la disminución de la estabilidad y pueden servir como superficies de deslizamientos o derrumbes, al hacer cortes o trabajos en el talud.

Ejemplo 2 - Se produce el desplazamiento del talud al abrirse las grietas de la parte alta del mismo. Se trata del estadio inicial del desajuste de la pendiente. En dependencia de las condiciones geológicas regionales puede mantenerse el desplazamiento y después de realizar algún corte en la pendiente, producirse deslizamiento o derrumbe.

Ejemplo 3 - Deformaciones de los taludes en las montañas muy altas, acompañadas por la separación de lomas y de bloques de grandes dimensiones. En la parte baja y media del talud las deformaciones prácticamente no se notan. Este ejemplo es típico para las rocas frágiles como granitoides, etc. Las dimensiones de este fenómeno son muy grandes y representan una de las formas de la tectónica de gravitación.

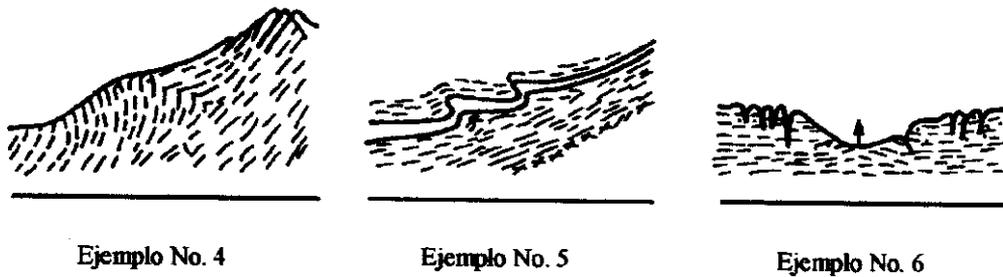


Fig. 80: Ejemplos de desplazamientos subsuperficiales (4, 5, 6).

Ejemplo 4 - Se trata de un caso similar al anterior pero en rocas esquistosas donde se combinan las grietas y estratificación. Se pueden notar deformaciones pseudoplásticas en la parte baja y media del talud que se manifiestan por plegamientos, flexuras, etc. En las partes superiores del talud los bloques se desplazan por varios planos de deslizamientos.

Ejemplo 5 - Es el caso típico de plegamiento gravitacional de las capas sedimentarias a lo largo de bordes de cuencas de plataformas. Estas formas de desplazamientos son conocidas p.ej. en las minas de carbón terciarias en la República Checa en las sierras coronadas por rocas sedimentarias, así como en calizas intercaladas con margas y arcillas.

Ejemplo 6 - Anticlinal del valle que surgió a consecuencia del empuje de los materiales más plásticos en el fondo del valle. Bajo la influencia diferencial del peso de los estratos superpuestos se reagrupan las rocas más plásticas, yacentes en el área de presiones liberadas que existe en el valle después de la erosión del río. Las formas más evidentes de este fenómeno las podemos ver cuando en la parte más alta aparecen rocas firmes y en la parte baja rocas plásticas.

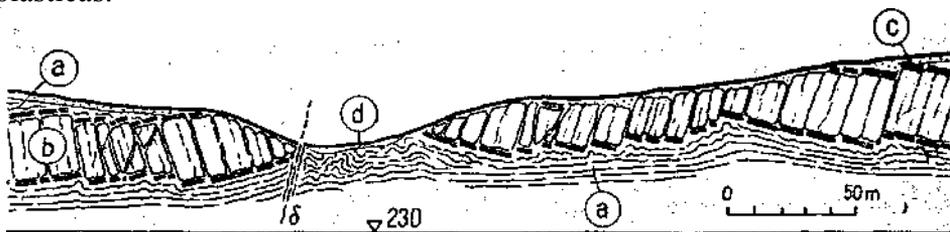


Fig.81: Deformaciones de las capas en el valle LUCINA cerca de OSTRAVA en la República Checa (Záruba,1974). a - pizarras arcillosas, b - rocas volcánicas, c - pizarras metamorfozadas, d - pizarras deformadas.

Durante la profundización del valle los movimientos adquieren el carácter de movimientos de bloques de las rocas clásticas yacentes. Durante el desarrollo de este tipo de desplazamiento pueden actuar, además de la gravitación otros factores, como son : cambios de volumen y de las cualidades físico-mecánicas de las rocas y otros. A este tipo de las deformaciones de las capas de valle Taylor y Kellaway (1944) le dieron el nombre de "bulging" y para los desplazamientos de las rocas firmes de las partes altas el nombre de "cambering".

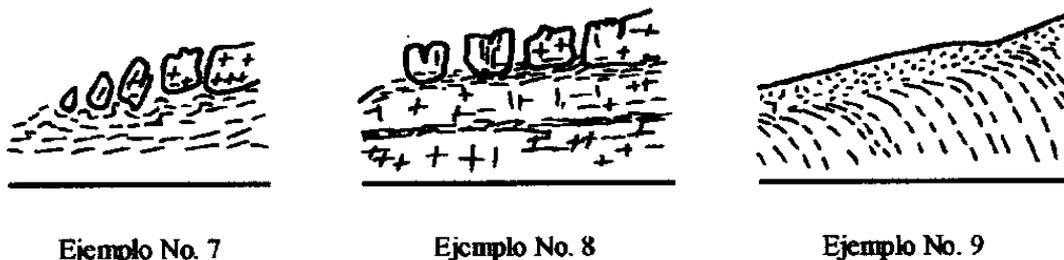


Fig. 82: Ejemplos de desplazamientos subsuperficiales (7, 8) y superficiales (9).

Ejemplo 7 - Los movimientos de bloques por la superficie de las rocas plásticas. Las condiciones ideales para el surgimiento de este tipo de movimiento se dan en el caso en que en la parte superior existen rocas firmes y más abajo rocas plásticas. Bloques de las rocas (calizas, granitos, andesitas, etc.) se rompen y desplazan por la pendiente. Durante este proceso se hunden en las rocas plásticas, y cambian su posición, en la dirección de la pendiente o contra ella. Un caso típico se presenta en el perfil de la presa Corojo en la margen derecha (Horsky, Reyes, 1979).

Ejemplo 8 - Se trata del movimiento de los bloques a lo largo de superficies predeterminadas, por ejemplo, por un estrato plástico. Los bloques de la roca firme se desplazan por la ladera apareciendo fisuras entre ellos y áreas llenas de bloques desplazados. Un caso típico se presenta en el pequeño puerto de Puerto Padre en Cuba (Horsky, Armañak, (1979).

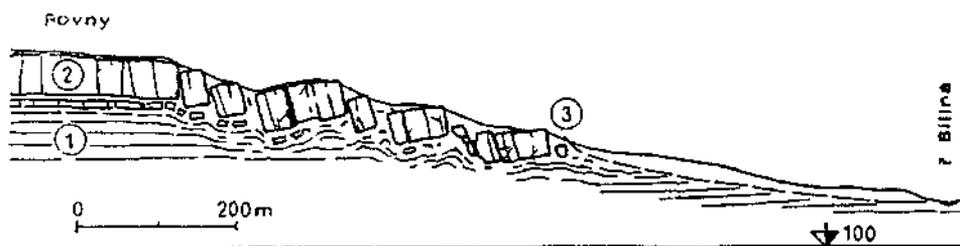


Fig. 83: Bloques de las rocas efusivas se rompieron y desplazaron por la pendiente. ( Záruba, 1984) . 1 - tobas, 2 - rocas efusivas, 3 – derrubios.

Ejemplo 9 - Desplazamiento superficial es el proceso que actúa en las laderas con la inclinación de  $20^{\circ}$  –  $30^{\circ}$ . Además de la gravitación actúan también los cambios climáticos. Son afectados las partes superficiales, especialmente la cubierta cuaternaria y a veces la superficie meteorizada de la roca firme. Los procesos periódicos dependientes de los cambios

de temperatura y de la humedad que provocan cambios en la resistencia y el volumen de las rocas (hinchamientos, contracción, etc.), provocan el desplazamiento de suelos y derrubios, el surgimiento de flexuras en la superficie de la roca firme, la cual se desplaza. Este caso es típico para zonas periglaciales (solifluxion areal), pero es normal también en otras zonas.

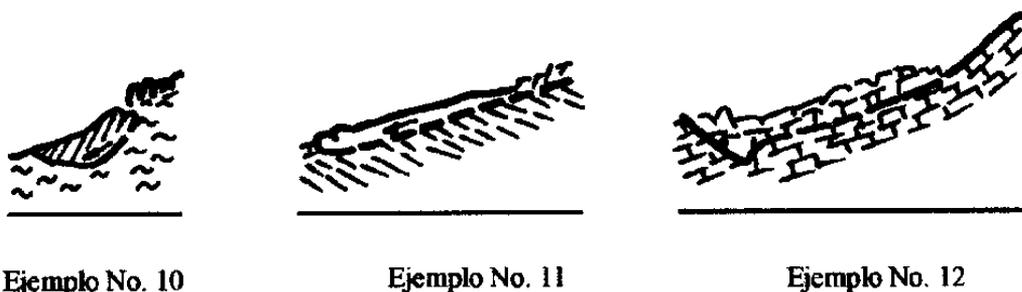


Fig.84: Ejemplos de deslizamientos (10,11,12).

Ejemplo 10 - Se trata de los deslizamientos según un plano de deslizamiento rotativo. Ocurre en rocas homogéneas o casi homogéneas y es común en las orillas de los ríos, embalses, mares, etc. Es un fenómeno muy desarrollado en Cuba y se puede ver por todas partes del país.

Ejemplo 11 - Deslizamiento según una superficie plana, la cual está predeterminada por límites geológicos o tectónicos, el límite entre los materiales superficiales y la roca madre, etc. Ocurre frecuentemente en los materiales que se meteorizan rápidamente.

Ejemplo 12 - Deslizamiento a lo largo del plano de deslizamiento predeterminado en desarrollo conforme a la pendiente. El plano de deslizamiento suele estar formado por una línea tectónica, plano de estratificación o agrietamiento.

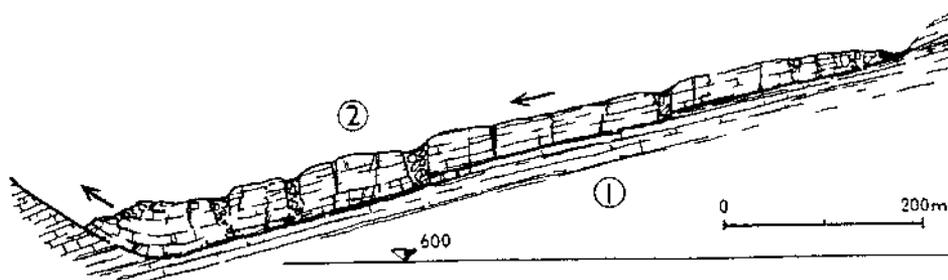
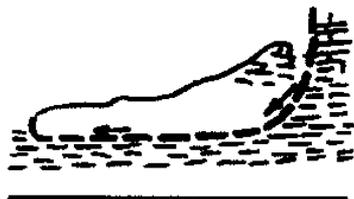


Fig.85: Deslizamiento a lo largo del estrato de arcillas en la localidad Sance-Recice, República Checa (según S.Novosad, 1965).

Deslizamientos típicos de este caso se desarrollan en areniscas, calizas, conglomerados, margas, esquistos arcillosos, etc. Un ejemplo clásico es la catástrofe de la presa Vaiont, en Italia (ver Fig. 74).

Ejemplo 13 - Deslizamientos a lo largo de planos combinados, es decir parcialmente circulares, parcialmente planos. Se producen en estratos arcillosos, limosos, margosos, etc. Aparecen por ej. a orillas del río Volga, Mar Negro, etc.



Ejemplo No. 13

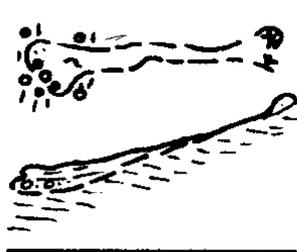


Ejemplo No. 14

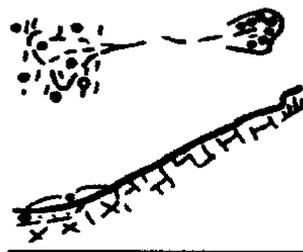
Fig 86: Ejemplos de deslizamientos (13, 14).

Ejemplo 14 - Deslizamiento a lo largo del plano horizontal o con pequeña inclinación. El plano de deslizamiento sale a cielo abierto al pie de la pendiente. Las rocas subyacentes tienen características físico-mecánicas diferentes a los de los materiales superpuestos. Surgirán deslizamientos laterales con sus forras típicas, con superficies de deslizamientos plano. En la parte superior, en donde se separa de la pendiente se forma un foso (graben). La parte central de la pendiente se traslada como un bloque continuo; al pie de la pendiente se forma una muralla.

Ejemplo 15 - Es el corrimiento de derrubios y otros materiales de forma muy rápida en llanuras y serranías. Masas saturadas de material corren por la superficie de las laderas, frecuentemente aplastadas, hasta alcanzar el valle. Cuando el corrimiento no es tan rápido, por ejemplo, logrando algunos m/día, el corrimiento sobrepasa al deslizamiento, con la misma forma (p. ej. gran deslizamiento en Handlová, República Eslovaca, con la velocidad de 6,3 m/día) Tienen un carácter especial los corrimientos en arcillas de alta sensibilidad en Canadá y los países Escandinavos.



Ejemplo No. 15



Ejemplo No. 16



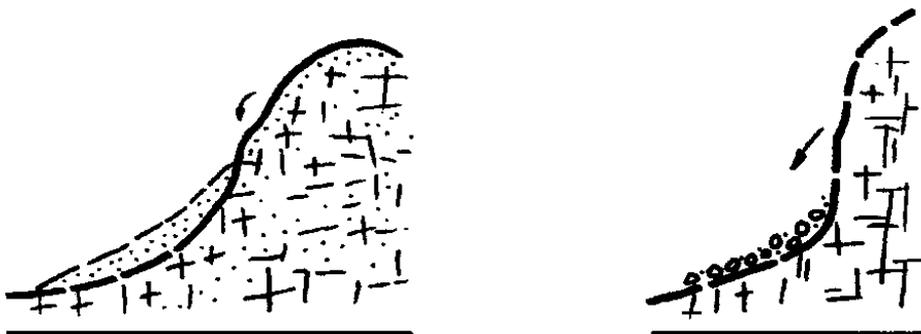
Ejemplo No. 17

Fig.87 : Ejemplos de los corrimientos (15 , 16, 17).

Ejemplo 16 - Corrimientos de derrubios y materiales del suelo en laderas fuertes, en Sierras, como consecuencia de precipitaciones anómalas. Los productos del intemperismo se

acumulan en distintas ollas para ser luego transportados, con velocidad bastante grande (hasta algunos km/h ). Esta corriente arrastra bloques, piedras y otros materiales. No es un movimiento gravitacional; aquí el papel principal lo desempeña la corriente fuerte del agua. Ejemplos de este tipo de deslismientos son comunes en los Alpes y Andes peruanos (huaicos).

Ejemplo 17 – Son los corrimientos de las partes más superficiales del material provocados por las precipitaciones enormes o por el deshielo en las montañas. Aparecen formas llamadas por los rusos “oplyviny, splyvy”, y los ingleses los llaman “flowage”. El movimiento abarca un área superficial limitada irregularmente.



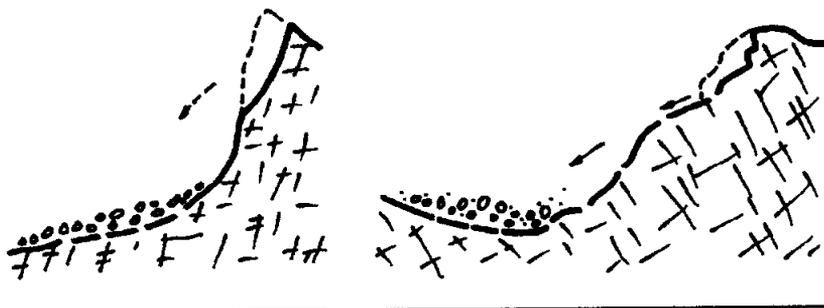
Ejemplo No. 18

Ejemplo No. 19

Fig. 88: Ejemplos de los derrumbamientos (18, 19).

Ejemplo 18 – Se refiere de la transición brusca de los materiales triturados por la ladera. Aparecen frecuentemente en sierras tectónicamente jóvenes sin la vegetación, donde sobresale el intemperismo mecánico. Al pie de las laderas surgen depósitos de materiales arcillosos, arenosos, gravosos, etc., los cuales si cambian la tensión original, p. ej. a causa del paso de un bulldozer o un gran animal, comienzan a moverse.

Ejemplo 19 - Transición muy brusca de los fragmentos de piedra, que se mueven primordialmente en caída libre, rodando y desplazándose por la ladera. Los fragmentos caen desde las paredes, formando cúmulos, conos, etc. al pie de la pared.



Ejemplo No. 20

Ejemplo No. 21

Fig.89 : Ejemplos de los derrumbamientos de los materiales (20, 21).

Ejemplo 20 - Se trata de la transición muy brusca de las paredes rocosas en zonas montañosas con la caída libre de las rocas. Este fenómeno se desarrolla por la aparición de grietas abiertas que se separan, p. ej. según planos tectónicos, luego se desmembran y se produce la caída libre de las rocas, acompañada por efectos acústicos, producidos por el viento (ola de presión). Después de caer en caída libre, sigue el transporte de material en forma de corrimientos a larga distancia.

Ejemplo 21 – Transición brusca del material rocoso en zonas montañosas por combinación de planos predeterminados y caída libre (derrumbe planar). Las formas de acumulación son similares al caso - ejemplo 20.



Deslizamientos de las orillas del vaso Orava en Eslovaquia Norte provocaron gran retrocedimiento de las laderas y pusieron al peligro casas, el bosque y áreas cultivadas. La localidad Osada. (Foto O. Horsky,1972).

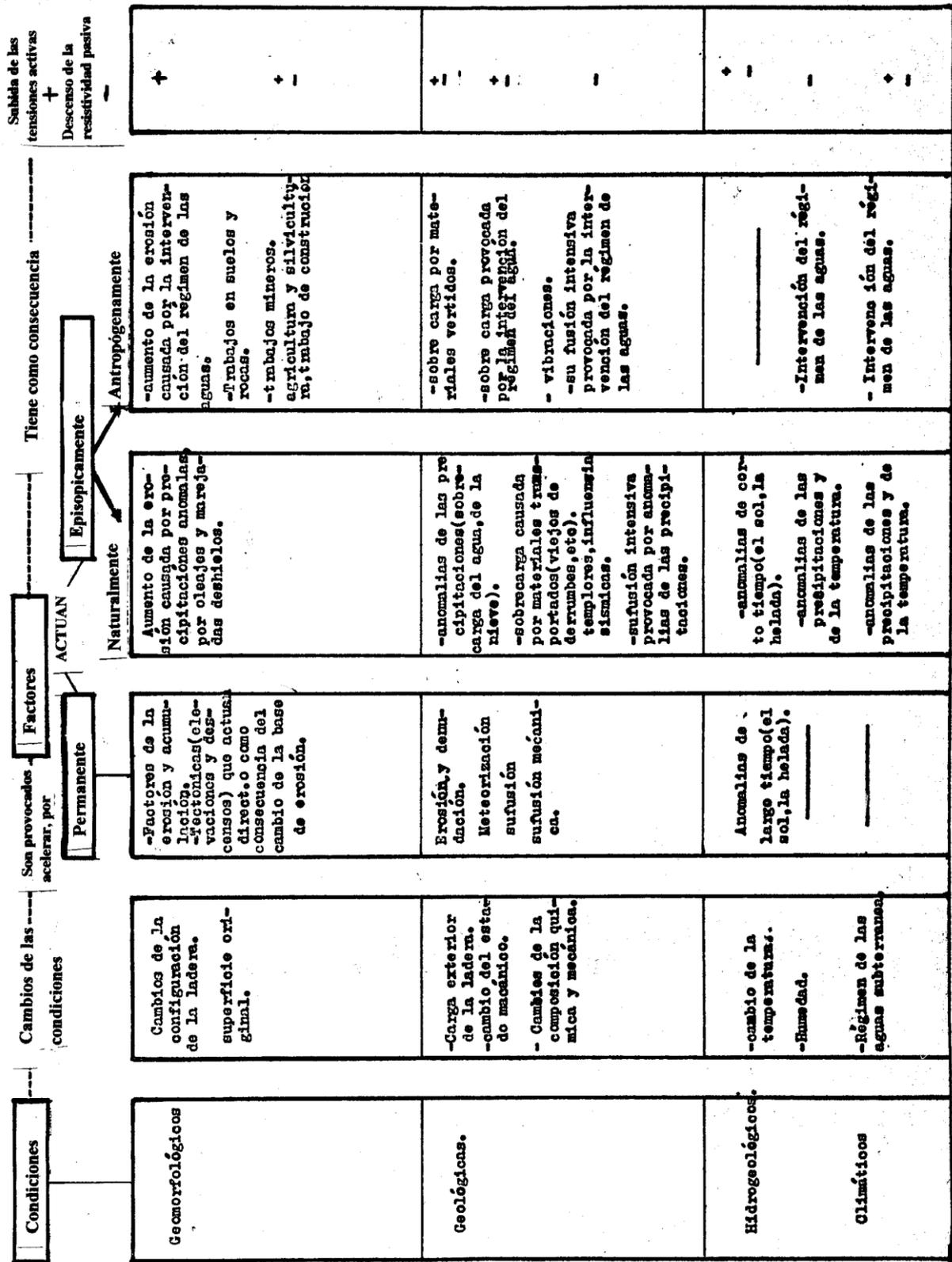


Fig. 90: Causas básicas de los deslizamientos.

MOVIMIENTOS DE LAS LADERAS.				DESCRIPCIONES DE LAS LADERAS.			
Clase de Mov.	Tipo de Mov.	Descripción del Mov.	Días y No.	Clase del Mov.	Descripción de la deformación de la pendiente.	Tipos de deformaciones.	
Desplazamiento Crep Flujos Kriechen Poliment Fluement.	desplazamientos del macizo rocoso.	Voladura, traducción diferencial, rotación de bloques según planos predefinidos o en proceso de formación.	1, 2, 3, 4		Desplazamiento de la pendiente de la pendiente.		
	Plazamiento gravitacional.	Pliegamiento gravitacional, Pliegamiento de doblamiento según planos predefinidos o en procesos de formación.	5, 6	m-cm por 10 años.	Desdoblamiento de la pendiente.		
	Mov. de bloques.	Quebramiento, hundimiento, traducción y rotación de bloques, arroyos, pliegues y amasado, o enturquecimiento de los rocosos y centros.	7, 8		En la parte superior de la ladera, posibles estructuras, rupturas, estrías, flujos, descensos, estrías, bloques desplazados. En la parte baja, posible abombamiento, o abombamiento relieves abultado irregularmente.	Transición de la deformación de bloques al deslizamiento.	
Desplazamiento superficial.	Desplazamiento superficial.	Traducción de partículas en la zona de cambios temporales.	9	m-cm por día	Acumulaciones de tipo de lomas, lobulos o arcos en la ladera curvatura ondulada, abombos inclinados.	Ej. 7, 8.	
	Deslizamiento	Rotación a lo largo de planos de deslizamiento rotativos.	10	m-cm por día	Rotación de separación, paradas de separación, rupturas superiores, irregularidades, rupturas inferiores, depresiones llenas de agua, murallas de acumulación, el frente de deslizamiento en forma de bocan. En el plano no tiene forma arcal, frontal o de corriente.	deslizamiento de vertebros y suelos.	
	Corrimiento	Traducción muy rápida de los suelos y de los rocosos por medio de corrimiento de agua.	11, 12	m por hora	Reglamiento sucesivo (rotativo), o deslizamiento sucesivo (planos predefinidos), o deslizamiento sucesivo (planos de deslizamiento, acumulaciones y embulladas)	Transición del deslizamiento a los surcos.	
Corrimiento Flujos Escalones Escaltes Steknik	Corrimiento	Rotación y traducción a lo largo de plano de deslizamiento predefinido.	13, 14		Peso de separación, estrías de separación, surcos de transferencia, arroyos de forma de lengua.	Transición del deslizamiento a los surcos.	
	Vertimiento desmenuzamiento	Traducción brusca de fragmentos por Mov. rotados a lo largo de la pendiente.	15, 16, 17	m por hora	En la parte superior sin modificación, o excepcionalmente en la parte baja cumulos de material.	deslizamiento o deslizamiento al derrumbe.	
	caída	Traducción brusca de los fragmentos por caída libre.	19	m. por seg.			
Derrumbes	Derrumbes	Traducción de bloques y de rascos (1/2 caída libre).	20, 21	m. por seg.			
			20, 21		derrumbes de roca.	20, 21	

Fig.91: Clasificación de los movimientos de las laderas y de los tipos de las deformaciones de las laderas.

TIPOS DE OBRA Pruebas de campo "IN-SITU"	FUNDAMENTACION			Pendientes	OBRAS SUBTERRÁNEAS		Excavaciones
	Presas de gravedad	Presas de bóveda	Estructuras grandes	Depósitos de rocas debajo del embalse	Grandes obras subterráneas	Túneles, pozos y minas	Minas a cielo abierto, Canteras, Excavaciones abiertas
<b>Pruebas de deformabilidad</b>							
Métodos estáticos	(n) ID	(r) IP,(n)ID, (n)DC	(r)ID		(n)AC		
Pruebas de placa	(n)ID	(n)ID,(n)DC (n)ID,(n)DC			(n)ID (n)ID	(n)AC	
Túnel de presión,(presión de agua,gato radial)							
Pruebas de presión en calas, dilatómetros	(r)IP	(n)ID,(n)DC	(i)IP		(r)IP,(n)ID	(i)AC	
Métodos dinámicos	(n)ID	(n)IP,(n)ID, (n)DC	(i)IP		(r)IP,(n)AC	(n)AC	
Medición de la velocidad de ondas longitudinales y transversales (vibrógrafo)		(n)ID,(n)DC			(n)ID		
Medición de la velocidad de ondas longitudinales (geófono)	(n)ID	(n)IP,(n)DC			(r)IP	(n)AC	
Mediciones directas de la velocidad de las ondas longitudinales en calas		(r)ID,(n)DC			(r)AC		
Investigación estratigráfica detallada	(r)AC	(r)ID,(r)AC	(r)AC		(r)AC	(n)AC	
<b>Mediciones de las tensiones naturales del macizo rocoso</b>							
Mediciones en la superficie de la roca					(r)IP,(n)ID		
Tensómetros pegados (by strain vosette)					(n)IP		
Mediciones de los cambios de las tensiones naturales durante las pruebas de placa (by flat jack)					(r)IP		
Mediciones dentro de la cala	(i)ID	(i)ID	(i)ID	(i)IP	(n)ID		
Mediciones de las deformaciones del núcleo después de perforar					(n)ID		
Mediciones de las deformaciones de las paredes de la cala después de perforar					(n)ID		
<b>Pruebas de resistencia</b>							
Compresión		(r)ID		(i)ID			
Triaxial test		(i)ID			(r)ID		
Esfuerzo cortante	(n)ID	(n)ID	(n)ID	(n)ID	(n)ID	(r)ID	(r)ID
Pruebas de esfuerzo cortante según planos de discontinuidades	(n)ID	(n)ID	(n)ID	(n)ID	(n)ID	(r)ID	(r)ID
Pruebas de esfuerzo cortante entre roca y hormigón	(r)ID	(r)ID	(r)ID				(i)IP
<b>Pruebas de permeabilidad</b>							
En calas (Lugeon)	(n)IP,(n)DC	(n)IP,(n)DC	(r)IP	(n)IP	(n)IP		
Bombeos	(n)IP,(n)DC	(n)IP,(n)DC					
Mediciones del nivel piezométrico y flujo del agua				(n)DC	(n)IP	(n)IP	(i)IP
Pruebas de anclajes				(n)IP,(r)AC, (i)DC	(r)ID	(r)ID	(r)AC
<b>Deslizamientos</b>							
Mediciones superficiales (etensómetros)	(n)DC	(n)DC		(n)DC	(n)DC		
Péndulos	(r)DC	(r)DC	(r)DC	(i)DC			
Indicadores de la pendiente				(n)DC			(r)DC
Movimientos de tierra después de la explosión	(i)ID	(i)ID		(n)AC	(n)IP,(n)AC	(n)IP,(n)AC	
Métodos geoacústicos				(r)DC			(i)DC

Fig.92: Importancia de las pruebas de campo en las diferentes etapas de investigación y para diferentes tipos de Obra.

Importancia de la pruebas: n = necesaria, r = recomendable, i = de interés, ( ) = alternativamente.

Etapas de la construcción : IP = Investigación preliminar, ID = Investigación detallada, AC = al construirla, DC = después de construirla

<b>Tipos de métodos</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Tipo de trabajos para obtener la información</b>	<b>Aplicación principal de los resultados</b>
1 - Geológicos	<p>Estudio geológico regional (levantamiento geológico regional).</p> <p>Estudio geológico detallado (levantamiento ingeniero-geológico detallado).</p>	<p>Estudio de la estructura geológica y tectónica, historia del desarrollo de la misma definiendo los tipos genéticos y litológicos de rocas y suelos, carácter y orden de las fallas tectónicas y procesos físico-geológico. Además se estudian zonas debilitadas.</p> <p>Idem que lo anterior, pero específicamente en el área del hidroconjunto con apoyo de las perforaciones, toma de las muestras, trabajos geofísicos superficiales y en calas, geomorfología, etc.</p>	<p>En todos aquellos lugares donde falte el estudio geológico regional. En caso de existir se debe revisar su utilidad para la construcción proyectada.</p> <p>Levantamiento ingeniero-geológico detallado, planos ingeniero-geológicos, perfiles ingeniero-geológicos. Modelos geotécnicos tridimensionales.</p>
2 - Hidrogeológicos	<p>Estudio hidrogeológico regional (levantamiento hidrogeológico regional).</p> <p>Estudio hidrogeológico detallado (levantamiento hidrogeológico detallado).</p>	<p>Realización de itinerarios hidrogeológicos, documentación de manantiales y otros afloramientos, amarrándoles topográficamente al plano existente.</p> <p>Realización de itinerarios hidrogeológicos en el área del hidroconjunto, determinación de los parámetros hidráulicos principales de las rocas y suelos presentes en el área de la presa, aforos, vertimientos, inyecciones a presión de agua, observaciones del registro, muestreo de las aguas subterráneas y superficiales, etc.</p>	<p>Evaluación de las condiciones hidrogeológicas regionales para la proyección, construcción y explotación del cierre y embalse, especialmente con respecto a infiltraciones a los valles vecinos.</p> <p>Plano hidrogeológico detallado, planos de hidroisohipsas, evaluación de las pérdidas por la filtración a las excavaciones, evaluar la necesidad de construcción de cortina de inyección, agresividad de aguas al hormigón, actividad corrosiva al acero y envolturas de cables, relación hidráulica de las aguas subterráneas con el río, etc.</p>

Tipos de métodos	Objetivo	Tipos de trabajos para obtener la información	Aplicación principal de los resultados
3 - Geofísicos	<p>Estudio de comportamiento de los campos físicos</p> <p>Estudio de comportamiento de los campos físicos</p>	<p>Métodos eléctricos (resistividad eléctrica), medición de los cambios de la resistividad eléctrica aparente en la superficie y en los laboreos de exploración.</p> <p>Sísmica de refracción. Definir las velocidades de las ondas sísmicas en diferentes capas.</p> <p>Sísmica de reflexión. Estudio de la trayectoria de las ondas sísmicas y del tiempo necesario para su llegada a la superficie, después de reflejarse en los contactos entre diferentes capas, a diferentes profundidades.</p> <p>Carotaje en calas (métodos nucleares y otros). Medición de campos eléctricos, sísmicos y radioactivos en las rocas debajo de la superficie y en los alrededores de las perforaciones.</p>	<p>Determinación de la potencia de las rocas de cobertura e intemperizadas, horizontes acuíferos, zonas conductoras y no conductoras, planos de deslizamientos y derrumbes, estadio de las alineaciones (cierre, toma de agua, vertederos, túneles, etc.).</p> <p>Determinación de los contactos entre diferentes capas y sus profundidades, obtención de módulos elásticos y otros parámetros, definición de la profundidad y calidad técnica de las rocas, determinación orientativa de la estructura geológica y tectónica y ubicación mejor de los laboreos de explotación.</p> <p>Determinación de contactos horizontales e inclinados y alternancias de capas. Se utiliza cuando no es posible utilizar la sísmica de refracción.</p> <p>Ayudan determinar las condiciones hidrogeológicas, litológicas, tectónicas y algunos parámetros geotécnicos. Ecvaluación de zonas debilitadas, pérdida de recuperación, etc</p>
4-Perforación, muestreo y laboreos de exploración.	Estudio de la estratigrafía, estructura, tectónica, propiedades físico-mecánicas de rocas y suelos, hidrogeología y geofísica.	Barrenos para explosivos, calas de percusión-rotaria. Toma de muestras, de monólitos parafinados, de rocas, Shelby etc.	Estudio de los fundamentos de obras,préstamos y canteras, embalses, túneles, etc. Determinación sobre la perforabilidad de las rocas, velocidades de perforación, estudio de las características geotécnicas y de la estructura geológica.

Tipos de métodos	Objetivo	Tipos de trabajos para obtener la información	Aplicación principal de los resultados
5 - El Registro de las paredes de la perforación con el periscopio o con TV.	Inspección visual de las paredes de la cala, estudio de las características geométricas de los elementos y de las características físicas de las discontinuidades y de otros defectos.	Calas de cualquier tipo sin revestimiento para que sea posible estudiar las paredes de la cala.	Estudio de la estructura del macizo rocoso, de tipos petrográficos y de límites entre ellos y de zonas defectuosas, estudio de efectividad de las inyecciones de la roca, estudio de cavernas, etc.
6 - Pruebas de la permeabilidad e inyectabilidad.	Estudio de la permeabilidad de la roca y de diferentes zonas defectuosas y el estudio de la inyectabilidad. Cambios de los parámetros mencionados en dependencia con cambios de la presión del agua.	Perforaciones, pruebas de presión del agua, pruebas de inyectabilidad.	Cálculo de las posibles pérdidas del agua por las infiltraciones, definir la profundidad de la cortina de inyecciones indispensable, definir el modo de realizarla y su efectividad para disminuir las infiltraciones y subpresiones.

Tipos de métodos	Objetivo	Tipos de trabajos para obtener la información	Alicación principal de los resultados
7 - Pruebas de campo "in situ".	<p>Estudio de la deformabilidad del macizo.</p> <p>Ensayo de cortante para estudiar los parámetros de corte "c" y <math>\phi</math>.</p> <p>Medición de las tensiones naturales.</p>	<p>Ensayos de la deformabilidad en calas, en galerías, etc; pruebas de placas, gatos radiales, pruebas hidráulicas, etc.</p> <p>Ensayos de cortante aplicando carga normal y horizontal tangencial</p> <p>Medición de las tensiones en calas, galerías, etc.</p>	<p>Para obtener el módulo de deformación y de elasticidad de las rocas.</p> <p>Conseguir la información sobre la estabilidad sobre sistema cargado por el peso de la estructura.</p> <p>Para obtener idea sobre las tensiones naturales en diferentes sentidos, los que se necesitan para el cálculo de la estabilidad del sistema.</p>

Fig.93: Tabla de los métodos principales en las investigaciones ingeniero-geológicas.

Formación		Tipo litológico característico de la roca		Simbología numérica		CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS ROCAS ( DE MACIZO ROCOSO )									
Zona	Subzona	en los cortes geológicos		en el registro de carotajes		norma ČSN 73 1001 clase	PROTODIAKONOV f <sub>sp</sub>	BARTON ( NCI ) Q <sub>s</sub>	DEERE ( RQD ) RQD	excavabilidad ( RQD ) ČSN 73 3050	excavabilidad ( RQD ) ČSN 73 3050	grado			
		δ. agrietamiento	δ. descripción	δ. descripción	δ. descripción	δ. descripción	δ. descripción	δ. descripción	%	δ. descripción	δ. descripción	clase			
Chispa II	-	a	2a	considerable	1,8	relativamente blanda	0,08	extremadamente mala	0	muy mala	4	II			
		b	3a	considerable	0,1	reblandecida	0,03	extremadamente mala	0	muy mala		III			
Gobrito III	-	a	1a	poco mediano	5	relativamente dura	30	buena	55-70	regular	6	I			
		b	2a	mediano	2	relativamente blanda	4	suficiente	30-50	mala					
	-	a	1a	poco mediano	4	relativamente blanda	20	buena	55-75	regular	6	I			
		b	2a	mediano	2	relativamente blanda	3	mala	30-50	mala					
	-	a	1a	mediano	2	relativamente blanda	5	suficiente	40-70	mala hasta regular	6	I			
		b	2a	considerable	1	blanda	1	mala	20-40	mala					
	-	a	2a	considerable	0,8	blanda	1,5	mala	10-40	muy mala hasta mala	5	I			
		b	3a	considerable	0,5	suelta	0,1	extremadamente mala	0-10	muy mala		II			
	-	a	2a	considerable	0,4	suelta	0,1	extremadamente mala	0-25	muy mala	4	II			
		b	3a	considerable	0,2	reblandecida	0,02	extremadamente mala	0-10	muy mala		III			
IP	-	a	2a	mediano	1,9	relativamente blanda	1,5	mala	50-70	regular	5-6	I			
		b	3a	mediano	0,5	suelta	0,05	extremadamente mala	30	mala		II			
Loma La Gloria IV	-	a	2a	mediano	1,9	relativamente blanda	20	buena	50-85	regular hasta buena	5-6	I			
		b	3a	mediano	0,2	reblandecida	0,05	extremadamente mala	0-20	muy mala		II			
Capas	-	a	2a	mediano	1,9	relativamente blanda	1,5	mala	50-70	regular	5-6	I			
		b	3a	considerable	0,2	reblandecida	0,5	muy mala	30	mala		II			
IP	-	a	7	considerable	0,6	muy blanda	0,01	extremadamente mala	0	muy mala	4	III			
		b	7	considerable	0,2	reblandecida									
Metabasitas	-	a	1a	poco	8	dura	150	muy buena	70-90	buena	6	I			
		b	2a	poco	6	relativamente dura	20	buena	30-50	mala					
	-	a	1a	poco	6	relativamente dura	100	muy buena	55-70	regular	6	I			
		b	2a	mediano	4	relativamente dura	10	buena	30-50	mala					

Fig. 94: Ejemplo de la clasificación geotécnica del macizo rocoso en la Hidroacumuladora en Escambray, Cuba . (O.Horský, 1988).



MACIZO ROCOSO														
Formación	Subzona	Tipo litológico característico de la roca	Simbología		Pro- piedad de Poisson ν	Velocidad de ondas P- m.seg-1	Registi- vidad aparente Ω m	Módulo de elasticidad MPa.10 <sup>3</sup>	Módulo estático		Resistencia al cortante			
			en los cortes geoló- gicos carotaj	en el registro de carotaj					orienta- ción res- istencia MPa.10 <sup>3</sup>	plasticidad de deformación MPa.10 <sup>3</sup>	orienta- ción res- istencia MPa	grados		
Chispa II	-	Esquistos cuarcíticos calcáreos	1	a	0,30	4000- 4500	50-200		no se distingue	0,15	0,08	no se distingue	0,02-0,05	32
		Esquistos cuarcíticos grafíticos	2	b	0,35	500-800	25- 50	0,8	no se distingue					
Cobrito III	1	Mármol brechoso	3	a	0,25	6000	10- 20	53	no se distingue	6,5	4,2			
		Mármoles estratificados, mármoles macizos de grano fino	4	b	0,30	5000	1000	53	no se distingue	7,0	4,7		1,0 0,3- 0,5	45 40
2	-	Calizas cristalinas (mármol) esquistosas, esquistos calcá- reos poco grafíticos	5	a	0,25	5200	500	45		1,8 1,0	1,0 6,0		0,4 0,05	50 38
		Esquistos calcáreos grafiti- cos hasta fuertemente grafi- ticos	6	b	0,30	4500	100	43		1,5 3,0	0,8 2,0		0,2 0,03	38 34
3	-	Esquistos calcáreos fuertí- sima grafiticos, repliegados	7	a	0,25	4700	50-100	43		0,7 8,3	0,32 4,7		0,2 0,05	40 36
		Esquistos calcáreos fuertí- sima grafiticos, repliegados	8	b	0,30	4000	10- 50	14		0,6 3,0	0,3 1,5		0,1 0,02	35 33
4	-	Esquistos calcáreos fuertí- sima grafiticos, repliegados	9	a	0,30	3000	10	14		0,5 2,0	0,25 1,2		0,1 0,00	38 32
		Esquistos calcáreos fuertí- sima grafiticos, repliegados	10	b	0,35	1000	10	14		0,4 1,5	0,2 0,8		0,05	28
IP	-	Esquistos calcáreos cloríticos, esquistos calcáreos micáceos	11	a	0,25	4600	100-150	40		1,6 8,0	0,8 5,5		0,5 0,15	42 34
		Esquistos calcáreos micáceos micáceos, gneises micocíticos	12	b	0,30	3900	20-100	40		1,2 3,0	0,6 1,6		0,1 0,05	35 30
Loma La Gloria IV	-	Esquistos cuarcíticos micáceos micáceos, gneises micocíticos	13	a	0,25	3500- 4500	800	40		1,6 8,0	0,8 5,5		0,4 0,10	40 34
		Esquistos cuarcíticos micáceos micáceos, gneises micocíticos	14	b	0,33	2000- 2500	300	40		1,2 3,0	0,6 1,6		0,1 0,00	35 30
IP	-	Esquistos clorítico	15	a	0,30	5000	100-300	42		(3,3)	(3,0)		0,4 0,05	50 38
		Esquistos talcoso	16	b	0,32	4000	10-100	42		(0,7)	(0,6)		0,2 0,03	38 34
IP	-	Esquistos talcoso	17	a	0,30	500-800	20- 40	0,8	no se distingue	(0,2)	(0,1)		0,05 0,00	28 22
		Esquistos talcoso	18	b	0,40	500-800	20- 40	0,8	no se distingue					
Loma La Gloria IV	-	Metabasitas de tipo Loma Pedro, gneises, metabasitas de otro tipo	19	a	0,30	6500	200-300	60	no se distingue	7,0	4,0	no se distingue	0,2	45
		Serpentinitas	20	b	0,32	5000	200-300	60	no se distingue	0,2	0,1	no se distingue	0,02-0,05	28
Metabasitas IV	-	Serpentinitas	21	a	0,30	6000		52	no se distingue	4,0	2,5	no se distingue	0,2	40
		Serpentinitas	22	b	0,35	4500		52	no se distingue	0,2	0,1	no se distingue	0,02-0,05	25

Fig. 96: Seleccionadas propiedades físico-mecánicas de las rocas del macizo rocoso en el Escambray, Cuba ( O.Horský, 1988 ).

## BIBLIOGRAFÍA RELACIONADA:

1. Gamboa F. Jorge : Mecánica de rocas y la cimentación de presas.
2. Curso sobre actualización en el diseño de presas, ESIA-IPN (1973 y 1975).
3. LONDE P : La Mécanique de roches et les fondation des barrages. C.I.G.B. (1973).
4. J. LAGINHA SERAFÍN : Rock mechanics considerations in the design of concrete dams, L.M.E.C. Lisbon (1964).
5. Bourgin : The safety of dams from the point of view of the foundations and the stability of reservoir banks. General Report Q.32. Ninth Congress of Large Dams, Istamboul (1967).
6. Stagg K.G. et Zienkiewicz : Rock Mechanics in Engineering Practica. New York (1968).
7. ASTM - STP 554 : Field testing and instrumentaron of rock. 1973.
8. ASTM - STP 477 : Determination of the in situ modulus of deformation of rock. 1969.
9. Conference on in situ measurement of soil properties. ASCE - 1975.
10. Sesión I.- In situ measurement of Permeability in soil and rock.
11. CIGB.- Lecons Tirées des Accidents de Barrage. 1973.
12. ASTM - STP 429 : Determination of stress in rock. A state of the art report, 1966.
13. Casagrande : Control of seepage through foundations and abutments of dams. Geotechnique, Sept. 1961.
14. Mayer : Recent work in rock mechanics, Geotechnique. June 1963.
15. K.G. Stagg : Rock mechanics in arch dam engineering. Theory of Arch Dams, an International Symposium, Pergamon Press. 1964.
16. Pierre Londe et F. Sabarly : La Distribution Despermeabilites dans la Fondation des Barrages Voûtes en Fontion du Champ de Contrainte-Premier Congres de la SIMR. Lisbon, 1966.
17. Ract - Madoux et Y. LeMay : Quelques Méthodes et Résultats D'auscultations D'appuis de Barrages. Premier Congres de la SIMR. Lisbon, 1966.
18. Okamoto Shunzo : Dams in Earthquake zones or other un favorable situations. General Report. Q.35. Ninth Congress on Large Dams. Istanbul, 1967.
19. Copen, M.D. : Arch Dam design. A state of the art. Journal of the P.D. ASCE. January, 1970.
20. Terrasa M et al. : Auscultation sismique du roches de foundanon du barrage de Roujanel.
21. First Congress on rock mechanics. Lisbon, 1966.
22. Serafim L. : Calculation of stability of slopes of dam foundations. First Congress on rock mechanics. Lisbons 1966.
23. GRISHIN et al. : The effect of heterogeneous character of rock foundation on the stresses on concrete dams investigated experimentaly. First Congress on rock mechanics. Lisbon, 1966.
24. Weyermann W. : Déformations des roches de fondation des barrages. First Congress on rock mechanics. Lisbon, 1966.
25. Serafim et al. : "In situ" tests for the study of rock foundations of concrete dams. First Congress on rock mechanics. Lisbon, 1966.
26. Fumagalli E. : Stability of arch dam rock abutments. First Congress on rock mechanics, Lisbon, 1966
27. Rebaudi, A et al. : Determination uf the behaviour of rock masses as structural

- foundations and its influence on dams. First Congress on rock mechanics. Lisbon, 1966.
28. Serafim, L. : Rock mechanics considerations in the design of concrete dams. Technical paper No. 224 LNEC. Lisbon, 1966.
  29. Berna ix, J. : Properties of rocks and rock masses. General Report. Third Congress of Rock Mechanics. Vol. I, Part A. Denver, 1974.
  30. Rocha, M. : Present possibilities of studying foundations of concrete dams. Third Congress of Rock Mechanics. Vol. I., Part A. Denver, 1974.
  31. Alvarez,A - Sancho J. : Study of a rock mass supporting an arch dam. Third Congress of Rock Mechanics. Vol. II, Part B. Denver, 1974.
  32. Gallico, A. – John K.W.: Graphical stability analyses for rock abutments of arch dams.
  33. Third Congress of Rock Mechanics. Vol II, Part B. Denver, 1974.
  34. Gilg,B. : Rock mechanics problems at José A. Paez. Arch Dam. Third Congress of Rock Mechanics. Vol. II, Part B. Denver, 1974.
  35. Savich, A.I. et al. : Seismic Survey of the Ingouri arch dam pit. Third Congress of Rock Mechanics. Vol. II, Part B. Denver, 1974.
  36. Timur, A.E. : The geotechnical investigation of a gallery. Third Congress of Rock Mechanics. Vol. II, Part B. Denver, 1974.
  37. Mary, M. : Barrages voutes, historique accidents et Incidents. Dunod, Paris, 1968.
  38. Chakib: Drainage du barrage Chah Abbas Kabir et son auscultation. 12<sup>eme</sup> Congrès International des Grands Barrages. México D.F. 1976.
  39. Cruickshank,V.C. : Flow in fractured rock masses. 12<sup>th</sup> International Congress on Large Dams. México, D.F. 1976.
  40. Alberro, J. : Filtrations in the foundations of the Santa Rosa Darc. 12<sup>th</sup> International Congress on Large Dams. México City, 1976.
  41. Comité Francaise des Grands Barrages. Infiltrations dans les barrages D'Electricité de France, Constatations, Interpretation et traitement. 12<sup>eme</sup> Congrès Internationale des Grands Barrages, México, 1976.
  42. Widmann R., Heigerth, G. : Rock deformations and seepage flows in the foundation of the Schlegeis arch dam. 12<sup>th</sup> International Congress on Large Dams. México,1976.
  43. Schnitter, N.J. : Abutment drainage for arch dams. 12<sup>th</sup> Int. Congress on Large Dams.México City, 1976.
  44. Fernandez, C.J.L. et al. : Analyse et auscultation des infiltration schemes de drainage. 12<sup>eme</sup> Congress Internationale des Grands Barrages. México, 1976.
  45. Sherard,J.L. et al. : Potentially active faults in dam foundation Geotechnique. September ,1974, London.
  46. ISRM. : Recommendations on site investigations techniques. July 1975.
  47. J. Laginha Serafim et al. : Geológica! Explorations for a Dam Site. Proceedings of the First I.S.R.M. Congress. Lisboa, 1966.
  48. Engineering Geology Related to Dam Foundations. General Report, Second International Congress of the IAEG. Sao Paulo. Brazil 1974.
  49. Tectonophysics: The study of Relations Between Deformation and Forces in the Earth. General Report. Third Congress of the I.S.R.M.Denver, 1974.
  50. Current Practice in Arch Dam Design and Construction. Joint ASCE Uscold Committee on Current U.S. Practice in the Design and Construction of Arch Dams. 1967.

51. Wahlstrom, E.E. : Dams, Dam Foundations, and Reservoir Sites. Elsevier Scientific Pub. Co. 1974. (Cap. 9, Geológica and Geophysical Investigations of Dam and Reservoir Sites).
52. Foundations for Dams. : An Engineering Foundation Conference. Published by A.S.C.E. March , 1974.
53. M. Gignoux et R. Barbier. : Géologie des Barrages et Des Aménagements Hydrauliques.
54. Masson et Cié. Editeurs. París,1955. (Cap. IV. Problemes Poses par les Barrages de Retenue, Cap. VII, Sondages et inyection).
55. Okamoto Shunzo. : Dams in Earthquake Zones or Other Unfavorable Situations. General Report. Q. 35. Ninth Congress on Large Dams. Istamboul 1967.
56. X. Ract - Madoux et Y. Le May : Quelques Méthodes et Résultats D'auscultations D'appuis de Barrages.Premier Congres de la SIMR. Lisboa 1966.
57. Pierre Londe et F. Sabarly : La Distribution Despermeabilites Dans la Fondation des Barrages Voútes en Fontion du Champ de Contrainte. Premier Congres de la SIMR. Lisboa, 1966.
58. Economic Commission for Asia and the Far East Bangkok, Thailand : Proceedings of the Regional Symposium on Dams and Reservoirs (Held at Tokyos Japan, 18 to 23 September 1961). Flood Control Series, Num 21, United Nations, New York, 1962.
59. Merlin D., Copen, F. Asce and Loyd R. Scrivner : Arch Dam Design: State of the Art,Journal of the Power Divisions ASCE.- Vol, 968 Num, PO 1, January, 1970.
60. Current Practice in Arch Dam Design and Construction, Arch Dam Design andConstruction. Joint ASCE-USCOLD Committee on Design Criteria for Large Dams, USA, 1967.
61. Brown, J.Guthrie : Hydro-Electric Engineering Practice. Blackie & Son Limited, Vol,1 (Civil Engineering), London, 1964.
62. Bellport,B.P.:Design and Construction of Arch Dams. Lesson From DamIncidents.ICOLD, 1974.
63. Valtr,V.: Aplikace karotážních metod v inženýrské geologii a stavebnictví. Výzkumný úkol ústavu Geofyzika, 1970.
64. Valtr,V.- Pantl.V.: Zpráva o geofyzikálních měřeních ve vrtech v oblasti hydrocentrály VD Dalešice. Archív Geofyzika Brno, 1971.
65. Erling Reinius : Design and Construction of Buttress Dams. Lesson from Dam Incidents. ICOLDS 1974.
66. Clemente Saenz et al. : Ámbito geológico de la presa. Separata de la obra Grandes Presas, 1974, Madrid, España.
67. Záruba Q. -Mencl,V. : Inženýrská geologie. (Geología para Ingenieros). Academia Praha, 1974.
68. Verfel,J.-Tkaný Z. : Těsnění základových púd. (Impermeabilización de los Suelos) SNTL, Praga, 1974.
69. Mareš,S.- Müller,K.: Geofyzikální metody v hydrogeologii a inženýrské geologii.(Métodos geofísicos en hidrogeología e ingeniería geológica). SNTL,Praha,1983.
70. Karpyšev, S. : Inženýrno geologičeskije iziskasnija dlja strojitelstva gidrotěchničeskich sooruženij. Energija, Moskva ,1980.
71. Paniukov, P. : Geología aplicada a la ingeniería. Editorial MIR, Moscú,1978.
72. ENIA MICONS : Mecánica de suelos. Ministerio de Educación, Habana,1982.
73. Japanese National Gommittee of the International Commision on Large Dams.

- Standarts for Geological investigations of dam foundations, 1978, Tokio.
74. Siches, Palma ,Ca Jus : Les étaps de la recherche geologique et geotechnique dans lconception des barrageus. 14<sup>0</sup>, R-31, ICOLD - Q 531-536. Río de Janeiro.
  75. Casajus, Salvo, Siches, Turrazini. : Fases de la investigación geotécnica en la concepción de Presas. Áctas Asociación Argentina, Vol. II , 1982 .
  76. Horský, O.(1967) : La Ingeniería Geológica en Checoslovaquia. Instituto de Investigaciones Geológicas, Vol. XXI, pg. 1 – 10, Barcelona 1967.
  77. Horský, O. - Müller, K. (1973) : Inženýrsko-geologické poměry přehradního místa Dalešice na řece Jihlavě. In Sborník geol. věd, řada HIG, sv. 11, 1974, pg. 125 – 160.
  78. Horský, O.- Müller, K.- Trávníček, L (1974).: Complex Documentation of exploratory workings. In Sborník I.A.E.G., Sao Paulo, 1974, VII - 8.1 - 8.8.
  79. Horský, O.- Drozd, K. (1975): Métodos de las Investigaciones geotecnicas para las Obras Hidrotécnicas. 3<sup>ra</sup> reunión del Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica Eléctrica y ramas Afines. Peru – Arequipa, 1975, Vol., II - 10.1, -10. 4.
  80. Horský, O.- Müller, K. (1977) : Investigation and Landslide Stabilization on the Orava Reservoir shores. Geotest and Landslide, República Checa, Brno, 1977, pg. 35 – 50.
  81. Horský, O. – Müller, K. (1977) : Rock Environment – Determining Factor for Projecting the Hydrotechnic Construction Works. III.Congreso I.A.E.G., Madrid, Sept.1978, Sec. III., vol.1., pg. 143 151.
  82. Horský, O.-Morua, O. (1979) : Norma para el levantamiento Ingeniero-Geológico. Vydal MICONs, Habana, 1979.
  83. Horský, O. (1980) : Colaboración entre Cuba y Checoslovaquia en la Construcción”. In Revista “ Checoslovaquia”, 1., pg. 9-11., Habana, Cuba, 1980.
  84. Horský, O. (1980) : Clasificación de los movimientos de las laderas. Vydal MICONs, Habana 1980, s. 1-12.
  85. Horský, O. – Morua, O. (1981) : Metodología del levantamiento y confección de los mapas ingeniero-geológicas. Vydal MICONs, Habana 1981.,s. 1 – 32.
  86. Horský, O. (1981) : Clasificación de las rocas a base del Índice de Calidad de la Roca – RQD. Vydal MICONs, Habana 1981., s. 1-16.
  87. Horský, O. (1981) : El maciso rocoso, factor decisivo para elegir el lugar de la construcción de la Obra Hidráulica. Vydal MICONs, Haba 1981., s.1 – 21.
  88. Horský, O. ( 1981) : Bases del levantamiento para confeccionar un mapa Ingeniero-Geológico. Vydal MICONs, Habana 1981., s.1-26.
  89. Horský, O. (1981) : Documentación completa Ingeniero-Geológica y Geotécnica de los laboreos de explotación. Vydal MICONs, Habana 1981., s.1-7.
  90. Horský, O.-Cesar, C. (1981) : Investigaciones Ingeniero-Geológicas para la construcción de Túneles y Metropolitanos. Vydal MICONs, Haban 1981.,s.1-29.
  91. Horský, O.-Fernandez, O. (1981) : Anteproyecto de norma “Investigaciones Ingeniero-Geológicas – simbolos gráficos”. Vydal MICONs, Habana 1981, s.1-46.
  92. Horský, O.- Morua, O. (1981) : Inženýrskogeologický průzkum pro hydroenergetické dílo na řece Agabamě v pohoří Escambray. Manustript, 8 stran + obrazové přílohy, Habana, 1981.
  93. Horský, O. (1981) : Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Obras Hidrotécnicas. I. Parte. Vydal MICONs, Habana 1981., s.1-52. Počet výtisků : 200.

94. Horský,O. (1981) : Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Obras Hidrotécnicas. II.Parte, Geotécnia. Vydal MICONS, Habana 1981., s,1-40. Počet výtisků : 200.
95. Horský,O. (1981) : Índice de calidad de la roca R.Q.D – uno de los parámetros básicos para clasificación de las rocas. In “IX.Jornada Científica”.,s.189-192, Academia de Ciencias de Cuba, Habana 1982.
96. Horský,O.-Conde,M.(1981) : Las Investigaciones Geofísicas en el estudio Ingeniero-Geológico de Obras Hidrotécnicas. In “Voluntad Hidráulica”, XX., N<sup>o</sup> 61., pg.14-18., Habana 1983.
97. Horský,O. (1982) : Bases metodológicas para el desarrollo de las Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Obras Hidrotécnicas. In “Voluntad Hidráulica”, XX. N<sup>o</sup> 62, pg.57 –63.,Habana 1983.
98. Horský,O. (1982) : Clasificación de las rocas sobre la base del “Índice de Calidad de la Roca – RQD. In “Voluntad Hidraulica”,N<sup>o</sup> 74, pg. 51-56.,Habana 1987.
99. Horský,O. (1982) : Bases metodológicas para el levantamiento Ingeniero-Geológico. Manuscrito para la Revista : “Voluntad Hidráulica”, Habana.
- 100.Horský,O. (1983) : Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Presas. Editado por : GEOTEST BRNO, República Checa, 1983, Pg.223.
- 101.Horský,O. (1983) : 30 let Oravské vodní nádrže a její vliv na deformace břehů. (30 años de Embalse Orava y su influencia a las deformaciones de las orillas). Editado: Inženýrské stavby, N<sup>o</sup> 10, pg. 489 – 498, Bratislava, Eslovaquia, 1984.
- 102.Horský,O. (1983) : Inženýrskogeologický průzkum pro přehradu Corojo ve vápencovém krasu na Kubě. Ročenka Geotestu 1981- 1983., s.21-32.,Brno 1984.
- 103.Horský,O. (1984) : Využití RQD pro inženýrsko-geologické hodnocení horninového prostředí. In “Zborník Inžiniersko-geologické sympóziu” při příležitosti 60 let Prof.Milana Matuly , s. 222-234.,1984 Bratislava.
- 104.Horský,O. (1984) : El macizo rocoso, factor decisivo para elegir el lugar de la construcción de la Obra Hidrotécnica. Manuscrito para la “Voluntad Hidráulica”, Habana 1984.
- 105.Horský,O. (1984) : Movimientos de las laderas en las áreas del estudio de Obras Hidrotécnicas. Manuscrito para la “Voluntad Hidráulica”, Habana 1984.
- 106.Horský,O. (1984) : Investigaciones Ingeniero Geológicas para las Presas. Büro Geológico Checo, 1984, pg. 1 – 228., Praha. Editado para el MICONS, Habana, en las 50 ejemplares.
- 107.Horský,O. (1984) : Application of Airborne in Investigation of Changes in the Banks of Reservoir in Dam Areas. XXVII mezinárodní geologický kongres, Moskva. Vol.VIII, sec. 17.,pg.56, Moskow 1984.
- 108.Horský,O.-Bláha,P. (1984) : Investigation of the disturbance of the Basalt sheet at damsite Slezská Harta using geological of geophysical method. XXVII mezinárodní geologický kongres, Moskva. Vol.VIII, sec. 17., pg.57, Moskow 1984.
- 109.Horský,O.-Pacareo,L. (1985) : Metodos de las Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Hidroacumuladoras. Conferencia publicada en MICONS, 1985, Cuba.
- 110.Horský,O. (1989) : Metodika inženýrskogeologického průzkumu pro přečerpávací vodní elektrárnu Centro Cuba. Ročenka geologické sekce 1990, s.75-86, Brno 1990.
- 111.Horský,O. (1990) : Stanovení korelačních vztahů mezi dynamickými moduly pružnosti a deformačními moduly v základech horní hráze přečerpávací elektrárny Centro Cuba. In : Sborník “ Geotechnické roblémy energetickej výstavby”, ČS VTS Vysoké Tatry, 1990, s. 41-44.

112. Horský, O. (1990) : Inženýrskogeologický průzkum pro přečerpávací elektrárnu Centro Cuba v pohoří Escambray. Geologický průzkum, č. 8, PG. 239 – 243., Praha 1991.
113. Horský, O. (1990) : The Causes of Morphological Changes at the Water Edges of Orava - Reservoir in Slovakia. In Sborník : Mezinárodní kongres IAEG, s. 285-286, Amsterdam 1990. Vydala Balkema, Rotterdam
114. Horský, O. (1990) : Inženýrskogeologický průzkum pro přehrady. Geofond Praha – Edice GEODA. Stran 1 – 119, Praha 1990. (Investigaciones Ingeniero-geológicas para las Presas).
115. Horský, O. (1990) : Diskuse ke stanovení rozsahu inženýrsko geologického průzkumu pro přehrady. In Sborník mezinárodního symposia “Metodické inovace v inženýrské geologii”, počet stran 8, Příbram 1990.
116. Horský, O. (1991) : Česko-španělský a španělsko-český geotechnický slovník. Vydal DPB Paskov, 1991, s. 1-61.
117. Horský, O. (1992) : Investigation and landslide stabilization on the Orava – Reservoir shores in Slovakia. International Conference on Environmental Management Geo-Water and Engineering Aspects. Počet stran 6, Wolongong, Australia 1993.
118. Horský, O. (1993) : Jet Grouting – tecnología progresiva de cimentación de las construcciones. Manuscript pro přednášku na Universitě v Barceloně, 1993. ( 7 stran + 7 obrázků)
119. Bláha, P.- Horský, O. (1984) : El uso de métodos geofísicos para el estudio del eje de la presa en la etapa orientativa. Manuscript GEOINZA Madrid a GEOTest Brno., 1984.
120. Bláha, P.- Horský, O. (1984) : Métodos de prospección geofísica para el estudio de las posibles cerradas en el anteproyecto o viabilidad de un embalse. Manuscript GEOINZA Madrid a GEOTest Brno., 1984.
121. Horský, O. (1991) : Inženýrskogeologický průzkum pro přečerpávací elektrárnu Centro-Cuba v pohoří Escambray. In Geologický průzkum, 8/1991, s. 239-243, + obrazová příloha. Praha, 1991.
122. Horský, O. (1994) : Geotechnical research for the pumping storage station. In Sborník : Mezinárodní kongres IAEG, s. 3919 – 3926., Lisabon 1994. Vydala Balkema, Rotterdam.
123. Horský, O.-Lincer, L.- Nešvara, J. (1994) : Ecological repairs of the Orava Dam reservoir shore banks. In Sborník : Mezinárodní kongres IAEG, s. 3729 – 3737, Lisabon 1994. Vydala Balkema, Rotterdam,
124. Bláha, P.-Horský, O. (1994): Engineering geophysics for dam site selection. In Sborník: Mezinárodní kongres IAEG, 69 – 78, Lisabon 1994. Vydala Balkema, Rotterdam.
125. Horský, O.-Spanilá, T. (1996) : Remodelling of water reservoir banks by exogenous processes. In Sborník : Mezinárodní kongres IAEG, 2771 – 2716, Athens, Greece 1997. Vydala Balkema, Rotterdam.
126. Spanilá, T.-Horský, O.-Banach, M. (2001) : Slides and sliding in the water reservoirs banks. In Sborník Landslides, Swets & Zeitlinger, Lisse, 2002, s. 315 – 319.
127. Bláha, P.-Horský, O.-Vlastník, M. (2002): Métodos geofísicos empleados para las orientativas investigaciones ingenierogeológicas de los sitios de presa. Manuscrito para la Voluntad Hidráulica, Havana, Cuba.
128. Horský, O. (2002) : Presas. El libro metodológico, Editado por EGT Horský, pg. 308, Brno 2002.
127. Bláha P., Kottas J., Sochor J.: Geological inhomogeneities in seismic tomography., In: Proceedings: 7th International Congress IAEG, Balkema, Rotterdam, 1994, p. 79-87.
128. Bláha P., Lincer L., Woznica L.: Geoakustické monitorovací měření na přehradě Víř.,

(en checo), Monitoreo geoacústico en la presa Víř., In: Sborník: Polní geotechnické metody 94, Dům techniky Ústí, Ústí nad Labem, 1994, s. 23-26.

129. Bláha P., Müller K.: Physical characteristic of failure zones., In: Proceedings: 2nd Meeting Environmental and engineering geophysics, Nantes, 1996, p.101 - 104.

130. Bláha P., Müller K.: The signification of geophysical monitoring in geotechnical practice., In: Proceedings 28th Polish-Czech-Slovak Symposium on Mining Geophysics, Sosnowiec 2001, s. 46.

#### Literatura nueva anexada a la edición electrónica (2015):

131. Horský, O. – Bláha, P.: *Inženýrskogeologický průzkum pro přehrady, aneb co nás také poučilo.* 224 stran. Repronis Ostrava, 2009, ISBN 978-80-7329-207-2.

132. Horský, O. - Bláha, P.: *The Application of Engineering Geology to Dam Construction.* 296 pg., todo color, papel brillante, Repronis Ostrava, 2011, ISBN 978-80-7329-278-2.

133. Horský, O.: *Jezero Titicaca na prahu třetího tisíciletí. El Lago Titicaca al borde de tercer milenio.* Vydavatel a tisk Nová Forma, s.r.o. 2013. ISBN 978-80-7453-384-6.

134. García Yagüe, A. – Alvarez, G. *Grandes deslizamientos Españoles, In II. Simposio sobre taludes y laderas inestables,* Andorra la Vella, 1988, p. 599 – 612.

135. García Yagüe, A. *Temas de Geología aplicada a las Obras Públicas,* Madrid: Colegio de I.C.C. y P, 2000.

136. Bláha, P. – Müller, K. *Uplatnění geofyzikálních metod v geotechnice a stavebnictví (Application of geophysical methods in geotechnics and civil engineering),* EGRSE, 2001, 1 – 2, p. 4 – 5, ISSN 1211 – 359X.

137. Bláha, P. – Müller, K. *The signification of geophysical monitoring in geotechnical practice,* In *Publications of the institute of geophysics Polish academy of sciences,* Warszawa, 2002, p. 356 – 365.

138. Bláha, P. – Müller, K. *Application of Geophysical Methods in Geotechnic and Construction,* Praha: EGRSE, 2003, 1 – 2.

139. Bláha, P. - Černý, V. - Duras, R. - Fousek, J. - Horský, O. - Lazecký, M. - Oprchal, J. - Tábořík, P. - Peshawa, A. - Aziz, B. Q. (2010): *Geoelectrical Surveys for the Feasibility Study of the Bawanur Dam Site.* EGRSE, 2011.

140. Bláha, P. - Černý, V. - Duras, R. - Fousek, J. - Horský, O. (2011): *Geoelectrical Surveys for the Feasibility Study of the Bawanur Dam.* Kongres HYDRO 2011, Praha.

141. Bláha, P., Duras, R., Fousek, J., Horský, O. (2011): *An Orientation survey of the Bawanur Dam.* Mezinárodní konference HYDRO2011, Praga, Session 7: Hydro Development in Asia.

142. Bláha, P., Černý, V., Fousek, J., Horský, O. (2012): *An engineering geological survey for the Bawanur Dam in Kurdistan.* Conf. Intern. HYDRO 2012, Thailandia,

143. Bláha, P., Horský, O. (2013): *Engineering-Geological Survey of the Reservoir Areas of Dams.* Mezinárodní konference HYDRO 2013. Water Storage and Hydropower Development for Africa. Addis Ababa, Ethiopia, April 2013.

144. Horský, O - Bláha P. (2014): *The Application of Engineering Geology to Dam Construction.* Publisher Comenius University in Bratislava, Slovak Republic, 2014, pg. 321, ISBN 978-80-223-3596-6. Second edition of English version, revised and extended. Printed in Czech Republic, Jan Sojnek.

# ANEXO I

## CONFECCIÓN DE LOS PROGRAMAS DE INVESTIGACIONES

### FUNDAMENTAL

Según la magnitud y la importancia del trabajo se dividen los programas en dos tipos. El programa completo se emplea para las obras importantes y grandes, el programa simplificado para las obras pequeñas.

### MODELOS.

Hoja titular, hoja de resumen y el cronograma, sirven para ambos tipos de programas; las hojas siguientes sirven solo para el programa simplificado.

### ANEXOS :

Son obligatorios solo para el programa completo, salvo el esquema del revestimiento hidrogeológico que es obligatorio, siempre y cuando se plantee. El programa completo debe contener plan de calas (macrolocalización). Además puede contener la microlocalización, mapa geológico y el corte geológico característico.

### OBSERVACIONES METODOLÓGICAS PARA PROGRAMAR LAS INVESTIGACIONES

#### I. Preparación de la investigación

La investigación la comenzamos a preparar en base de la solicitud "escrita" ("tarea técnica") donde se define el objetivo de los trabajos, lugar y fecha de la investigación. En algunos casos podemos hacerlo basado en la iniciativa misma del organismo.

Esto significa verificar todos los asuntos importantes desde el punto de vista de la tarea técnica, las que podemos confeccionar sin los trabajos explorativos de campo (trabajos técnicos). Las informaciones las averiguamos no solamente sobre el área de la construcción, sino para un área más amplia.

#### 1 – Preparación del programa de la investigación.

La preparación del programa de la investigación abarca:

- a) El estudio de todos los materiales e informaciones sobre el proyecto obtenidos de parte del proyectista, como es la etapa de proyección, todos los datos técnicos importantes sobre el proyecto desde el punto de vista de la investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica, el estudio de las bases topográficas, etc.
- b) El estudio de la literatura y de los materiales de archivo, datos geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, climáticos, hidrogeológicos, etc.
- c) El estudio de los mapas existentes en los archivos y de mapas desarrollados actualmente tales como topográficos, geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, pedológicos, geotécnicos y de otros tipos, eventualmente el estudio de las fotos aéreas.

- d) Estudio de los resultados de las investigaciones anteriores en la región, especialmente de las primeras etapas de la investigación.
- e) Visitas al área de interés, para realizar marcha rutas con el fin de conocer los aspectos geomorfológicos, geológicos, hidrogeológicos, etc. respetando el objetivo de la investigación. También se estudiarán los posibles accesos para las máquinas perforadoras, etc.
- f) Verificación de datos específicos como es la actividad minera, la presencia de yacimientos, zonas protegidas, reservaciones, áreas sísmicas, etc.
- g) Preparación del proyecto (programa de investigación) lo realizaremos en colaboración con el-proyectista y el cliente.

## 2 - Problemas de los intereses.

Cuando el contratista está preparando el programa de investigación, estudia los posibles problemas de intereses, los que pudieran influir en la realización o no de toda la investigación supuesta, por ej. intereses del estado, de la protección de la naturaleza, de personas particulares, etc.

Si el contratista averiguara en algún momento la posibilidad de problemas de intereses, lo comunicará al cliente antes de terminar el programa de investigación y esperará hasta el momento de definir el asunto.

## II - Proyección de la tarea de investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica.

### 1- Programa de la investigación geológica

- a) El programa de la investigación geológica e hidrogeológica (a continuación solamente programa) es el resultado de la etapa de preparación de la tarea técnica. La hacemos para cualquier investigación, inclusive para los trabajos ingeniero-geológicos e hidrogeológicos durante la construcción de la obra o después de construirla. No abarca dictámenes periciales.
- b) El programa elaborado es un conjunto de materiales los que definen el volumen de los trabajos, el modo de realizarlos, la elaboración de los resultados y el cronograma de los trabajos. Además se agrega el presupuesto de los trabajos. Se exige mantener los principios de la complejidad y economía planteando los trabajos de la investigación. Además, hay que hacer la investigación por etapas y no unir estas, si otra depende de los resultados de la etapa anterior.
- c) El programa tiene generalmente 4 partes:
  - parte geológica
  - técnica
  - presupuesto
  - anexos
- d) La parte geológica del programa la elabora el responsable de la investigación. Si la problemática del trabajo abarca los trabajos especiales, esta parte lo preparan los especialistas, pero el responsable de la tarea lo coordina. Esta parte geológica (representada por trabajos ingeniero-geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, etc.) define el modo de resolver la tarea para satisfacer al cliente en condiciones dadas. Hay que definir el objetivo de la tarea, los fines y la metodología

de los trabajos elegidos, volumen de los trabajos de la investigación, procedimientos de trabajos obligatorios, orden o etapas de los diferentes trabajos a realizar , se formularán pedidos para la colaboración de otros departamentos, especialistas u organismos.

El programa tiene que contener, según la necesidad e importancia de la obra lo siguiente:

- ❖ Volumen del levantamiento ingeniero-geológico, su escala, metodología de elaboración y confección del mapa.
- ❖ Exigencias al volumen, alcance y fines de los trabajos geofísicos.
- ❖ Exigencias para la calidad y tipo de los trabajos técnicos (calas, calicatas, zanjas, trincheras, etc.) y para la tecnología de los trabajos técnicos, siguiendo los objetivos de estos desde el punto de vista de la investigación.
- ❖ Metodología de la documentación de los trabajos de la investigación (de calas, calicatas, pozos, etc).
- ❖ Exigencia en el trabajo de carotaje en las calas , o de otros métodos geofísicos dentro de las calas (eventualmente en calicatas u otras obras.)
- ❖ Cantidad de las muestras para petrografía y paleontología y los criterios de la toma de las muestras.
- ❖ Criterios de la toma de las muestras de agua, de suelos y de las rocas para examinarlas en el laboratorio, cantidad de las muestras supuestas.
- ❖ Definir los parámetros geotécnicos necesarios de investigación.
- ❖ Definir los principios para escoger las pruebas de campo "in situ", lugares donde se realizarán y cantidad de las mismas.
- ❖ Bases para escoger las pruebas hidrogeológicas "in situ" y de distintas mediciones (por ej. medición del abatimiento, aforos, vertimientos, pruebas indicativas, etc.) cantidad de mediciones supuestas.
- ❖ Los medios de protección de los trabajos de la investigación (calas, calicatas, etc. ,y su posible uso en las etapas siguientes, eventualmente las posibilidades de la liquidación de estos.
- ❖ Objetivos, fines y volúmenes de los trabajos geofísicos detallados para puntualización y extrapolación de datos obtenidos en base de las investigaciones "in situ".
- ❖ Exigencias de los trabajos topográficos y de aseguramiento de diferentes mapas, fotos aéreas, etc.
- ❖ El cronograma de los trabajos para que sean ejecutados unidos y escalonadamente.
- ❖ La forma y volumen de la elaboración de los resultados obtenidos.
- ❖ Mencionar el método del almacenamiento de la documentación geológica (por ej. se escribe, si los testigos de perforación se pueden echar o si es necesario proteger y guardarlos y como realizar esto).

La parte geológica además contiene proyectos de trabajos especiales si no son de grandes volúmenes, puede hacerlo el responsable de la investigación en base a consultas con los especialistas. Si se refiere de trabajos muy complejos, los especialistas presentan sus proyectos de trabajo los que formarán parte orgánica del proyecto y el responsable lo unirá todo.

## Trabajos Geofísicos

El programa tiene que contener :

- ❖ Resumen general del objetivo y de los fines del trabajo en diferentes etapas en armonía con los trabajos geológicos.
- ❖ Metodología del trabajo y procedimientos del mismo obligatorios.
- ❖ Forma de entrega de los resultados al ingeniero geólogo o hidrogeólogo.

## Trabajos geotécnicos

El programa tiene que contener :

### 1 - Pruebas de laboratorio.

- ❖ Breve resumen de los ensayos pedidos y de los valores geotécnicos que se piden.
- ❖ Metodología y procedimientos del trabajo, forma de entrega de los resultados.
- ❖ Exigencias en la toma, transporte y almacenamiento de las muestras.

### 2 - Pruebas de campo “in situ”.

- ❖ Breve característica de los valores geotécnicos del macizo rocoso, en los que se piden volumen y tipo de las pruebas.
- ❖ Metodología y procedimientos del trabajo.
- ❖ Exigencias para la preparación técnica de las pruebas y aseguramiento de las condiciones óptimas para su realización.

## Trabajos hidrogeológicos.

El programa tiene que contener:

- ❖ Breve resumen del objetivo y de los fines de las pruebas hidrogeológicas (en armonía con la parte geológica).
- ❖ Metodología de las pruebas y mediciones, procedimientos obligatorios del trabajo.
- ❖ Exigencias para la preparación de las pruebas y las mediciones.

## Pruebas de las aguas en el laboratorio.

El programa tiene que contener:

- ❖ Breve resumen de los volúmenes de las prueba. Su cuantificación.
- ❖ Exigencias para la toma, protección y transporte de las muestras al laboratorio.
- ❖ Volumen y modo de apreciación de los componentes inestables.

## Otros trabajos especiales.

El programa tiene que contener:

- ❖ Breve resumen del objetivo y de los fines de los trabajos técnicos especiales.
- ❖ Metodologías y procedimientos obligatorios del trabajo.
- ❖ Exigencias para asegurar las mejores condiciones para su óptima realización.

Trabajos topográficos.

En base al pedido del responsable de la investigación el topógrafo elaborará el programa de los trabajos topográficos. Es necesario definir la escala y el tipo del mapa, en el que hay que ubicar los trabajos de investigación (calas, calicatas, trincheras, etc.) Hay que pensar bien todas las circunstancias que puedan crear problemas en los trabajos topográficos. Es necesario proyectar el modo de conservación de los puntos medidos (hacer estables y duraderos los puntos). Este programa debe contener el procedimiento de trabajo topográfico y su volumen.

La parte geológica tiene en general, estos capítulos:

- ❖ Parte General (condiciones jurídicas, denominación completa del objeto, et.).
- ❖ Datos generales, las investigaciones anteriores, resumen de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la región, etc.
- ❖ Definición del objeto de la investigación, metodología del trabajo elegido, trabajos proyectados y sus objetivos, etc.
- ❖ Especificación de los trabajos de la investigación, como por ej. levantamiento, excavaciones, perforaciones, pruebas en el laboratorio y el campo, pruebas especiales, trabajos topográficos, etc.
- ❖ Necesidad de los trabajadores (especialistas), materiales, recursos auxiliares, etc.
- ❖ Colaboración externa con otros organismos.

e) - La parte técnica del programa

La forma el responsable de los trabajos técnicos. Esta parte define la forma de realización de los trabajos de tal manera que resuelvan todas las tareas definidas en la parte geológica, esto por ej. la preparación del lugar de trabajo, el número de brigadas necesarias, tipos de las máquinas, tecnología del trabajo, la toma de las muestras de suelos, rocas y agua, el número de máquinas que se necesitan, el método para asegurar las pruebas de campo y las diferentes mediciones relacionadas con los trabajos técnicos, la forma de proteger y conservar los trabajos realizados.

f) - Presupuesto de los trabajos

h) - Anexos (esquemas, mapas geológicos, perfiles, etc).

# LA COMPOSICIÓN COMPLETA DEL TEXTO DEL PROGRAMA DE LAS INVESTIGACIONES.

## I - PARTE GEOLÓGICA

### 1 - Introducción:

- ❖ formular los objetivos generales del trabajo y la precisión requerida para la elaboración correspondiente a la etapa de proyecto, su importancia económica.
- ❖ especificar todos los datos y anexos que sirven para confeccionar el programa.
- ❖ característica detallada y acertada de la obra, especificando los problemas que requieren la elaboración precisa.
- ❖ puntualizar los requerimientos y las preguntas del cliente.

### 2 - Parte general:

- ❖ geografía del lugar (provincia, municipio, hoja del mapa y coordenadas aproximadas, vías de comunicaciones, condiciones específicas que influyen en la organización del trabajo, accesos, suministros de corriente eléctrica, de agua, etc.).
- ❖ resumen de los trabajos ya realizados y sus resultados (se trata de las etapas antecedentes y de otros trabajos exploratorios, los últimos hay que evaluarlos desde el punto de vista de su utilidad en el proceso explorativo presente).
- ❖ geología del lugar en general (resume todos los conocimientos existentes sobre la petrografía, tectónica, estratigrafía y morfología en forma breve, al respecto de los problemas a resolver.).

### 3 - Metodología de los trabajos.

- ❖ la descripción de los trabajos planteados relacionados con los objetivos del detalle de la investigación (cantidad de calas, calicatas, etc., su ubicación y profundidades, las distancias entre ellas con relación a la estructura geológica a su supuesta variación, otros métodos y mediciones planteados.).
- ❖ el resumen de los requerimientos del cliente relacionados con el propuesto para sus soluciones.

### 4 – Especificación detallada de los trabajos planteados.

- a. Levantamiento geológico: Demarcación (ubicación) del área a investigar, su extensión, escala del mapa a utilizar, modo de su elaboración, forma de documentación de los afloramientos u otros fenómenos significativos ( morfológicos ), cantidad necesaria de puntos de documentación, la cantidad de trabajos técnicos (calas, calicatas), otros trabajos necesarios (laboratorio, observaciones, etc.), el cálculo

del tiempo para la elaboración del mapa.

- b. Perforaciones y excavaciones: Se recomienda elaborar una forma de tabla, expresando las profundidades y ubicación de cada cala, calicata, galería, etc., rumbos (dirección), diámetros requeridos, encamisado, j muestreo, columnas litológicas característica.
- c. Pruebas y mediciones: La descripción detallada del proceso de las pruebas planteadas, sus características, equipos necesarios, lugares destinados para realizar las pruebas, cronograma detallado de las pruebas, los parámetros de prueba (por ej. precisión necesaria, niveles de pruebas, etc.). " ~
- d. Trabajos de laboratorio: Cantidad de los trabajos, los cambios que no se encuentren en la metodología adoptada, la propuesta de elaboración (grupos para elaboración común, métodos estadísticos, etc), la propuesta de ensayos especiales.
- e. Trabajos topográficos: Tipo y cantidad de trabajo, requerimientos especiales (mediciones repetidas del sentamiento, del desarrollo de deslizamientos, etc), replanteo de calas.

#### 5 - Requerimientos especiales del personal técnico, de equipamientos y de colaboración con otros organismos.

Enumerar todos lo requerimientos específicos que son necesarios para resolver los problemas planteados y que no se pueden asegurar en la rama de la empresa. Dichos requerimientos deben ser detalladamente especificados para contratar su cumplimiento en otros organismos.

## **II – PARTE TÉCNICA**

Contiene las especificaciones de los equipos necesarios para cumplir el programa, su tipo, su cantidad, el modo del suministro de los equipos por combustibles, agua potable, en los casos complejos la organización del trabajo (la ubicación de equipos, de almacenes, etc), cronograma detallado, reglas de protección física, rendimientos planteados, el cálculo de los materiales (arena, cemento, bentonita, tuberías, camisas ciegas y ranuradas, etc.).

## **III – PRESUPUESTO**

Se elabora en base de las partes antecedentes. Se usan los datos planteados (el volumen de perforación, las columnas litológicas supuestas, el volumen de ensayos, los equipos planteados, etc.) Se prepara independientemente de las partes geológicas, inclusive los trabajos de laboratorio, de pruebas de campo, de trabajos topográficos y la parte de trabajos técnicos. Siempre se cuenta con cierta reserva para los casos imprevistos.

## **A N E X O II.**

### **NORMALIZACIÓN DE INVESTIGACIONES INGENIERO-GEOLÓGICAS PARA LAS PRESAS**

Para cada nivel de investigación, se establecen las premisas fundamentales del mismo y las tareas consecuentes que permiten lograr los objetivos planteados.

Dado que los problemas a resolver son siempre diferentes, dependiendo de etapa de las investigaciones, de complejidad ingeniero-geológica, de categoría de la obra según sus características técnicas y de otros factores, no se pretende que la normalización puesta a consideración sea utilizada en una forma rígida, sino que a partir de las necesidades de cada sitio de fundación específicas y características del proyecto propias pueda el ingeniero geólogo decidir sobre las líneas de investigación necesarias, tendientes a responder preguntas formuladas.

Progresión de estudios y de tareas geotécnicas correspondientes a cada etapa de investigaciones se definen en el esquema en la pg. 25 y en la tabla N<sup>o</sup> 4 en la pg.31.

Para elegir bien el lugar de una presa y del embalse el más conveniente, sirven como las más importantes y básicas las primeras etapas de las investigaciones ingeniero-geológicas. Para estas etapas hasta el nivel de la Prefactibilidad presentamos una sistemática de trabajo.

#### **NIVEL DE INVENTARIO O RECONOCIMIENTO PRELIMINAR (Subetapa de la Tarea de Proyección Anterior)**

Premisa: El nivel de información geotécnica debe tener un grado de detalle suficiente para permitir a la Ingeniería del Proyecto establecer las comparaciones entre distintas variantes de aprovechamientos posibles dentro de una cuenca y seleccionar aquellos cuya economía justifique un nivel de investigación más avanzado.

Trabajos previos de gabinete:

Recopilación de antecedentes.

- Información geológica disponible
- Datos hidrológicos
- Cartografía disponible
- Imágenes satelitarias, fotografías aéreas y mosaicos

Análisis de los antecedentes disponibles para delimitar zonas de interés y posibles lugares de aprovechamiento.

- ❖ Análisis fotogeológico, confección de un mapa fotogeológico preliminar a escala 1 : 50 000 como mínimo
- ❖ Ubicación de posibles localizaciones de obras respetando criterios geomorfológicos.
- ❖ Ubicación de posibles áreas de préstamos de materiales de construcción
- ❖ Estudio cualitativo de los posibles vasos de embalse, zonas de los riesgos, zonas de inestabilidad, zonas tectónicas, cárnicas y de fugas de agua

topográficas

- ❖ En el caso de aprovechamientos integrados en cascada, se necesita el perfil longitudinal del río y sus afluentes, obtenido de las cartas topográficas y de los fotos aéreos

Reconocimiento de campo:

- ❖ Control de la fotointerpretación hecha en gabinete.
- ❖ Reconocimiento geológico expeditivo de los lugares de obras preseleccionados y ejecución de esquemas geológicos (en escala adecuada y disponible)
- ❖ Reconocimiento geológico de los lugares problemáticos en los vasos preseleccionados
- ❖ Control barométrico del perfil del río y diferencias absolutas entre distintas zonas de aprovechamiento (cotas relativas).

Trabajo de gabinete :

- ❖ Reinterpretación de los fotos aéreos y confección de un mapa fotogeológico o ingeniero-geológico a escala 1 : 50 000 como mínimo.
- ❖ Selección de los posibles aprovechamientos a base de las observaciones de campo. Esbozo del posible esquema de aprovechamientos.
- ❖ Informe preliminar

Trabajo de campo:

- ❖ Perfiles geológicos preliminares a escala 1 : 5 000 como mínimo (dependiendo de las dimensiones del cierre u obra) .
- ❖ Recolección de muestras de agua, roca y otros materiales en los distintos lugares de aprovechamiento y de yacimientos, para determinación de parámetros físico-mecánicos básicos orientativos (clasificación según normas establecidas) y descripciones petrográficas y sedimentológicas

Informe final:

- ❖ Introducción
- ❖ Metodología del trabajo
- ❖ Hidrología
- ❖ Geología Regional
- ❖ Descripción ingeniero-geológica y geotécnica de los perfiles de presa tentativos
- ❖ Descripción ingeniero-geológica de los vasos elegidos, definiendo problemas básicos, como posibles fugas de agua, zonas de inestabilidad etc.
- ❖ Descripción geotécnica de los posibles préstamos de los materiales de construcción y de canteras.
- ❖ Fichero de incógnitas que servirán como base para la programación de las futuras tareas

Planos:

- ❖ Cuenca - área del interés
- ❖ Esquema de microlocalización en general
- ❖ Ubicación de cierres tentativos con esquema geológico
- ❖ Perfiles ingeniero-geológicos de cierres tentativos
- ❖ Perfiles y trazas de obras de conducción
- ❖ Bosquejo de posibles yacimientos de materiales de construcción

#### NIVEL DE ANTEPROYECTO SOMERO O PREFÁCTIBILIDAD (Etapas de Tarea de Proyección - prefeasibility or preliminary study).

Premisa : Los estudios se realizan para que la ingeniería de proyecto pueda confrontar diferentes variantes de un aprovechamiento. Los lineamientos del programa de investigación que se detallarán han sido desarrollados fundamentalmente para presas que se emplazarán en valles de montañas, donde es necesario determinar las características del macizo rocoso y de rellenos de valles existentes.

Objetivo de los trabajos es asegurar al proyecto datos suficientes para valorar los costos relativos entre variantes elegidas y estimar las inversiones futuras seleccionando finalmente la variante más conveniente.

Documentación previa necesaria :

Tarea Técnica:

La Tarea Técnica es el documento de solicitud de las investigaciones, realizado por el proyectista principal de la obra hidrotécnica a base de trabajos y estudios anteriores. El contenido de la Tarea Técnica depende, entre otros factores, de tamaño y tipo de la obra proyectada, de su categoría y de la complejidad de las condiciones geológicas. La Tarea Técnica debe orientar al ingeniero-geólogo en la problemática que hay que resolver para fundamentar el proyecto y su contenido ( en detalle ver capítulo V ).

Programa de las Investigaciones :

El programa de las Investigaciones ingeniero-geológicas es la base sobre la cual descansa todo el trabajo de investigación, permitiendo establecer el cronograma de ejecución y el costo de los trabajos.

Los parámetros principales que influyen en el contenido del programa son: altura máxima de la presa, longitud de la cortina, longitud de la derivación del agua, tamaño y tipo de la presa y de la hidrocentral y el grado de los conocimientos anteriores. El contenido del programa para la investigación del embalse depende básicamente de los siguientes factores: volumen y área del embalse, presencia de obras de gran importancia bajo la influencia del embalse que hay que proteger, traslado de vías lineales, fenómenos físico-geológicos negativos etc. El volumen de trabajos depende también del grado de conocimiento de la estructura geológica actual, número de afloramientos naturales, de tipo de morfología del lugar, de las posibilidades del acceso al lugar etc.

Al terminar el programa de las investigaciones, tenemos toda la documentación previa necesaria para la realización de los trabajos investigativos (en detalle ver cap.V).

Realización de los trabajos investigativos:

Estudios de fundación:

Área de estudios.

- ❖ Cierre principal tentativo por variantes
- ❖ Cierres laterales
- ❖ Aliviadero, toma de agua, otros objetos de obra
- ❖ Vaso

Notas:

La investigación cubrirá en general el área de fundación de la presa, extendiéndose por sobre la cota de coronamiento dos veces la altura H de la presa hacia ambas laderas y cuatro veces H hacia agua arriba y agua abajo del pie del paramento húmedo y seco, salvo que en las adyacencias exista una estructura geológica que justifique la ampliación del área a estudiar. Distancias entre los perfiles y entre las calas y sus profundidades se definen en forma orientativa en el capítulo VIII.

El levantamiento ingeniero-geológico debe abarcar un área mayor que el NAM elegido por todo el embalse, pero no sobrepasarlo en 1 - 1,5 km en general. Solo si hay que resolver algunos problemas específicos, como definir las zonas inestables, posibles fugas del agua, carso etc., hay que realizar el levantamiento hasta un punto exterior que nos dé la posibilidad de resolver el problema en cuestión.

Metodología de estudios :

- ❖ Relevamiento geológico de superficie en cada variante.
- ❖ Estudio estructural-tectónico del lugar, litología.
- ❖ Delimitación contacto, cobertura, roca.
- ❖ Estudios geofísicos detallados
- ❖ Perforaciones :En aluvión: determinación de espesor y características, método percusión. En roca : diámetro NX o NQ. (entre 80-120 mm) método rotación con sacatestigo doble.

La ubicación, número o cantidad y profundidades de las calas orientativas ver capítulo VIII. Se recomienda como mínimo 3 calas con cotas y coordenadas correspondientes.

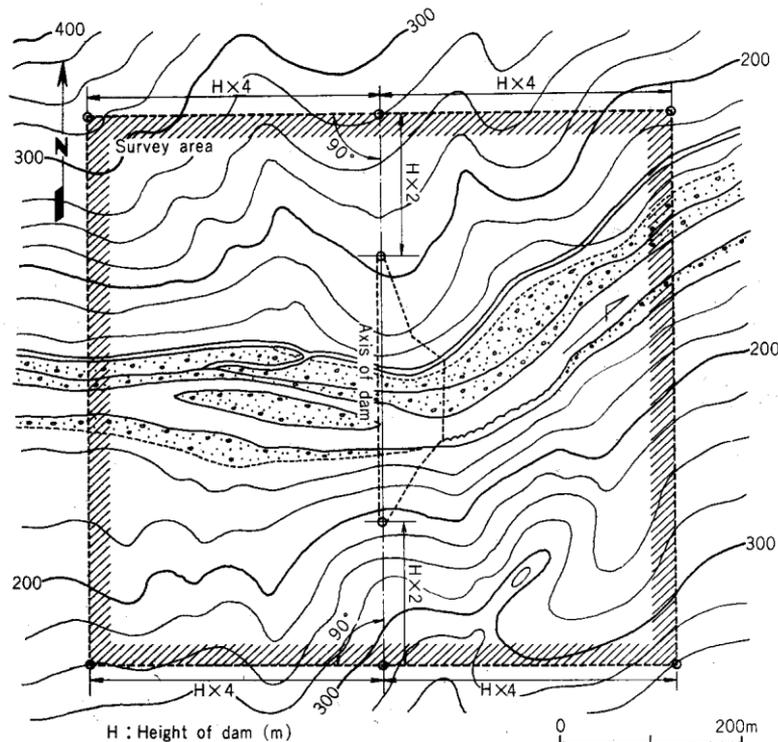


Fig.1 : Un ejemplo del área elejida de las investigaciones para el Estudio Preliminar.

Ensayos y determinaciones:

- ❖ Permeabilidad (aluvión): ensayo tipo Nesterov.
- ❖ Penetración normal SPT
- ❖ Recuperación de testigos normal y modificada - RQD
- ❖ Absorción de agua (roca) : ensayos tipo Lugeon, vertimientos
- ❖ Nivel acuífero, análisis químico del agua
- ❖ Ensayos especiales dentro de la cala, pruebas presiométricas, carotaje de las calas, TV o periscopio etc.
- ❖ Planilla tipo de perforaciones
- ❖ Conservación y almacenamiento de muestras de acuerdo con normas establecidas

Ensayos de laboratorios :

En aluvión y material de cobertura.

- ❖ Análisis granulométrico
- ❖ Peso específico de los sólidos
- ❖ Densidad aparente húmeda y seca (directa e indirecta)
- ❖ Peso específico aparente húmedo y seco en cohesivos
- ❖ Límites de Atterberg
- ❖ Hinchamiento Libre y Controlado
- ❖ Permeabilidad
- ❖ Remojo

- ❖ Cortante, Triaxial, Axial
- ❖ Consolidación
- ❖ Clasificación unificada

En rocas.

- ❖ Resistencia a la compresión simple
- ❖ Tensión de rotura y deformabilidad
- ❖ Resistencia a la tracción
- ❖ Índice de carga puntual (Index point load)
- ❖ Peso específico y absorción de agua
- ❖ Humedad natural
- ❖ Porosidad
- ❖ Coeficiente de ablandamiento
- ❖ Módulo de deformación
- ❖ Velocidad de ondas elásticas (ultrasonido)
- ❖ Determinaciones petrográficas

Labores (calicatas, trincheras, en casos específicos galerías)

- ❖ Documentación completa ingeniero-geológica y geotécnica de los labores de exploración (ver capítulo X)
- ❖ Ensayos "in situ" dentro de labores

Pruebas del campo según las necesidades del proyecto

- ❖ Estudio de la deformabilidad de la roca
- ❖ Ensayos de cortante
- ❖ Medición de tensiones naturales

El vaso :

Estudiar detalladamente zonas de inestabilidad, realizar pronóstico de los procesos de abrasión de las orillas, estudiar posibles fugas de agua por laderas, estudiar posibles procesos de sedimentación de los materiales en el vaso y evaluar la influencia del vaso a los procesos ecológicos.

Materiales de construcción y yacimientos

Premisa :

Los estudios tienden a obtener un mapa general de suelos de la zona (suelos finos y granulares) de los materiales útiles más cercanos a la futura obra, como asimismo un mapa de afloramientos rocosos que puedan servir como canteras para su utilización como material para escollera y eventualmente como áridos para hormigón.

Obtener datos suficientemente aproximados que sirvan de base para una investigación de mayor detalle en la etapa subsiguiente, luego de efectuar una evaluación de costos entre las distintas variantes.

Es necesario disponer de los planos de yacimientos y canteras (su localización y distancia al eje de la presa) como asimismo la individualización de los perfiles y ubicación con cota

relativa de los sondeos y pozos a cielo abierto. En principio, se deberá cubicar el doble del volumen para cada uno de los materiales.

Trabajos del campo:

Suelos granulares.

Ejecución de sondeos y/o pozos a cielo abierto para confeccionar perfiles paralelos de exploración del yacimiento. Se extraerán muestras de los suelos en forma continua durante el avance de la excavación o sondeo para realizar el perfil del pozo o sondeo y del yacimiento tentativo. Densificación somera de la exploración para poder cubicar el yacimiento de acuerdo con lo estipulado en la premisa. Determinación mediante una serie de ensayos de la densidad natural y humedad natural del yacimiento.

Remisión al laboratorio de todas las muestras extraídas a condicionadas e individualizadas para ser sometidas a ensayos de identificación e individualizadas para ser sometidas a ensayos de identificación y rutinarios. Determinación del nivel acuífero.

Suelos finos.

Ejecución de perfiles paralelos de exploración mediante sondeos y pozos a cielo abierto, extrayendo muestras en forma continua, durante el avance de la excavación o sondeo, para realizar el perfil del pozo o sondeo y del yacimiento tentativo. Determinación mediante una serie de ensayos de la densidad y humedad natural del yacimiento. Remisión al laboratorio de todas las muestras extraídas, acondicionadas e individualizadas para ser sometidas a los ensayos de identificación y rutinarios. Se deberá utilizar para la extracción de las muestras indisturbadas la técnicas o normas establecidas y de uso internacional. Determinación del nivel acuífero.

Canteras.

Relevamiento geológico de superficie, delimitación de destapes, contactos y diaclasamiento. Determinación petrográfica, grado de alteración y espesor de la misma. Cubicación.

Ensayos en laboratorio :

Suelos granulares :

La granulometría gruesa y fina

Densidad máxima y mínima

Densidad aparente húmeda y seca

Peso específico de los sólidos

Ensayo de abrasión o desgaste Los Ángeles

Peso específico y absorción de los materiales para hormigón

Peso específico de los materiales para espaldones

Resistencia al intemperismo o durabilidad

Humedad natural

Permeabilidad  
Porcentaje de materia orgánica  
Sales solubles totales y PH  
Cloruros, sulfuros, carbonates  
Ángulo de reposo

Suelos finos :

Granulometría por vía húmeda  
Límites de Atterberg  
Humedad natural  
Peso específico aparente, húmedo y seco  
Peso específico de los sólidos  
Densidad máxima y humedad óptima (proctor standart)  
Permeabilidad con carga constante y variable  
Porcentaje de materia orgánica  
Sales solubles totales y PH  
Determinación de cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio y potasio  
Hinchamiento libre y controlado  
Cortante  
Triaxial  
Químicos  
Ensayos mineralógicos  
Paleontológicos  
Ensayos de consolidación

Canteras :

Estudio petrográfico  
Peso específico y absorción de agua  
Abrasión  
Intemperismo  
Humedad natural  
Resistencia a la compresión axial seca y saturada  
Porosidad  
Coeficiente de ablandamiento  
Aguas:

Análisis químico de las aguas para determinar su agresividad al hormigón y a otros materiales.

Estudio del grado de contaminación del agua.

El grado de radioactividad del agua.

Trabajos de Gabinete :

El mismo tiene el objetivo de analizar los trabajos realizados, confeccionándose la memoria descriptiva, la cual se divide en dos aspectos: el texto y los anexos gráficos.

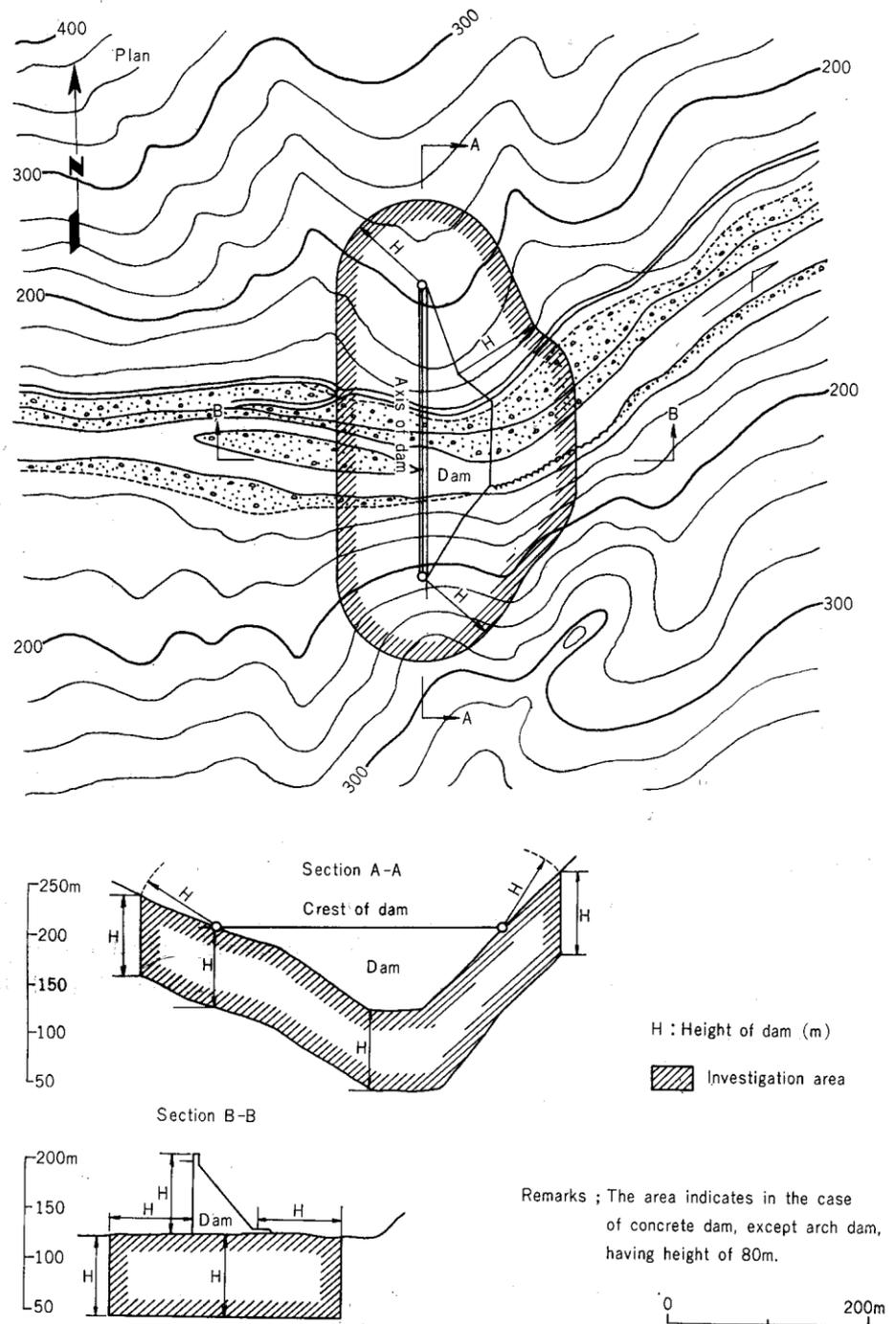


Fig.2 : Ejemplo del área de las investigaciones para el estudio detallado de la Obra Hidrotécnica.

Texto:

Introducción.

## Capítulo 1 – Volúmenes de trabajo

- 1.1 Cumplimiento del Programa de Investigaciones. Metodología empleada e incidencias
- 1.2 Volúmenes de trabajo de campo y laboratorio

## Capítulo 2 – Condiciones geológicas generales

- 2.1 Características geográficas y económicas de la región
- 2.2 Constitución geológica
- 2.3 Hidrogeología
- 2.4 Geomorfología y fenómenos físico-geológicos

## Capítulo 3 - Condiciones ingeniero geológicas del Conjunto Hidráulico

- 3.1 Condiciones ingeniero-geológicas de todos los cierres estudiados y su comparación .
- 3.2 Condiciones ingeniero-geológicas para las obras principales y sus variantes
  - 3.2.1 Aliviadero
  - 3.2.2 Toma de Agua
  - 3.2.3 Otros objetos de obra
- 3.3 Condiciones ingeniero-geológicas del embalse
- 3.4 Hidrogeología
- 3.5 Conclusiones y recomendaciones

## Capítulo 4 – Materiales de construcción

- 4.1 Volúmenes de trabajo de campo y laboratorio
- 4.2 Características de los materiales de construcción  
Para cada préstamo ex necesario exponer lo siguiente:  
Ubicación geográfica , características geográficas, geológicas e hidrogeológicas, propiedades físico-mecánicas y cálculo de reserva de los materiales.
- 4.3 Conclusiones y recomendaciones.
- 4.4 Planeamiento de la futura investigación para la etapa de anteproyecto avanzado

## ANEXOS:

Todos los capítulos de la memoria descriptiva se ilustran con mapas, gráficos, fotos y tablas. Los anexos imprescindibles y necesarios son los siguientes:

- ❖ Copia de la tarea técnica de proyectos.
- ❖ Mapa con la microrregionalización de la obra, Esc. 1 : 50 000
- ❖ Mapa geológico de la región, Esc. 1 : 50.000
- ❖ Mapa ingeniero-geológico en las zonas de los cierres, Esc. -1 : 10 000
- ❖ Mapa hidrogeológico, Esc. 1 : 10 000
- ❖ Mapa de regionalización ingeniero—geológica, Esc. 1 : 10 000

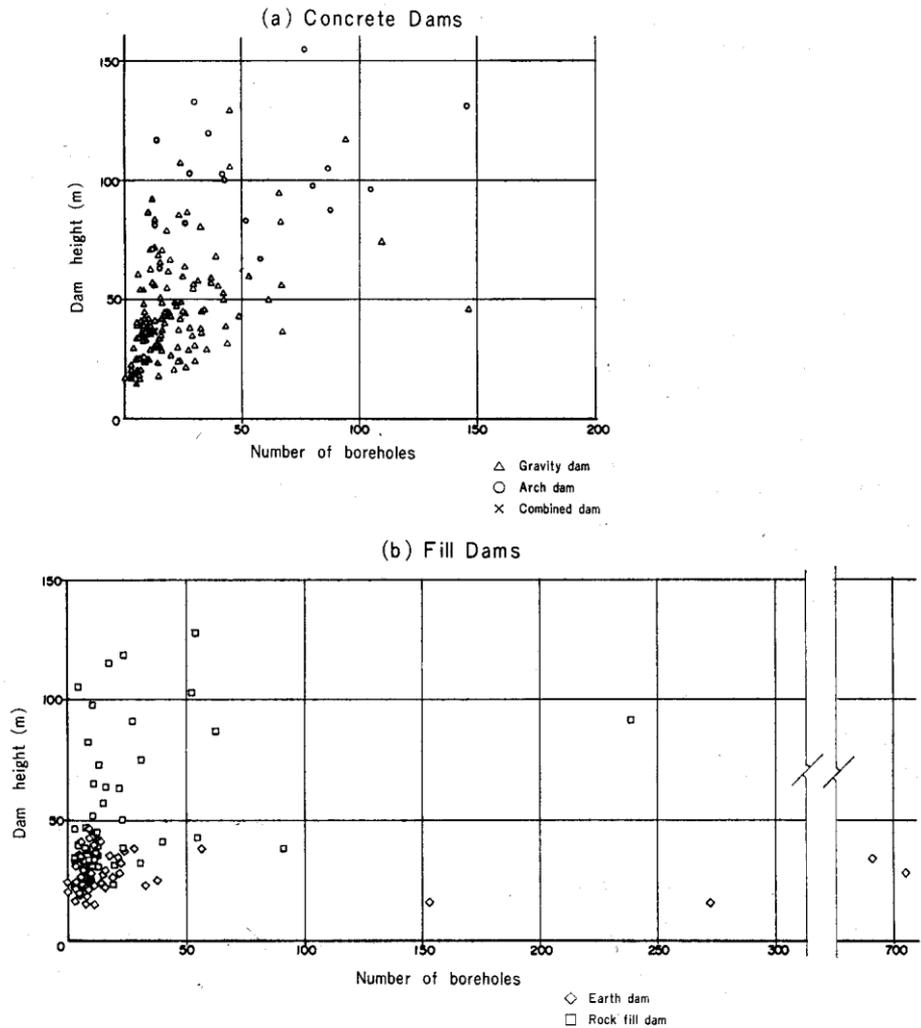
- ❖ Perfiles ingeniero-geológicos de los cierres, Esc.H. 1 : 500, Esc. V. 1 : 200
- ❖ Perfiles ingeniero-geológicos de los distintos objetos de obras, Esc. H. 1 : 500 y Esc. V. 1 : 200
- ❖ Perfiles geológicos por el embalse, Esc. H. 1 : 500 y Es. V. 1 : 200
- ❖ Columnas litológicas de las perforaciones y excavaciones realizadas
- ❖ Tabla o gráfico de las observaciones sistemáticas
- ❖ Tabla de la agresividad de las aguas
- ❖ Tabla con la composición química de las aguas subterráneas
- ❖ Tabla con los resultados de los ensayos de filtración,
- ❖ Coordenadas y cotas de las perforaciones y excavaciones realizada.
- ❖ Determinaciones petrográficas y paleontológicas
- ❖ Tabla con las propiedades físico-mecánicas de los suelos y rocas, con sus valores promedios obtenidos por el cálculo estadístico
- ❖ Rango granulométrico con curva promedio de cada estrato de suelo
- ❖ Tabla resúmenes de ensayos

### Materiales de Construcción

- ❖ Mapa de la ubicación de los materiales de construcción y cálculo de reservas Esc. 1 : 2 000
- ❖ Perfiles geológicos de los materiales de construcción, Esc. H. 1: 1000 y Esc. V. 1 : 500
- ❖ Columnas litológicas de todas las perforaciones y excavaciones realizadas.
- ❖ Tabla con las propiedades físico-mecánicas promedios obtenidas por el cálculo estadístico y
- ❖ cálculo de reservas de los materiales de construcción
- ❖ Rango granulométrico con curva promedio de cada material de préstamo
- ❖ Rango del Proctor Standard con curva promedio de cada material de préstamo.
- ❖ Tabla resúmenes de ensayos.

Lugar elegido para construir una presa tiene sus dificultades propias y cada proyecto sus necesidades particulares. Por esta razón el listado de tareas presentado se encuentra lejos de esquematizar la misión del ingeniero-geólogo y obliga a éste a recurrir a sus conocimientos y experiencia , a fin de que los resultados que se vayan obteniendo permitan encauzar las investigaciones en aquellos casos críticos que se hacen a la seguridad y economía del proyecto.

Normalización presentada comenta solamente las primeras etapas de las investigaciones ingeniero-geológicas, ya que programa de investigaciones para la etapa de Proyecto Técnico depende de metodología y grado de proyección y del modo de construcción misma. En esencial hay que resolver las mismas tareas como para la Tarea Técnica, pero con mucho más detalle.



These examples are cited by Japanese dams having more than 15m height, completed in 1965-1975.

Fig.3 Ejemplo de la cantidad de las perforaciones utilizadas durante de las investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Presas de distinto tipo de la estructura.

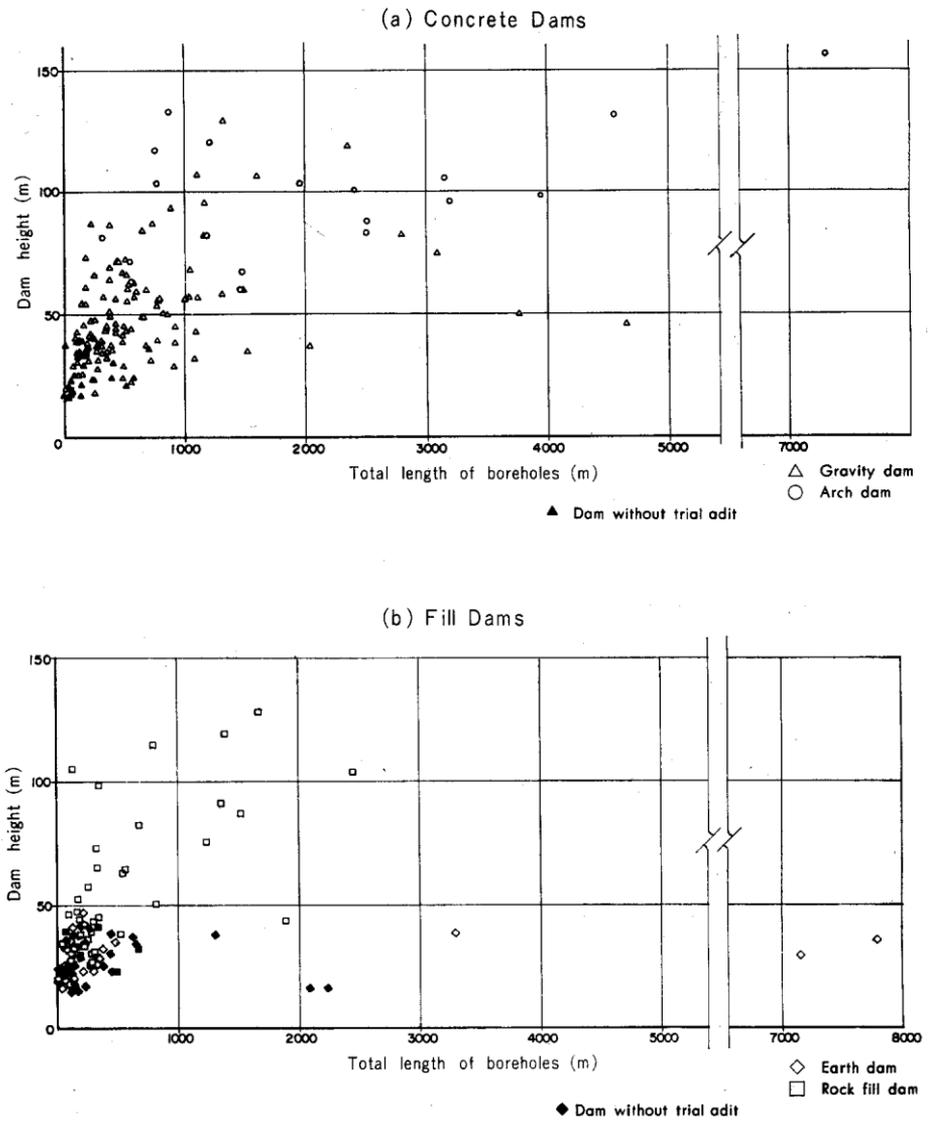


Fig.4: La longitud total de las perforaciones ( eventualmente la combinación con las calicatas) utilizada durante de las investigaciones para distintos tipos del Dique.

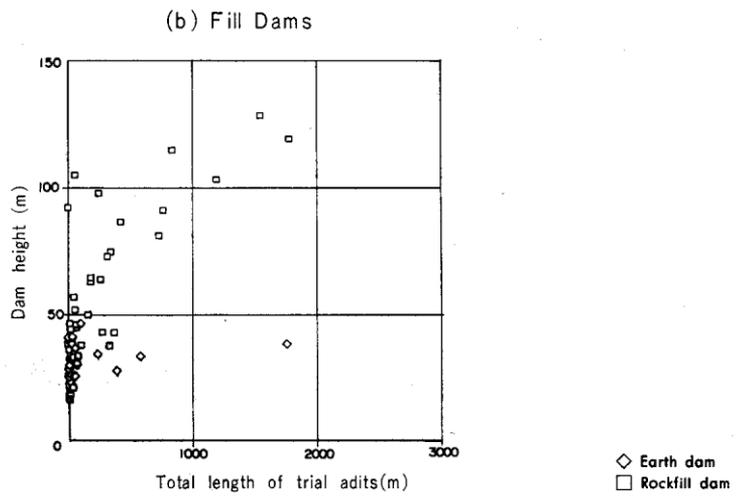
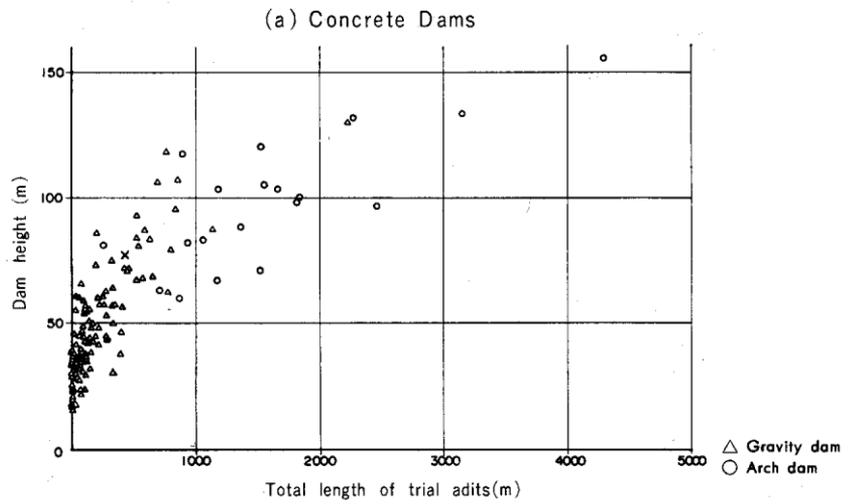


Fig.5: La longitud total de las calicatas utilizadas durante de las investigaciones para distintos tipos del Dique.

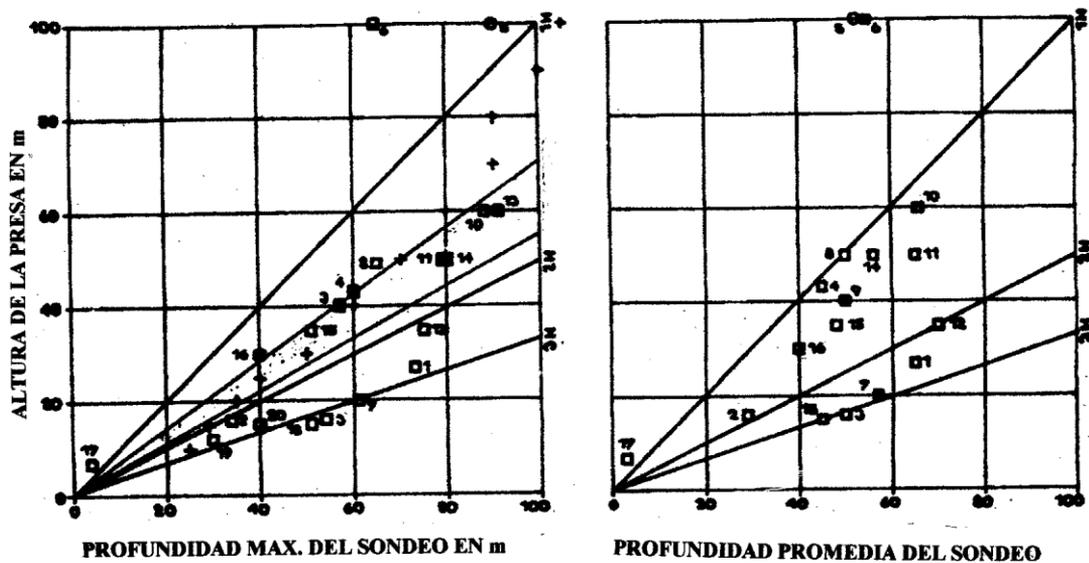


Fig.6: El gráfico de la dependencia entre la altitud de la presa de distinto tipo y de la profundidad de la perforación. (según Horsky, 1990).

□ - presa de materiales sueltos – enrocamiento; o - presa de hormigon

Altura de la Presa	República Checa	Cuba	Rusia	Japonia Argentina	Observacion
0 - 20	2H - 3H	1,4 H - 1,8 H	1,8 H - 2,7 H	> 15 m	Max. 3 H
20 - 30	1,4 H - 2,8 H	1,4 H - 1,8 H	1,6 h - 1,8 H	1,0 H - 1,5 H	
30 - 60	1,3 H - 1,8 H	1,4 H - 1,8 H	1,3 H - 1,7 H	Para presas de horm.	
60 y más	0,8 H - 1,4 H	1,0 H - 1,4 H	1,0 H - 1,4 H	0,5 H - 1,0 H P. de enrocamiento	

Fig.7: Las profundidades maximas de los sondeos recomendadas para las distintas alturas de las presas.

H = la altura de la presa en metros.

## ANEXO III

### Empleo de métodos geofísicos para el estudio del lugar de presa en las etapas preliminares

Pavel Bláha, Otto Horský, Martin Vlastník

La exigencia fundamental que se requiere de una investigación ingenierogeológica relativa a los sitios de las presas lo es, en las primeras etapas de trabajos de investigación, la efectividad de las investigaciones efectuadas en la calidad requerida. Los errores, cometidos en las primeras fases de la investigación, suelen reincidir en las etapas posteriores, cuando la eliminación de ellos ya llega a ser enormemente penosa y difícil en cuanto al tiempo, profesionalidad y finanzas. La geofísica, como una disciplina científica, es capaz de aportar en esta importante fase de investigaciones una gran cantidad de informaciones a precios aceptables.

Tareas relativas a las mediciones geofísicas a realizar en las primeras etapas de la investigación

La investigación geofísica orientativa de los sitios de presas tiene por tarea brindar información relativa a las siguientes esferas:

- a) Investigación del sitio de la presa
- b) Investigación de la zona de embalse
- c) Investigación de yacimientos y préstamos de los materiales de construcción
- d) Investigación efectuada en el sitio de los futuros objetos

Queda entendido que incluso en las primeras etapas de investigación no siempre se da solución a toda índole de cuestiones. Muy frecuentemente ocurre que mucha importancia se dedica meramente a la solución del primero de los problemas, o sea a los estudios del sitio de la futura presa.

Dentro del marco de la investigación del sitio de presa se identifican y determinan particularmente los fundamentales tipos litológicos y su localización en la zona objeto de investigaciones. Otro ámbito de problemas lo representa la delimitación de las zonas del macizo rocoso debilitado incl. la identificación de trastornos tectónicos de las rocas. En el no último lugar procede - incluso en esta etapa - hacer estimaciones de las fundamentales propiedades físicas y mecánicas de las rocas, necesarias para diseñar la obra hidráulica en cuestión. No podemos omitir el grado de permeabilidad del macizo rocoso y las cuestiones - con ello vinculadas - de estimación de la profundidad de la cortina de inyección.

En la zona de embalse hay que estudiar tanto el grado de alteraciones y trastornos producidos en los taludes como las zonas impermeables que pudieran dar origen a las pérdidas de agua del vaso por infiltración. Representa la primera esfera de interés la investigación de las existentes deformaciones de talud y la localización de lugares de la posible aparición de las deformaciones de talud nuevas. Es necesario determinar los lugares de gran posibilidad de hallarse en ellos las superficiales formaciones de cobertura potentes, los lugares con los trastornos tectónicos acusados del macizo rocoso. Representa la segunda

esfera de interés la localización de lugares con capas extremadamente permeables, indicadas litológica o tectónicamente. Esta esfera además abarca las obras de investigación del eventual dique lateral y de protección en el embalse del futuro vaso.

Cada presa nueva requiere aseguramiento de las suficientes cantidades de materiales de construcción. En dependencia del tipo proyectado del dique a construir difieren también los requisitos relacionados con aseguramiento de los materiales de construcción. En todo caso siempre se trata de la necesidad de buscar yacimientos y préstamos que ofrezcan los materiales convenientes y asimismo siempre es necesario determinar la índole y grado de hallarse alterado el material rocoso en los sitios de las futuras canteras, y también siempre es necesario fijar el grado de explotabilidad del material de construcción. Asimismo es preciso averiguar datos relativos al agua subterránea en los sitios de los futuros préstamos.

En caso de considerarse por preciso disponer ya dentro de la fase de investigación orientativa de las especificaciones y antecedentes vinculados con los objetos funcionales, es necesario buscar y encontrar respuestas a las preguntas concernientes a las reales posibilidades de cimentar en el lugar en cuestión los objetos requeridos. En tal caso se cumplirá con las tareas similares a las relativas a la investigación del sitio propio de la presa.

### Selección de los métodos geofísicos

Para dar solución a los problemas planteados se emplea una gama considerablemente amplia de los métodos geofísicos, tanto en lo que se refiere a los métodos de sondeo como a los de calicateo, cuya combinación y estructura concreta depende del carácter del lugar de presa a investigar e influyendo sobre la selección de las técnicas más apropiadas tanto las opiniones expresadas por el proyectista como la composición litológica de la zona investigada, las propiedades físicas de las rocas y la índole de alteraciones del macizo rocoso. No obstante, aun así es posible establecer algunas leyes naturales de vigor general para poder elegir un apropiado empleo de los individuales métodos. De las técnicas de sondeo se emplea la sísmica de refracción superficial (SRS) y el sondeo eléctrico vertical (SEV). Para desarrollar las tareas especiales es posible emplear el sondeo de frecuencia (SF), el método radárico o el de polarización inducida. De las técnicas de calicateo se emplean en primer lugar los métodos de calicateo geoelectrico, sobre todo el calicateo simétrico de resistencia y el calicateo electromagnético, a utilizar particularmente en la modificación de las ondas muy largas o, en su caso, en la modificación de la conductometría electromagnética. Se subentiende que se aprovechan asimismo otras variantes de los métodos geoelectricos de calicateo, muy a veces complementados por calicateos magnetométricos, especialmente en cuanto a las mediciones del vector total de imanación del campo magnético de la Tierra. En los casos específicos se usan métodos de calicateo por polarización inducida o, en su caso, las técnicas de calicateo térmico o radiotérmico.

Antecedentes y materiales de partida para interpretaciones de las mediciones geofísicas:

De materiales de partida para interpretar las mediciones geofísicas sirve toda índole de antecedentes existentes y adquiribles, es decir, todos los disponibles materiales de archivo, tanto los llevados por la empresa como los que proceden de las databases geológicas a nivel nacional. Eso son los mapas geológicos de todo tipo de notas y registros de archivo relacionados con las sondas y con otras obras de investigación directa realizadas en la amplia zona de interés. Asimismo se trata de toda índole de datos vinculados con las mediciones geofísicas anteriores y de todo tipo de mapas realizados en cualesquiera escala y en cualesquiera época en los alrededores del área en cuestión. No podemos omitir los estudios de

las fotos tomadas por satélite y de los resultados de los demás métodos de telefotografía (en caso de disponer de tales materiales).

En el no último lugar hay que mencionar los datos que el ingeniero geofísico de experiencia puede ganar directamente en la zona en cuestión, ya se trate del estudio de los mapas geodésicos existentes, ya de la inspección geológica del terreno. Desempeñan un rol imprescindible también los aparatos de navegación por vía satélite que facilitan las operaciones de localizar los afloramientos y las características morfológicas y, además, favorecen la orientación en el terreno de la zona. Las inspecciones y visitas a través del terreno en cuestión no podemos considerarlas como mapeo geológico, no obstante, sí nos ofrecen una tal idea fundamental sobre la situación geológica y la configuración geomorfológica de la zona. Naturalmente, dentro del marco de tales inspecciones también se identifican varias propiedades físicas en los afloramientos de las rocas, adquiriéndose así cierta idea acerca de comportamiento de las rocas y sus propiedades. Luego se tomarán en consideración los resultados de estas investigaciones para que se puedan seleccionar los métodos y procedimientos más apropiados con respecto a la investigación geofísica. Según la misma regla se procede en relación con la testificación de las sondas nuevas o, al menos, en cuanto a las mediciones a efectuar en los testigos de las nuevas sondas.

En la tabla siguiente vienen indicados resultados de las paramétricas mediciones ultrasónicas efectuadas en los testigos de perforación situados en la zona de los diseñados perfiles en España, emplazados en el curso central del río Genal en Andalucía.

Tabla 1: Velocidades de ondas longitudinales

cala	prof. [m]	tipo litológico						observaciones
		filitas		esquistos		esquistos quarcíticos		
		según el eje del sondeo	según la foliación	según el eje del sondeo	según la foliación	según el eje del sondeo	según la foliación	
C1	52			3.95	4.72			a través de grieta 2.27
C1	68					4.27	6.34	a través de grieta 3.84
C2	15			3.00	3.09			
C2	21	4.77	5.46					
C2	33			2.72	2.38*			fuerte alterado
C3	73			5.40	4.95			a través de grieta 4.27
C3	75			5.18	5.53			
C3	85			4.37	5.88			
C4	48					4.94	5.09	
C4	59					5.20	5.13	
C6	82	1.42	5.00					a través de grieta 1.31
C6	99	1.57	5.16					
promedio - C2/33		2.59	5.21	4.10 4.83	4.42 4.83	4.80	5.19	a través de grieta 2.92
coeficiente de anisotropía			2.01		1.08		1.11	
promedio total				3.90	4.81			
anisotropía total					1.25			
observaciones		velocidades en la tabla en v km/s						
		* en la muestra mayor cantidad del grafito						

Del cuadro sinóptico se evidencia claramente que sobre la velocidad, de la más marcada manera influye la alteración de la roca y la eventual presencia de hendiduras y grietas. Por pasar la onda longitudinal a través de la grieta va decreciendo la velocidad hacia el valor equivalente al 65%, aproximadamente. Otro factor modificador significativo se debe al sentido de mediciones con respecto a la foliación. El coeficiente de anisotropía llega hasta el valor de 2.0 y en realidad es de suponer un valor más alto aún, dado que las mediciones ya efectuadas no comprenden ni perciben el elipsoide completo de la anisotropía, abarcando solamente los dos sentidos determinados por el eje de sonda respecto la foliación. De los resultados obtenidos de las paramétricas mediciones ultrasónicas es posible deducir que de los resultados de mediciones de la sísmica de refracción superficial podemos inferir que se trata de las rocas alteradas y parcialmente intemperizadas. En cuanto a la composición litológica, no es prácticamente posible exteriorizar algún juzgado fundado.

Como se ha dicho arriba, los materiales valiosos y necesarios para interpretaciones de mediciones geofísicas podemos obtenerlos solamente mediante profundos estudios de los mapas geodésicos y de la geomorfología de la zona en cuestión. Una muestra de tales actividades se ofrece en las figuras 1 y 2, relacionadas con la arriba citada localidad en el río Genal en Andalucía.

Para el análisis morfológico del área de interés se partió del mapa geográfico a escala de 1:50000. De datos de base para buscar las líneas tectónicas sirvió el análisis relativo a los sentidos de cursos de agua, y de otros antecedentes sirvieron los sentidos ocupados por las coordenadas de los taludes de montaña. La fig. 1 representa los resultados del análisis morfológico que demuestra los principales sentidos de las líneas tectónicas que es de suponer en la zona a investigar. Es lógico que en este caso concreto es necesario considerar por línea tectónica la zona del macizo rocoso debilitado. Dicha debilitación se puede deber a las alteraciones tectónicas, pero asimismo bien podría corresponder a las zonas de rocas de menor resistencia. Es interesante observar como algunas de las determinadas zonas debilitadas del macizo rocoso sí guardan y otras no guardan relación con las fallas en el mapa geológico a escala de 1:50000.

Acaso la más importante desviación del mapa geológico lo manifiesta el sentido E-O en la mitad del sur de la zona objeto de investigación. Sin embargo, queda bien claro del análisis morfológico, efectuado de los sitios de perfiles de la presa, que dicho sentido sin duda existe en los alrededores del pueblo Guacín. Además, este sentido es importante también porque, siempre entre dos tales líneas, el río Genal cambia de curso. Entre estas dos bandas pasa el río desde el Norte hacia el Sur. El curso general del río Genal es el sentido NE-SO o mejor dicho, NNE-SSO (ver las zonas al sur desde el punto P4 y hacia el norte del P3). Otros hechos que se deben a la líneas E-O, es el carácter del curso Genal. Hacia el norte de la línea E-O más importante (línea A), el río Genal hace fuertes meandros en su valle. Debajo de esta línea, el curso se ve considerablemente más recto. En la fig. 2 documentamos, además de este fenómeno, el sentido general que sigue el valle y el sentido real del curso del río Genal. Y afuera de eso, el río presenta una muy diferente pendiente de curso entre las líneas "A" y "B". Si hacia el norte de la línea A el río supera un desnivel de 10 m en el tramo de aproximadamente 300 – 600 m de su curso, entonces entre las dos mencionadas líneas necesita para similar desnivel unos 700-200 m. Parece ser que precisamente entre las líneas "A" y "B" se hallen las rocas más resistentes y que, además, esta zona relativamente subirá en comparación con las partes hacia el S y el N. Por consecuencia, el río Genal en la parte N del área tiene que hacer meandros aunque represente el curso superior. Este tipo de meandro es conocido también como meandro encajado o atrincherado, debido a su coherencia con la estructura tectónica de la zona en cuestión..

Partiendo de este análisis geomorfológico fue posible enunciar el supuesto de que en la zona de interés la situación geológica es muy complicada, particularmente en cuanto a la estructura tectónica. Las mediciones geofísicas plenamente y en todo su alcance comprobaron nuestra opinión. Resultó ser que las individuales líneas tectónicas guardan relación directa con las manifestaciones geofísicas del macizo rocoso.

## Resultados de las mediciones geofísicas

El ejemplo que presentamos de las mediciones geofísicas, destinadas para efectos de investigación ingenierogeológica a realizar con fines informativos, procede, al igual que los ejemplos anteriores, de la zona del río Genal, esta vez del lado izquierdo del perfil P6 (fig. 3). En este caso, el complejo de métodos geofísicos de sondeo abarca la sísmica de refracción superficial (SRS) y el sondeo eléctrico vertical (SEV). La SRS fue interpretada mediante método de penetración dinámica que permite identificar y determinar de cómo crece la velocidad y, asimismo, determinar los cambios que se producen debajo del piso de refracción. Por entre las técnicas elegimos el método de calicateo de resistencia con dos rangos de intervalo entre electrodos. En el sistema según Wenner se efectuó calicateo a la profundidad de 10 m y en el de Schlumberg, a la profundidad de 30 m aprox. El calicateo de resistencia fue complementado por el método de ondas muy largas y por la determinación de la magnitud del campo magnético de la Tierra. Estas técnicas de calicateo reales fueron, además, complementadas por el parámetro de cambio de velocidad de las ondas longitudinales en el piso de refracción. Este parámetro es determinable de la interpretación de la sísmica de refracción superficial.

Con raíces de la medición geofísica es posible encuadrar bajo seis conjuntos casihomogéneos el macizo rocoso en los alrededores de este perfil, representando el tipo A las gravas de valle y el tipo B las arcillas terrosas de cobertura o los escombros terrosos. El tipo C representa la parte superior de eluvión y el tipo D la parte inferior de eluvión de las formaciones rocosas. Prácticamente inalteradas son las formaciones rocosas de los tipos E y F. En este caso concreto se trata de esquistos (tipo E) y de filitas (tipo F).

Es posible caracterizar las transformaciones y cambios de las propiedades físicas de los tipos litológicos principales, como sigue:

Tipo litológico	Resistencia específica	Velocidad ond.long.
formaciones de cobertura (B)	800 – 2000 $\Omega\text{m}$	0.3 – 0.5 km/s
eluvión (C)	360 – 1400 $\Omega\text{m}$	0.7 – 1.4 km/s
capa de transición (D)	270 – 820 $\Omega\text{m}$	1.0 – 2.5 km/s
subsuelo rocoso (E + F)	320 – 1200 $\Omega\text{m}$	2.4 – 5.0 km/s

De este cuadro sinóptico se hace patente que las más bajas resistencias las presenta la capa de transición, lo que se debe a la red conductora formada por grietas enarcilladas, y a la humedad que va aumentando tal y al igual ir creciendo la profundidad del macizo rocoso. Si pasamos por alto la resistencia específica reducida en la falla  $\delta_4$ , podemos decir que, en cuanto a la resistencia, esta capa es la más estable. Las altas resistencias específicas indican la composición de la capa superficial, estructurada predominantemente por derrumbes secos detrítico-arcillosos. Tanto los valores de resistencias específicas de VES como el transcurso de las curvas de resistividad dan indicios de que no existe intercalación de arcillas puras a lo largo del perfil. Es posible caracterizar la capa de eluvión como un estrato de las mayores variaciones de resistividad. Todo eso demuestra la heterogeneidad de la composición

geológica de las capas. El mayor efecto sobre los valores de resistividad lo ejerce la cantidad de minerales arcillosos en la roca - y no tiene importancia si los minerales tienen su origen en el sitio mismo o si entraron en él arrastrados secundariamente por corrimientos del agua subterránea. También otro agente influye considerablemente sobre el valor de resistividad, es decir, la humedad de la roca que se presenta en diversos puntos respectivos del macizo rocoso. Esta capa es, pues, especificable como intercalación de rocas de diverso grado de intemperización parcial y con diversas medidas de intrusiones y mezclas de minerales arcillosos de diferentes grados de humedad. La resistividad de las formaciones rocosas (E + F) se manifiesta como considerablemente variable, sin embargo, es necesario tomar en consideración los dos tipos litológicos que las estructuran, en virtud de lo cual podemos hacer constar que las resistencias específicas de filitas varían en este perfil entre los valores de 320 y 380 ohmíómetros, y las resistividades de esquistos entre los valores de 720 y 1200 ohmíómetros. Desde este punto de vista ya no parece tan señalada la variabilidad de las rocas.

Las velocidades de ondas longitudinales - capa B, plenamente corresponden con el concepto que se tiene acerca de las velocidades de ondas longitudinales en arcillas y detrito, y lo mismo rige también para el caso de las velocidades de ondas elásticas en la capa de eluvi6n. Para las obras de construcci6n es de importancia esencial el hecho de que ser6 posible extraer con facilidad ambas estas capas mediante equipos mecanizados. Las velocidades de ondas longitudinales parecen bajas en la zona de transici6n (D), dado que ya desdicen de semirrocas, pero hay que tener en cuenta que estas velocidades fueron medidas a trav6s del m6todo de distancias cr6ticas (m6todo de punto de deflexi6n) para identificar la velocidad s6smica con respecto a la superficie del estrato en cuesti6n. En este caso concreto se trata de una profundidad de aproximadamente 10 m, donde el car6cter de la capa se aproxima a las propiedades de eluvi6n. La deceleraci6n se debe tambi6n al bajo grado de humedad que el macizo rocoso en estas profundidades presenta. Las formaciones rocosas ya guardan las velocidades correspondientes con estos materiales y sus moderaciones hasta las de 2,4 km/s se deben a los trastornos tect6nicos provocados en los lugares perturbados del macizo rocoso. En virtud del detallado monitoring de las velocidades tenemos que hacer constar que las elevadas velocidades fueron determinadas de las mediciones ejecutadas perpendicularmente con respecto al perfil objeto de estudios. En tal caso las ondas s6smicas pueden no superar la zona entera de las rocas alteradas, pero s6 pueden "acelerarse" en las intercalaciones de rocas relativamente inalteradas y directamente en la falla, o pueden "dar la vuelta" alrededor de la falla a trav6s del circundante macizo inalterado.

Mediante mediciones magnetom6tricas fue identificada una anomal6a positiva sobre la llanura aluvial de Genal. Es probable que esta anomal6a pudiera tener su origen en las gravas que en la llanura existen y que son ajenas con respecto al perfil objeto de investigaci6n porque fueron acarreadas por el r6o desde su curso superior. No fueron registradas otras anomal6as magn6ticas en los taludes de Genal en toda el 6rea de investigaci6n.

Es alto el grado de trastornos que acusa el macizo rocoso en el puesto del estudiado perfil de presa. El ejemplo que presentamos fue con intenci6n seleccionado precisamente de este perfil, porque queremos demostrar las posibilidades que ofrece el nuevo modo de c6mo interpretar las mediciones s6smicas. El m6todo de penetraci6n del rayo s6smico hace posible describir el campo de velocidades a considerables profundidades del macizo rocoso y bien caracteriza los cambios horizontales y verticales de las velocidades. En la fig. 3 se observa una muy destacada deceleraci6n en el trazado de distancia de 125 a 175 m. La moderaci6n se debe a la falla  $\delta 4$  con la cual empata, en la 6ntima proximidad, la falla  $\delta 6$ . Estas intercalaciones forman entre s6 el 6ngulo oblicuo, pues queda patente que sin duda se halla perturbado tambi6n el macizo rocoso entre estas fallas. Una significativa moderaci6n es

posible documentar también en el transcurso de la velocidad límite en el tramo de 120 a 145 metros, es decir en el sitio donde la falla  $\delta 4$  va aproximándose al principal piso de refracción. La falla  $\delta 5$  queda situada fuera de los sitios de mediciones sísmicas y su transcurso fue determinado a base de las mediciones geoelectricas. Según el carácter de las curvas de resistencia y según el carácter de las curvas de las ondas ultralargas podemos dar por supuesto que la significación de la falla vaya disminuyendo tal y al igual del grado de profundidad.

### Interpretación ingenierogeológica de las mediciones geofísicas

Para poder llevar al cabo una buena interpretación ingenierogeológica se requieren también los profundos y detallados análisis de propiedades físicas de las rocas. En la fig. 4 ofrecemos un ejemplo de los estudios de resistividades de las formaciones rocosas situadas en el espacio de presas en el río Genal. De la figura queda bien clara la presencia de dos y tres conjuntos estadísticos, respectivamente. El conjunto F corresponde a filitas, el conjunto E a esquistos. El conjunto con las más bajas resistencias específicas afecta a los perturbados horizontes del macizo rocoso. La interrelación de los dos conjuntos bien corresponde con los conceptos de los ingenieros geofísicos en cuanto a las resistividades de los individuales tipos litológicos. Buena coherencia fue determinada también mediante comparación de estos conjuntos estadísticos con los resultados de obras de perforación.

Por medir varios perfiles (tales como fue el P6L) es posible asumir lo esencial que el ingeniero geólogo necesita, es decir, concretamente el corte ingenierogeológico por el perfil de presa a investigar y el esquema de correlación de los trastornos tectónicos de los alrededores del sitio de presa. Un ejemplo de tales labores y del corte ingenierogeológico resultante se ofrece en la fig. 5 (sitio del perfil de presa GENAL P4). En el perfil fueron destacadas las rocas cuaternarias y las formaciones rocosas más antiguas (Cordilleras Béticas).

### Determinación pormenorizada de los tipos geotécnicos:

#### Cuaternario:

A: Gravas

B: Limos de taludes y parte superior de eluvi6n

C: Eluvi6n del talud, es posible caracterizar el estrato como predominancia de desgalgaderos, con intrusiones arcillosas en los puntos de resistencia específica reducida.

#### Precuaternario:

D: Parte inferior de eluvi6n del talud y del subsuelo rocoso parcialmente intemperizado. Geológicamente, estas rocas tienen su origen en esquistos y filitas. Las intercalaciones de minerales conductores, particularmente de arcillas, pueden aquí estructurar una interconectada red sobre las grietas. Esta red conductora da origen a las resistividades rebajadas.

E: Parte del macizo rocoso relativamente poco alterada y parcialmente intemperizada. Desde el punto de vista litológico se tratará de intercalaciones de esquistos, eventualmente de intercalaciones de filitas inalteradas y silicificadas. En los lugares que presentan

resistividades expresivamente elevadas puede tratarse de intercalaciones de esquistos cuarcíticos.

F: Parte del macizo rocoso relativamente poco alterada y parcialmente intemperizada. Desde el punto de vista litológico se tratará de intercalaciones de filitas, eventualmente de intercalaciones de esquistos grafiticos.

Como ya se ha relatado, para formar criterios acerca de las posibilidades de construir la presa, y asimismo para tomar el propósito del tipo de la presa y para adoptar otras decisiones de importancia, es indispensable conocer la estructura tectónica de los alrededores del sitio de la futura presa. En la fig. 6 se ve un ejemplo de estructura tectónica del sitio de presa Genal 4. Para la correlación de las individuales zonas de fallas sirvieron de especificaciones fundamentales los resultados de las mediciones efectuadas en los perfiles geofísicos P41 – P45. Se evidencia que, para levantar un mapa al respecto, no es necesario medir en el sistema de perfiles regulares ni tampoco en la red de perfiles, sino que basta con disponer de cierto número de perfiles orientados en general. En la actualidad, y con uso de nuestros métodos y equipos, no hay problemas en cuanto a la localización de estos perfiles, lo que es importante en primer lugar en las áreas donde la vegetación imposibilita movimientos o donde no se dispone de la red geodésica apropiada.

En nuestro caso hemos aplicado los resultados de mediciones sísmicas como base para analizar la correlación de las zonas perturbadas. Esta selección resultó procedente en vista del aparato que empleamos en vinculación con las técnicas de interpretación de las mediciones sísmicas (ver fig. 3). Las mediciones geoelectricas sirvieron de mediciones complementarias. En cuanto a la correlación de las individuales fallas, hemos tomado en consideración también las leyes geológicas de vigor general y toda índole de manifestación morfológica del terreno (ver lo relatado en la introducción del presente artículo).

Partiendo de las así interpretadas mediciones geofísicas y en virtud de las leyes geológicas generales es posible deducir otros parámetros, necesarios para diseñar la presa. En la siguiente tabla relatamos, a efecto informativo, los factores y hechos que se requieren para los cuatro perfiles de presa en el río Genal en las proximidades de Guacín en España del Sur. En función de criterios principales para evaluar desde el punto de vista ingenierogeológico y geotécnico la idoneidad del sitio de presa, seleccionamos:

- el número de fallas tectónicas, acusadas y menos acusadas, en el perfil de presa en cuestión,
- la litología,
- el grosor del cuaternario,
- la supuesta profundidad del macizo rocoso relativamente sano – la supuesta profundidad de la permeabilidad superante el criterio de Lugeon (1 l/min/m a la presión de 10 Atm),
- en la Nota se indican otros fenómenos que desventajan el sitio de presa

El resultado de la tabla representa la clasificación por orden de la idoneidad de los individuales sitios de presa.

Tabla 2: Características de los ejes de presas

per	mr	1	2	3	4	5	6	7	observaciones	8
P1	I	-	1	E	4	8	18	35		1.
	V	1	-	F		8	15	50		
	D	-	1	E+F		10	22 (hasta 30)	40		
P2	I	1	1	F+E	7	22	45	65	sospecha de la deformación creep en la margen izquierda	3.
	V	1	-	F		5	15	50		
	D	-	1	E+F		13	20 (hasta 30)	40		
P3	I	-	-	E+F	5	15	25	40	cruce de dos sistemas de fallas tectónicas en valle	2.
	V	1	-	E+F		8	10	60		
	D	2	-	E+F		15	25	40		
P4	I	1	2	E+F	8	10	20	35	cruce de dos sistemas de fallas tectónicas en valle	4.
	V	1	-	F		5	13	60		
	D	3	2	E+F		13	30 (hasta 60)	50 (hasta 80)		
<b>observaciones</b>										
per	eje de presa									
mr	margen									
1	fallas tectónicas destacadas									
2	fallas tectónicas de menor importancia									
3	litología (E...esquistos, F.,,filitas									
4	cantidad de fallas tectónicas en la cerrada									
5	potencia del cuaternario									
6	techo del macizo relativamente sano									
7	profundidad de la permeabilidad supuesta según criterio de Lugeon									
8	orden de la ventajocidad del eje según criterios elejidos									
I	margen izquierda									
V	valle									
D	margen derecha									

Los datos así resumidos demuestran que de manera inequívoca se impone como el más propio, desde el punto de vista ingenierogeológico y geotécnico, el perfil de presa P1, a cual conclusión conducen los siguientes hechos:

- sólo única falla tectónica de valle que tiene importancia (existe en todos perfiles)
- relaciones litológicas equivalentes desde el punto de vista geofísico en todos perfiles
- grosor mínimo del cuaternario
- grosor mínimo de intemperización parcial y de distensión del macizo rocoso, resultando de ello las favorables circunstancias para menor permeabilidad en comparación con otros perfiles de presa.

#### Investigación de la zona de embalse

Uno de los importantes problemas consustanciales a la posibilidad de construir una presa lo representa la estabilidad de taludes no sólo en el sitio del perfil de presa, sino asimismo en el vaso de embalse. Cómo graves son estos problemas lo testimonia la gran serie de accidentes, de los cuales el más conocido es la tragedia que se produjo en los años sesenta en Valliont (Italia). Es más importante aún el conocimiento de las estructuras de taludes en

caso de las presas que sirven de abastecimiento de agua para regar suelos en las regiones áridas donde se producen las fluctuaciones señaladamente altas del agua embalsada, lo que, conjunto con la velocidad de decrecer el nivel del agua, se refleja negativamente en la estabilidad de las deformaciones de talud. El ejemplo (en la fig. 7) procede de la localidad Mingchukur (Uzbekistán), de la presa Charvac. La altura de la cortina pedraplenada (rockfill) excede de 200 m y la fluctuación del agua es mayor que 80 m. Los ángulos de pendiente son de 10 a 20°. Desde el punto de vista geológico, la predominante parte del talud lo forman los sedimentos de edad cretácica hasta paleógena. En estos sedimentos yacen de modo discordante los conglomerados de edad cuaternaria.

En el deslizamiento fueron efectuadas investigaciones incl. la geofísica. El grupo geofísico usbege realizó las mediciones del campo y el autor de las ponencias llevó al cabo el reprocesamiento de la interpretación geofísica original.

Mediante interpretación de las mediciones geoelectricas se logró determinar dos grados de deslizamientos. Desde el punto de vista de las propiedades geoelectricas difieren inequívocamente los dos grados de deslizamiento, particularmente el segundo estrato de los dos deslizamientos cuyo resistividad en el deslizamiento más alto es prácticamente por un orden mayor en comparación con el deslizamiento más bajo. El grado superior del deslizamiento se halla predominantemente estructurado por bloques desintegrados de conglomerados cuaternarios. En vista de las considerables perturbaciones y la baja humedad, las resistividades oscilan dentro del marco comprendido entre 320 y 1500 ohmiómetros y la capa superficial acusa la resistividad 5 veces mayor. El grado inferior de la deformación de talud presenta resistividades de 16 a 55  $\Omega\text{m}$ , de lo cual es posible deducir que los materiales del deslizamiento inferior está estructurado ya predominantemente por las rocas flysch. Estas rocas yacen, en la predominante medida, debajo del nivel del agua subterránea, reduciendo su elevada humedad la resistividad. Es posible que la línea divisoria entre la primera y la segunda capa no corresponda con el nivel del agua subterránea.

El tercer estrato se destaca por grosor considerable y resistividades poco variables (14-25 ohmiómetros). Interesante es la última línea divisoria interpretada en la cual van aumento moderadamente las resistividades de las rocas. Toda la línea divisoria da la impresión de tratarse del brazo de un sinclinal. Se conoce (de la investigación de perforación) la transformación del ángulo de yacimiento de los sedimentos flysch en la localidad, no obstante, no se puede excluir que se trate del movimiento flexural. Esta transformación del ángulo de los planos de estratificación favorece el deslizamiento, dado que no es necesario que el material de roca se halle perturbado “a través de los estratos”, pudiendo para su movimiento aprovechar aquellos estratos en el paquete de flysch que presenten destacadamente debilitadas las propiedades mecánicas.

## Conclusiones

El presente artículo indica las posibilidades de empleo de los métodos geofísicos en las orientativas investigaciones ingenierogeológicas de los perfiles de presa. Los resultados extraordinariamente buenos se reciben en aquellos casos cuando para la investigación ingenierogeológica se emplee el complejo compuesto de varios métodos. En los casos concretos (España del Sur, Uzbekistán) bien se ven las posibilidades de llevar exitosamente al cabo las operaciones y obras, tal y como se suele aplicar en la República Checa. La actualidad ofrece, entre otras cosas, la técnica de satélite, por consecuencia de lo cual ya podemos dejar de utilizar los métodos clásicos de localización geodésica orientativa. Así es posible medir en

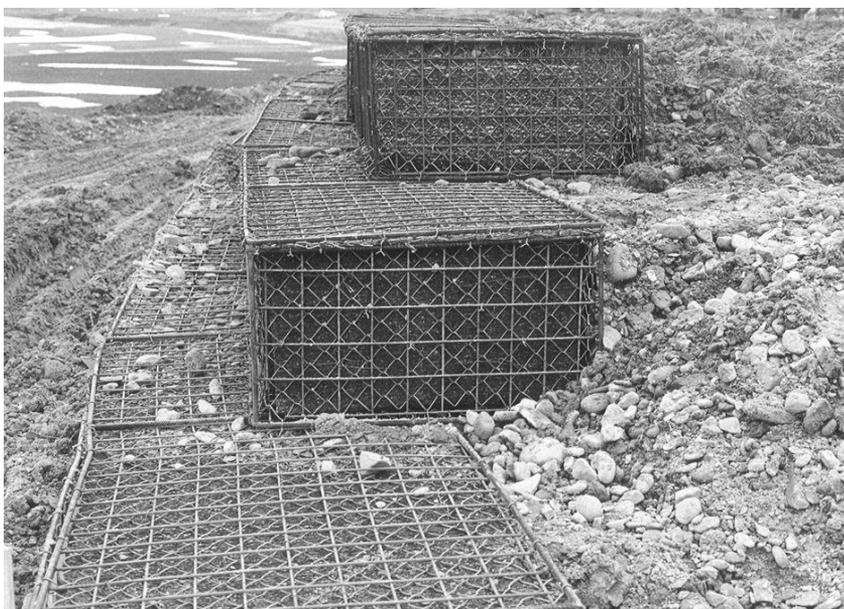
los perfiles irregulares. También tal sistema de perfiles es posible aprovecharlo en relación con la correlación de los importantes elementos de la estructura geológica..

Además de la evaluación de la fundamental estructura geológica, asimismo se adquieren informaciones relativas a muchos otros datos, necesarios para diseñar un terraplén, sobre todo los datos vinculados con las condiciones de yacencia de los individuales tipos de roca, los datos relativos a los trastornos y fallas del macizo rocoso, los datos sobre las discontinuidades del macizo rocoso y de la división del mismo en bloques casihomogéneos con propiedades geotécnicas similares. Pero los métodos geofísicos representan una gran aportación también en cuanto a las nuevas nociones y experiencias acerca de las profundidades y grados de intemperismo y desmoronamiento de las rocas, de la profundidad de la zona de detensiones en los valles y en los taludes, de la estabilidad de taludes en el punto de trabazón y en los taludes de la zona de embalse. No se puede no subrayar que precisamente las técnicas geofísicas ayudan a evaluar la permeabilidad de las rocas y a diseñar proyecto para la adecuada profundidad de la cortina inyectada impermeable.

#### Referencias:

- Blaga P.: Komplexnaja seismiĉeskaja dokumentacija skvaŝin., (en ruso, „*Testificación geofísica de los sondeos*”) In: Izmerenije i racionalnoje ispolzovanije geologiĉeskoj sredi., SAIGIMS, Taškent, 1989, s.55-68.
- Bláha P.: Seismická měření na přehradním tělese., (en checo, „*Mediciones sísmicas realizadas en el cuerpo de la presa*“), In: Sborník: Seismologie a životní prostředí, ÚGN, Ostrava, 1993, s.85-92.
- Bláha P.: Shallow refraction processing in geology., Proc. 7th International IAEG Congress, Rotterdam, Balkema, 1994, p. 61-68.
- Bláha P., Vlastník M.: Využití metody pronikání při zpracování mělké refrakční seizmiky pro účely inženýrské geologie., (en checo, „*Utilización del método de penetración durante de elaboración de mediciones de sísmica refractaria para los fines de Ingeniería Geológica*”) Geologický průzkum, 1992, ročník 34, č.6, s. 169-171.
- Bláha P., Horský O.: Engineering geophysics for dam site selection., In: Proceedings: 7th International Congress IAEG, Balkema, Rotterdam, 1994, p 69-78.
- Bláha P., Kottas J., Sochor J.: Geological inhomogeneities in seismic tomography., In: Proceedings: 7th International Congress IAEG, Balkema, Rotterdam, 1994, p. 79-87.
- Bláha P., Lincer L., Woznica L.: Geoakustické monitorovací měření na přehradě Vír., (en checo, „*Monitoreo geoacústico en la presa Vír*“), In: Sborník: Polní geotechnické metody 94, Dům techniky Ústí, Ústí nad Labem, 1994, s. 23-26.
- Bláha P., Müller K.: Physical characteristic of failure zones., In: Proceedings: 2nd Meeting Environmental and engineering geophysics, Nantes, 1996, p.101 - 104.
- Bláha P., Müller K.: The signification of geophysical monitoring in geotechnical practice., In: Proceedings 28<sup>th</sup> Polish-Czech-Slovak Symposium on Mining Geophysics, Sosnowiec 2001, s. 46.
- Horsky O., Drozd K.: Metodos de las Investigaciones Geotécnicas para las obras Hidrotécnicas. In: Proceedings : 3<sup>ra</sup> Reunion del Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica y ramas afines. Arequipa, Peru, vol. II, 1975, pg.101 – 104.
- Horsky,O., Müller,K.: Rock environment – determining factor for projecting the hydrotecnic construccion works. In: Proceedengs : III International Congress IAEG, secc. III, vol. 1, p.143 – 151, Madrid, 1978.

- Horsky O.: Investigaciones Ingeniero Geológicas para las presas (el libro metodológico), Buró Geológico Checo, Praga 1978, pg. 1 – 228
- Horsky O., Conde M.: Las investigaciones geofísicas en el estudio ingeniero-geológica de obras hidrotécnicas., Revista Voluntad Hidráulica, 61, XX, La Habana, 1983, pg. 14 – 18.
- Horsky O.: Bases metodológicas para el desarrollo de las investigaciones ingeniero-geológicas para las obras hidraulicas., Revista Voluntad Hidraulica, 62, XX, La Habana, 1983, 57 – 63.
- Horský O., Bláha P.: Investigation of the disturbance of the basalt sheet at the dam site Slezská Harta using geological and geophysical methods., In: Proceedings: 27. MGK, Nauka, Moskva, 1984, p.57.
- Horský O.: Inženýrsko-geologický průzkum pro přehrady., (en checo, “*Investigaciones ingeniero geológicas para las Presas*”), Geofond, Praha, Edice Geoda No 3, 1990, pg. 1 – 119.
- Horský O., Limzer L., Nešvara J.: Ecological repairs of the Orava dam reservoir shore banks., In: Proceeding: 7th International IAEG Congress., 1994., Balkema, Rotterdam., pg.3729-3737.
- Horský O., Spanilá T.: Remodelling of water reservoir banks by exogenous processes., In: Proceedings: Proceedidings International Symposium on Engineering Geology and the Environment., IAEG/ATHENS/GREECE/1997, pg.2711-2716.
- Spanilá T., Horský O., Banach M: Slides and sliding in the water reservoir banks., In: Proceedings LANDSLIDES, Swets & Zeitlinger, Lisse 2002, pg.315-319.



La protección de las orillas por gaviones. Embalse Orava, Eslovaquia,  
Foto Otto Horský, 1992.

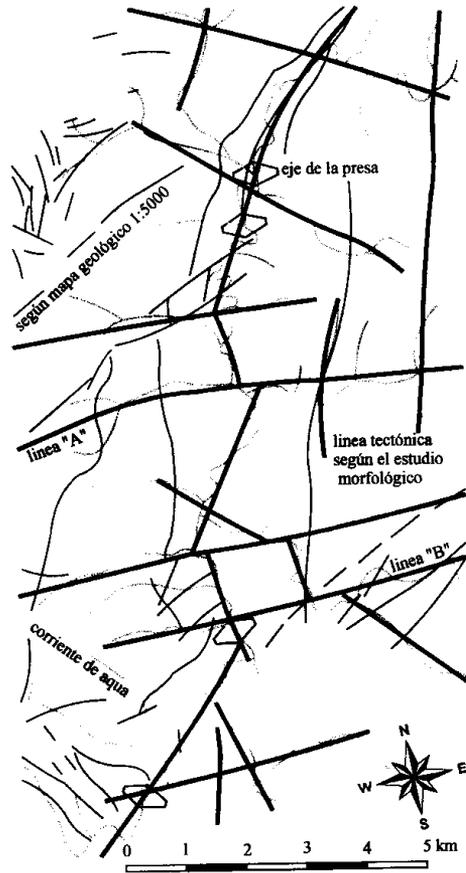


Fig. 1: El estudio morfológico con la ubicación de diques proyectados

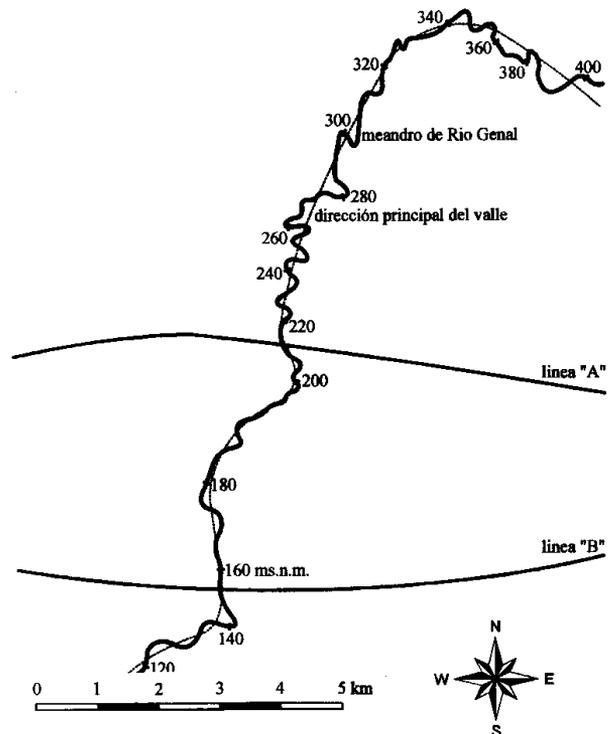


Fig.2: El estudio del corriente del río Genal

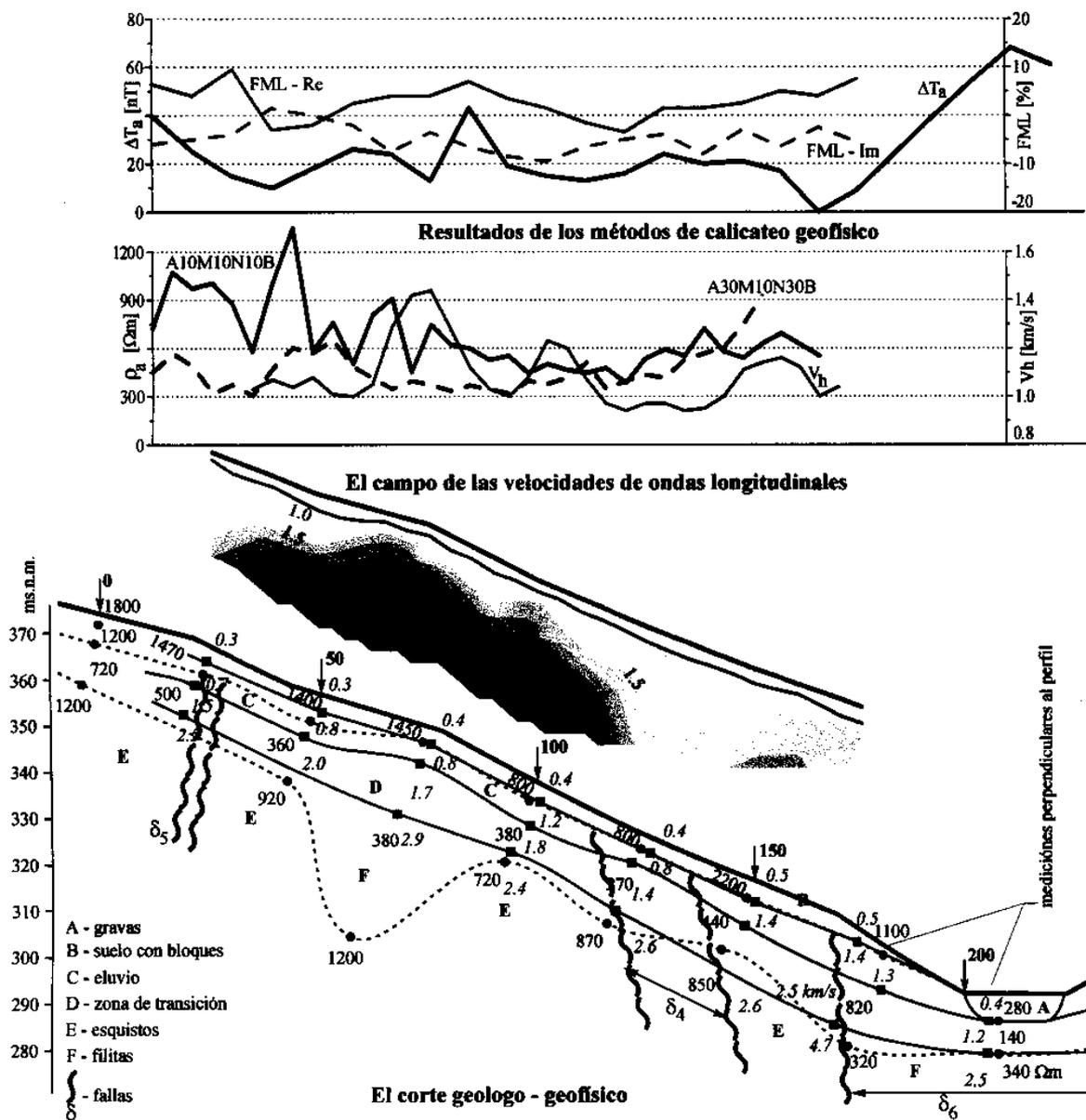
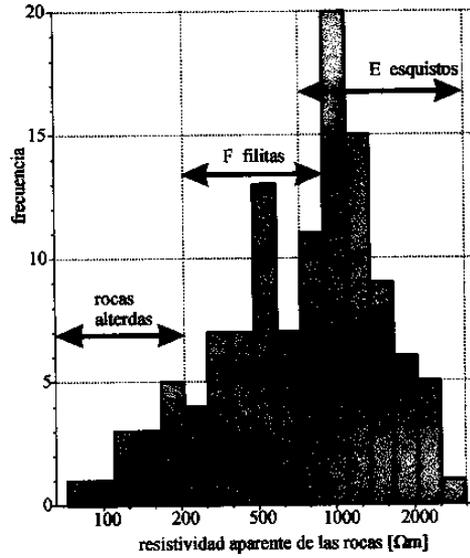
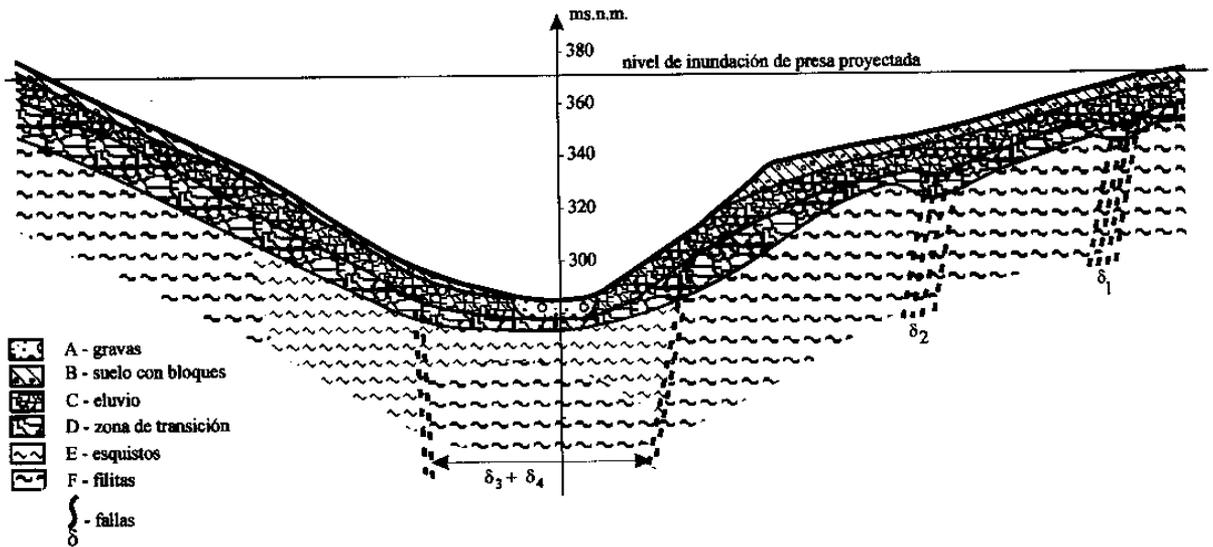


Fig. 3: El corte geológico – geofísico de la margen izquierda de una de las varientes de la ubicación del dique – P6L.



**Fig.4 La distribución de las resistencias aparentes de las rocas**



**Fig 5 El perfil geológico P4 interpretado a base de geofísica**

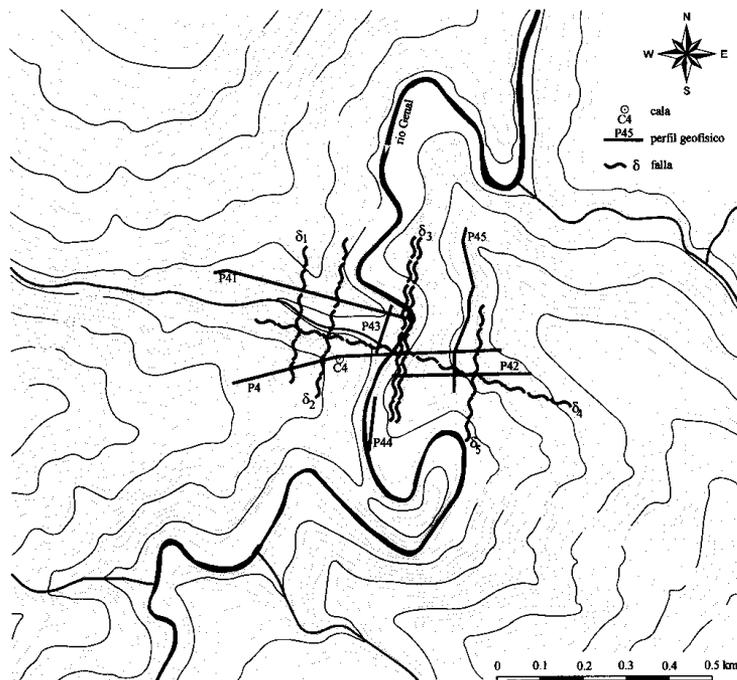


Fig. 6: Las condiciones tectónicas en el eje de la presa proyectada en el río Genal.

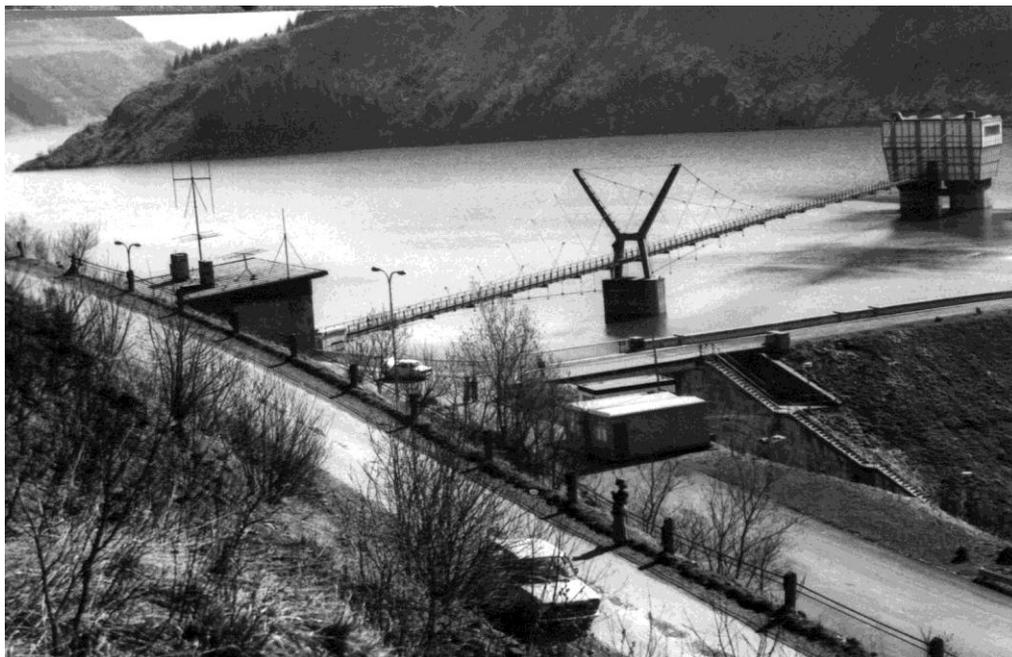


Fig.7: Mediciones geofísicas en el río Genal, España. Foto Pavel Bláha, 1991.

# FOTOGRAFÍAS



Presă Šance en el río Ostravice, en la República Checa, construida en rocas de Flysh. Dique de rocfill está construido de los materiales locales. Foto Otto Horsky, 1964.



Presas Šance en la República Checa, construida en las rocas de Flysh, 1964.



Puebas de la permeabilidad de agua según criterios de Lugeon, presa Slezská Harta en Moravia, 1972.



Presas de gravedad, de hormigón, en Mohelno, aguas abajo de Dalešice (Hidroacumuladora)



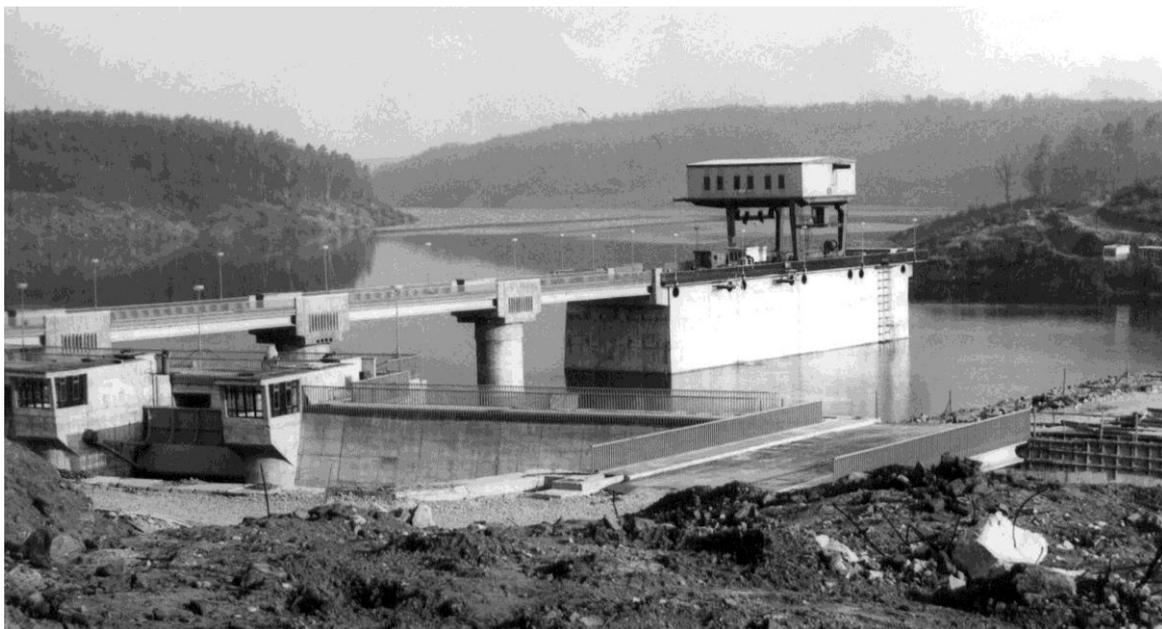
Presas Dalešice en la República Checa en la construcción, objetivo asociado con las tuberías abajo, 1972



La construcción de la Hidrocentral abajo de la presa rock-fill en Dalešice, 1972. Vista aguas arriba.



Fundación de las turbinas en Dalešice, 1972.



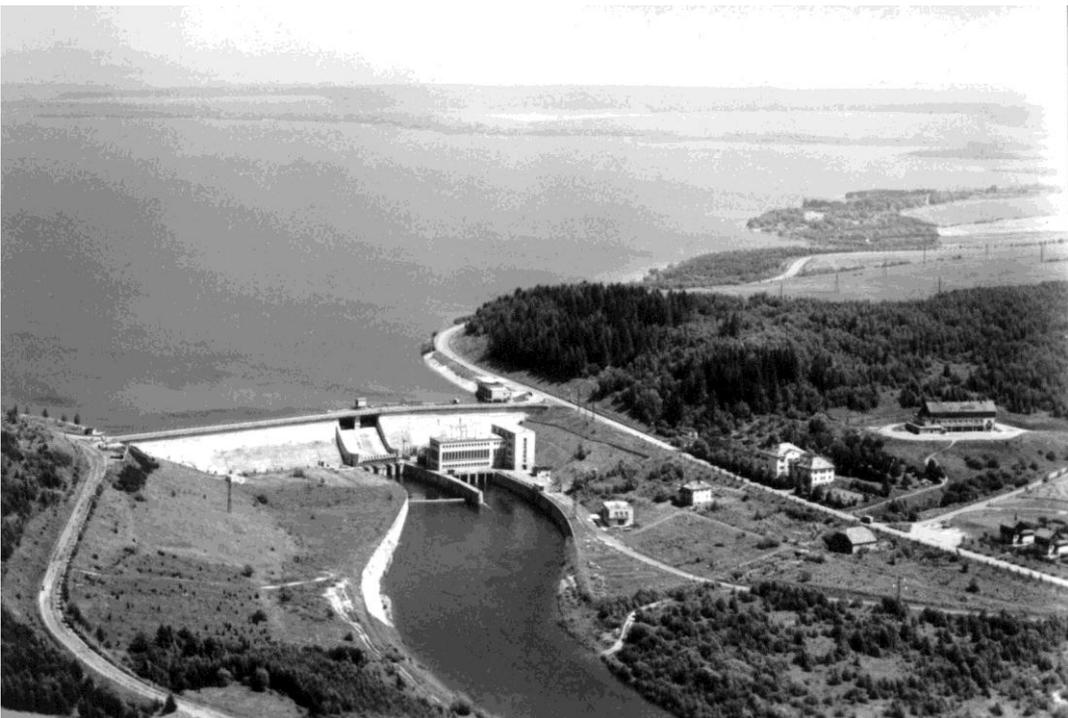
Dalešice en el año 1978. Llenamiento del embalse en el año 1978.



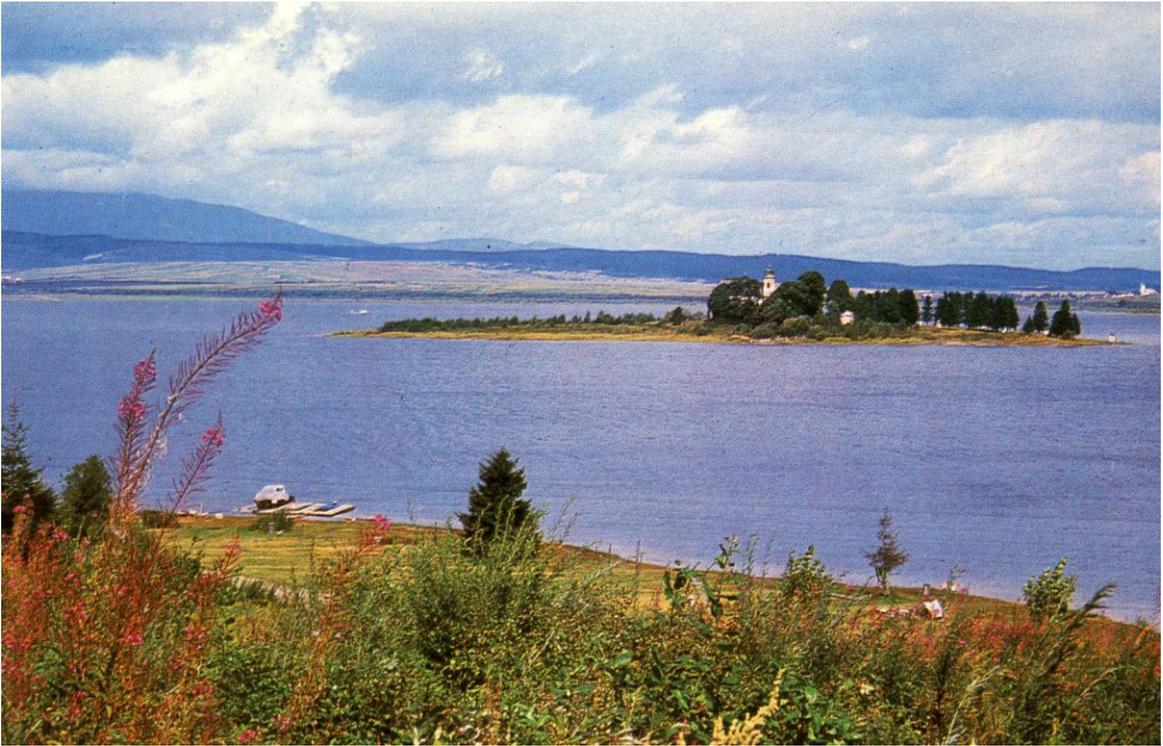
La hidrocentral de Dalešice en la explotación, 1983. Vista aguas abajo.



Derrumbe de la margen derecha de Dalešice, provocado por abrir el valle hasta la profundidad de los 20 metros, para ubicar las tuberías. No se ha respetado el proyecto de realizar antes de la apertura los anclajes. 1972



Presa Oravská přehrada en Eslovaquia, fundada en las rocas de tipo flysh.



Vista al Embalse de Orava en Eslovaquia, localidad La Isla Slanická Osada.



Abrasión de las orillas y sucesivos deslizamientos en rocas del neogéno, presa Orava, 1968.



Deslizamientos en las rocas del neogéno en la presa Orava en Eslovaquia, 1992.



Abrasión de las orillas en gravas cuaternarias en Oravská přehrada, 1972



Derrumbes en los sedimentos del neógeno en la localidad Osada en Oravská přehrada, 1968.



Abrasión de las orillas y consecuentes derrumbes de orillas de la presa Orava en Eslovaquia, 1968.



Derrumbes de témpanos de hielo en la presa Orava están modelando y afectando las orillas, provocando deslizamientos. Orava, localidad Puerto, 1968



Sanación de las orillas en la presa Orava, 1992. Localidad Polhoranka.



Abrasión y erosión de las orillas en embalse Orava, Eslovaquia, 1968.



Los deslizamientos en el embalse Orava amenazaron varios hoteles. 1968.



Una parte muy importante de las Investigaciones es la documentación de las excavaciones durante de la construcción de la Obra. Presa Lubina en Chequia, 1972

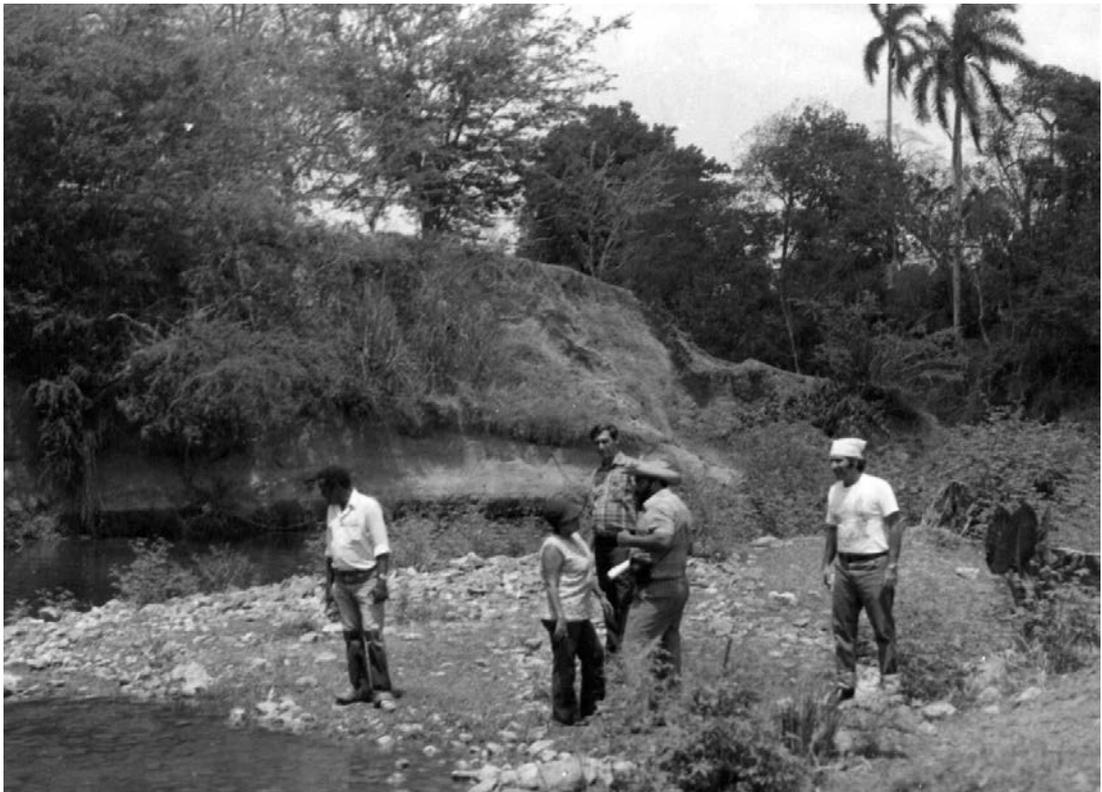


Presa Slezská Herta en las montañas Jeseníky en Chequia durante de la construcción.

## CUBA 1978 – 1982



Reconocimiento del terreno en el río Agabama. 1978.



Reconocimiento del terreno y el estudio de los afloramientos en Corojo , 1981.



Derrumbe en Charco Redondo ha desvalorizado el eje de la presa, 1981



Derrumbe de la margen izquierda en la presa en construcción, Giuza, 1981



Derrumbe en Guiza puso en peligro los trabajos de la construcción. Estado en 1981.



Estudio hidrogeológico en Corojo, 1981.



Las infiltraciones por el dique del Embalse “La amistad Cubano-Búlgara”, 1982.



Vista completa al valle de Corojo, 1981.

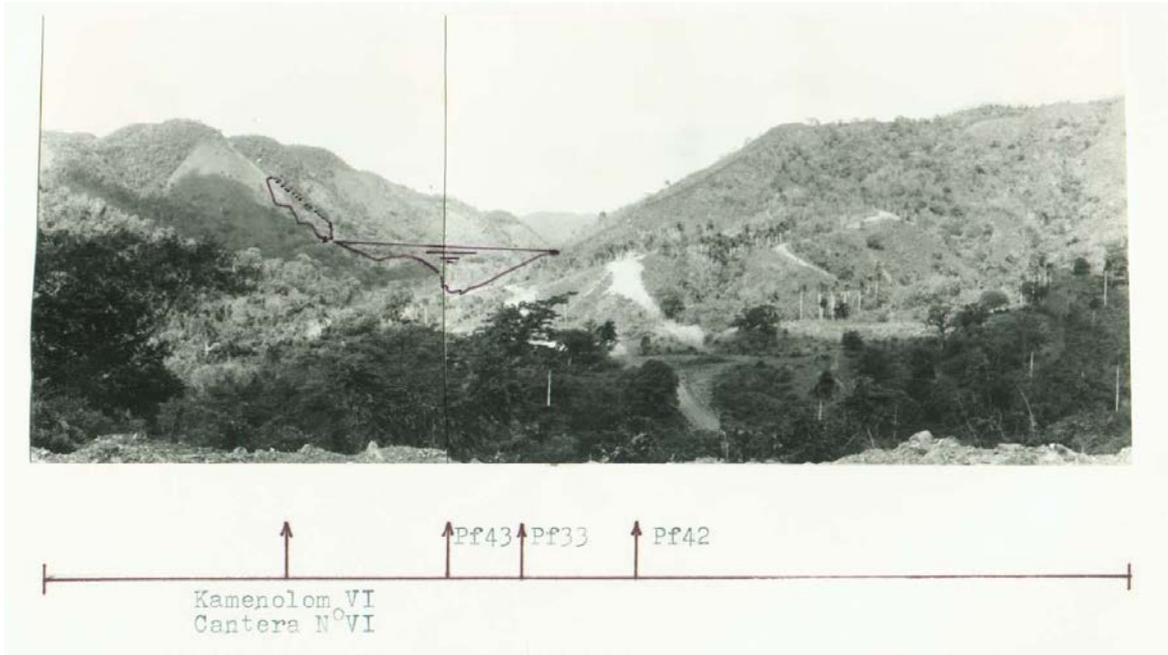
## CUBA – CENTRO, 1984 – 1988



El eje original PF 42 de la presa del Embalse Inferior de la Hidroacumuladora Centro.



El estudio del eje original PF 42 descubrió la estructura cárstica, la que ha llevado al cabo el abandono de este perfil. 1985.



El eje nuevo y definitivo del Embalse Inferior, llamado como el Eje de Reserva, 1985.



El eje de la Presa del Embalse Superior, PF 15, 1985.



Embalse Superior, flecha 1 marca la ubicación de la Cantera I, flecha 2 la cantera “Cobrito”



Carotaje geofísico en la perforación C 264, en la estructura cársica. 1985.



Carotage geofísico de calas en el Embalse Inferior, 1985.



Levantamiento ingeniero-geológico, 1985.



Estudio detallado de los afloramientos. Escambray, 1985.



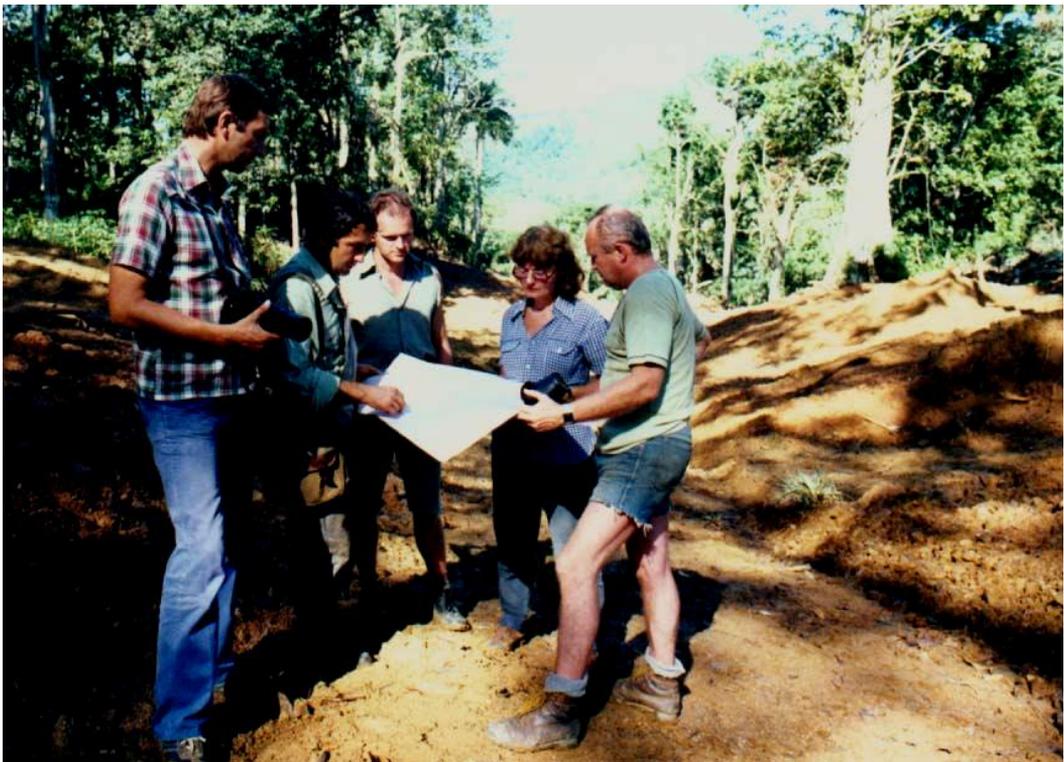
En el terreno complicado hay que montar caballo. Dr. M. Somin durante de la revisión de la estructura geológica, 1985.



Punto topográfico de la base. En la foto el proyectista Ing.Pavinger, geólogo del Hidroproyecto Praga , Dr.Schützner y especialista geólogo principal Ing.Pacareo.



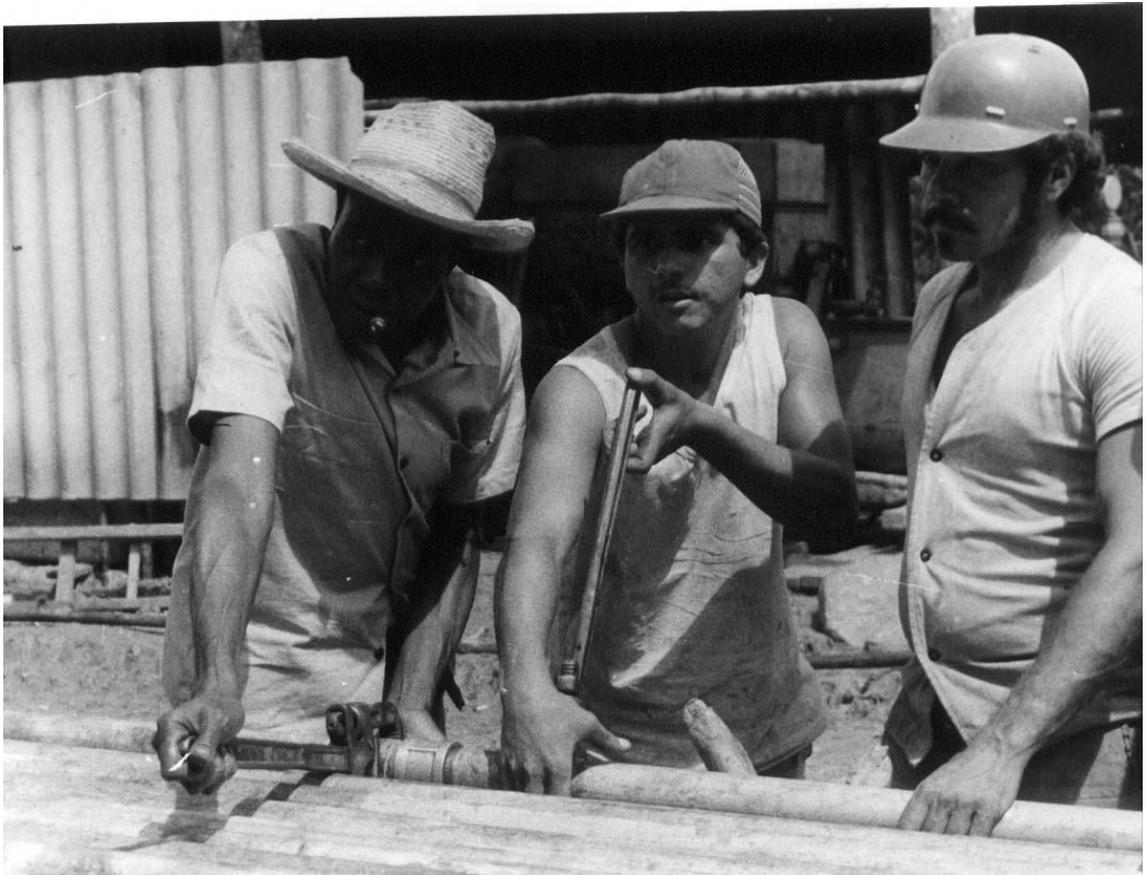
Reconocimiento del terreno en el trazado de las conductoras, 1985.



Reconocimiento del terreno junto con los proyectistas, 1986.



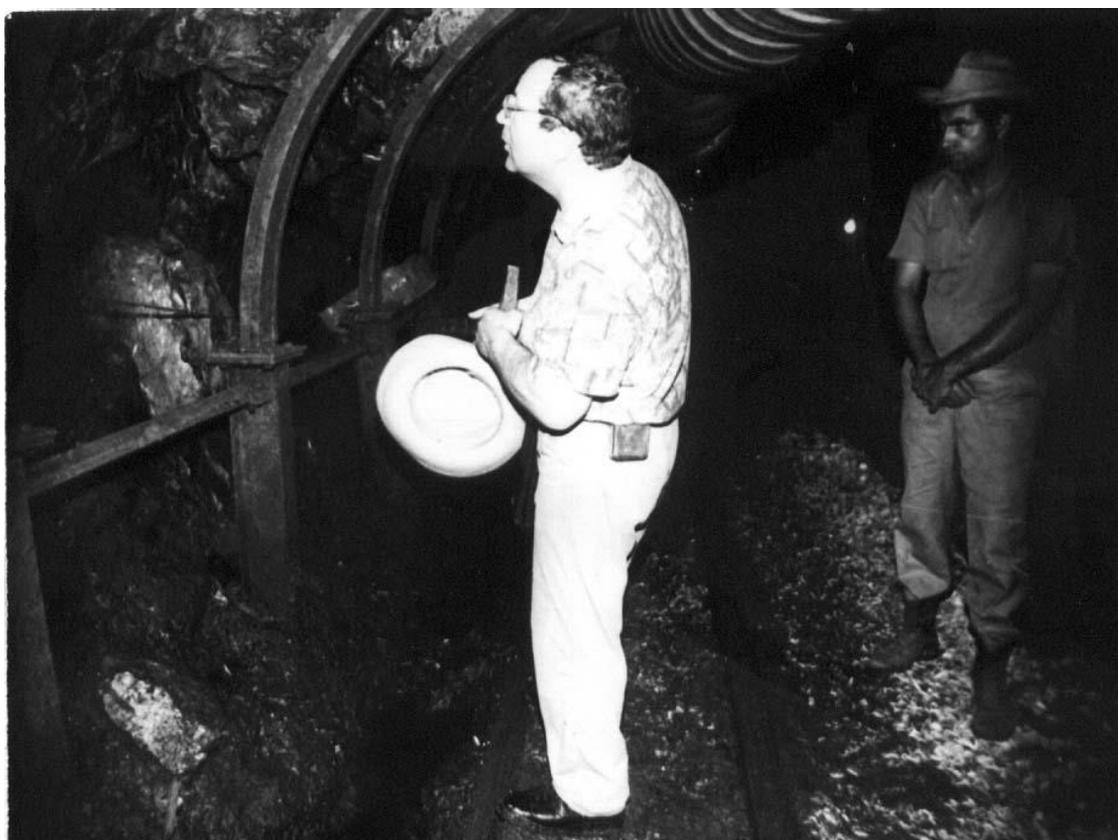
Pruebas de Inyecciones del agua e inyecciones del cemento en la cala CA 174, 1985.



El desarrollo de los trabajos de la perforación en el Embalse Superior, 1985.



Perfecta y rigurosa documentación de los testigos de la recuperación es la parte muy importante de las inestigaciones. Escambray, 1986.



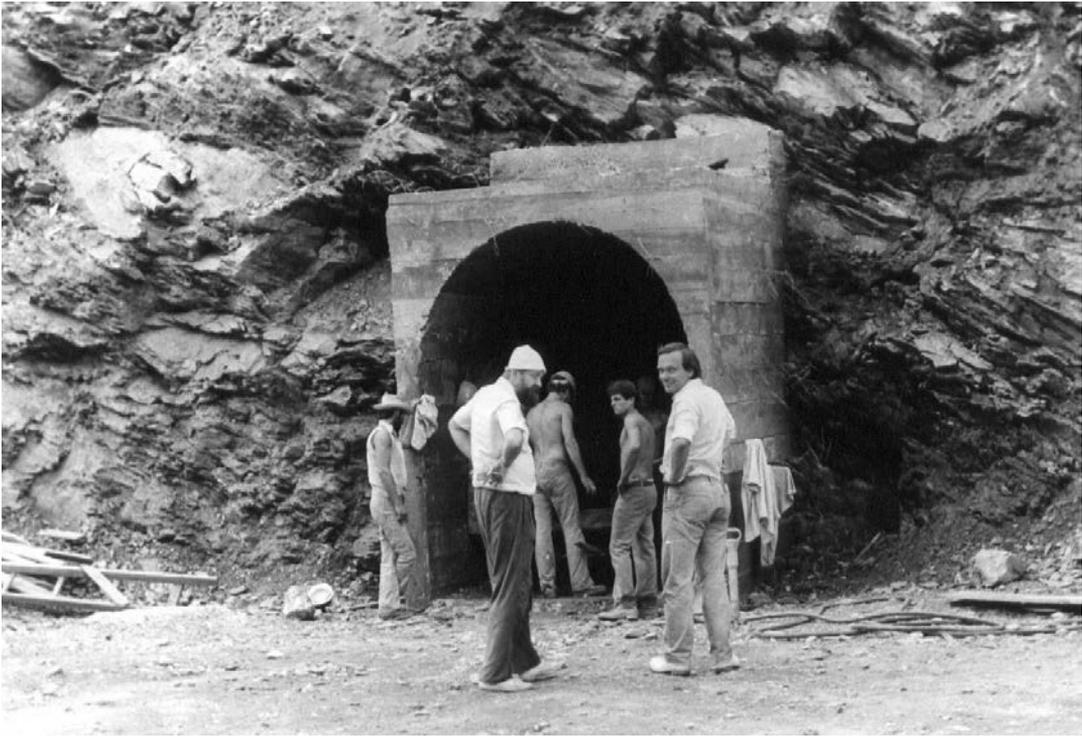
Igual importancia tiene la rigurosa y completa documantación de las galerías de investigación. En la foto experto ruso Dr.M.Somin y geóúogo cubano Ing.L.Pacareo, 1985.



Durante del estudio de la estructura geológica del Escambray colaboraron también Dr.G.Millán y Dr.M.Somin de las Academias de la Habana y de Moscú, 1985.



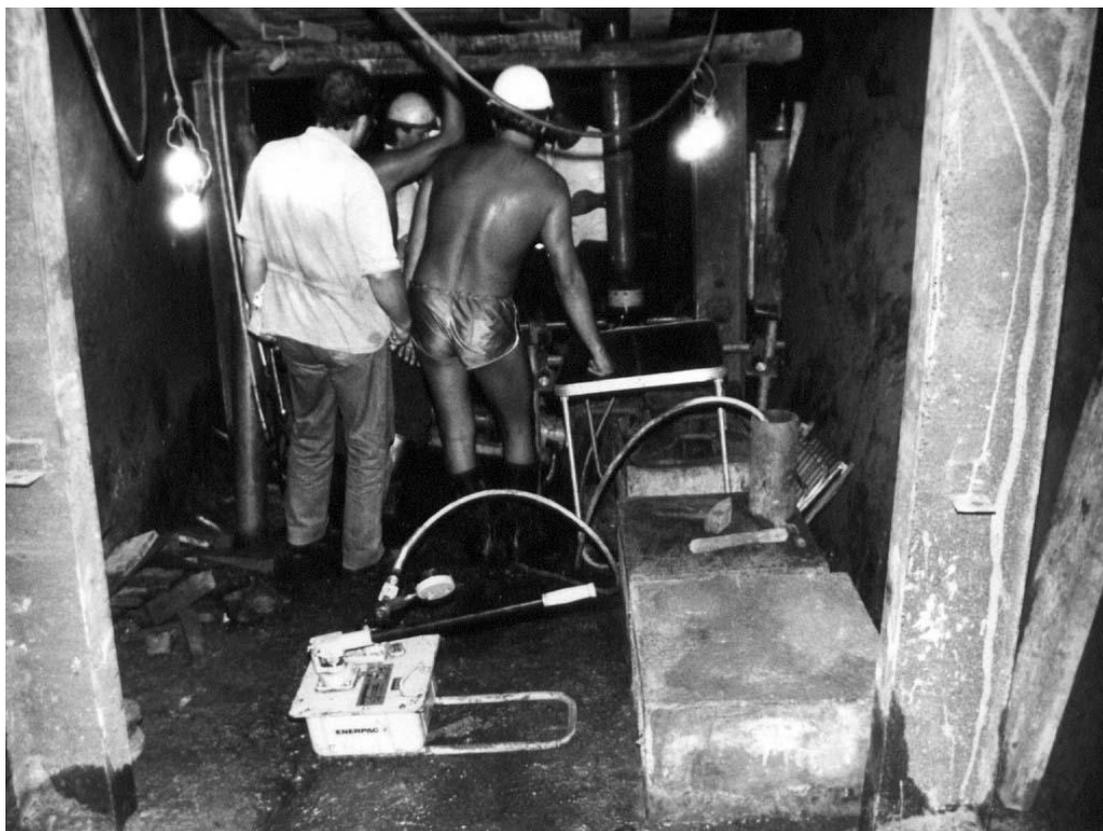
Para el transporte de material excavado de las galerías sirvieron locomotoras y excavadoras de la tecnología checoslovaca, 1985.



El portal de la galería de las investigaciones “A” en el año 1984.



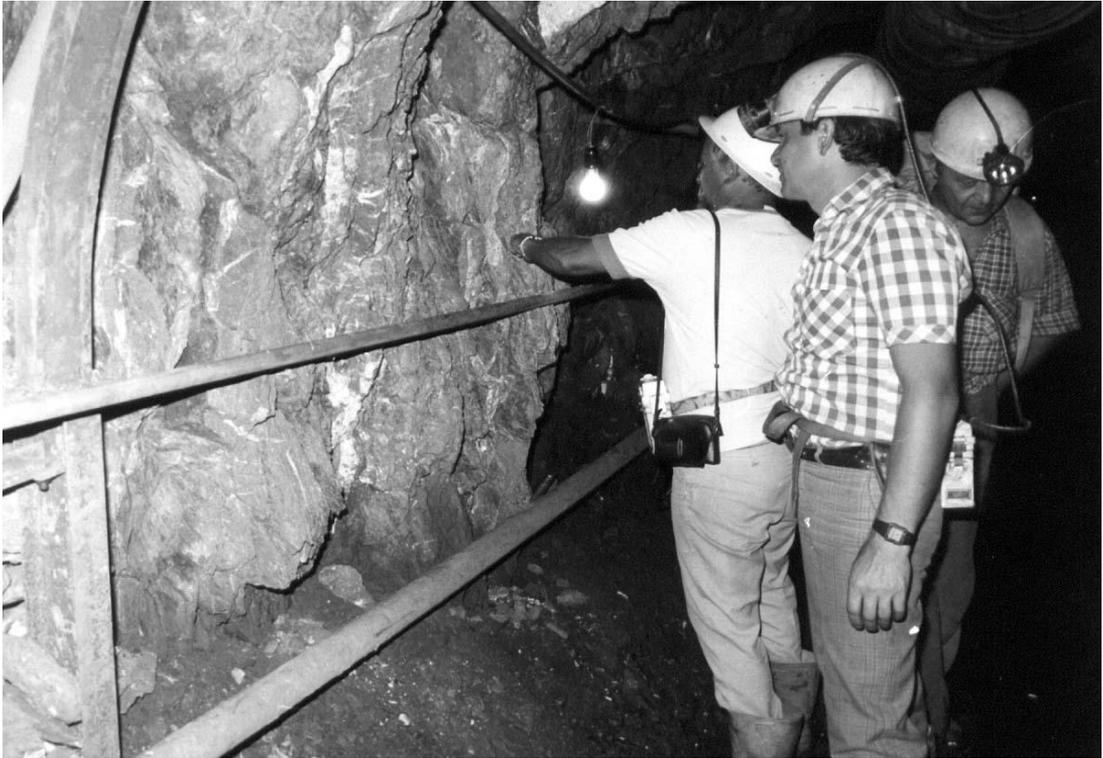
Vista completa al portal de la Galería de las Investigaciones, 1984.



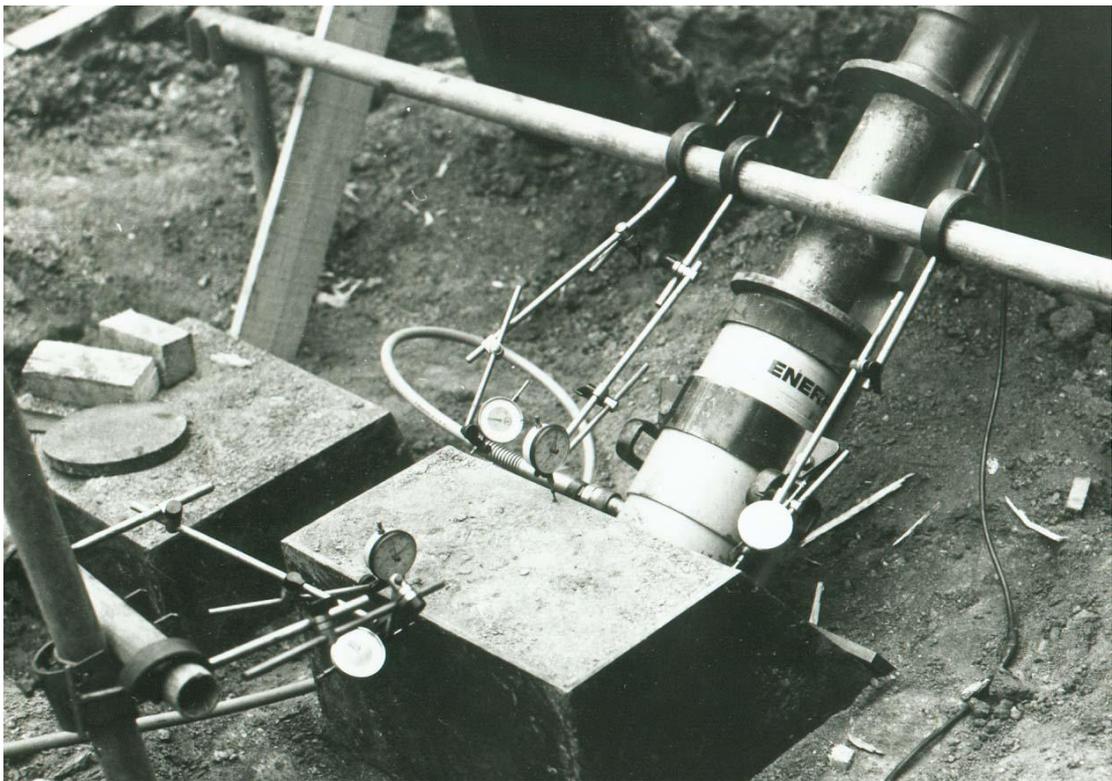
Pruebas de carga dentro de la Galería "A", 1986.



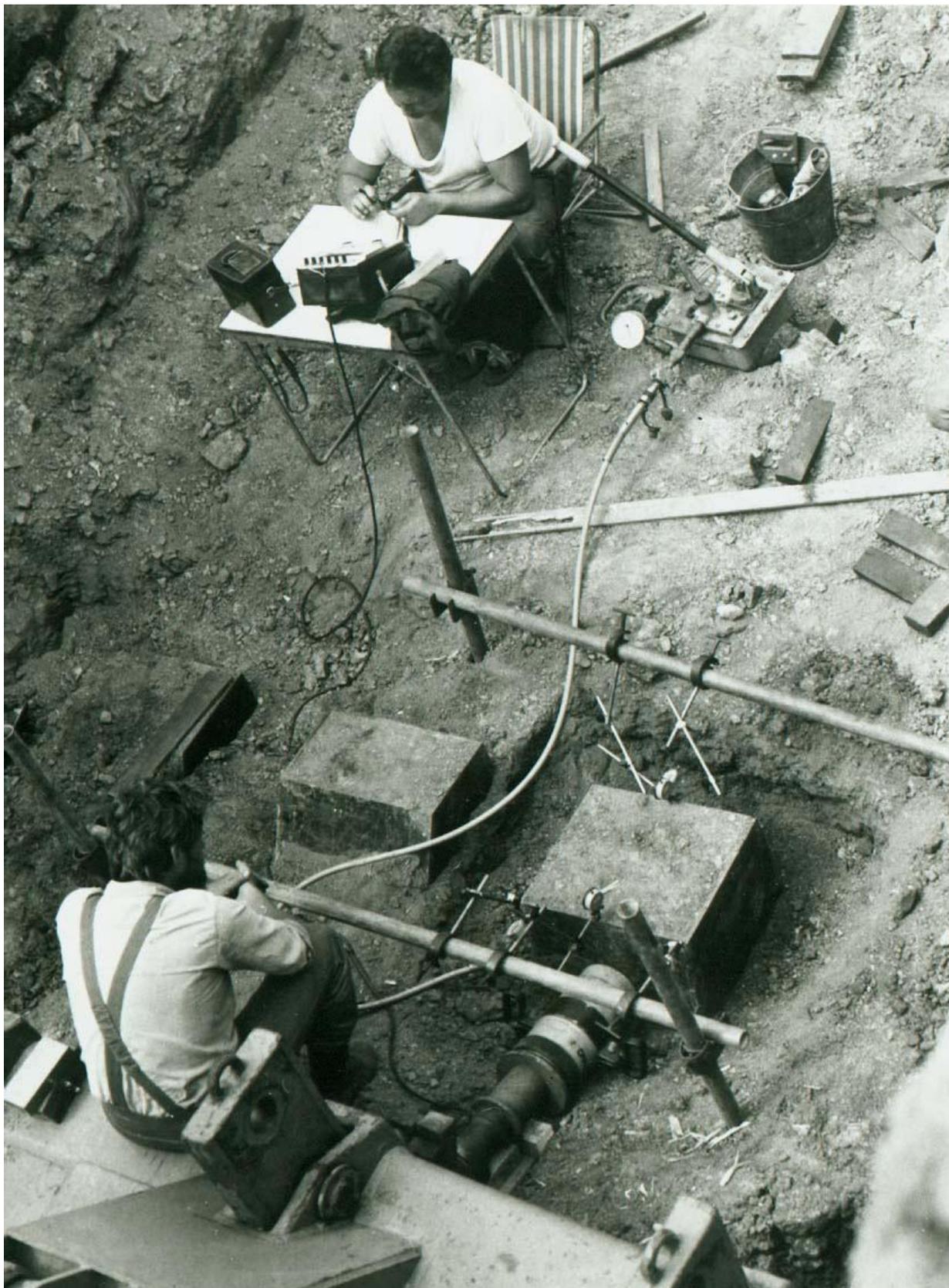
Pruebas de cortante en la Galería "A", 1986.



Documentación geotécnica de la Galería “A”, 1985.



Disposición del sistema de carga con la ubicación de los defórmómetros – prueba de cortante en la calicata cerca de la cala CA 102, Centro-Cuba, 1986.



Pruebas de cortante en la calicata , Embalse Superior, 1986.



Pruebas de compactación en el Embalse Superior, 1986.



Prueba de carga de placa en terraplen de prueba en el Embalse Superior, 1986.



Pruebas de carga de los materiales de construcción, debajo de un puente de carga en el Embalse Superior, 1987.



Pruebas de carga en el laboratorio en Gavilanes, 1985.



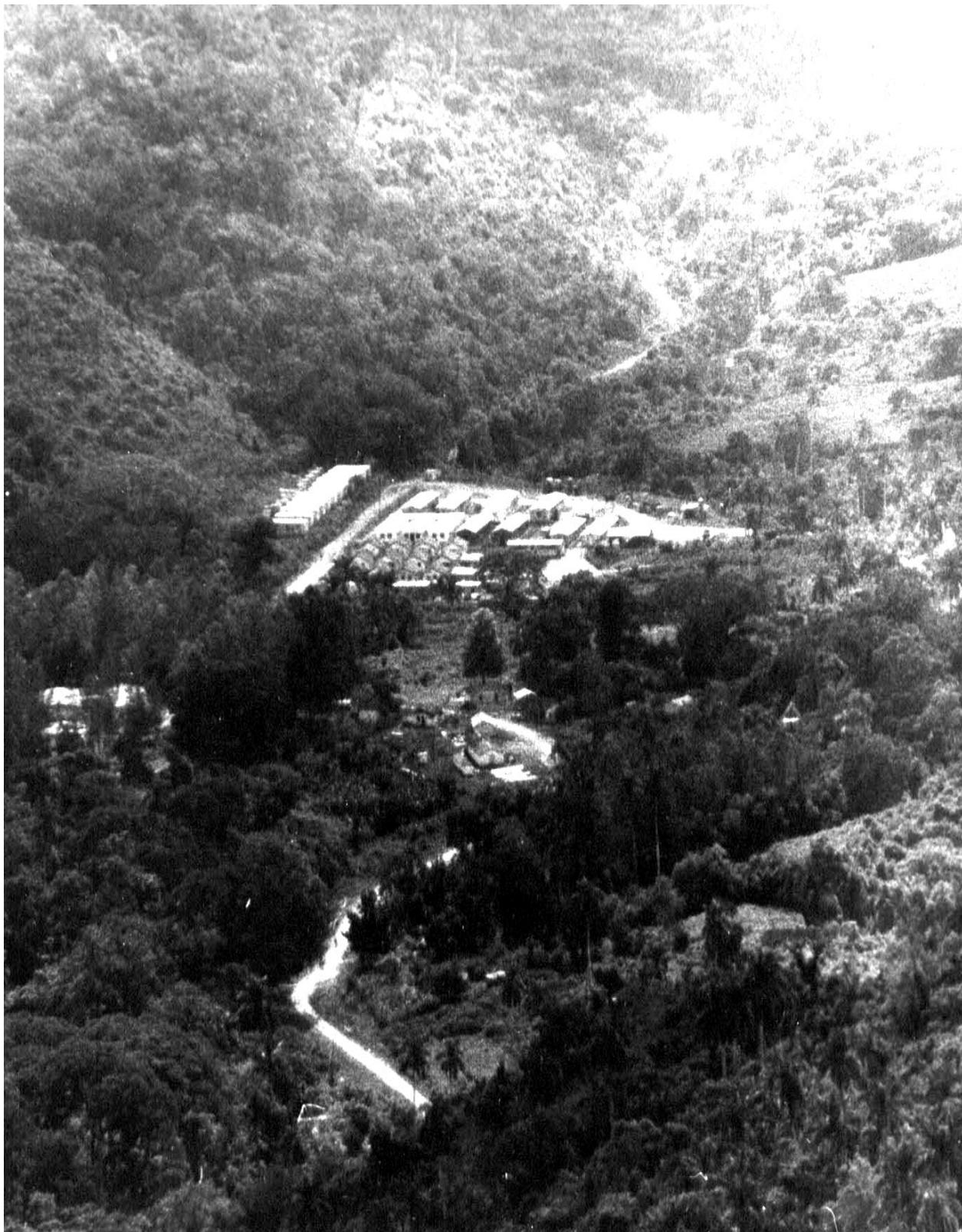
Trabajos del gabinete, Campamento en Gavilanes, 1986.



Mediciones geofísicas en la Central Hidroacumuladora en Escambray, 1986..



Vista completa desde el Embalse Superior al trazado de las tuberías y a las "Tetas", una de las variantes de materiales de construcción, 1985.



Vista al campamento de los geólogos y de los trabajadores en CHA Centro Cuba.

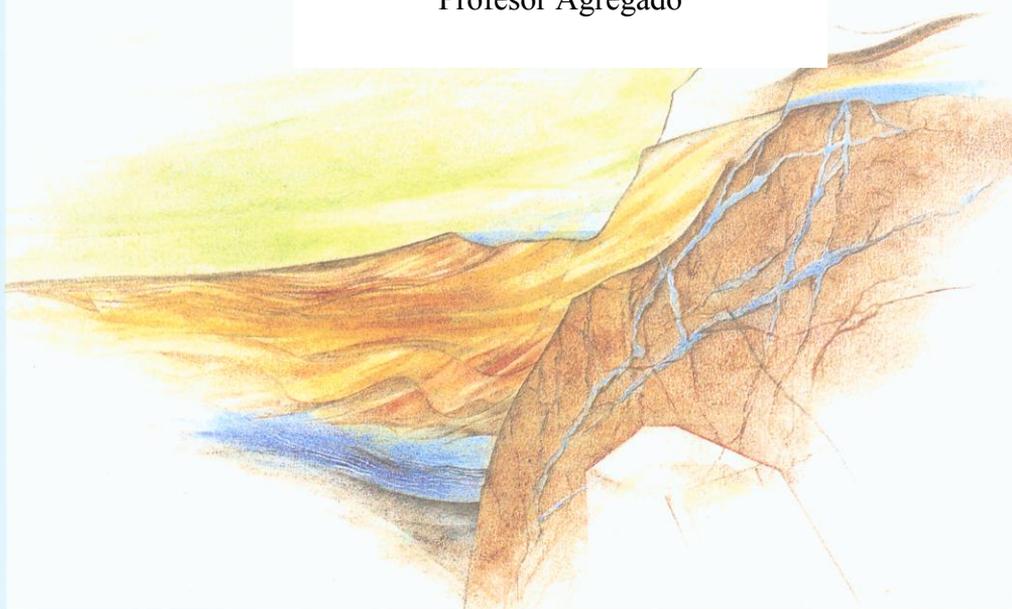
**GEO<sub>test</sub>BRNO**

**GEOLOGICKÉ A SANAČNÍ PRÁCE PRO OCHRANU ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ,  
GEOTECHNICKÝ A HYDROGEOLOGICKÝ PRŮZKUM**

TRABAJOS GEOLOGICOS Y DE SANEAMIENTO RELACIONADOS CON LA PROTECCION DEL MEDIO AMBIENTE,  
INVESTIGACIONES GEOTECHNICAS E HIDROGEOLOGICAS

## GRUPO GEOFÍSICO

RNDr. Pavel Bláha, DrSc  
Profesor Agregado



**Dirección de contacto :**

**Geotest, a.s.**

**Šmahova 112, 659 01, Brno**

**Tel.: 00 420 548 125 308**

**Tel.: 00 420 602 739 001 (Bláha)**

**Geotest, a.s.**

**Sucursal Ostrava**

**28.října 287, 709 00, Ostrava**

**Tel.: 00 420 596 62 27 72**

**Doc. RNDr. Pavel Bláha, Dr.Sc.**  
**Profesor Agregado**



Nacido en Checoslovaquia el 25 de Mayo de 1.944.

Estudios de licenciatura en la Universidad de Carlos de Praga, en Geología y Geofísica Aplicada ( 1961 – 1965 ). Diploma B.Sc 1966, diploma RNDr 1969, diploma CSc-PhD 1990, diploma Doc (Associate Profesor) 1992, diploma DrSc (D.Sc) 1998.

Entre los años 1966 – 1969 ha trabajado en la Universidad de Carlos de Praga como el Profesor Ayudante de Explotación de Yacimientos, desde el año 1969 hasta 1971 como el Profesor Agregado en el área de Geofísica Aplicada a la Construcción en la Universidad de Ostrava en Moravia.

Desde el año 1971 hasta la actualidad desempeñó distintos cargos en la empresa GEOTEST BRNO, hasta el Jefe del departamento especializado en Geofísica Aplicada a la Ingeniería Geológica e Hidrogeología en Ostrava, con especial experiencia en Geoacústica, Tomografía Sísmica y Remote sensing.

Ha realizado más de 20 investigaciones científicas de gran índole sobre la aplicación de métodos geofísicos en geología Aplicada a la Ingeniería.

Realizó más de 200 estudios de geofísica.

Desde el año 1.981 ha realizado varios desplazamientos a la antigua URSS y despues a la Rusia, para realizar estudios e investigaciones prácticas de su especialidad y para acesorar algunos trabajos científicos.

Supervisó los trabajos de investigación geofísica para la „Central Hidroacumuladora“ en Cuba.

Ha realizado varios trabajos geofísicos para las obras de distinto índole en España, Polonia, Rusia, Alemania, Albania, Uzbekistan, Yugoslavia, Cuba.

Ha realizado más de 100 publicaciones, de los que los más importantes se relacionan en este libro.

Experiencias profesionales especiales :

El uso de métodos geofísicos en Ingeniería Geológica, Hidrogeología y Protección de Medio Ambiente, Exploraciones Geofísicas para pocas profundidades. Técnicas especiales, como Tomografía, Geoacústica, aplicación de métodos Geofísicos para el estudio de Derrumbes y Deslizamientos, Remote sensing.

## LA SOCIEDAD GEOTEST BRNO SE PRESENTA...

La entidad GEOtest Brno, S.A., con domicilio social en Brno, Šmahova 112, es una de las más importantes empresas checas que se dedica en primer lugar a las tecnologías geológicas y técnicas de regeneración, enfocadas hacia la protección del medio ambiente; ofrece labores de investigaciones geotécnicas e hidrogeológicas, partiendo de ricas experiencias que cuentan no menos que treinta años en todas las disciplinas recién mencionadas y disponiendo de un colectivo de madrigados profesionales; muchos de ellos con larga práctica en los países extranjeros.

Goza de protección marcaria dentro del marco nacional e internacional el nombre comercial "GEOtest", igual como su presentación gráfica.

La entidad GEOtest existe en su actual forma desde el año 1992, cuando fue, dentro del marco del proceso de la privatización, transformada de la empresa estatal del mismo nombre, fundada en el año 1968.

La Sociedad dispone de varios centros y talleres en Ostrava, Zlín y Praga y coopera con la compañía filial que bajo el nombre GEOtest Bratislava, S.L. opera en la República Eslovaca; a partir de los inicios del 1995 está obrando también otra entidad asociada, con el nombre comercial GEN, S.L.

Las actividades profesionales y especializadas conciernen a seis fundamentales esferas de actividades, cada una con su gerente mánager:

- Investigaciones relacionadas con la protección de aguas y recursos rocosos
- Operaciones de saneamiento para proteger el medio ambiente
- Depósitos y vertientes de basuras y residuos
- Geotecnica e ingeniería geológica
- Hidrogeología
- Dictámenes, evaluaciones, estudios (EIA, auditorios sobre el medio ambiente, análisis de los riesgos, actividades de perito).

La Sociedad asegura y realiza trabajos en todas y cada una de las etapas y niveles de los individuales procedimientos, es decir, es capaz llevar a cabo tanto la completa obra en general, como preparar y realizar cada un nivel o paso particulares. Bajo el término "nivel" se entienden tales etapas como:

- 1) La etapa de estudios, dictámenes y evaluaciones, documentación e informes periciales, consultas, compilación de datos, supervisiones, levantamientos, mapeo etc.
- 2) La etapa de investigación, es decir, la prospección completa incluyendo las operaciones técnicas e incluyendo la determinación de los pasos a realizar, conjunto con la propuesta de diversas variantes y analizando los respectivos riesgos.
- 3) La etapa de la propia realización, o sea, llevando a cabo la obra de construcción, la regeneración o la decontaminación del terreno etc.

Los centros industrializadores, dirigidos por sus mánageres, realizan las operaciones propiamente dichas; allí por lo general se concentran las demandas de diversas esferas de la profesión; los centros de servicios especializados aseguran en una parte los trabajos específicos, necesarios para los centros industrializadores, en otra parte se dedican a las demandas externas. Merced a la filosofía de la política investigativa de la entidad, la Sociedad dispone de la más moderna técnica en cuanto a las instalaciones y equipos, pudiendo así prestar los servicios de alta efectividad y perfección.

Para ilustrar - algunos de los centros de servicios de mayor importancia:

Los laboratorios hidroquímicos disponen de los más modernos equipos y aparatos analíticos que les permiten emplear los métodos de mayor exigencia - la espectrometría material, la cromatografía en fases gaseosa y líquida, la absorción atómica, las espectrofotometrías IR y UV y otros equipos de tales marcas como Varian, Perkin Elmer, Hewlet Packard, Carlo Erba etc., pudiendo así y con uso de los métodos y procedimientos extranjeros (EPA, ASTM, DIN) analizar y evaluar casi toda índole de contaminantes existentes en aguas, suelos, desechos y residuos.

Los Laboratorios de Mecánica de Suelos y el Laboratorio Central de Ensayos Geotécnicos son, dentro de la República Checa, unos de los muy pocos institutos capaces de asegurar la completa serie de las reglamentadas pruebas.

El Centro de la Geofísica Superficial con sus talleres en Ostrava asegura los auscultativos trabajos geofísicos, empleando tanto los métodos tradicionales como los específicos y las - en su categoría única - superficiales técnicas eléctricas, sísmicas o acústicas, las que ofrecen dentro del marco del complejo de la prospección geotécnica y asimismo en parte, satisfaciendo de tal manera las demandas individuales.

Nuestra Sociedad goza de posibilidades realmente extraordinarias en cuanto a la multitud y variedad de trabajos y operaciones - ventaja que se debe al rico surtido de profesiones que sus empleados y especialistas representan.

El marco profesional, que comprende más que 160 empleados, permite satisfacer y resolver un considerable número de solicitudes y demandas de muy diversa naturaleza.

Las actividades que a continuación se relatan, representan solamente una pequeña parte de nuestras actividades - geofísica.

## El grupo Geofísico se presenta...

Grupo Geofísico de la Sociedad GEOTest Brno, S.A, existe a partir del año 1971. Fue instituido en nuestro centro en Ostrava, con fin de asegurar que de la más efectiva manera se empleasen los métodos geofísicos en la ingeniería geológica e hidrogeológica, con la particular atención prestada a tres fundamentales campos de trabajos, de los cuales:

- 1) La primera esfera abarca las rápidas auscultaciones y dentro de ellas también las mediciones geofísicas en función de pasos preparativos para proyectar las actividades de gran alcance.
- 2) La segunda esfera representan las especiales mediciones geofísicas, sobre todo las relacionadas con ingeniería geológica.
- 3) La tercera esfera es la de coordinar los trabajos geofísicos, destinados a satisfacer las demandas de gran volumen y de llevar a cabo las integrales y resumidas interpretaciones de los análisis.

Aunque se trata de un colectivo de pocos miembros - lo que, con todo, coincide con el principal intento (participando en los trabajos nunca más que tres especialistas de nivel universitario y cuatro del técnico medio), el Grupo Geofísico de GEOTest es efectivamente operativo.

Hoy en día dispone el grupo de los equipos técnicos aptos para operar en pocas profundidades, aplicando tanto los métodos estándar - tales como para la sísmica de refracción, para los sondeos y calicateos de resistencia eléctrica o para las mediciones magnetométricas - como las técnicas especiales y poco comunes o no conocidos en los procedimientos de investigación estándar, tales como el calicateo por medio de ondas electromagnéticas, la ultrasonografía o las mediciones geoacústicas. Hasta la fecha, el grupo geofísico de GEOTest ha llevado a cabo como 280 trabajos investigativos y de auscultación, cuyo muy amplio surtido de problemas y métodos de solución abarca la más diversa índole de solicitudes desde las simples de estudio y análisis de la corrosión, hasta las grandes obras investigativas, relacionadas por ejemplo con las centrales hidroeléctricas de acumulación.

En el pasado se destinaba la mayor parte de los trabajos a la ingeniería geológica. De los de importancia podemos mencionar las investigaciones para las plantas eléctricas hidroacumuladoras (Dalešice, Čierny Váh, Hrhov, Malá Vieska etc.), para las presas (Slezská Harta, Josefův Důl, Mohelno, Orava etc.), y los análisis de las deformaciones de taludes (Třinec, Turany, Harvelka, Handlová, Fintice etc.). No obstante, durante los años recién pasados iba cambiando la orientación de las actividades desarrolladas por el Grupo Geofísico, enfocándose no sólo hacia las cuestiones específicas, sino también a la entera esfera de la problemática de auscultación de las capas de poca profundidad. En la actualidad la mayor atención se presta al empleo de los métodos geofísicos en la hidrogeología y en todo el conjunto de problemas que se consideran importantes desde el punto de vista de la protección del medio ambiente.

Pero no sólo la investigación o auscultación es el dominio del Grupo Geofísico, dado que sus miembros participaron también en las soluciones de 50 tareas de carácter científico - prospectivo, han publicado como 120 artículos y estudios en las revistas profesionales o en forma de ponencias dentro del marco de diversas conferencias o en congresos, han realizado trabajos geofísicos en varios países - p.ej. las mediciones geofísicas en Usbekistán, Perú y Alemania, o los complejos trabajos geofísicos en Cuba y en España.

Nuestro Grupo Geofísico está dispuesto para satisfacer los deseos de los clientes, ofreciéndoles:

- las completas reinterpretaciones de los trabajos geofísicos hechos en el pasado, - las interpretaciones de las mediciones geofísicas (sea efectuadas por nosotros, sea por otras entidades)
- realización de las medidas geofísicas en el terreno de interés,
- elaboración de los proyectos de los trabajos geofísicos,
- demostraciones de las aplicaciones de resultados de las mediciones geofísicas para distintos fines,
- las discusiones sobre las teóricas bases de los métodos geofísicos.

A continuación presentamos algunos de nuestros resultados, introduciendo primero los ejemplos de labores que forman objeto de especialización de nuestro grupo. En segundo lugar ofrecemos algunas de nuestras soluciones

de los corrientes problemas geológicos y al fin incorporamos algunas muestras de los métodos de penetración dinámica y de las mediciones de la sismicidad inducida - labores realizadas por nuestro colaborador el Instituto de Geónica de Academia de Ciencias de la República Checa (Ústav geoniky AVČR).

Lista de contenido de los referidos ejemplos a continuación relatados, en relación con las respectivas actividades:

- Las Cimentaciones
- Contaminación térmica de macizos rocosos
- Protección contra corrosión
- Deformaciones de taludes
- Documentación de obras de investigación directa
- Extensometría
- Método geoacústico
- Geofísica para túneles
- Las investigaciones hidrogeológicas
- Investigaciones superficiales para pequeñas escalas
- Marcas magnéticas
- Geofísica en la minería
- Obras lineales
- Pruebas dinámicas de penetración
- Protección de aguas subterráneas
- Remote sensing
- Sitios de las futuras presas
- Tomografía sísmica
- Mediciones ultrasónicas
- Vertederos

Esperamos con gozo la oportunidad de poder cooperar con Uds.,

RNDr. Pavel Bláha, Prof. Agreg., DrSc.

# **EJEMPLOS DE LA UTILIZACIÓN DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EN DISTINTOS TIPOS DE OBRA.**

## **LAS CIMENTACIONES**

Con ayuda de las investigaciones geofísicas es posible adquirir las informaciones de suma importancia incluso en las industrias que aún en la época reciente no han aplicado similares técnicas. Uno de los ejemplos concretos es la investigación geofísica para las cimentaciones de las obras y construcciones pequeñas, mientras que para las obras grandes - p.ej. presas - forman objeto de las investigaciones geofísicas ya desde hace mucho tiempo.

Es natural que en el caso de las obras pequeñas, siempre los recursos financieros, destinados para las investigaciones ingenierogeológicas son limitados y precisamente, por ésta razón, son tan útiles las técnicas por nosotros propuestas, dado que los apropiados métodos geofísicos pueden aportar muchas nociones y experiencias valiosas, brindando con relativamente bajo volumen de inversiones el relativamente grande volumen de informaciones que servirán de buena contribución en el proceso de proponer un óptimo proyecto de cimentación.

Nuestra Sociedad ofrece su cooperación en las siguientes esferas de la actividad:

- Discusiones sobre las bases teóricas de las tecnologías a emplear
- Discusiones sobre las posibilidades y perspectivas de su empleo
- Aseguramiento de las labores de medición en el terreno de interés
- Evaluación de las medidas de campo incluyendo la representación gráfica de los resultados.

Buenos resultados se logran sobre todo en aquellos casos, cuando las técnicas geofísicas se apliquen combinadas con alguno de los simples métodos geotécnicos.

A continuación presentamos un ejemplo de nuestro trabajo, resumiendo las labores de la investigación destinada para la aligerada sala de producción de postes de tendido eléctrico de alta tensión en el Madrid. Fue empleada la técnica combinada del sondeo eléctrico vertical y la penetración dinámica. La situación de los puntos de SEV individuales se representa en la parte izquierda del pie de la figura. Según los resultados del SEV se hace patente que se ha logrado identificar tres estratos de diversas propiedades físicas. Partiéndose de los análisis de analogías y tomándose en consideración los resultados de un sondeo por penetración dinámica, fue posible atribuir a dichas propiedades el concepto geológico. Los resultados de la penetración indican que la predominante parte de la segunda capa - la de suelos limosos - es de consistencia media. Los resultados del SEV comprueban que dicha capa no presenta un espesor constante debajo de la sala proyectada y que se producen cambios en ella. Puesto que se conoce la existencia de los sedimentos limosos de mayores espesores, hallados en la zona en cuestión, decidió el proyectista que nuestros resultados se verificaran por medio de una sonda. Esta sonda se situó en el puesto del SEV 3. La medición de la profundidad de las gravas terrosas (o sea, el espesor de los suelos limosos) dio resultado mayor de 0,4 m en comparación con el obtenido por medio de los métodos geofísicos, lo que sin duda y unequivocamente significa un resultado muy bueno.

Atendida la realidad de disponerse generalmente de finanzas muy limitadas en los casos de las investigaciones ingenierogeológicas efectuadas para las construcciones y obras poco extensas, relativamente rara vez se emplean los métodos geofísicos en estas esferas de la actividad. No obstante, nuestra sinopsis recién relatada comprueba que incluso en tales circunstancias es posible, a través de combinar de manera apropiada las simples técnicas geofísicas y geotécnicas, lograr los resultados muy buenos y propiciar la mayor efectividad de las labores investigativas.

## **CONTAMINACIÓN TÉRMICA DE MACIZOS ROCOSOS**

Sobre los diferentes tipos de la contaminación del macizo rocoso ya se habla muchos años. En la mayoría de los casos comprendemos bajo este término la contaminación por varias sustancias químicas, muy raramente denominamos como la contaminación los cambios del campo físico. La presencia de los radionuclidos naturales y la carga del medio ambiente consecuente debido a la existencia de los productos de su descomposición es la única excepción. Nuestra sociedad comprobó la existencia de la contaminación térmica del macizo rocoso, la cual suele ser unida con otros tipos de las contaminaciones del medio ambiente.

La colaboración con nuestra sociedad consiste en :

- La discusión sobre las causas básicas de la contaminación térmica y sobre las posibilidades del aprovechamiento de éste fenómeno
- Elaboración del programa, realización y evaluación de las mediciones de campo

La contaminación térmica se conoce ante todo en las zonas de la extracción de carbón: los problemas presentan la combustión de vaciaderos del material estéril. Otro tipo de la contaminación térmica es la combustión ó la oxidación de los materiales extraídos en las proximidades de minas.

Otro tipo posible de la contaminación térmica está relacionado con el cambio en la distribución de las temperaturas de los estrados superficiales. En los ejemplos siguientes mostraremos que se trata de los cambios de las temperaturas en las profundidades mayores que son las de variaciones periódicas de la temperatura. Los valores anómalos determinados en la distribución del campo térmico son sorprendentes.

Primer ejemplo proviene de la Bohemia central. El aumento de las temperaturas es expresivo comparándolo con los valores corrientes del campo térmico. El ascenso de la temperatura en el año 1983 llegó a ser más que 40C. Después de dos años la temperatura empezó a bajar y en el año 1995 el ascenso fue sólo de 2<sup>0</sup>C. Teniendo en cuenta que en la localidad no sucedieron los escapes del agua caliente de la fábrika química hacia el subsuelo, es imprescindible buscar el origen de la subida de las temperaturas o en la contaminación de aguas subterráneas. El aumento de la temperatura se debe al efecto de la disolución de materias químicas (el calor de disolución) o al cambio de la concentración o a las reacciones exotérmicas entre los componentes contaminantes. En la localidad bajó la contaminación del agua subterránea en el cuaternario entre los años de 1983 y 1995 y de manera correspondiente bajó también la temperatura. Es interesante que prácticamente no cambiaron las temperaturas del agua subterránea en la base rocosa cristalina de pegueña permeabilidad. Es probable que la reducción de la contaminación en el cuaternario es demasiado pegueña para que produjera también el descenso de la temperatura en la base rocosa.

Otro ejemplo que demuestra la subida extrema de la temperatura proviene del Usbekistan. La temperatura del agua subterránea llegó a más de 60<sup>0</sup>C. En este caso la subida sucedió en el macizo rocoso en las proximidades de una estación del metro. Después de analizar los cambios de la temperatura llegamos a la conclusión de que la contaminación térmica desapareció en las profundidades de unos 50 – 60 m, dónde hallamos las temperaturas corrientes y correspondientes a los valores naturales. Otra campaña descubrió que el aumento de temperatura se debió a los escapes del agua caliente. Después de haber eliminados los escapes (en el otoño de 1998) la temperatura bajó a unos 44<sup>0</sup>C (25/2/1999).

Tercer ejemplo es de Moraria del Norte. En este caso se puede observar el ascenso de la temperatura de hasta 6<sup>0</sup>C y en las profundidades mayores de 55 m. Aquí se trata de la contaminación del subsuelo por debajo de un gran complejo químico. Las mediciones repetidas confirmaron los resultados originales. La determinación de la contaminación del agua subterránea no se realizó por los escalones respecto a la profundidad y por eso es imposible determinar las relaciones entre la contaminación y la temperatura.

Último ejemplo pertenece a Bohemia oriental. Las líneas tinas en la figura No. 4 demuestran el aumento de la temperatura en las perforaciones medidas. Se nota, que el aumento en 45 puntos medidos difiere y la diferencia son 3 – 11<sup>0</sup> C en comparación con la temperatura normal. Entre las perforaciones medidas es posible discernir un grupo de las mismas, dónde el aumento de las temperaturas es más evidente (la zona A). La zona no corresponde a la ubicación de las calas y depende probablemente del contenido de los contaminantes en ellas. En la figura es posible observar otra circunstancia interesante. La es primeramente la subida de la temperatura y luego su disminución sucesiva. Así aparece una forma característica de anomalías, la que es evidente también en las curvas de la temperatura promedio.

Hasta el momento no conocemos la razón del fenómeno y solamente podemos suponer que el aumento de temperaturas está relacionado con la contaminación y con los procesos que suceden dentro del medio contaminado. Debemos constatar que nos hallamos en los principios de las investigaciones, ya que desconocemos las razones que llevan al aumento de la temperatura. En segundo plano queda la pregunta si no fuese ventajoso aprovecharse de este calor, por ejemplo practicando las bombas térmicas.

## **PROTECCIÓN CONTRA CORROSIÓN**

Los métodos de investigación orientada hacia la protección contra corrosión analizan la agresividad del ambiente de roca. La protección propiamente dicha se clasifica según los sistemas que difieren en dependencia

de las normas, vigentes en cada el país respectivo (ISO, DIN etc.). Por ejemplo, la escala checa comprende cuatro grados de protección anticorrosiva. La clasificación se realiza por medio del : calicateo de resistencia según Wenner.

Forman objeto de nuestros estudios también las corrientes continuas vagabundas, cuyos valores y sentidos de fluir son unos de los factores determinantes de la clasificación arriba mencionada. En dependencia de los resultados por las mediciones obtenidos y contrastados con las respectivas normas, se procede a proponer el adecuado grado de protección.

Nuestra Sociedad brinda la cooperación y asistencia técnica en las esferas de consultas sobre las bases teóricas de las tecnologías y sobre su óptimo empleo o puesta en práctica de las mediciones en el terreno en cuestión

I evaluaciones de las mediciones y la representación gráfica de los resultados.

Ambos métodos - la determinación del grado de agresividad del ambiente de roca y la identificación de las cc parásitas - son empleables tanto para las obras lineales como para investigar el área de obra de construcción. La fig. 1 representa algunos resuP.tados de la investigación hecha para el acueducto en la proximidad de la

localidad Židlochovice. En la parte superior del croquis hay valores de la específica corriente aparente, corregidos con el índice de efecto de la época de a o. Más abajo está representada la distribución de los individuales grados de agresividad del ambiente de roca según la norma checa CSN o la norma ISO.

La fig.2 es un ejemplo de estudios de agresividad de suelo en el área destinada para la planta de preparación de carbones en la proximidad de la mina ČSA en Karviná. La agresividad ambiental fue medida en la red de perfiles; los resultados fueron resumidos en forma del mapa de isolíneas de los determinados valores de agresividad ambiental.

La fig. 3 representa los resultantes valores y sentidos de las cc parásitas que se estudiaron en la localidad de Letovice en relación con el trazado para gaseoducto. La flecha (punto No. 3) indica el sentido y la magnitud de las corrientes parásitas.

Aunque breve, este cuadro sinóptico comprueba las ventajas de las mediciones geofísicas para clasificar y proponer las efectivas medidas a tomar para proteger las estructuras metálicas contra la agresividad ambiental de la roca. Las figuras evidencian que los métodos arriba relatados sirven de buena base para establecer la conveniente y adecuada protección no sólo en caso de la obras lineales, sino también para las construcciones de cimentación directa.

## **DEFORMACIONES DE LAS TALUDES**

Tareas básicas de geofísica para resolver junto con el ingeniero-geólogo problemas relacionadas con las deformaciones de las taludes, son las siguientes :

- Delimitar el perímetro de la deformación de talud
- Identificar las profundidades de los planos y zonas de deslizamiento
- Determinar índole y grado de hallarse alterado el macizo rocoso vinculado con la deformación y con las zonas de deslizamiento
- Evaluar el desarrollo de la deformación contra el tiempo.

Para determinar la superficie de las deformaciones sirven los métodos de calicateo geofísico que permiten delimitar tanto la deformación de la talud propiamente dicha, como aquella parte de la pendiente donde la alteración todavía no se puede detectar por simple vista. Dichos métodos también hacen factible la descripción de la zona con el cambiado campo tensional detrás del borde de desprendimiento de la deformación de la talud.

Otra y no menos importante tarea de la técnica geofísica es la de identificar las profundidades de planos y zonas de deslizamiento, para lo cual se emplean los métodos geofísicos de sondeo, aplicándose con mayor frecuencia el sondeo eléctrico vertical y la sísmica de refracción superficial. En algunos casos aporta muy buenos resultados la gravimetría y puede ofrecerlos también la sísmica de reflexión, ante todo en las deformaciones en forma de bloque. En las etapas de las investigaciones ya desarrolladas o avanzadas, es decir, hecha la prospección por perforación, dan buenos resultados las testificaciones de las sondas, especialmente las acústicas y densimétricas.

Determinar el carácter de trastornos que se hallan en el macizo rocoso relativo a las deformaciones de talud, es posible de los resultados de mediciones superficiales por una parte y por otra parte de las mediciones de testificación, más ventajosas y más efectivas en comparación con las superficiales, dado que las testificaciones ofrecen una imagen sobre las ocurrencias en el interior del macizo en cuestión y que, además, se dispone de varios métodos para aplicar.

La última tarea arriba relatada, o sea, la evaluación del desarrollo de corrimiento en función del tiempo, se resuelve mayormente por la inclinometría precisa y la geoacústica, complementándose dichos métodos algunas veces por los procedimientos superficiales de calicatero. Satisfactorio es también el método de reiteradas mediciones de testificación de corriente uso.

El ejemplo siguiente demuestra la complejidad del conjunto de mediciones - tanto desde el punto de vista de la metodología como del de los fines y efectos - y proviene de los procedimientos realizados en la deformación de talud Trinec. La profundidad de las zonas de deslizamiento fue determinada por haberse combinado el sondeo eléctrico vertical con la sísmica de refracción superficial. Los análisis perimétricos de la superficie de deslizamiento se llevaron a cabo por medio del calicatero simétrico de resistencia con dos rangos de intervalo entre electrodos.

Los resultados de mediciones geofísicas posibilitaron evaluar la estructura geológica tanto en la zona inalterada detrás del borde de desprendimiento como en el recinto de la deformación de talud, identificándose dos pisos de la misma, de los cuales el superior podemos caracterizar como deslizamientos que a lugares tienden a presentarse en forma de corrimientos, mientras que el piso inferior se halla sometido al deslizamiento de muy baja velocidad que a lugares adquiere rasgos de reptación.

En lo que concierne al eventual saneamiento o a la regeneración del terreno, desempeñan el rol esencial las desfavorables circunstancias, derivadas del hecho de alcanzar el piso inferior de la deformación hasta el lecho del río Olše. Con el saneamiento no se lograría más que el efecto de proteger la orilla cóncava contra las erosiones posteriores. Sin embargo, tal solución carece de fundamento, porque los movimientos de talud sin duda destruirán los resultados de las medidas tomadas al respecto.

Podemos hacer constar que los métodos geofísicos aportan las informaciones esenciales sobre las deformaciones de talud, brindando no sólo las descripciones geométricas, sino también las importantes indicaciones de la naturaleza de trastornos en el macizo rocoso producidos o del desarrollo de deformaciones en función del tiempo. Merece subrayar también el aspecto financiero; es que las tecnologías geofísicas son más económicas en contraste con los métodos tradicionales de investigar las deformaciones.

## **DOCUMENTACION DE OBRAS DE LA INVESTIGACIÓN DIRECTA**

Las obras de investigación directa, y en especial las galerías, representan uno de los elementos más costosos dentro del marco de las investigaciones geológicas, en virtud de lo cual es muy importante acopiar el volumen máximo posible de datos y nociones. Además de los métodos convencionales y bien conocidos (documentación geológica, ensayos de mecánica de rocas), entra en la práctica también la documentación geofísica.

La documentación geofísica de las obras de investigación directa tiene por tarea en primer lugar facilitar un reconocimiento más detallado del macizo rocoso. Partiéndose de tal fundamento es posible con racionalidad localizar los lugares más convenientes para los subsiguientes ensayos de diverso tipo. Es muy voluminoso el número de métodos utilizados en la documentación geofísica. Las mediciones se realizan en la solera o en las paredes de galerías, aprovechándose, en su caso, las cortas sondas hechas en la galería.

Desde el punto de vista de la documentación geofísica de galerías y calicatas podemos desglosar las tareas principales de geofísica como sigue:

- Especificar las condiciones geológicas alrededor de la galería o calicata
- Dividir el macizo rocoso en bloques casi homogéneos
- Identificar los puntos debilitados del macizo
- Determinar lugares que se consideren por útiles para las investigaciones posteriores, incluyendo los puestos de los ensayos especiales.

Ofrecemos la cooperación en las siguientes esferas de actividad:

- Discusiones sobre las bases teóricas de los métodos empleados
- Discusiones sobre las posibilidades de la documentación geofísica
- Realización de las mediciones en el terreno de interés
- Evaluación de la documentación geofísica incluyendo la representación gráfica de los resultados.

A continuación presentamos ejemplo de documentación de la galería Tereza en la localidad Malá Vieska en Eslovaquia. Por el medio de la documentación geológica fue delimitado solamente un bloque de dolomitas (a la

profundidad de 210 m) y un bloque de calizas (la parte restante de la galería). A través de la documentación geofísica fueron determinados todavía tres bloques fundamentales más: A (0 - 115 m), B (115 - 210 m) y C (de 210 m al extremo de la galería). Del análisis, efectuado de todos los valores medidos, fue posible determinar los sub-bloques parciales. De esta manera se seleccionaron los puestos, convenientes para los ensayos geotécnicos a hacer y luego, mediante las computaciones, inferir de las mediciones geofísicas otros parámetros derivados (coeficiente de Poisson, módulos de elasticidad etc.).

Las mediciones geofísicas, realizadas en las galerías y calicatas, ofrecen los datos muy útiles para la investigación geológica. Su primordial importancia estriba en la perfectibilidad de adquirir más conocimientos sobre el macizo rocoso, y asimismo en la posibilidad de distribuir de manera óptima y proporcional las labores a realizar en estas obras directas. No vaca de interés el copioso número de los datos de otra manera inasequibles - en este caso concreto se trata especialmente de los de distribución de la tensión mecánica o algunos datos de las propiedades mecánicas de rocas y de macizo rocoso.

## EXTENSOMETRÍA

Extenzometría es uno de los métodos fundamentales de observación en geotécnica, ante todo durante las observaciones del desarrollo de las deformaciones de taludes. Ya que nuestro grupo de geofísica dedica un gran esfuerzo a las observaciones y a los estudios de deslizamientos, incorporamos dentro de la gama de métodos utilizados también las mediciones de extenzometría.

Extenzometría se basa en las observaciones de los cambios de la distancia entre los puntos estabilizados mediante la cinta métrica. Para alcanzar la puntualidad deseada la cinta métrica debe extenderse por la fuerza constante. La lectura básica con la puntualidad de 0,01 m se obtiene por la cinta métrica y la lectura complementaria, la que garantiza la puntualidad necesaria; se realiza mediante un pie de rey. Ambos dispositivos forman un conjunto, el que garantiza la puntualidad de las mediciones a los 0,05 milímetros. Los puntos de referencia deben estar perfectamente estabilizados. Por esta razón el propio punto está anclado dentro de la perforación corta horizontal. La boca de la perforación está cementada y lleva una camisa la que protege el punto de referencia.

Para obtener la puntualidad requerida de la medición es imprescindible eliminar la influencia de la temperatura como la causa de las variaciones de la longitud de la cinta métrica. Sin las correcciones térmicas es imposible llegar a los resultados requeridos. Otra condición indispensable es la fuerza constante para extender la cinta. En nuestro caso la fuerza equivale a los 200 N. Además consideramos las correcciones de la deformación constante de la cinta, las que determinamos por las mediciones en la base contrastadora.

Nuestra sociedad ofrece la colaboración en las siguientes áreas:

- discusiones sobre las bases teóricas del método,
- discusiones sobre las posibilidades de las aplicaciones del método,
- realización de las mediciones en el campo,
- evaluación de las mediciones incluso la presentación gráfica de los resultados obtenidos.

En las figuras presentamos los ejemplos de la aplicación del método de extenzometría en las observaciones de deslizamientos. Primer ejemplo demuestra las observaciones del deslizamiento en la ciudad de Orlová en Moravia, el que se formó después de las precipitaciones catastróficas en el verano de 1997. El movimiento del deslizamiento, que amenazaba las estructuras civiles y el cable de alta tensión, se observaba diariamente más veces. El sistema de las mediciones se instaló después de los primeros movimiento notables en la primera década de julio. Después de tener instalado el sistema el movimiento se midió diariamente. En el día 21 de julio se comprobó otro movimiento considerable del deslizamiento. Después de haber aplicado las medidas técnicas simples se logró moderar el movimiento del deslizamiento y así obtener el período necesario para la ejecución de las investigaciones ingenierogeológicas del deslizamiento y el saneamiento sucesivo.

Otro ejemplo pertenece a la deformación de la talud en el pueblo de Karolinka en Moravia. Las mediciones de extenzometría demostraron el comportamiento complejo del deslizamiento. Se nota que durante el período largo pasan los movimientos de oscilación en la zona de desprendimiento del deslizamiento (véase la curva roja). En el gráfico se presentan las relaciones mutuas entre los movimientos, la temperatura, las precipitaciones y la salida de agua de la perforación próxima. Se nota que durante el período entre los meses de marzo y de julio la distancia medida se disminuye, mientras que en el período entre los meses de octubre y de diciembre se extiende. Pues las curvas presentan el carácter contrario al mismo supuesto y basado en el desarrollo de las temperaturas. Cuando los movimientos dependen de los cambios de la temperatura, detenía la distancia

extenderse en el verano, pero lo que sucede es, que la misma se disminuye. Pues es necesario buscar otros factores, los que causan los cambios del volumen de los escombros.

Otro factor, que pueda inferir en los procesos dentro de los estuados de cobertura en la cima de la cresta, es la humedad del material rocoso. De la comparación de las curvas del movimiento entre los puntos medidos y de la salida del agua de la cala próxima es evidente, que no existe la relación simple entre el movimiento y la cantidad de agua saliente. Tampoco existe una relación unívoca entre otros factores observados. Las relaciones existentes entre los factores estudiados son muy complejas y su definición verosímil contará mucho esfuerzo.

## MÉTODO GEOACÚSTICO

El método geoacústico representa una especial índole de las labores sísmicas. Su principio consiste en detectar las naturales ondulaciones elásticas. Nuestra experiencia con los métodos geoacústicos cuenta más que 20 años, durante los cuales la hemos aplicado en la República Checa, asimismo como en los países extranjeros - en Alemania, Perú, Eslovaquia y Usbekistán.

Las mediciones geoacústicas detectan ante todo las ondulaciones elásticas provocadas por los trastornos, originados en curso de ocurrir trastornos en el macizo rocoso. En este sentido, la predominante parte de nuestras labores se orienta hacia los estudios de las deformaciones de taludes. Otro amplio marco de posibilidades para aplicar el método lo ofrecen los estudios de asentamiento, las deformaciones del macizo rocoso en los alrededores de las obras mineras, las corrientes de aguas subterráneas en los fisurales colectores acuíferos, y sirve asimismo p.ej. para estudiar las transformaciones de tensiones en el macizo rocoso, etc.

En los análisis, relacionados con las deformaciones de talud, es posible determinar las profundidades de los planos de cortante o las zonas de deslizamiento, observar el transcurso de desarrollarse en tiempo y en espacio la actividad de la deformación etc. El método geoacústico nos avisa sobre un elevado esfuerzo del macizo rocoso antes que pudieran obtenerse informaciones similares a través de los precisos procedimientos inclinométricos; nuestras experiencias comprueban que a veces los racionales indicios anticipan los resultados obtenidos por las técnicas convencionales, difiriendo en períodos de tiempo comprendido entre varios meses a dos años.

Para llevar a cabo las medidas geoacústicas es necesario proveer las sondas de un especial tipo de entubaciones, con camisas no metálicas y con la impermeable columna de entubado.

Nuestra empresa ofrece cooperación en las siguientes esferas:

- Discusiones sobre las bases teóricas del método
- Discusiones sobre las posibilidades del empleo del método
- Ayuda relacionada con el equipamiento de aparatos e instrumentación
- Aseguramiento de las mediciones de campo
- Evaluaciones de las medidas geoacústicas inclusive de la representación gráfica de los planos de deslizamiento.

El primer ejemplo que a continuación presentamos abarca los resultados de las medidas geoacústicas, realizadas en la sonda JS25A (fig. No.1) en el deslizamiento Harvelka en Eslovaquia. La zona de corrimiento se compone de dos estrechas franjas de deslizamiento (de dos planos de cortante), sobrepuestas estrechamente afines, lo que, no obstante, en este caso no tiene alguna considerable importancia, dado que las resultantes determinaciones de la profundidad del plano cortante (resp. de la base de la zona de deslizamiento) presentan las desviaciones que no llegan a 1 m.

El segundo ejemplo - de las mediciones geoacústicas realizadas en el deslizamiento Oravský Podzámok – Eslovaquia, documenta el carácter estacional de las emisiones acústicas (fig. No. 2), o sea, el comportamiento en dependencia de las diversas estaciones del año. Durante la época de invierno permanecen estables ambos pisos que forman la deformación de la talud. Durante la primavera época del deshielo sufre unas significantes alteraciones el piso superior, teniendo esos trastornos su reflejo en un alto valor de la amplitud relativa que alcanza las profundidades de hasta 15 m. Por el movimiento ladero se hallan influidos los suelos arcillosos, situados encima del antiguo depósito del río Orava. Menos (más o menos 6 veces) se desarrolla la actividad del piso inferior, obrando sobre la inferior parte de los suelos limosos y ante todo sobre la capa de arcillitas parcialmente intemperizadas. En este orden de cosas merece subrayar que precisamente el piso inferior de la deformación de la talud suele pasar inobservado por los ingenieros geólogos - hecho que mayormente se debe a la característica reptación del desplazamiento (Creep). La identificación y documentación de su existencia comprueba las considerables ventajas y buenos resultados que brindan los métodos geoacústicos.

En la tercera figura se comparan las mediciones geoacústicas con las velocidades de ondas sísmicas que fueron analizadas por radiografía. De las curvas, que documentan las velocidades sísmicas y las frecuencias geoacústicas, es posible resumir que: el piso superior alcanza la profundidad de siete metros, presentando la actividad geoacústica en su pleno volumen; la ondulación sísmica se propaga con velocidades menores de 1.6 km/s; el piso inferior de la deformación de pendiente presenta la actividad geoacústica solamente en la zona de deslizamiento.

El método geoacústico sirve no sólo para detectar trastornos que ocurren en el macizo rocoso. También el flujo del agua subterránea que corre, por ejemplo, en las fisuras, da impulso a las emisiones geoacústicas, como lo demuestra la fig. 4, que representa las medidas efectuadas en un talud (cuya pendiente tiene carácter no deslizante) situado en la orilla del embalse Lipno. Las individuales anomalías geoacústicas reflejan las fisuras y grietas, sobre las cuales corrió el agua subterránea durante el período de medir. Las micropartículas arrastradas, de dimensiones que fluctúan dentro del marco comprendido entre unos y decenas de micrones, engendran las emisiones acústicas por chocar con el esqueleto de la roca.

## GEOFÍSICA PARA LOS TÚNELES

Los métodos geofísicos aplicados durante las investigaciones para los túneles se aprovechan en los últimos años de modo corriente. Según nuestra opinión sigue persistiendo cierta desconfianza en la aplicación de la geofísica ante todo por el porte de los profesionales en las sociedades que se dedican más bien a la explotación de los túneles. Pero durante de la construcción de túneles se puede utilizar muy efectivamente una gama muy amplia de los métodos geofísicos. También el conjunto de los problemas a resolver por geofísica es muy extenso.

La colaboración con nuestra Sociedad es posible en los siguientes aspectos:

- discusiones sobre las bases teóricas de los métodos convenientes
- discusiones sobre las posibilidades de sus aplicaciones
- realización de las mediciones en el campo
- evaluación de las mediciones incluso la presentación gráfica de los resultados obtenidos.

En el ejemplo adjunto mostramos el uso no corriente de los métodos geofísicos en la documentación de la excavación del túnel. La documentación aprovecha no solamente los métodos clásicos geológicos y geotécnicos sino también las mediciones geofísicas. Por varios razones la aplicación de geofísica se limitó en el registro de la susceptibilidad magnética, de la radiación radioactiva y de las velocidades de ondas elásticas.

En la figura demostramos el registro continuo de las velocidades de propagación de ondas longitudinales y transversales en la galería dentro de las rocas graníticas. La distancia mutua entre los geófonos utilizados en la solera de la galería era de 1 metro. Las mediciones de la susceptibilidad y los de la potencia de la radiación gama complementaron las mediciones anteriormente mencionadas. Basándonos en las velocidades medidas determinamos los bloques geotécnicos. Para cada punto de medición calculamos los valores del número de Poisson, del módulo de elasticidad de Young  $E_d$ , del módulo de elasticidad volumétrica  $K_v$  y del módulo de elasticidad en cizallamiento de  $G$ . Sucesivamente determinamos los valores de parámetros mencionados en cada bloque definido. En la evaluación estadística es evidente el empeoramiento de las propiedades geotécnicas a partir del bloque A hacia el bloque D. Las relaciones son simples salvo las entre las propiedades geotécnicas y de la potencia de la radiación gama y de la susceptibilidad magnética, ante todo en los bloques muy alterados D1 y D2 casi superficiales.

A pesar de que los labores son difíciles y costosos, el geotécnico puede obtener las informaciones verosímiles sobre el estado del macizo rocoso en la proximidad del túnel en la base de los resultados de mediciones sísmicas y de otros de geofísica. Apoyándose en los resultados obtenidos es posible dividir el macizo rocoso en los bloques casi homogéneos y así ubicar con ventaja otras pruebas de campo geotécnicas.

Al geotécnico no lo interesan generalmente los valores dinámicos de los módulos, sino pide ante todo los módulos de la deformación  $E_0$ . En la práctica sucede con frecuencia, que para transponer los módulos dinámicos suelen aplicarse las relaciones experimentales comunes, presentadas en varias monografías (p. e. Savic et all., 1969). Recomendamos enérgicamente no recurrir a este procedimiento. Las relaciones entre los módulos dinámicos, los estáticos y los de deformación oscilan en la extensión muy amplia. Se sabe, que mientras tanto  $E_0$  en comparación con  $E_d$  es del orden más bajo en el caso de las rocas sanas, la diferencia aumenta en caso de las rocas alteradas y llega a dos ordenes. El descenso es todavía más notable en el caso de los suelos. Por eso es posible aplicar los recálculos entre diferentes tipos de módulos solamente después de realizar con esmero el estudio de correlaciones empleando las mismas muestras o midiendo en el mismo lugar del macizo rocoso estudiado.

## **LAS INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS**

Las actividades que la geofísica tiene por tarea dentro de las investigaciones hidrogeológicas las podemos desglosar como sigue:

- Auscultación de las condiciones geológicas en los amplios alrededores del terreno en cuestión
- Prospección de la seleccionada zona de interés
- Análisis de la estructura hidrogeológica y determinación del modelo geofísico de la misma
- Identificación de las correlaciones existentes entre los parámetros hidrogeológicos y las propiedades físicas de las rocas
- Verificación de las posibilidades de determinar los niveles del agua subterránea por el medio de los métodos geofísicos.

Dentro del marco de lo recién mencionado ofrece nuestra sociedad su cooperación en relación con :

- las discusiones sobre las bases teóricas de los apropiados métodos
- las discusiones sobre las posibles esferas de la aplicación
- el aseguramiento de las mediciones en los terrenos de interés
- la evaluación de las mediciones de campo incluyendo la representación gráfica de los resultados.

A continuación se ofrecen los resultados de las mediciones realizadas en la localidad Markvartovice, concretamente de la zona situada en la Cuenca de Ostrava en Moravia. Los sedimentos glaciogénicos - el importante recurso acuífero de agua potable para la región entera - descansan sobre los sedimentos arcillosos de neógeno. Fue comprobado por la técnica geoelectrica de mediciones paramétricas efectuadas en las sondas antecedentes que la línea, que separa las arenas y gravas cuaternarias de las subyacentes arcillas de neógeno, se manifiesta de manera destacada en las curvas del electrosondeo vertical (ver los resultados de las medidas paramétricas en la sonda V3). En las sondas fue consecutivamente analizada la correlación entre la resistencia específica y los rendimientos de las sondas, cuyos caudales fueron determinados a través de los ensayos de aforo.

En una parte del perfil analizado por la medición se hace notar que las mediciones geofísicas son capaces no sólo identificar los límites definidos entre el cuaternario y el neógeno, sino que hacen posible descubrir también las líneas divisorias en el interior del complejo de sedimentos glaciogénicos y, además de eso, es posible - con cierto grado de probabilidad - determinar el existente nivel del agua subterránea. Este nivel corresponde con la frontera límite geoelectrica situada en la mayor proximidad de la superficie, representada o por la línea divisoria entre los sedimentos terrosos y las arenas (p.ej. SEV82 ó SEV87) o por la línea que separa las arenas secas de las acuíferas (SEV84 y SEV85). Otra información muy importante y no asequible a través del mapeo geológico, es la posición del lecho glaciogénico, puesto que ésta no coincide con el actual valle del arroyo que atraviesa la zona de interés.

La investigación geofísica, realizada para los fines hidrogeológicos, es un ventajoso camino para adquirir una serie de conocimientos de enorme valor desde el punto de vista de la evaluación de la zona estudiada. Conocimientos, de los cuales muchas veces no se dispone debido al limitado marco de posibilidades de las investigaciones de común uso. La técnica mencionada aporta también ahorros económicos en comparación con los métodos que se emplean en las investigaciones por perforación convencionales. Otro progreso muy positivo estriba en que es posible situar de manera óptima las sondas, favoreciendo así todas las operaciones consecutivas, necesarias tanto para la subsiguiente investigación como para realizar los pozos y, por consecuencia, utilizar por las vías más racionales los recursos de las aguas subterráneas.

## **INVESTIGACIONES SUPERFICIALES PARA PEQUEÑAS ESCALAS**

En la geología aplicada surge a veces la necesidad de investigar las formaciones superficiales de la cobertura a las pequeñas profundidades. En contraste con la convencional ingeniería geológica, en tales casos es necesario reconocer dicha estructura geológica en una gran área, sin embargo, por otro lado no se necesita conocer con precisión la distribución de los estratos individuales en plano lineal, tratándose más bien de mapear los cortes

tipo, efectuados a través del terreno a investigar, lo que sin duda aporta mucha utilidad por ejemplo en los casos de:

- levantamiento y elaboración de los mapas ingenierogeológicos,
- levantamiento y elaboración de los mapas hidrogeológicos,
- los estudios relacionados con ecología.

Nuestra sociedad les ofrece la cooperación en las siguientes esferas:

- evaluaciones de las mediciones de campo incluyendo la representación gráfica de los resultados,
- discusiones sobre las bases teóricas de los métodos apropiados,
- discusiones sobre las posibilidades de emplear los métodos escogidos,
- aseguramiento de las mediciones en los terrenos de interés.

La primera demostración que presentamos es de los estudios relacionados con la protección del medio ambiente. Se trata de la explotación de gravas en el río Jarama en España, donde el objetivo de las mediciones geofísicas fue el de componer los cortes geológicos que atravesaran una zona de aprox. 60 km de longitud. Según el pedido del cliente, las distancias entre los perfiles individuales fueron más o menos de 3 km. Además, interesante para él fue exclusivamente el área que no distara más que 100 m de la orilla. Comparadas las mediciones paramétricas, realizadas en los alrededores de las sondas previamente conocidas, se decidió resolver la tarea solamente por medio del sondeo eléctrico vertical. La primera figura presenta el resultado obtenido en uno de los perfiles estudiados. La vertiente derecha del valle está formada por la estructura de calizas, las que afloran prácticamente de inmediato en la orilla del río. De los resultados del SEV resulta que las calizas se van hundiendo hacia por debajo de los sedimentos de menor edad que se hallan en la opuesta orilla del río. Desde el punto de vista del cliente fue esencial el hecho de que el curso del río Jarama no se vincula con la destacada falla tectónica y que las calizas no ocupan gran ángulo para descender por debajo de los sedimentos jóvenes. Como muy diferente se manifiesta la estructura geológica en la orilla izquierda, donde la primera acentuada capa está estructurada por gravas que con frecuencia afloran, siendo secas y presentando el alto grado de la resistividad (capa B). En algunas partes de la zona en cuestión hay gravas terrosas, con los valores de la resistividad más baja (capa A); a lugares tiende esta capa a adquirir carácter de limos terrosos acarreados por crecidas. La parte inferior de la potente capa de sedimentos cuaternarios la estructuran gravas acuíferas (capa C, event. la capa D - más arcillosa), encontrándose en su manto subyacente los sedimentos neógenos (capa G), con predominancia del material arcilloso, por consecuencia de lo cual las resultantes curvas del SEV adquieren un acentuado carácter de la "K".

Nuestro segundo ejemplo es del mapa ingenierogeológico de Frýdek-Místek en Moravia, escala 1:25000. En este caso fue necesario determinar mediante los métodos geofísicos la presencia de sedimentos glaciógenos en la zona de interés y establecer la naturaleza del subsuelo tipo flysch. También esta solución fue con el éxito lograda mediante el método de SEV, respondiendo de manera inequívoca a todas las preguntas pendientes. La primera capa estructuran las arcillas limosas loésicas, cuyos espesores varían (en la figura no aparecen los espesores menores de 1 m). En la mayor parte de perfil (entre los SEV79 y SEV88) se han documentado las gravas glaciógenas. En la parte derecha del perfil se hallan gravas desprendidas por denudación, formando la cobertura sólo los sedimentos de la talud. Fuera de la zona de los SEV88 y SEV86 estructuran el subsuelo predominantemente las arcillitas, no obstante, en los dos puntos mencionados del SEV se encuentran los sedimentos flysch con predominancia de areniscas.

Las mediciones geofísicas, aplicadas en el proceso de levantar los mapas geológicos de pequeñas escalas, pueden aportar muchos mejoramientos y dar pretexto a varios inventos, de los cuales el primer plano de importancia lo ocupa la formación de una serie tipo de cortes geológicos que atraviesan la zona de interés. No menos ventajoso aspecto de las mediciones geofísicas es el de descubrir incluso aquellos fenómenos geológicos que en la superficie quedarían inobservados en los comunes procedimientos de levantamiento geológico.

## MARCAS MAGNÉTICAS

El método de la marcación magnética se utiliza como medio de determinar grandes movimientos de las someras deformaciones de la talud. El método se funda en observar el movimiento de los imanes permanentes, introducidos en el cuerpo del deslizamiento.

Con mayor frecuencia se emplea dicha técnica en las deformaciones debidas a la solifluxión, cuando - en la mayor parte de los casos - los imanes permanentes se hacen penetrar a la profundidad de hasta 5 m. Los resultantes datos que identifican la situación del epicentro se obtienen con la precisión mejor de 10 cm. Con particular ventaja se emplea el método en aquellas circunstancias cuando un gran movimiento del macizo rocoso da origen a destrucciones de las sondas monitoras. La interpretación de las medidas se computa en las calculadoras categoría IBM/PC, partiéndose del efecto del dipolo magnético orientado en general.

Dentro del presente marco de actividades estamos dispuestos a cooperar en las siguientes esferas:

- Discusiones sobre las teóricas bases del método
- Discusiones sobre la gama de las posibles aplicaciones de dicho método
- Aseguramiento de las mediciones en el terreno de cuestión
- Evaluación de las medidas, con identificación del desplazamiento de los determinados puntos de la deformación de la talud.

La demostración de nuestra práctica se refiere al deslizamiento Třinec. El deslizamiento combinado de Třinec lleva en su parte superior un desprendido bloque de gravas aglomeradas en terrazas, y manifiesta el movimiento rotativo contra la pendiente. Dicha parte superior de la deformación funciona de "empuje" respecto a la parte superior del corrimiento, cuyo contenido lo forman los deslizamientos precedentes y las arcillitas, parcialmente erosionadas. Las figuras documentan que los vectores de desplazamiento de los puntos superficiales y de los imanes presentan líneas prácticamente paralelas en las profundidades de 1 a 2.65 m y los detallados estudios de los vectores comprueban que el corrimiento no procede de manera proporcional en relación con el tiempo ni tampoco con el espacio.

Mediante las marcas magnéticas es bien adquirible un correcto concepto de los movimientos que ocurren dentro de los rápidos corrimientos, excluyéndose, a la vez, el riesgo de errores o defectos del sistema de medida que pudieran deberse a la inobservancia o mal intento de las personas o que pudiesen surgir como consecuencia de las defectuosas camisas, alambres rotos, anclas etc.

## **GEOFÍSICA EN LA MINERÍA**

Las posibilidades del uso de geofísica en la minería son conocidas ya durante un largo período. Unos cuantos institutos científicos en nuestro país estudiaban las aplicaciones geofísicas en la rama. Las ventajas de algún procedimiento son conocidas suficientemente y muchos libros de textos, neografías y publicaciones se dedican a su descripción. Nuestro grupo no abarca el tema completo de las aplicaciones, solamente aprovechamos las posibilidades de la tomografía sísmica.

La colaboración con nuestra sociedad es posible en siguientes aspectos:

- ❖ posibilidades de la aplicación de la tomografía sísmica en la minería
- ❖ bases teóricas del método
- ❖ problemas del método y de la metodología de la aplicación de la tomografía sísmica en la minería
- ❖ realización de la radiación sísmica para la tomografía sísmica
- ❖ evaluación de la radiación sísmica usando las trayectorias curvas de rayos sísmicos

El ejemplo presentado muestra la aplicación de la tomografía sísmica para estudiar la distribución de las tensiones en la proximidad de una obra minera – de la galería excavada en el medio rocoso. La distribución de tensiones mecánicas es posible estudiarla ante todo en el campo de velocidades, en el de gravedad o en el de masas volumétricas. El ejemplo de la radiación sísmica, la que evaluada pro la tomografía facilita la creación de la hipótesis real acerca de las zonas de tensiones concentradas o de las zonas de “compactación” (valores elevados de los parámetros observados) o acerca de las zonas de descarga o de alteraciones elevados (valores reducidos).

La figura agregada muestra la elaboración tomográfica de la radiación sísmica entre una galería transversal y unas perforaciones en la mina del distrito minero de OKR. La radiación sísmica se realizó dos veces en el mismo puesto, antes y después de las voladuras. El campo de las velocidades primario antes de voladuras es muy articulado y las velocidades vagan entre los valores de 3.0 a 5.5 km/seg. Según el campo

de velocidades definimos las zonas más alteradas, las que comparamos con los resultados del carotaje radioactivo (Homola, 1997). Es posible concluir, que los resultados de ambos métodos geofísicos concuerdan bien. Las zonas determinadas de bajas velocidades corresponden a las de masas volumétricas reducidas.

Después de realizarse las voladuras de descarga examinamos otra vez el campo de velocidades. Los resultados presentamos cómo las isoclinas de diferencias en las velocidades antes y después de las voladuras. Así podemos evaluar los cambios sucedidos dentro del macizo. Las áreas azules muestran las zonas de velocidades reducidas, las rojas las zonas de velocidades elevadas. Los resultados de la tomografía sísmica comparamos con los resultados de pruebas geotécnicas de campo (Šňupárek et al., 1997). Las zonas de velocidades reducidas después de realizarse las voladuras corresponden bien a los lugares con el aumento del número de grietas y con la longitud total de grietas extendida por un metro de perforación.

El campo de diferencia de velocidades testifica otro tipo de alteración del macizo rocoso por las voladuras sin extracción en comparación con el mismo comúnmente supuesto. El efecto de voladura no se extiende simétricamente en los alrededores de la perforación, sino las mediciones geofísicas muestran, que la alteración del macizo se concentra ante todo entre la perforación de voladura y la galería transversal.

Además, el ejemplo muestra de manera evidente, que mientras tanto las pruebas de campo geotécnicas facilitan la evaluación de los cambios en el macizo rocoso solamente en los puntos de las pruebas, el campo de velocidades ofrece una hipótesis plana sobre estos cambios no solamente en las condiciones naturales, sino también después de la intervención técnica humana. Este proceso permite evaluar todos los cambios sucedidos en el macizo rocoso de manera más perfecta.

## **OBRAS LINEALES**

Las investigaciones geofísicas pueden servir de apoyo muy útil como la fuente de informaciones, importantes para las investigaciones ingenierogeológicas relacionadas con las obras lineales. Escala de tareas, donde geofísica contribuye al conocimiento detallado del trazado es muy amplia, desde los iniciales análisis del trazado de la obra, hasta las determinaciones de los parámetros geotécnicos, destinados para objetos individuales en la futura obra lineal.

Nuestra Sociedad ofrece la cooperación en los siguientes campos de actividades:

- Discusiones sobre las bases teóricas de los métodos empleables
- Discusiones sobre las posibilidades y perspectivas de dichos métodos
- Aseguramiento de las mediciones en el terreno de interés
- Evaluación de las mediciones de campo incluyendo la representación gráfica de los resultados.

A continuación demostramos ejemplos de tres tipos de nuestras labores. El primer caso (fig. 1) ilustra las investigaciones ingenierogeológicas de trazar la carretera que debería rodear el vaso del embalse en proceso de construcción en Karolinka. Por vía de combinar los métodos geoelectrónicos de calicateo y de sondeo fue posible identificar los fundamentales conjuntos casi homogéneos existentes en el macizo rocoso. La figura demuestra una fuerte fluctuación del espesor que presenta el deluvión en la pendiente, variando desde 1 m hasta los 10 m, los que alcanza en la proximidad del SEV 19. Por muy importante consideramos la delimitación del corrimiento torrente, identificado en los SEV 17 y SEV 18, que luego llegó a ser objetivo de estudios más detallados. En el macizo rocoso propiamente dicho se logró determinar espesores de los sedimentos de flysch parcialmente intemperizados. La resistividad del complejo intemperizado es considerablemente más baja que la resistividad de las rocas sanas.

El ejemplo de la fig. 2 es de las especiales mediciones, realizadas debajo del futuro puente en la línea de la autopista Brno - Vyškov. Con la ayuda de la testificación sísmica, efectuada a través de las ondas sísmicas longitudinales y transversales, fue a lo largo de la sonda determinado el transcurso del coeficiente de Poisson. En la zona de la intemperización parcial, los valores del coeficiente Poisson fueron inferiores a los determinados en las profundidades elevadas. Por el método sísmico de establecer dicho coeficiente siempre se obtienen los valores un poco más altos en comparación con los determinados mediante los clásicos ensayos geotécnicos. Puesto que la técnica sísmica introduce muy baja porción de las tensiones adicionales, es de esperar que al

máximo se aproxime el resultante coeficiente Poissón así obtenido a los reales valores del macizo de roca o suelo hallado in situ.

Muy diferente es el tipo de obras lineales de nuestro último ejemplo que presentamos en la fig. 3, relativa a las investigaciones hechas para realizar reestructuraciones del túnel ferroviario. En la ferrovía Brno - Česká Třebová fue necesario determinar la distribución de la tensión mecánica en las proximidades de la existente galería de túnel. Con tal que - en conformidad con la teoría - crezcan las velocidades sísmicas en proporción con aumentar las tensiones mecánicas, será factible, mediante la testificación sísmica por alta frecuencia, analizar la distribución de las velocidades sísmicas halladas detrás del muro del túnel. En una sonda corta se estudian, por intervalos de 0.25 m cada uno, los momentos de aparecer la señal sísmica. La resultante curva demuestra los tiempos de estar registrada la onda por los individuales detectores. Eso hace posible determinar las velocidades en cada un trecho. El presente caso permite concretar que el macizo rocoso en cuestión manifiesta fuertes alteraciones hasta la distancia de más o menos 3.5 m detrás del muro de revestimiento. Luego viene una zona de velocidades normales, alterada por la de las tensiones concentradas en un trecho de 5 m aprox.

Nuestro breve compendio testimonia las ventajas que aportan los métodos geofísicos, empleados en las labores de investigaciones ingenierogeológicas en relación con las obras lineales. Se subentiende que las muestras por nosotros relatadas no abarcan ni de lejos todo el surtido de posibilidades de emplear las técnicas geofísicas en dicha esfera de investigaciones. Las medidas geofísicas sirven de apoyo sea en los trabajos de estudiar en general la estructura geológica a todo el largo de la obra lineal que se ha de proyectar, sea para ayudar a solucionar los problemas parciales. Inmensa y variada es la escala de problemas que suelen surgir particularmente en caso de las estructuras lineales, pero asimismo rica es la escala de procedimientos y soluciones que brindan los métodos geofísicos.

## **PRUEBAS DINÁMICAS DE PENETRACIÓN**

En caso de la penetración dinámica no se trata de un método geofísico, sino de una de las pruebas de la esfera geotécnica. No obstante, ya que disponemos del equipo de penetración ligero, llegó a ser uno de los cotidianos complementos de nuestras mediciones geofísicas. Y precisamente por esta razón, la penetración dinámica (que se efectúa de acuerdo con la norma internacional) va incluida dentro del marco de las actividades que nuestro grupo geofísico desarrolla.

El método de penetración dinámica (MPD) se basa en la capacidad de los suelos de resistir en diversos grados (en dependencia de su composición litológica y las propiedades fisicomecánicas) a la forzada penetración dinámica de un trépano o aguja. Para efectuar el MPD se hace penetrar, golpeado por martillo que cae de su constante altura, el sistema de varillaje, provisto de una punta especial (generalmente cónica y cuyo diámetro es mayor que el de varillaje). Se registra el número N de los golpes necesarios para alcanzar la punta su determinada profundidad y de dicho número de golpes se calcula la resistividad dinámica de penetración de los suelos, en acuerdo con las fórmulas dadas por el principio de la conservación de la energía.

Establecida la resistencia dinámica de penetración y determinadas las correlaciones entre la penetración y las pruebas de campo o de laboratorio (ver la fig. 1 - módulo de deformación), es posible determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos analizados.

Nuestra Sociedad ofrece la cooperación en las siguientes esferas:

- Discusiones sobre las bases teóricas del método
- Discusiones sobre las posibilidades de su empleo
- Aseguramiento de las pruebas de campo
- Evaluación de las pruebas de penetración.

Existen diversos tipos de equipos para ensayar la penetración dinámica; difieren en cuanto al peso de martillo, al diámetro o a la forma de la punta. Nosotros ofrecemos las pruebas efectuadas por medio de un equipo ligero con la punta perdida de diámetro de corte de 10 cm<sup>2</sup> y de ángulo de 30°, cargada por un peso de 10 kg e hincada desde la altura de hasta 50 cm.

Nuestro equipo de penetración se destina sobre todo para las pruebas de los suelos arenarcillosos. Presenta una satisfactoria sensibilidad también en pruebas de los suelos blandos y poco compactados y con buenos resultados hemos operado asimismo en las gravas arenosas aluviales medianamente compactadas hasta sueltas, lográndose un máximo de 200 golpes por 10 cm (ver la fig. 2).

Además de la punta perdida mencionada arriba, utilizamos también la llamada "punta prolongada", cuya parte cilíndrica mide 18 cm y que nos sirve para verificar valores del rozamiento que obra entre el suelo y el acero - por ejemplo para poder calcular la fuerza que se necesite en casos de tender tubos forzándolos en el suelo. Otro ejemplo de aplicación presenta la fig. 3 - el perfil geológico a través del subsuelo en el lugar de obra, perteneciente a las construcciones de recursos hidráulicos en la localidad Olšany en Moravia. Las sondas indicaron las condiciones de cimentación complicadas - una capa de espesor de hasta 3.5 m, estructurada por suelos procedentes de llanuras aluviales, de reducida capacidad portante y de fuerte compresibilidad y, además, el alto nivel de agua subterránea de fuerte efecto agresivo sobre las estructuras de construcción - factor que haría muy difícil y costoso todo el proceso de cimentación en caso de que fuese necesario ubicar los cimientos hasta sobre la capa de gravas de terrazas. En este caso concreto hemos introducido el sondeo de penetración complementario para poder registrar de modo continuo el grado de capacidad de carga del suelo en cuestión y determinar el requerido hallado de suelos de menor compresibilidad, existente dentro del paquete de estratos de los suelos de procedencia llanera. De esta manera pudimos mejor y con más detalles detectar el transcurso de la ondulada superficie de gravas, prácticamente incompresibles, y consecuentemente ejecutar la predominante parte de cimientos por encima del nivel de agua subterránea.

Sobre ser útil en los casos hasta el momento mencionados (completación de los perfiles o de los calicateos en combinación con sondeos o mediante otros métodos - p.ej. geofísicos, verificaciones de las propiedades mecánicas de suelos determinando el módulo de deformación en los suelos arcilloarenosos, índice de compacidad de arenas, cohesión total de suelos arcillosos), las pruebas de penetración sirven de apoyo muy importante en los casos de entregas u homologaciones de juntas de cimentación, de supervisar las conclusiones de investigaciones geológicas o la calidad de servicios prestados por las empresas constructoras (profundidad de distensión por explotación, licuefacción etc.), ensayos de compactación y otros.

Las ventajas de nuestro ligero equipo de penetración son evidentes. Lo testimonian los buenos resultados, obtenidos mediante penetración dinámica que conjunto con las combinadas técnicas geofísicas fue realizada en las investigaciones destinadas a la sala Belinchon en Madrid (ver capítulo de cimentaciones). De manera similar empleamos la penetración dinámica en distintas labores de investigar las profundidades pequeñas, en particular en el complejo de suelos arenoarcillosos.

## **PROTECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Para dar solución a la actual tarea de proteger las aguas subterráneas, aplicamos con ventaja las mediciones geofísicas. La técnica geoelectrica en combinación con los métodos sísmicos permiten determinar tanto los espesores de los materiales de cobertura y de los mantos desintegrados, como las profundidades y condiciones cuantitativas de las sub - bases rocosas. Mientras que el método sísmico nos informa en primer lugar sobre las propiedades fisicomecánicas del ambiente rocoso - o sea, sobre el grado de intemperización que acusa el ambiente rocoso, los métodos geoelectricos más bien nos demuestran las líneas tectónicas y las partes conductibles, permeables o no permeables, del macizo rocoso. Utilizando métodos geofísicos adecuados con propiedad combinadas entre sí, aportan un amplio surtido de datos sobre las condiciones del ambiente rocoso.

Nuestra Sociedad está dispuesta para cooperar y prestar los servicios en cuanto a:

- Las discusiones sobre las bases teóricas de los métodos y sobre las posibilidades de su empleo
- Los aseguramientos de las mediciones in situ; la elaboración completa y computación de los resultados
- Las reinterpretaciones de las mediciones geofísicas precedentes, proponiendo el completo concepto general que conduzca a la solución de la problemática.

Nuestro ejemplo se relaciona con el vertedero Fulnek en Moravia, donde en la antigua y agotada cantera fueron depositados los desechos y residuos procedentes de talleres de galvanoplastia. Dentro del marco de la protección del medio ambiente se consideró por necesario analizar los riesgos de la contaminación de los alrededores. A la tarea se dio solución mediante haber combinado las mediciones geofísicas con las operaciones convencionales de investigación hidrogeológicas. Se midieron 4 perfiles geofísicos en el completo torno de la cantera y, mediante los resultados geofísicos, fueron identificados los sitios de las fallas tectónicas y de las capas impermeables que pudieran ser puntos de fuga de las contaminadas aguas. En el perfil (ver la figura) fue analizado el sitio SEV2 que se halla en el centro de la franja que en el ambiente rocoso representa una permeabilidad relativamente elevada (resist. es. más que 100 m con más o menos similares valores de las

velocidades sísmicas). Otro sitio investigado fue seleccionado debajo del SEV9, donde se produce subsidencia del estrato rocoso subyacente (evidentemente relacionado con la influencia de falla tectónica). Las sondas croquisadas provienen de la precedente etapa de las investigaciones. En los lugares por nosotros previamente establecidos fueron situadas las sondas hidrogeológicas, realizándose los ensayos de aforo en ellas para determinar el grado de riesgo de poder escapar las aguas contaminadas a través de los puntos más críticos del ambiente rocoso. El uso de las medidas geofísicas redujo considerablemente el número total de las sondas necesarias para detectar los riesgos de la contaminación, merced a lo cual fue posible en el área de interés (que abarca los redores de la cantera en cuestión) realizar no más que tres sondas hidrogeológicas.

Los resultados, que durante los últimos años han acusado las técnicas geofísicas dentro del marco de la protección de aguas subterráneas, indican nuevas perspectivas para diverso uso de los métodos geoelectrónicos. Algunos contaminantes que forman el contenido de las aguas subterráneas, reducen la resistencia específica de ellas. Tal reducción, que ejerce sobre la resistencia específica del agua que rellena los poros de la roca, tiene por consecuencia la reducción de la resistividad que en general se produce en todo el ambiente estudiado. En tales casos es posible deducir directamente del valor de la resistividad aparente (obtenido sea mediante el sondeo eléctrico vertical, sea por medio de las apropiadas distancias entre los puntos de calicateo de resistencia) el alcance del área del ambiente atacado por la contaminación.

Las investigaciones geofísicas resultan ser muy útiles en los problemas de cómo proteger aguas subterráneas, sirviendo no sólo en las cuestiones vinculadas con la estructura geológica de la zona, sino también para adquirir otras nuevas nociones sobre la localidad o determinar por vía directa el alcance de la contaminación.

## REMOTE SENSING

Las Investigaciones a Larga Distancia (remote sensing) llegan a ser una parte integrante de las Investigaciones. Este método se utiliza principalmente si trabajamos con las pequeñas escalas, en los lugares, donde no tenemos a disposición los trabajos explorativos anteriores e si no existen. Así obtendremos las informaciones básicas sobre la estructura geológica y tectónica del lugar del interés y, además, las informaciones sobre el desarrollo último de las condiciones naturales y antropógenos del área.

Referente a lo mencionado, nuestra Sociedad ofrece su cooperación en las siguientes esferas de las actividades:

- Discusiones sobre las bases teóricas del método a Larga Distancia
- Discusiones sobre las posibilidades y perspectivas de su empleo
- Aseguramiento de los fotos de satélites inclusive de las interpretaciones

La demostración práctica de las posibilidades del método presentamos de los trabajos realizados en Albania. En este caso, el objeto de nuestro interés no era solamente el estudio clásico de las condiciones geológicas, sino que nos han interesado también las direcciones del flujo del agua del mar y el sistema de causas de los ríos aguas abajo.

Después de obtener un concepto básico sobre la estructura tectónica del lugar y de los alrededores del río Vlora, sometimos al análisis una foto de la superficie del lugar adquirida del satélite LANDSAT 7. Para el análisis tuvimos fotos de ocho canales del día 6 de marzo de 2000. La elección de la escena no es siempre la misma, ya que el satélite vuelva siempre al mismo lugar pasando varios días. Respetando los parámetros económicos, tuvimos a la disposición las fotografías simplificadas, llamadas "quick look". Para la interpretación hemos seleccionado una fotografía hecha en la época de mínima cobertura de la nieve y de la vegetación todavía amortiguada. Por esta razón como la fotografía óptima ha salido la del mes marzo, del día minimalmente nublado. El nivel del vuelo del satélite tal día era los 705 km y el área fotografiada 185 km.

Al ver la figura superior izquierda, los elementos básicos de la estructura geológica del lugar investigado las representamos con el color amarillo. Hay que mencionar, que las fallas tectónicas interpretadas de las fotografías del satélite las confirmamos después con las mediciones geofísicas realizadas en el campo. Las diferencias entre la interpretación de las fotos y de la realidad confirmada no sobrepasaron  $10^0$ . Se ha demostrado, que la fractura norte - sur continúa más allá al sur, donde transiciona a la superficie que se pone debajo de la estructura del corrimiento.

En el marco de los estudios ecológicos de la "Bahía Vlora" nos ha interesado, si el agua de la bahía comunica con el agua del mar Adriático. Al estudiar las fotos del satélite detalladamente, podríamos definir, que las corrientes marítimas están distribuyendo las partículas finas aportadas por los ríos durante de las desheladas primaverales. Se nota, que las corrientes marítimas fluyen a lo largo de las orillas en la dirección de noroeste a

sureste. Delante de la “Bahía de Vlora” la corriente marítima cambia impetuosamente su dirección y da una vuelta al mar libre. Queríamos confirmar, si la misma dirección de la corriente marítima es también en las distintas épocas del año, es decir, no solamente en la primavera. Siguiendo los parámetros económicos del estudio, también para resolver esta tarea utilizamos las fotografías “quick look”. Comparando los resultados de las fotos del satélite plenamente valiosas con las de “quick look” del día 6 de marzo de 2000, podríamos constatar, que también en estas fotos simplificadas es posible observar la distribución de las partículas finas por los flujos marítimos. Se ha logrado confirmar, que las corrientes marítimas entre los meses desde el enero hasta el septiembre no se están cambiando. Podemos entonces constatar, que la “Bahía de Vlora” es un sistema cerrado, y que con el mar Adriático libre comunica minimalmente. Esta teoría está confirmada también por la profundidad del mar. En la entrada a la bahía la profundidad del agua es mucho menor que en la bahía propia.

Se ha mostrado, que para estudiar el sistema de meandros y de brazos ciegos y otras características del río en la parte de vega, lo mejor es utilizar las fotografías del infra-espectro. En la figura – la interpretación de la fotografía del satélite, puesta abajo, podemos observar que la infra-zona la más corta corresponde con las ondas las más cortas visibles, es decir, con el color azul. En esta fotografía podemos observar no solamente los canales principales de los ríos, sino que también los ríos salvajes en la parte media del curso del río, canales de irrigación, brazos ciegos del río y otros elementos del régimen acuático en la parte hondonada de Albania.

## LOS SÍTIOS DE LAS FUTURAS PRESAS

En cuanto a los estudios relacionados con los sitios de las presas, podemos mencionar las siguientes tareas geofísicas a resolver:

- Investigación de las condiciones geológicas en el amplio radio del sitio
- Investigación del seleccionado perfil de la presa
- Investigación de la zona de embalse
- Prospección de los yacimientos y préstamos de los materiales de construcción
- Investigación para las construcciones de los objetos funcionales.

Para dar solución a las individuales tareas se combinan varias técnicas geofísicas, tanto en lo que se refiere a los métodos de calicatero como a los de sondeo, complementándose los superficiales procedimientos geofísicos por los ensayos de testificación y de radiografía.

Para auscultar el amplio radio del sitio de la presa, ocupa primer plano de importancia el reconocimiento de la fundamental estructura geológica de la zona de interés, o sea, se trata de determinar las líneas divisorias existentes entre los individuales complejos rocosos y de delimitar las debilitadas zonas del macizo rocoso, para lo cual se procede por medio del calicatero de resistencia o, en su caso, por medio del calicatero electromagnético, del sondeo eléctrico vertical y de la sísmica de refracción superficial.

El primordial objetivo de las investigaciones ingenierogeológicas es el de especificar con detalles la estructura geológica en general y, dentro de eso, determinar los individuales bloques casihomogéneos, identificando las propiedades geofísicas de los mismos, detectar las profundidades de las alteraciones por intemperización y establecer la profundidad de la cortina de inyección. De manera similar a la del ejemplo arriba descrito, se combinan los métodos geofísicos de calicatero y de sondeo que en este caso concreto se complementan por los procedimientos de testificación y de documentación de las obras prospectadas, si es que se disponga de labores de perforación e incluso de galerías de exploración. No podemos omitir los métodos radiográficos. En esta fase de auscultaciones ingenierogeológicas comienzan a prevalecer los métodos sísmicos sobre los geoelectrónicos y magnéticos, porque son aptos para identificar las propiedades geotécnicas del ambiente rocoso en los alrededores del perfil de la futura presa.

En la zona de embalse hay que estudiar tanto el grado de alteraciones y trastornos producidos en los taludes como las zonas impermeables que pudieran dar origen a las pérdidas de agua por infiltración. Otra tarea importante es la de analizar capa meteorizada superficial, existente en las pendientes del vaso, que pudiera estar afectada por la abrasión de la presa. En la mayoría de los casos se emplean los sondeos - tanto los eléctricos como los sísmicos, complementándose a veces por los métodos de calicatero o, en su caso, por los de teledetección. Los estudios de yacimientos y préstamos de los materiales de construcción representan, en su principio, una tal forma de investigación de yacimientos; en correspondencia con eso se emplea una serie de procedimientos que incluyen un relativamente amplio espectro de métodos - desde los simples superficiales hasta los de testificación.

En los estudios de los futuros objetos funcionales desempeñan sus importantes roles aquellas técnicas geofísicas, cuyos resultados brindan un detallado concepto sobre el macizo rocoso y sobre sus propiedades mecánicas, lo que implica ante todo las documentaciones de las directas obras de explotación (galerías, sondas) y los métodos geofísicos del sistema "sonda - superficie".

Un ejemplo de las mediciones por nosotros realizadas proviene de los estudios que con fines informativos fueron efectuadas en la parte del perfil de presa P4 en el río Genal en España. La parte izquierda del perfil fue analizada por medio de los métodos de calicatero y de sondeo, merced a los cuales fue posible identificar seis conjuntos casihomogéneos, es decir: gravas, suelos de la cobertura, eluvión del talud, parte inferior del mismo eluvión y las rocas subyacentes relativamente inalteradas, o sea, esquistos y filitas. Además se logró identificar las expresivas líneas tectónicas, de las cuales la mayor importancia tiene la intersección de las fallas tectónicas 3 y 4 debajo del valle del río Genal. Esta ancha falla tectónica prácticamente imposibilitó que la construcción del dique se proyectase en el sitio en cuestión. Así, por haberse empleado un simple complejo de los métodos geofísicos, fue posible comprobar la inconveniencia de una de las variantes que se habían propuesto en relación con el sitio del futuro perfil de presa.

Como lo corroboran los mencionados ejemplos, hoy en día no podemos imaginarnos lo difícil que para la ingeniería geológica sería auscultar el terreno de una futura presa sin que se disponga de las medidas geofísicas. El considerable aporte de la geofísica marca un progreso en la vía de estudiar la estructura geológica tanto en el sitio del futuro dique como en otros lugares con tal obra relacionados, brindando, a la vez, una imagen - en general y detallada - sobre las propiedades mecánicas del macizo rocoso en cuestión y sobre la correlación y distribución de las tensiones y esfuerzos en el radio de los objetos a proyectar.

## TOMOGRAFÍA SÍSMICA

La tomografía sísmica es uno de los modos específicos de cómo efectuar algunos análisis de las medidas sísmicas. Se refiere sobre todo de la elaboración de los datos de las mediciones de las radiografías sísmicas y del ampliado método de la testificación geofísica mediante sismodiagrafía, obteniéndose - merced a dichos tipos de mediciones - una imagen sobre la correlación de las velocidades distribuidas en el plano radiografiado, circunferido por las obras de investigación o por las trayectorias de los rayos sísmicos.

Nuestros equipamientos originales y aparatos de programación se destinan para computar las tareas de planaridad en las calculadoras IBM/PC. El algoritmo de solución calcula con el factor de rayos sísmicos, propagados a través de las trayectorias más cortas en función del tiempo, es decir, siguiendo las sinuosidades geométricas.

Referente a lo mencionado, estamos ofreciendo las siguientes esferas de colaboración:

- Discusiones acerca de la teórica aptitud de la metodología
- Discusiones sobre las posibilidades del empleo de nuestros métodos
- Aseguramiento de las mediciones a realizar en el terreno de interés
- Evaluaciones de las medidas tomográficas incluyendo la representación gráfica de los resultados.

En la fig. No. 1 se presentan las velocidades, obtenidas a través de la elaboración tomográfica de la ampliada testificación por sismoradiografía, empleada para analizar la sonda J4 en el desfiladero de Strečňany en Eslovaquia, donde el más marcado elemento lo representa una destacada aceleración en la base de la sonda, correspondiendo dicho lugar a la línea de transición entre las granodioritas poco meteorizadas y las por intemperización prácticamente no alteradas. Esta línea divisoria serviría de capa de refracción en caso de llevarse a cabo las superficiales mediciones sísmicas. Otro significativo elemento es la anomalía en forma de las elevadas velocidades cuyo centro se halla en profundidad de unos 15 m debajo del metraje de 10 m, representando dicho lugar un bloque de granodiorita poco alterada por intemperización. Es muy probable que el bloque alcance hasta la capa por encima de la base de gravas. Para interpretar las líneas divisorias entre las individuales categorías ambientales se toma como fundamento la descripción geológica de la sonda y luego el transcurso de las isoclinas de velocidades. Los resultados, relacionados con los improporcionales y desiguales impactos de intemperización, son de suma importancia tanto para el ingeniero geólogo, como para él que proyecte las obras de construcción.

Otro ejemplo proviene de las medidas efectuadas en la sección que se halla entre las sondas JŽ-401 y JŽ-403 de la obra hidráulica Žilina - Eslovaquia. Del corte se nota que el macizo rocoso se puede dividir en tres bloques subhorizontales (en la figura marcados como A, B y C), coincidiendo el Bloque A con el sistema cuaternario de

la zona investigada y caracterizándose su base por un brusco aumento de velocidad. Dicho gradiente no se nota de manera tan destacada en los sitios de manifestarse las rocas alteradas, ubicadas en el Bloque B. Corresponde con una velocidad de más o menos 1.0 km/s la línea divisoria entre los sedimentos de cuaternario y la sub - base del paleógeno.

En el macizo rocoso se presentan las transformaciones de mayor alcance en el Bloque B, fluctuando aquí los valores de velocidades entre las de 1.0 y 2.0 km/s. Podemos caracterizar el bloque como el de sedimentos paleógenos fuertemente alterados, con lugares que manifiestan completamente reducida la tensión original y, asimismo, con los casos contrarios, donde la tensión se concentra. Es determinable la base de este bloque en el nivel de unos 320 m sobre el mar.

Además, de isólinas se puede deducir que cierta alteración se manifiesta hasta en las profundidades de 5 m más bajas. El alto grado de alteraciones que las rocas en el mencionado corte presentan, se deben a la perpendicularidad que el perfil ocupa respecto al sentido tectónico que delimita la zona, aislada por erosión, desempeñando el rol determinante las fallas tectónicas que acampan en la zona tectónica principal. En el corte de referencia son localizables cuatro lugares de hallarse debilitado el macizo rocoso. Los trastornos, existentes en la sonda JZ-403, son también identificables por la reducida recuperación de testigo, registrada en la profundidad de 12.5 m. En cuanto a los lugares debilitados marcados como b, c, d, e y f, existe también otra explicación del fenómeno: es que no se puede excluir que se trate de unas capas con peores propiedades mecánicas dentro del paquete de estratos paleógenos, en cual caso representarían las posiciones "b" una capa y las posiciones "c, e", otra capa. Prácticamente entre todas las zonas debilitadas se hallan lugares con acentuados aumentos de velocidades, formando así los concentrados y encerrados máximos intersticiales. Hay lugares con las velocidades tan altas como las que corresponden a las profundidades de hasta 15 m más bajas.

El Bloque C ya lleva todos rasgos de paleógeno que ofrecen las comunes ocurrencias. Es interesante que en estas profundidades elevadas se manifiesta no más que la falla d - un fenómeno con mayor probabilidad originado por el hecho de obrar sobre esta capa la fuerte tensión horizontal, engendrada en la proximidad de la falla principal del valle investigado, pues que la mayor parte de las fallas parciales están encerradas.

La tomografía sísmica es el método que hace posible adquirir una gran serie de conocimientos - inasequibles mediante otras tecnologías conocidas - sobre el investigado ambiente geológico. Además, es aplicable tanto para proceder midiendo con el sistema de "sonda - sonda" y "sonda - superficie", como para las medidas específicamente superficiales y, merced al actual nivel de desarrollo de las técnicas de mediciones y de computación, la tomografía sísmica es asimismo bien aplicable en las construcciones antropógenas (p.ej. presas, etc).

## **LAS MEDICIONES ULTRASÓNICAS**

Las buenas soluciones de algunos de los específicos problemas, relacionados con la técnica de construcciones, con la geotecnia o con las investigaciones ingenierogeológicas, son alcanzables merced a las técnicas ultrasónicas, sobre todo en los casos vinculados con pequeños volúmenes del ambiente a investigar, cuando se halla fuertemente amortiguada la ondulación elástica de alta frecuencia en el real ambiente geológico o en los ambientes cuya existencia se debe a la actuación del hombre.

Las mediciones ultrasónicas se pueden aplicar con la ventaja para determinar los parámetros mecánicos del ambiente investigado; dentro de este marco merece mencionar la múltiple serie de diversas muestras de materiales de construcción, testigos de perforación o los casos, no menos importantes, del uso de radioscopia ultrasónica para estudiar los cuerpos de pequeño volumen.

Nuestra Sociedad está dispuesta para cooperar en las siguientes esferas de labores:

- Discusiones sobre las teóricas bases de la metodología
- Discusiones sobre las posibilidades de empleo del respectivo método
- Realización de las medidas en las condiciones prácticas incluyendo la interpretación de los resultados.

Es bien variado el uso del equipo ultrasónico; la posibilidad de emplear los cabezales impermeables y los de cabeza cónica dotan la técnica de muy potentes perspectivas de utilidad para la geología como tal, brindando una de las vías hacia la solución del problema de cómo auscultar de manera perfecta el medio geológico. Mientras que los cabezales estándar sirven en confiable grado solamente para investigar las muestras redondeadas o preparadas (o sea las que llevan dos planos paralelos), los cabezales cónicos son aplicables incluso en los casos de disponer no más que de las muestras no redondeadas, es decir, sirven prácticamente para todo tipo de testigos

y, además, permiten estudiar la anisotropía mediante las mediciones efectuadas en diversos sentidos. Por medio de dichos cabezales es posible radiografiar los cuerpos de elevadas dimensiones; en caso de materiales rocosos puede tratarse de los cuerpos de dimensiones hasta decimétricas. En lo que se refiere a los cuerpos de hormigón, la profundidad radiografiada llega hasta los primeros metros. Los cabezales impermeables permiten analizar los cuerpos también debajo del nivel de agua. Además de medir en el agua los objetos de hormigón, es posible realizar las mediciones acústicas en sondas. Las comunes testificaciones acústicas son reemplazables por las discretas medidas realizadas a través de "la testificación acústica por puntos".

El primer ejemplo proviene de las mediciones ultrasónicas de los testigos de perforación - Sonda JI en Jevišovice. Los primeros 20 m fueron perforados en el dique de mampostería de la antigua presa, la parte restante de la sonda se sitúa en ortogneises del subsuelo del dique. En las curvas gráficas, que representan las velocidades estudiadas a lo largo del eje de la sonda y en el sentido vertical respecto al dicho eje, se evidencia lo diferente que presentan los caracteres de los dos ambientes. En el dique varían relativamente mucho las velocidades, difiriendo bastante en ambos sentidos. En el macizo gnéisico, al pasar cierto interestrato, comienza a manifestarse el aumento de velocidad en dependencia de la creciente profundidad. Las velocidades de ambos sentidos son prácticamente similares, creciendo de los valores de 4000 m/s (24 m) a los de 4500 m/s (33 m).

Los resultados de mediciones de testigos caracterizan la roca en el momento de medición. Sobre los valores de las velocidades medidas ejercen negativamente los variados grados de humedad de los testigos, asimismo como el alivio de carga del testigo una vez extraído de la sonda. No obstante, debemos hacer constar que a través de comparar las velocidades observadas en la muestra descargada y las determinadas en la sonda en condiciones de la tensión natural se adquieren muy valiosas informaciones sobre el estado de macizo rocoso.

Algunos de los resultados de la testificación acústica por puntos ofrecemos en la fig. No. 2 que demuestra las medidas empleadas en las investigaciones realizadas para la obra Budišov. Del transcurso de las velocidades es posible derivar que cómo complicado es el desarrollo de las velocidades a lo largo del eje de la sonda, alternando las velocidades relativamente altas (en la íntima proximidad de la superficie) con las velocidades reducidas hasta unos valores que quedan muy cerca por encima de los 2000 m/s. Dichos cambios de velocidades van repitiéndose varias veces y testimonian la complicada estructura geológica y sobre todo los complicados trastornos de las rocas.

La tercera muestra se refiere a la radiografía de objetos de hormigón, empleando el método ultrasónico para estudiar los pilares de hormigón de la estacada en Ostrava. Es bien observable de las curvas gráficas de velocidades que el hormigón en los tres pilares analizados es isótropo y que ni siquiera las diferentes cualidades de hormigón de los individuales pilares tienen importancia.

El último ejemplo proviene de las mediciones por ultrasonido, empleados en el cuerpo de prueba para ensayos cortantes de la roca. El bloque de prueba fue radiografiado en ambos sentidos horizontales. En la figura se representan las isolíneas de velocidades de un sentido. Es evidente que se trata del material en general homogéneo (variando las velocidades dentro del marco comprendido entre los 3.65 y 3.95 km/s), con cierta zona debilitada en el centro del bloque estudiado. Las figuras demuestran algunas de las posibilidades que el uso del método ultrasonoro ofrece en la geología. No cabe duda que dicha técnica brinda muy importantes informaciones sobre el estado del macizo rocoso a investigar.

## **VERTEDEROS**

Uno de los campos de aplicación técnica que acrisolan la pertinencia de usar las mediciones geofísicas, son los depósitos de residuos y los vertederos en general. Se trata de investigar las condiciones para los vertederos futuros, o se trate de auscultaciones de los vertederos existentes, precedentes o basurales clandestinos, siempre y cuando se carezca de informaciones sobre los espesores de los materiales depositados o sobre la naturaleza de las capas subyacentes. Por combinar las operaciones sísmicas con las geoelectricas se han abierto otras perspectivas que dan realidad a los reconocimientos de los espesores de materiales depositados y su índice de compacidad, igual como a la identificación de la índole del subsuelo. Mediante los métodos sísmicos se obtienen datos, relacionados sobre todo con las propiedades fisicomecánicas del ambiente de roca (grado de compacidad de la masa depositada, grado de intemperización del ambiente de roca), mientras que los métodos geoelectricos más bien indican las líneas tectónicas y las partes conductivas, permeables o no permeables del ambiente de roca.

Nuestra Sociedad ofrece la cooperación en las siguientes esferas:

- discusiones sobre las bases teóricas de los métodos propuestos y de las posibilidades que ofrecen
- aseguramiento de las mediciones de campo y las complejas evaluaciones de las mismas

- reinterpretación de las mediciones geofísicas realizadas en el pasado, con acento puesto en el concepto general de la problemática en cuestión.

El ejemplo que a continuación presentamos es la investigación de un antiguo vertedero en Hněvotín en Moravia. En el pasado - que cuenta decenas de años - se llenaba la antigua calera de diverso tipo de los materiales inútiles y de desecho. Para proponer un adecuado método de proteger los recursos de agua potable y de regenerar el terreno fue necesario, en primer lugar, conocer la profundidad de la sub-base del vertedero, lo que se ha logrado por medio de la investigación geofísica, realizada en dos perfiles perpendiculares entre sí. En la fig. 1 se ve la parte del perfil geofísico a lo largo de la línea de desnivel, con el perspicuo recinto del mayor ahondamiento de la cantera (debajo del SEV3). Dicho punto - el más profundo del vertedero - fue propuesto para tomar muestra de las aguas contaminadas y para los posteriores análisis químicos. Los resultados de los estudios geofísicos permitieron que, para analizar perfectamente todo el recinto de vertedero mediante las investigaciones por el sondeo, nos limitáramos a efectuar no más que tres sondas, apropiadamente situadas de modo tal que indicasen e identificasen los más potentes espesores de los materiales de residuos y desechos en los vertederos depositados. Los resultantes ahorros financieros fueron de considerable importancia.

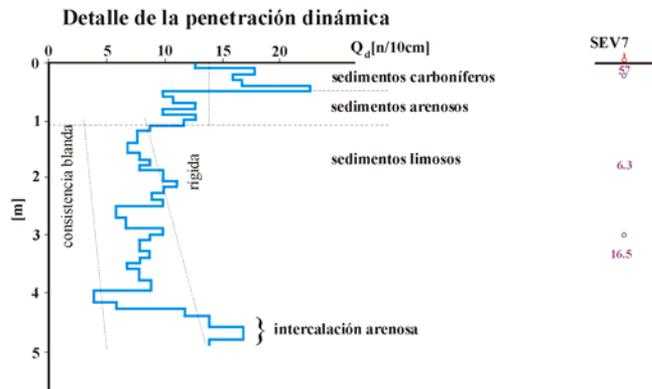
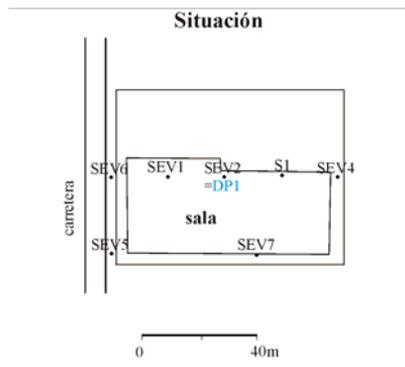
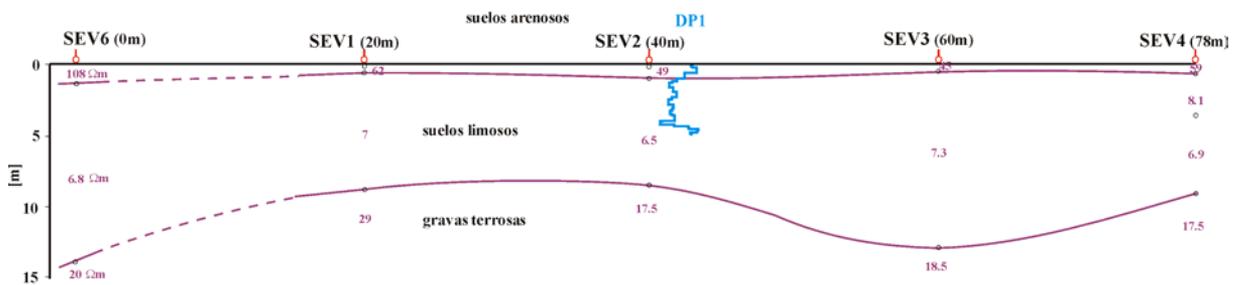
La fig. 2 resume una de las investigaciones, hechas con fin de analizar el terreno desde el punto de vista de su aptitud para servir de vertedero. Los resultados de las mediciones geofísicas permitieron establecer que el ambiente de roca se secciona en materiales de cobertura, estructurados por eluvión en las laderas y formados de arenas y gravas en el fondo del valle. El subsuelo rocoso lo estructuran las rocas del "culm" intemperizado, debajo del cual se halla el "culm" intemperizado parcialmente. Esta clasificación muy detallada del ambiente de roca se ha llevado a cabo sin que fuese necesario ejecutar ni siquiera una sonda de investigación - echo que tiene base en nuestra experiencia y práctica de largos años, relacionada con las mediciones en las rocas culmíferas.

Los datos, obtenidos con la ayuda de las investigaciones geofísicas, no sólo nos informan sobre la estructura geológica del terreno que rodea el vertedero y de las capas subyacentes, pero sí que también pueden ser muy relevantes para analizar el cuerpo antecedente de un vertedero. Además, las mediciones geofísicas, previa y oportunamente efectuadas, abren camino para proponer el proyecto de cómo realizar los sondeos a manera más económica posible. Tampoco carece de importancia la posibilidad de ubicar las sondas en tales lugares que se consideren más ventajosos para las operaciones posteriores.

**Figuras acompañantes de los distintos métodos geofísicos y de las investigaciones geofísicas para los distintos tipos de las obras en cuestión.**

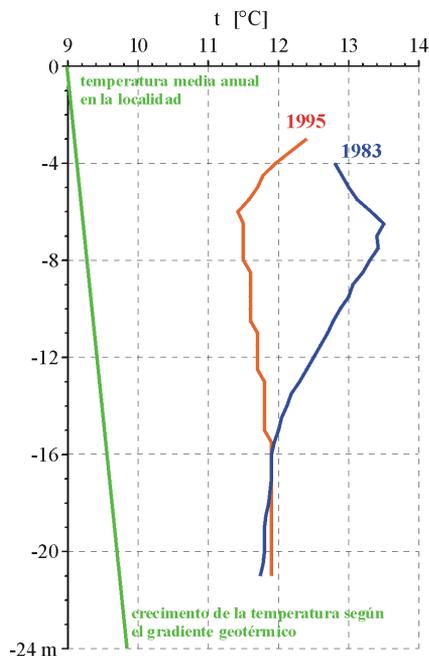
# LAS CIMENTACIONES

## Madrid - Sala Jiménez Belinchon

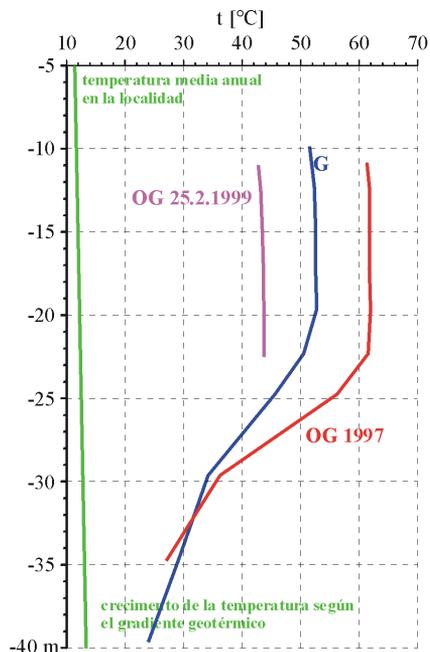


# CONTAMINACIÓN TÉRMICA DE MACIZOS ROCOSOS

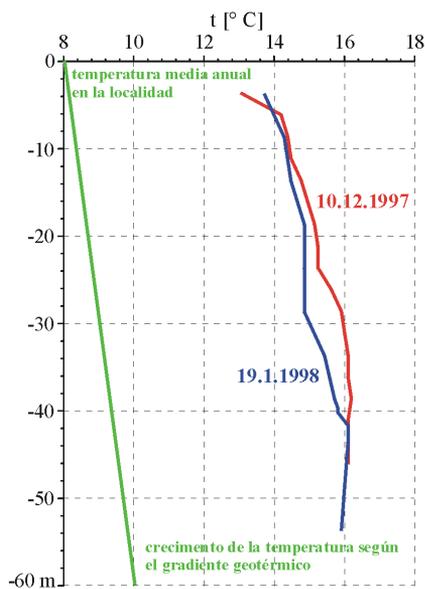
**Fig.1 Mediciones en Bohemia Media**



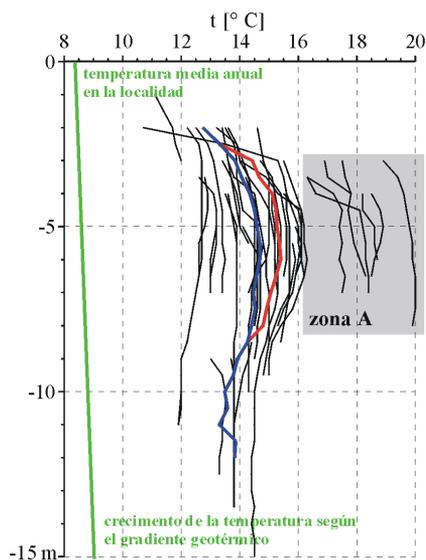
**Fig.2 Mediciones en Taškent - Uzbekistan**



**Fig.3 Mediciones en Moravia del Norte**



**Fig.4 Mediciones en Bohemia del Este**

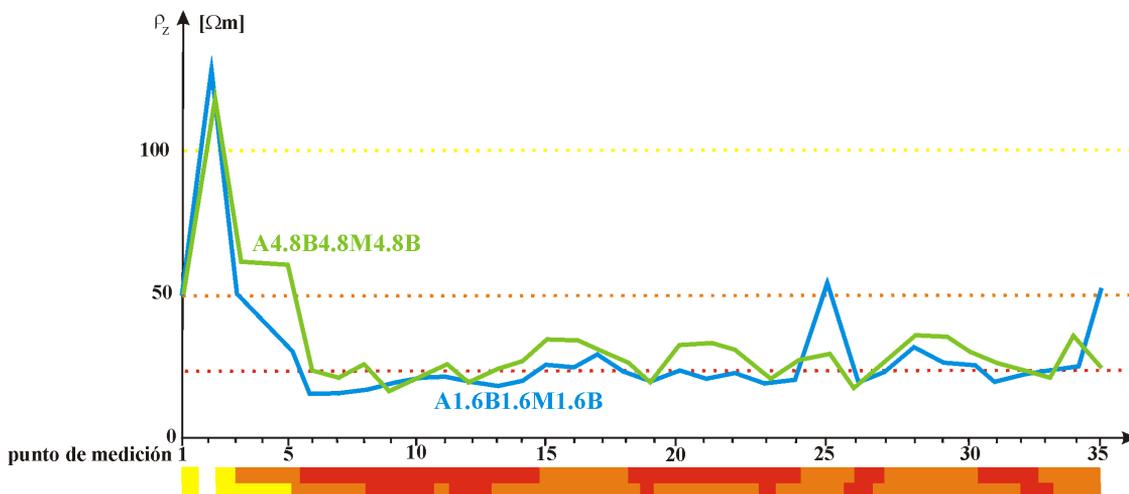


- perforaciones singulares
- diámetro de todas calas
- promedio excepto la zona A

# PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

## Fig.1 Židlochovice - acueducto

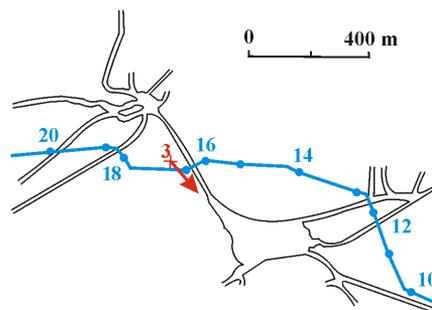
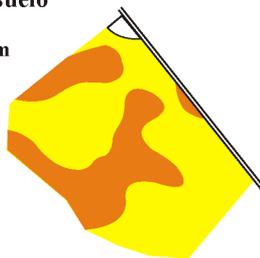
Agresividad del suelo



## Fig.2 Karviná planta de tratamiento

Agresividad del suelo

0 400 m



Referencias  
Grado de agresividad del suelo

- I  muy baja
- II  media
- III  elevada
- IV  muy alta

• 20 punto de medición de la agresividad del suelo

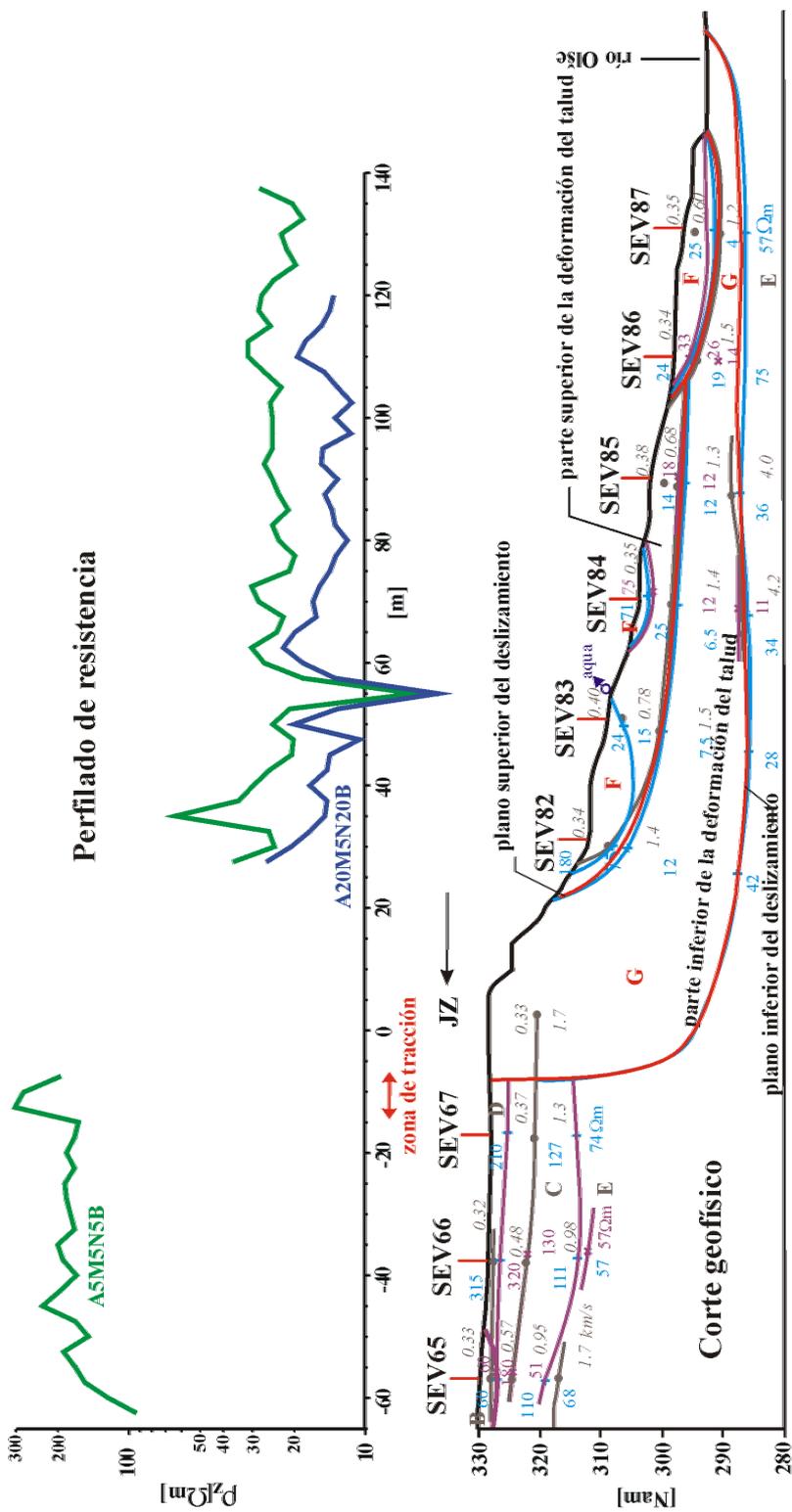
+3 punto de medición de las corriente erráticas

→ vektor proudé hustoty [ $\mu\text{A}/\text{m}^2$ ]

## Fig.3 Letovice gaseoducto

# DEFORMACIONES DE TALUDES

## Trinec



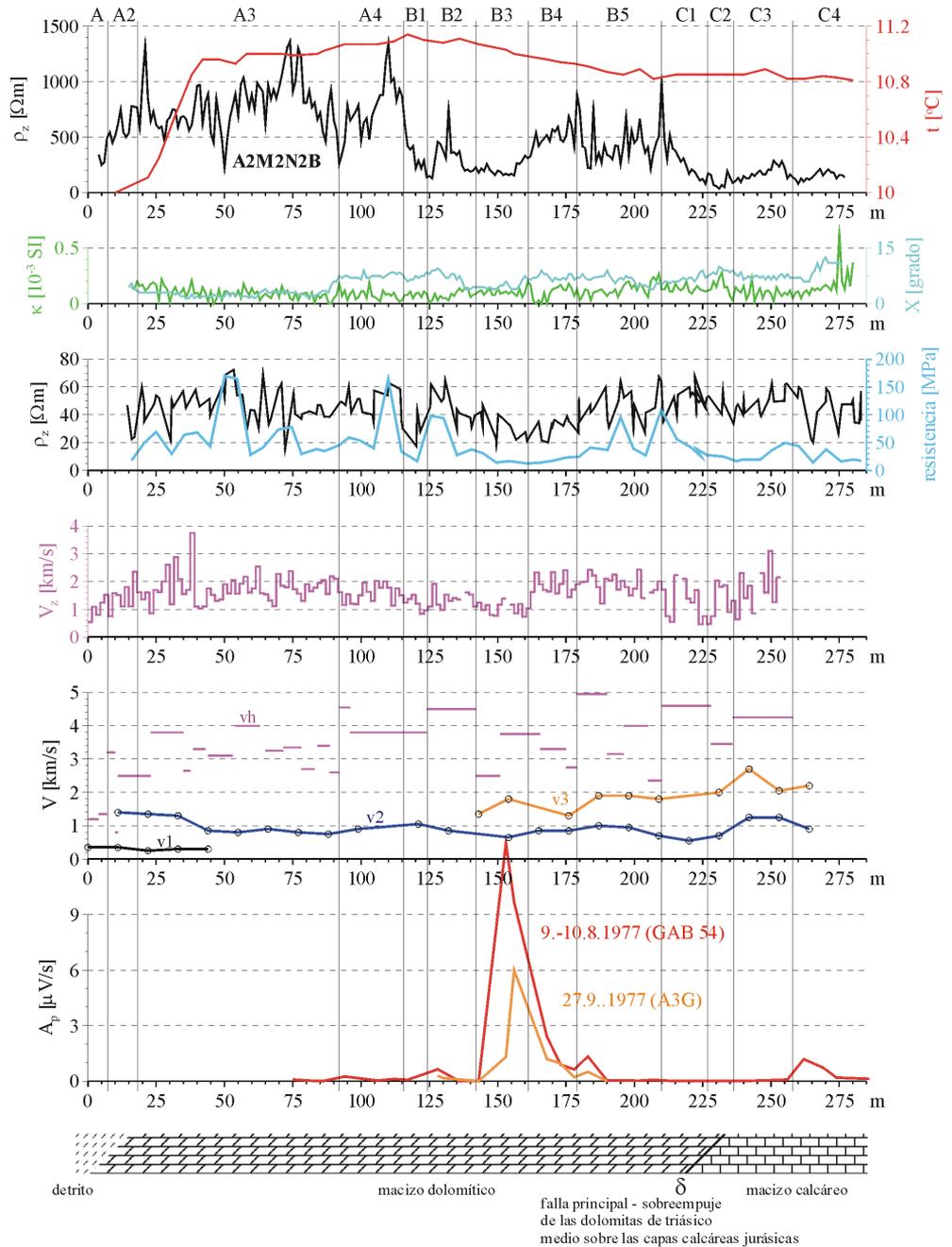
SEV perpendicularmente al perfil  
SEV a lo largo del perfil  
SRS a lo largo del perfil

E rocas subyacentes  
F rocas de los deslizamientos poco profundos  
G rocas de las deformaciones profundas

B limos terrosas  
C sedimentos rissiensens acuíferos  
D sedimentos rissiensens no acuíferos

# DOCUMENTACIÓN DE OBRAS DE LA INVESTIGACIÓN DIRECTA

## Malá Vieska - documentación geofísica de la galería

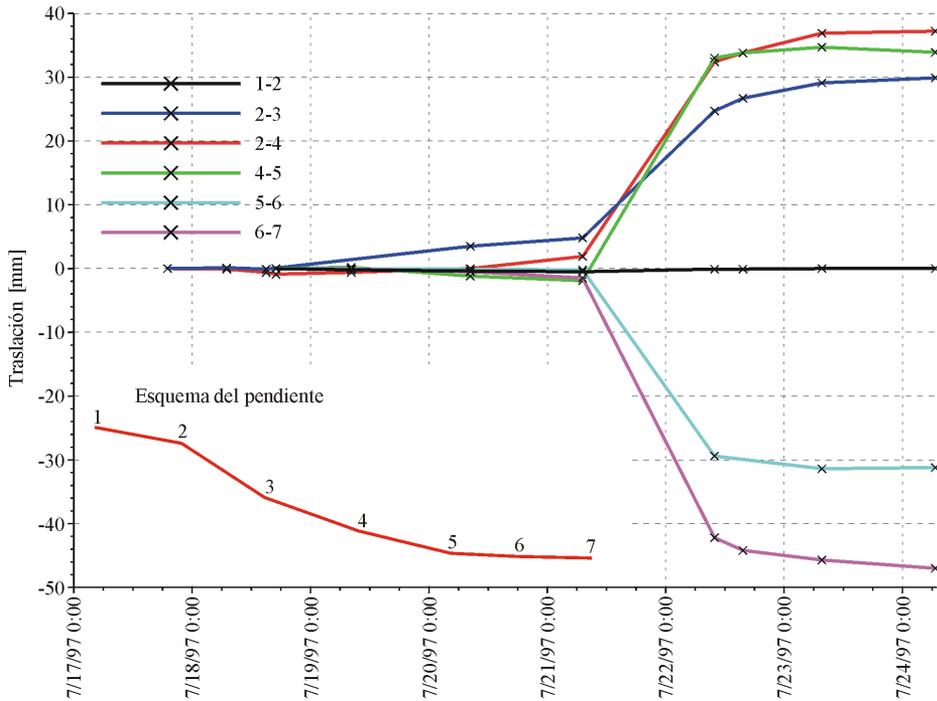


A3 marcación de los bloques casihomogéneos

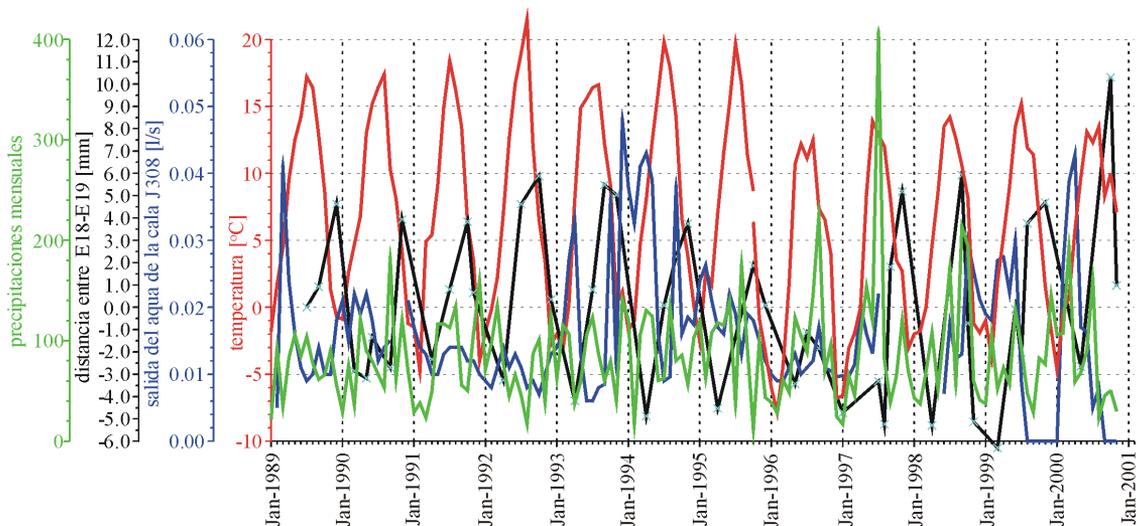
- 1) perfilado simétrico de resistencia y medición de la temperatura
- 2) susceptibilidad magnética y actividad gamma global
- 3) valor de rechazo del martillo Schmidt y medición de la dureza
- 4) resultados del perfilado sísmico
- 5) velocidad de la onda directa ( $V1$ ) y velocidades  $V2$ ,  $V3$ ,  $Vh$  (límite)
- 6) curva de la actividad geoacústica
- 7) documentaciones geológicas

# EXTENSOMETRÍA

## Orlová - Okružní - deslizamiento. Resultados de la extenzometría

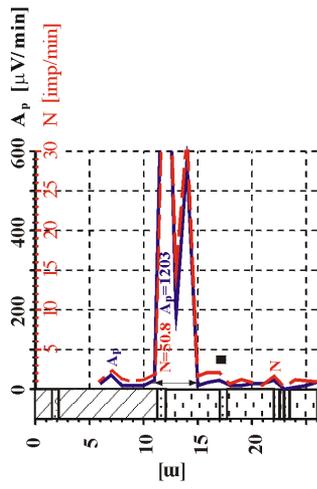


## Relaciones entre la distancia E18-E19, la temperatura a la salida del agua de la perforación J308

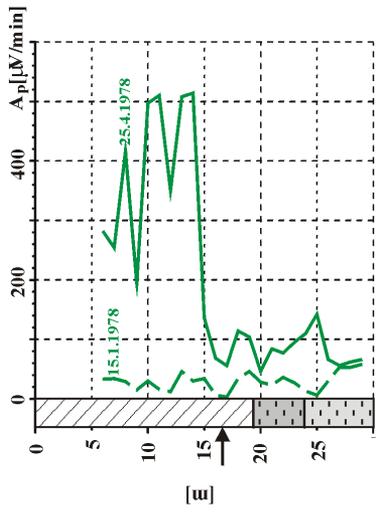


# MÉTODO GEOACÚSTICO

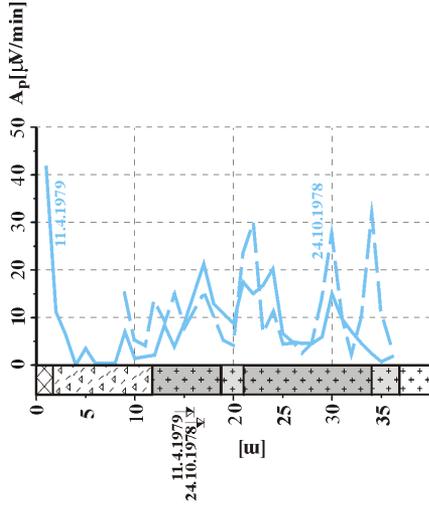
**Fig.1 Harvelka**



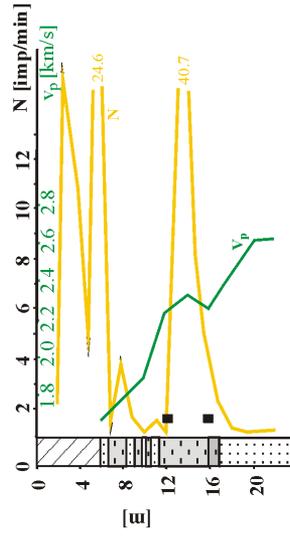
**Fig.2 Oravský Podzámok**



**Fig.4 Lipno**



**Fig.3 Turany**

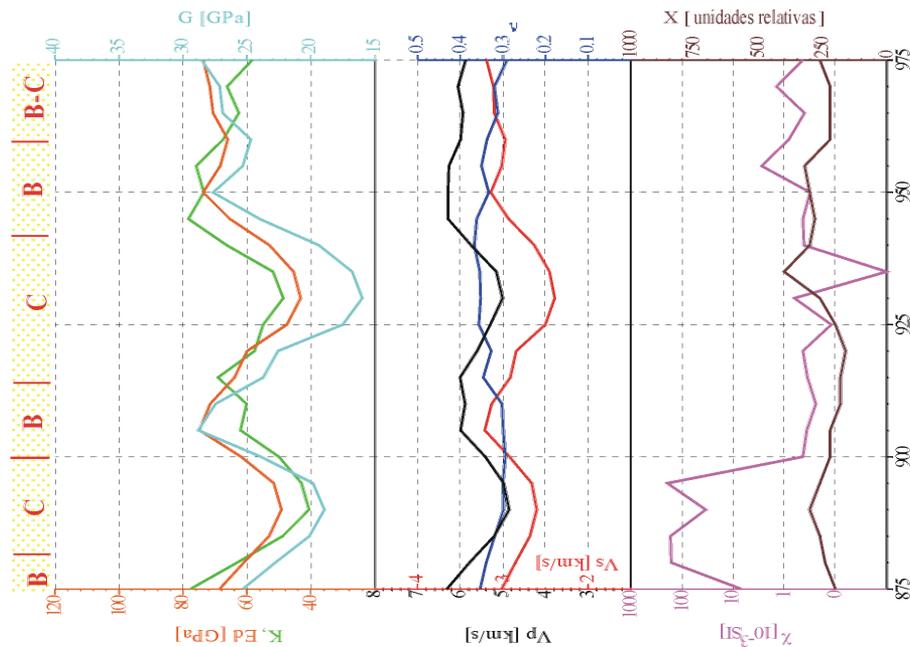


**Referencias**

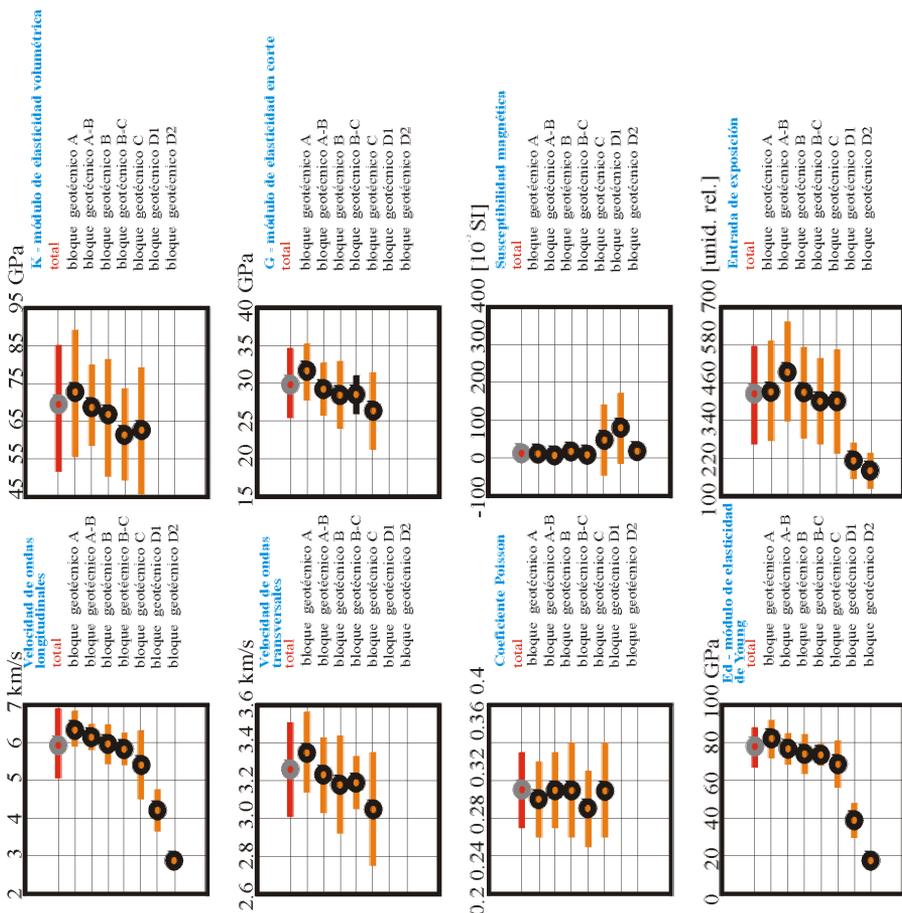
-  terrenos de acarreo
-  detrito de piedra
-  limo
-  gravas
-  arcillitas
-  arcillitas desmoronadas
-  arcillitas fuertemente desmoronadas
-  areniscas
-  granita alterada por meteorización
-  granita
-  nivel de agua subterránea
-  plano de deslizamiento según testigo
-  plano de deslizamiento según geoacústica
-  capa intercalada de suelos - acarreo fluvial del río Orava

# GEOFÍSICA PARA LOS TÚNELES

## Presentación gráfica de los resultados



## Estadística



## Observación continual de las propiedades físicas i geotécnicas

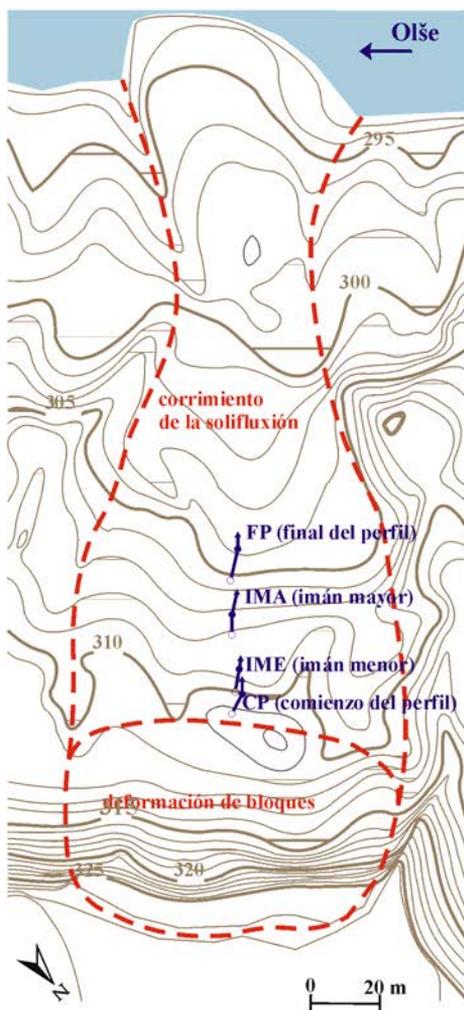




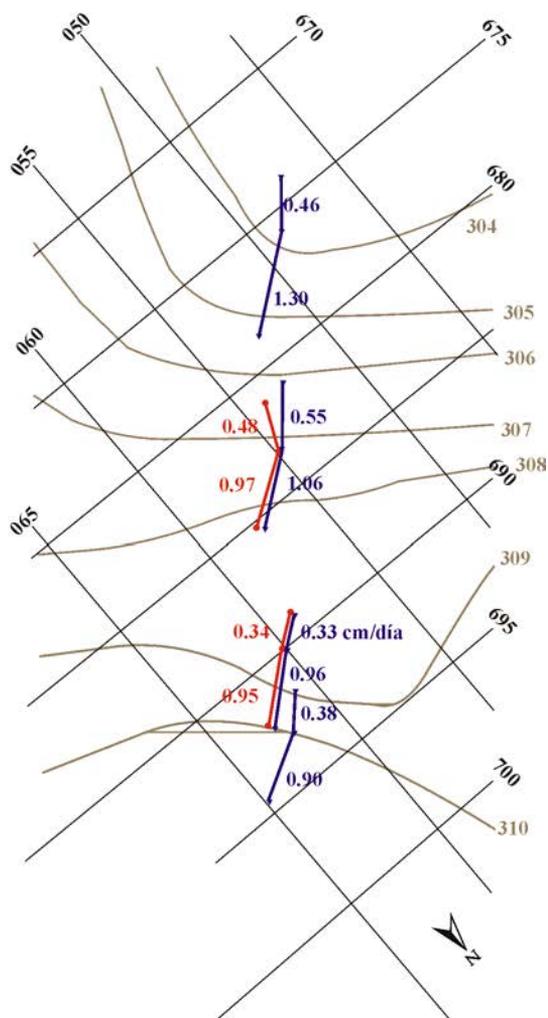
# MARCAS MAGNÉTICAS

## Třinec

Situación de las mediciones



Vectores de corrimientos de los puntos superficiaales y de los epicentros de los imanes



354 días entre las 1<sup>a</sup> y 2<sup>a</sup> mediciones

483 días entre las 2<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup> mediciones

• imanes

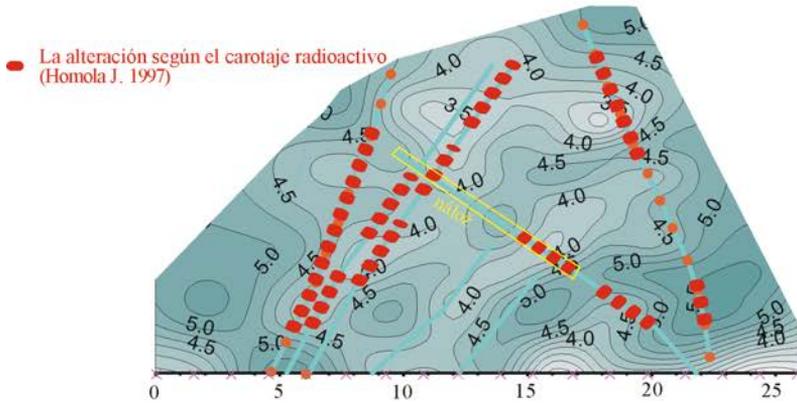
• puntos superficiales

310 Nam

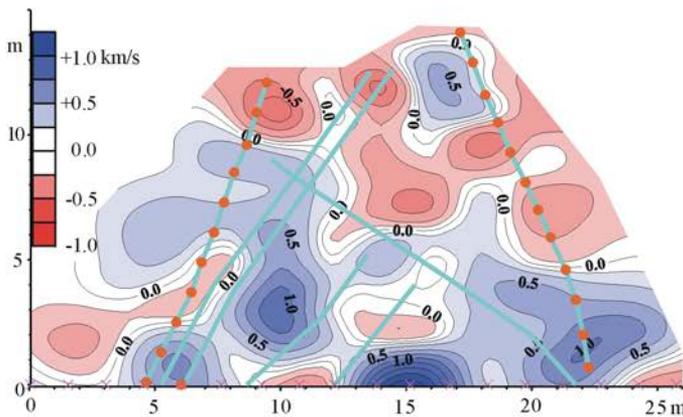
# GEOFÍSICA EN LA MINERÍA

## Tomografía sísmica antes y después de voladuras no productivas

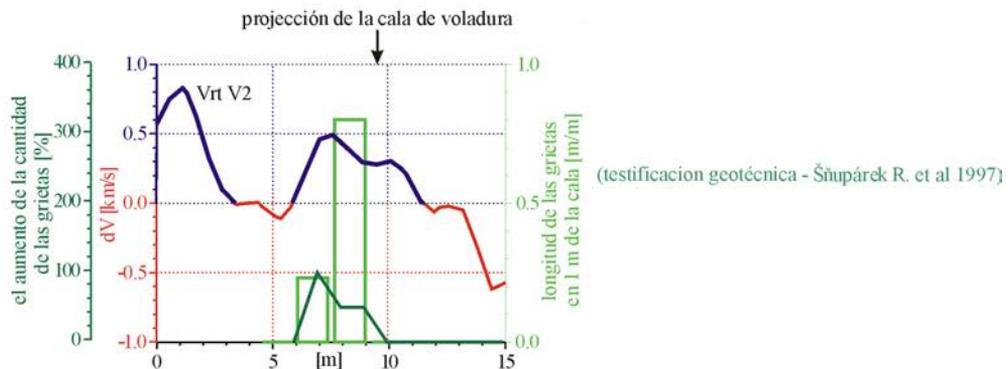
### El campo de las velocidades antes de las voladuras



### Diferencias de las velocidades antes y después de las voladuras

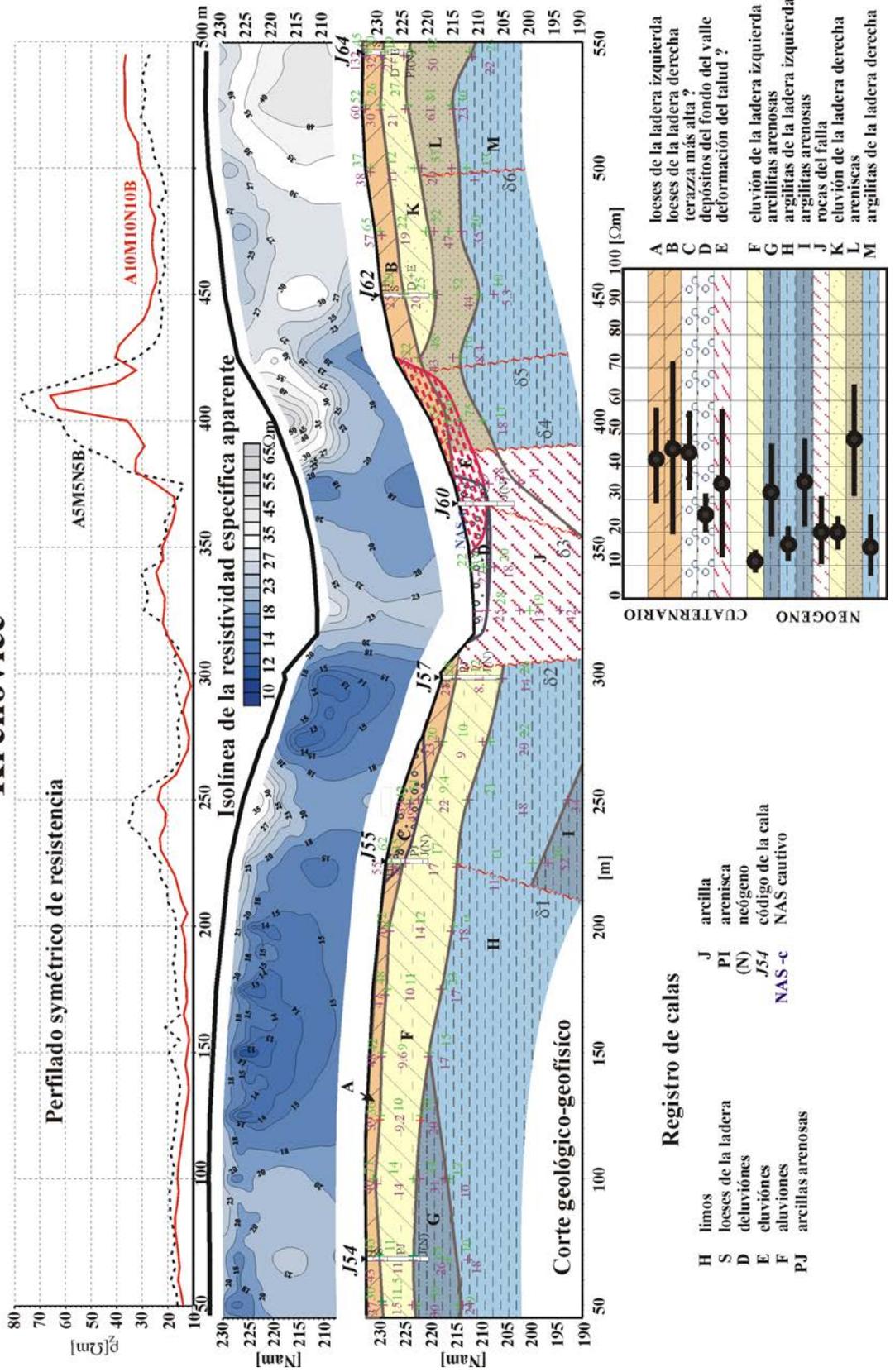


### La comparación de diferencias de velocidades y pruebas geotécnicas



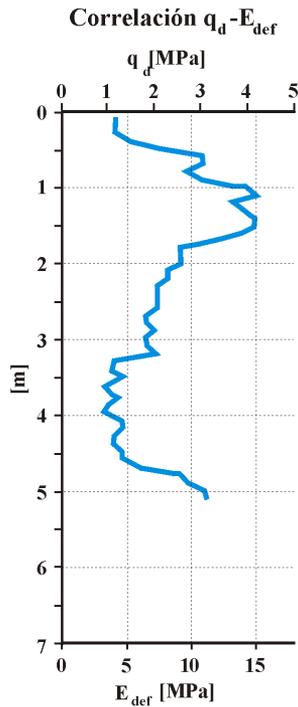
# OBRAS LINEALES

## Křenovice

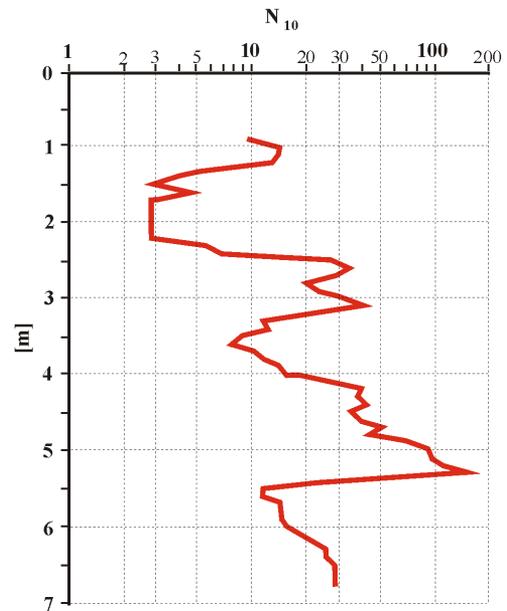


# PRUEBAS DINÁMICAS DE PENETRACIÓN

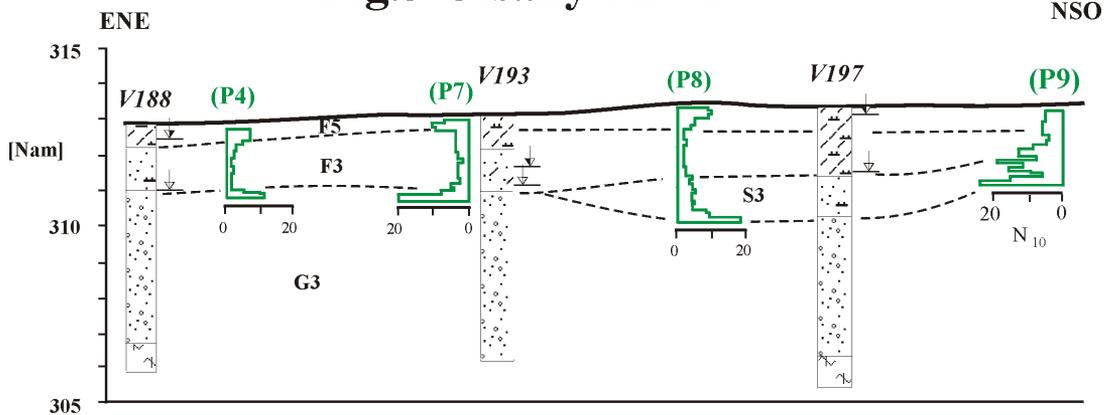
## Fig.1 Bohumín



## Fig.2 Ostrava-Kunčice



## Fig.3 Olšany P2 - 2



### Referencias

	suelos finos		gneises del Morávico		NAS estabilizado
	suelos arcillosos	$N_{10}$	número de golpes por 10cm	(P)	penetrómetro
	arena limosa		NAS cautivo		
	grava arenosa	S3	clasificación según la norma checa ČSN 73 1001		



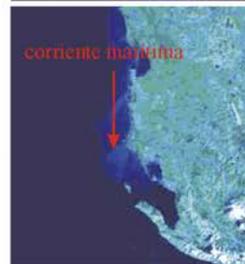
# Remote sensing



Fotografía en colores naturales  
(dislocaciones y corrientes marítimas)



"quick look"  
6.3.2000

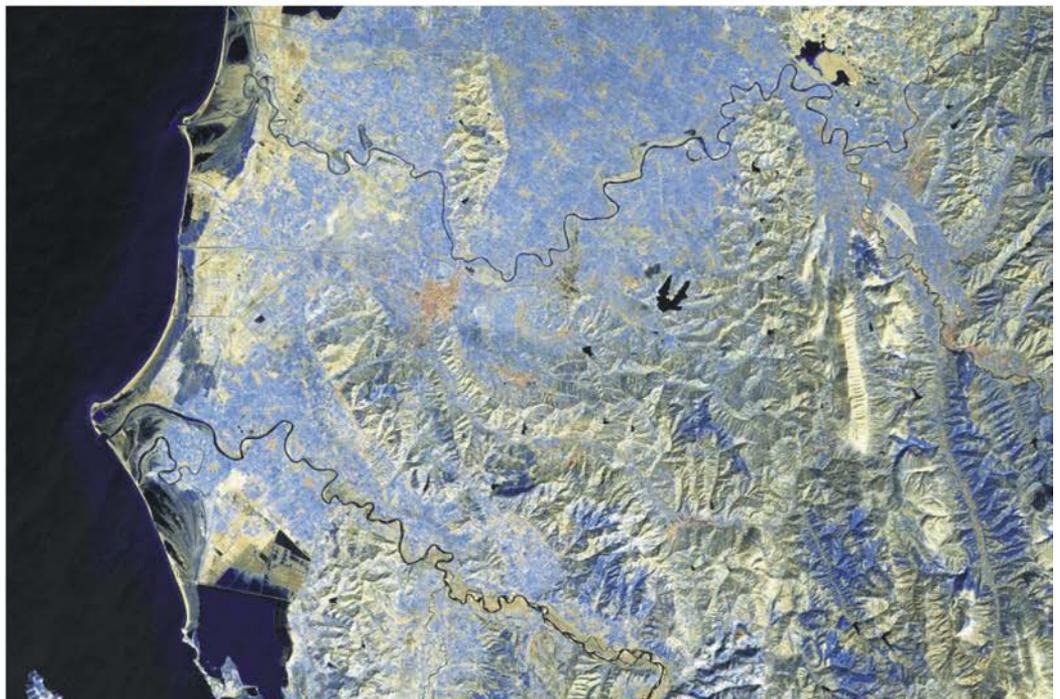


"quick look"  
12.3.2002



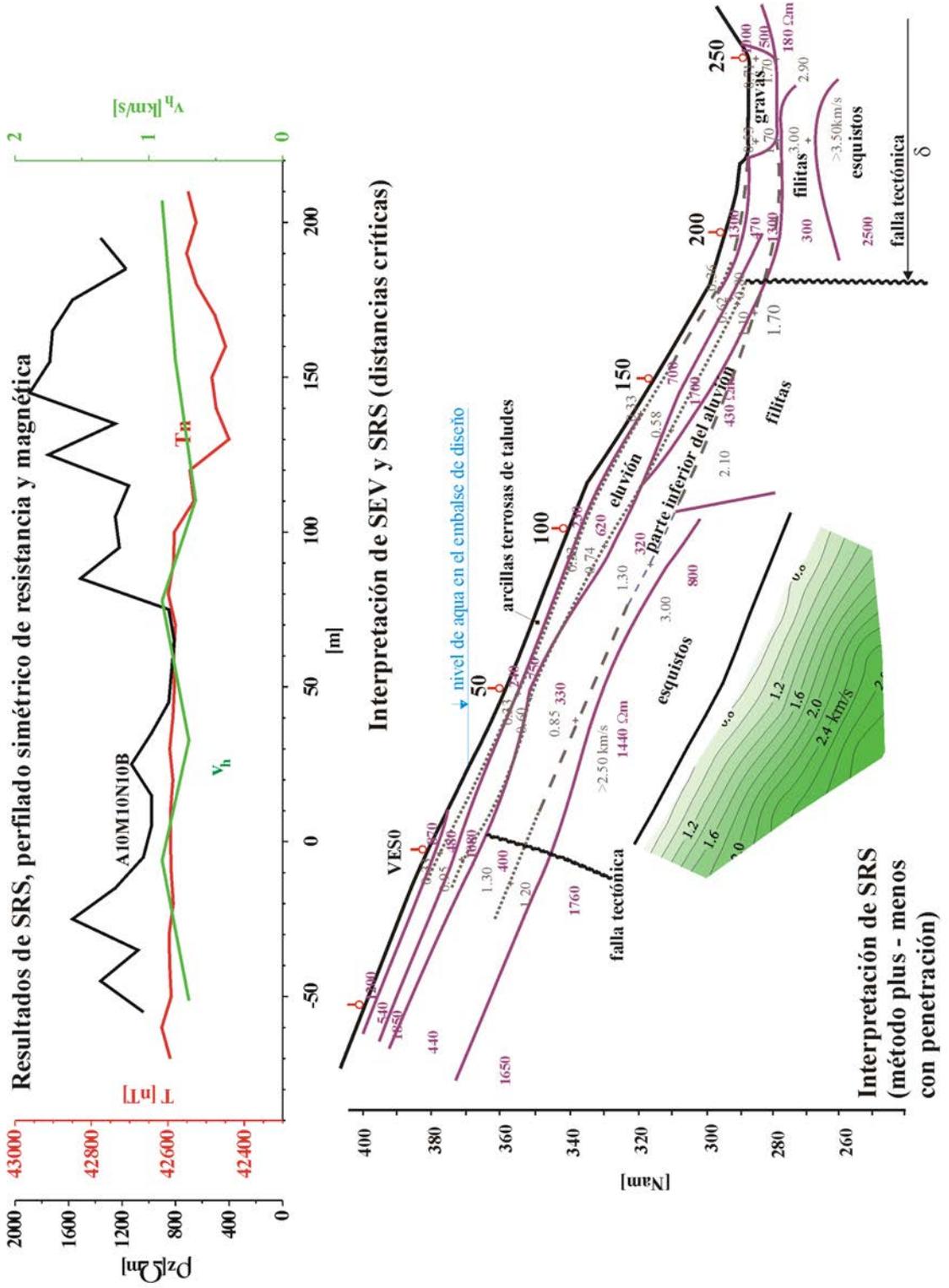
"quick look"  
28.9.1999  
sin huellas de corrientes marítimas

## Foto de la cuenca en infraespectro

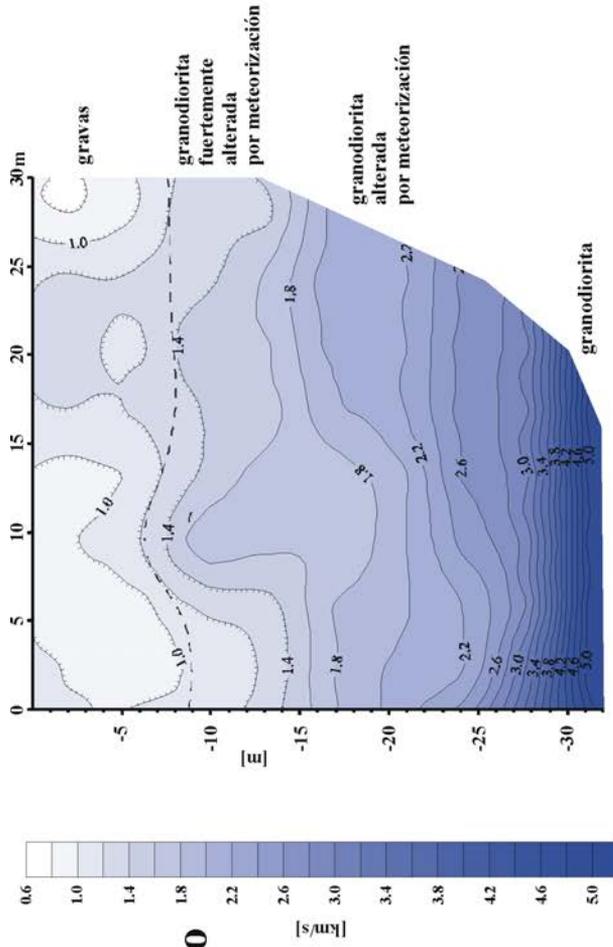


# SÍTIOS DE LAS FUTURAS PRESAS

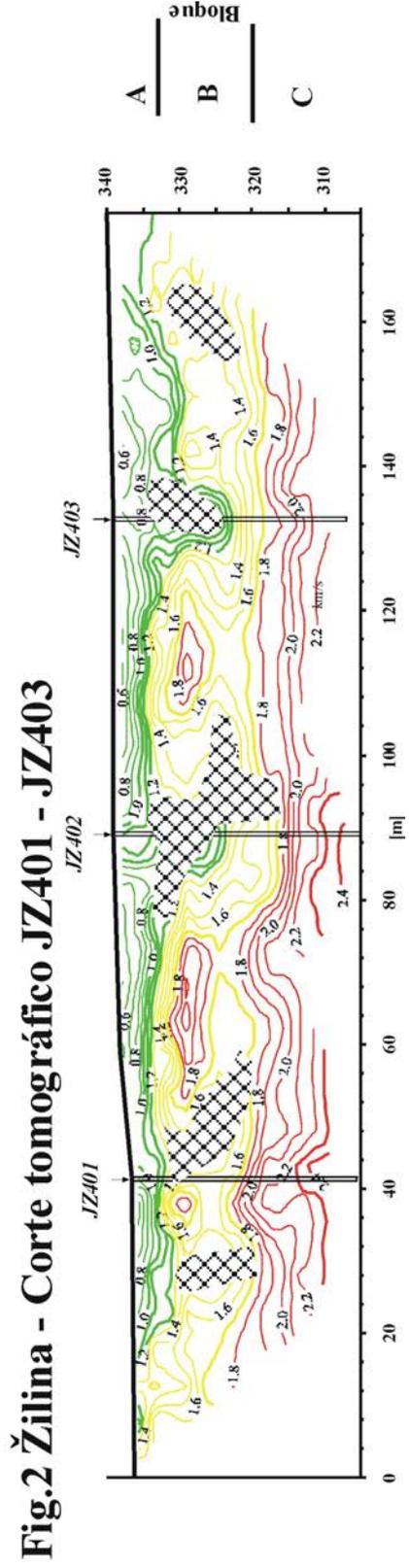
## Genal P4



# TOMOGRAFÍA SÍSMICA



**Fig.1 Strečno - Corte tomográfico  
Isolíneas de velocidades  
tomográficas**

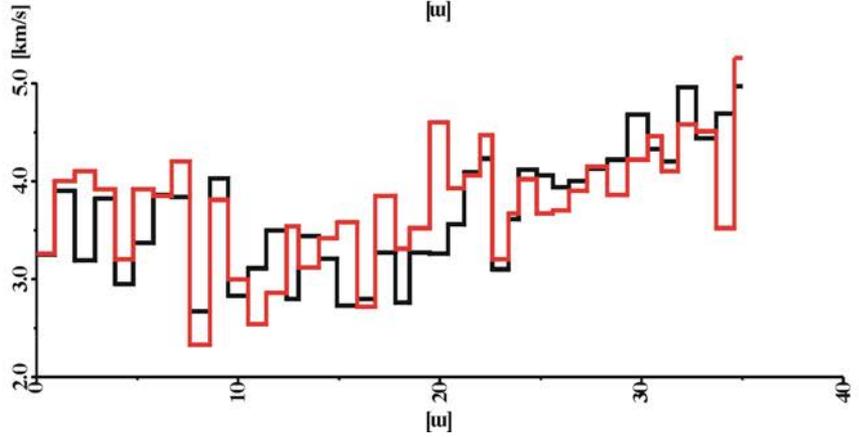


**Fig.2 Žilina - Corte tomográfico JZ401 - JZ403**

# MEDICIONES ULTRASÓNICAS

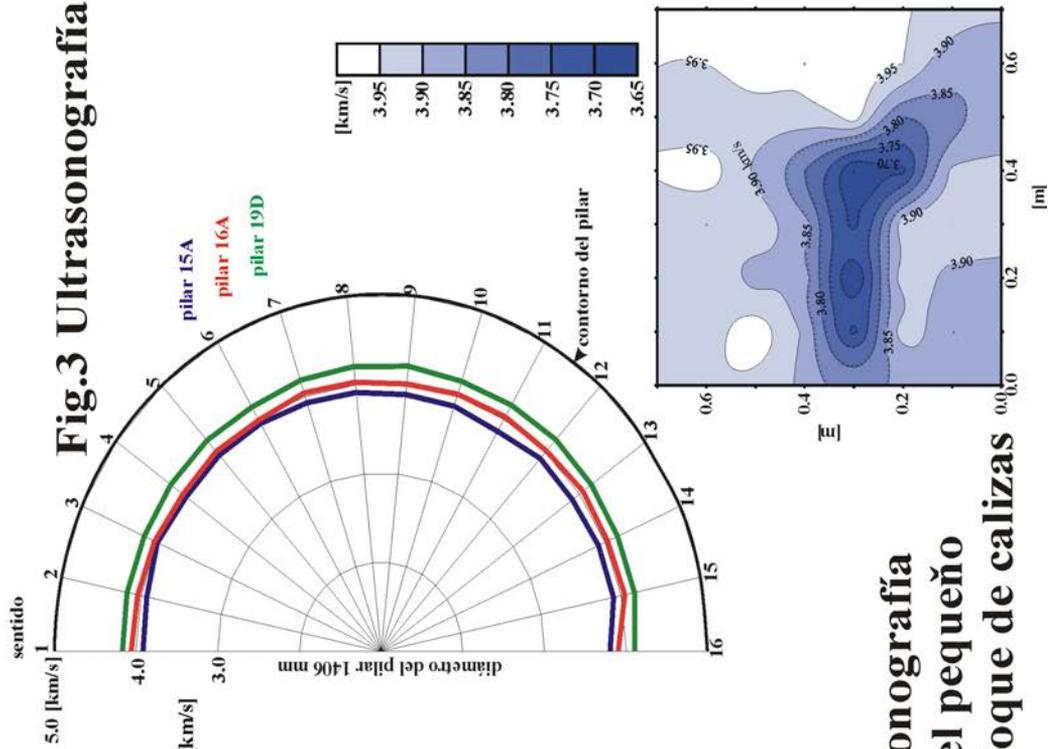
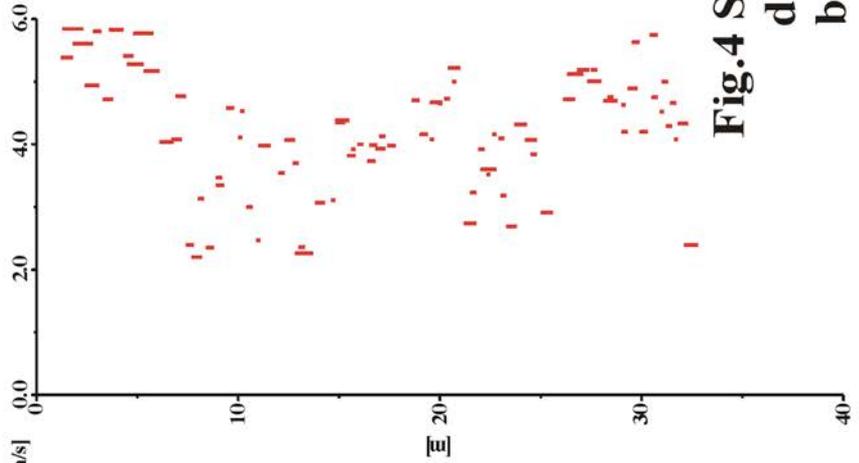
**Fig.1 Jevišovice**

Mediciones en testigos



**Fig.2 Budišov J3**

Testificación acústica en puntos

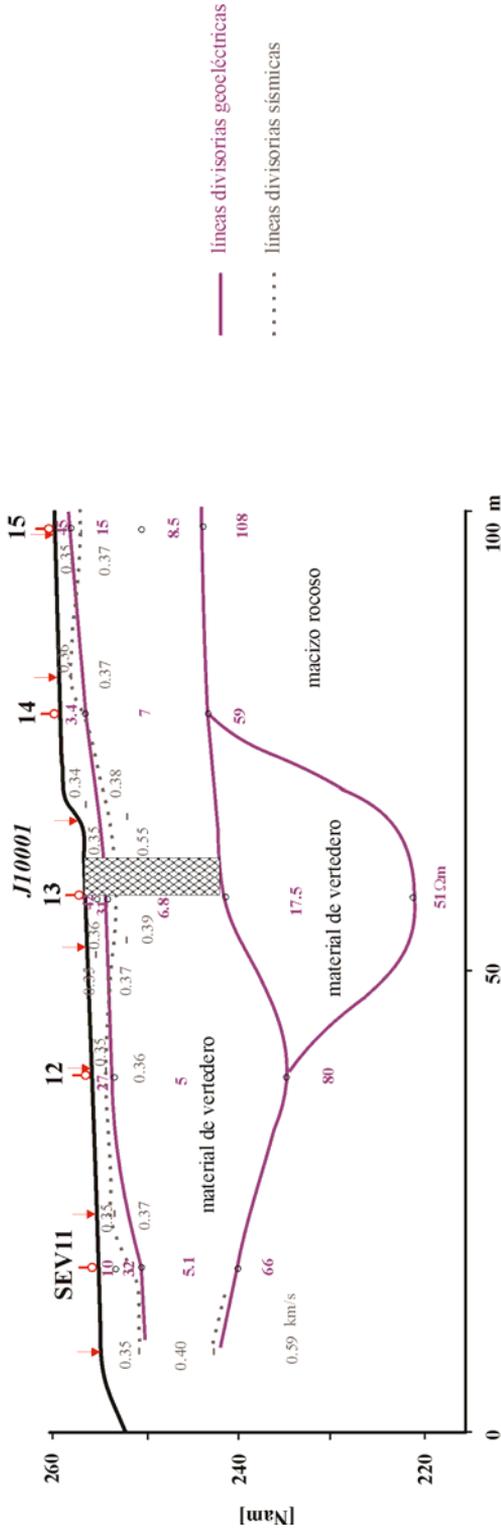


**Fig.3 Ultrasonografía**

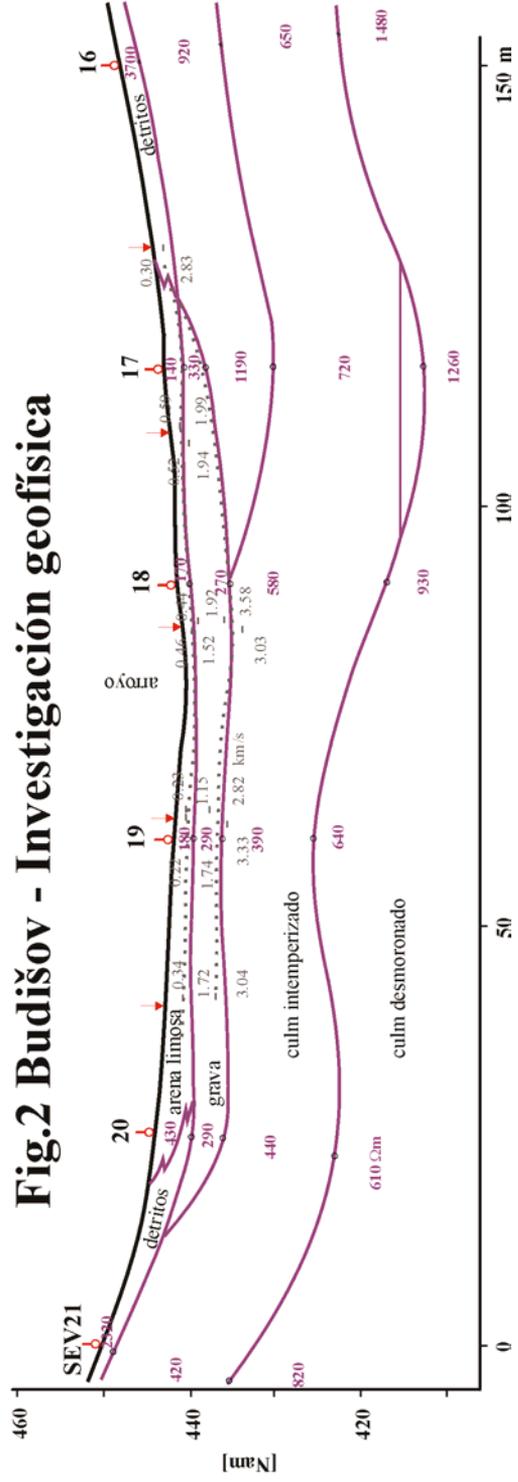
**Fig.4 Sonografía del pequeño bloque de calizas**

# VERTEDEROS

## Fig.1 Hněvotín - Depósito vertedero

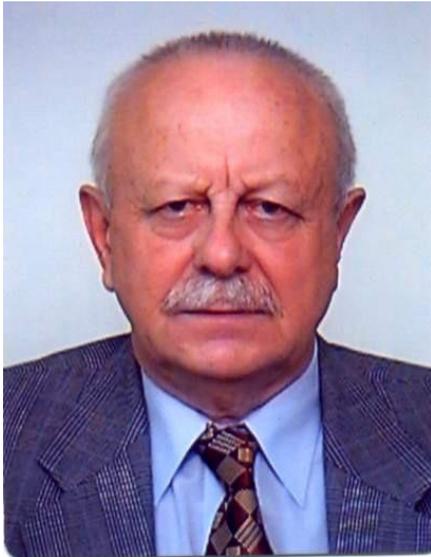


## Fig.2 Budišov - Investigación geofísica



## Horský Otto, Ing. CSc.

### Palabras sobre el autor del libro:



Nacido el 13 de Abril de 1.938 en Checoslovaquia.

Ingeniero Civil, especialidad en cimentaciones, mecánica de suelos y de rocas y en general, en ingeniería geológica (1961), Doctor Ingeniero (Ph.D. – CSc) – 1978.

Como el empleado de la empresa GEOTEST BRNO realizó y dirigió los estudios del terreno para puentes, autopistas, silos de grano, túneles, aeropuertos, plantas industriales, centrales hidroeléctricas en superficie y subterráneas y para varias presas y embalses. En estos estudios no sólo dirigió y coordinó la investigación de geólogos y expertos de variadas especialidades, que por la dificultad e importancia de las obras llegaron a superar la veintena; sino el propio proyecto y construcción.

Entre los trabajos efectuados destacan:

Autopista de Praga a Brno.

Presa de Dalesice, la mayor altura en Checoslovaquia, sus túneles y la central hidroeléctrica.

Las dificultades de estas obras motivó la posterior evaluación de comisiones de expertos de diferentes países, que consideraron el trabajo realizado como excelente.

Investigaciones sobre Geología Aplicada a las Obras Hidráulicas y sobre los movimientos de ladera por los procesos de embalse y desembalse. Estas últimas son muy conocidas en Europa Central y le sirvieron de base para redactar unas recomendaciones y normas para el tratamiento de márgenes y protección del medio ambiente, que aplicó en el vaciado completo del embalse de Orava en Eslovaquia, rehabilitando 91 km de laderas afectadas por la abrasión y deslizamientos.

Una o más veces al año realizaba viajes de estudios, entre los que citamos: estudio de la presa Asuan en Egipto (1966); estancia de más que un mes en la Universidad de Barcelona (1967); reunion de estudio en Bérgamo en Italia (1969); reuniones con las comisiones de expertos en Moscú (1971); reuniones con los expertos en Belgrado (1972); Alemania, Polonia, México, Peru , España.....

Actuó como jefe da la „Delegación de Ingenieros Checoslovacos“ en el XI Congreso Mundial de Grandes Presas en Madrid (1972) y como delegado checo en el 3<sup>er</sup> Congreso Internacional de Geología del Ingeniero en Madrid (1978).

Agregado Comercial y jefe de la Oficina Técnica de la Embajada de Checoslovaquia en Peru encargado de la colaboración técnica y científica de proyectos de distinta índole, entre otros de proyctos hidroeléctricos y túneles ( ampliación de la hidrocentral Machu Picchu, El Sheque, Mantaro ) – 1974 – 1976.

Ingeniero Jefe del Área de Ingeniería Geológica y Geotécnica en el Ministerio de las Construcciones de Cuba y Jefe coordinador de Expertos Checoslovacos en la construcción (más de 30 expertos ) en los trabajos de cooperación bilateral entre Checoslovaquia y Cuba (1978 – 1982).

Jefe del equipo técnico formado por los 30 especialistas checoslovacos para el estudio y proyecto de la Hidroacumuladora de Escambray en Cuba. El trabajo abarcó desde el estudio geológico estructural de la zona y estudios de Geología Aplicada y Geotécnica, hasta el proyecto de viabilidad y proyecto definitivo de los túneles, de los embalses y de la central subterránea ( 1984 – 1988 ).

Como Director General de la empresa mixta checo-española „Vodni Española,S.A.“ y después como uno de los dueños de la empresa „Geoinza, S.L.“ en Madrid ha realizado más de 40 trabajos de investigación y de construcción en España ( 1991 – 1994 ).

Profesor Agregado de la Universidad Técnica de Brno de Geología Aplicada a Construcción y Geotécnica desde 1971.

Profesor invitado y conferenciante en universidades de Checoslovaquia, España, Perú, Cuba, México.

Responsable de la formación y adiestramiento de técnicos cubanos. Preparó material docente, normas y desarrolló numerosas clases y un curso de Postgrado para ingenieros y profesores de universidad ( 1978 – 1982 ).

Desde el 1990 hasta el 1994 secretario de la Asociación de Ingenieros Geólogos en Moravia. Miembro de las comisiones examinadoras para otorgar el grado de especialista científico en Checoslovaquia.

Miembro de la Comisión del Ministerio del Medio Ambiente de Eslovaquia ( 1990 ).

Realizó más de 200 estudios ingeniero-geológicos y más de 10 investigaciones científicas al tema de ingeniería geológica.

Ha publicado más de 170 publicaciones, más de un centenar de los cuales en Checoslovaquia o en la República Checa y las restantes en el extranjero (España, Brasil, Perú, Rusia, Países Bajos, Australia, Portugal, Grecia, Cuba, Tailandia, Etiopía).

Desde el año 1994 trabaja como asesor independiente en materia de rendimiento, el diseño y la evaluación de los trabajos geológicos en ingeniería hidráulica. Dentro de estas actividades, visitó varias veces España, México, Chile, Brasil y Cuba. Desde 2010 ha colaborado como experto principal con CREA y Geotest para el proyecto de la presa de Bawanur en Irak - Región del Kurdistán.

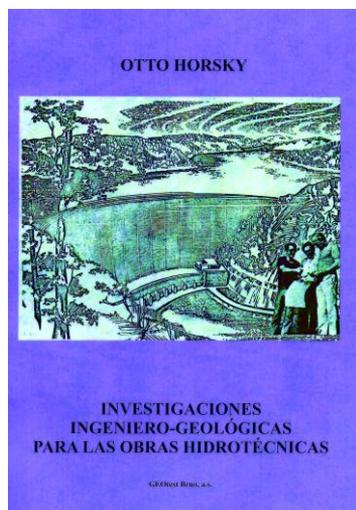
Junto con el Prof. RNDr. Pavel Bláha, DrSc, escribió en checo un libro titulado “*Iženýrskogeologický průzkum pro přehrady*” (Las Investigaciones Ingeniero Geológicas para las Presas) (2009) traducido al inglés con el título “*The Application of Engineering Geology to Dam Construction*” (2011).

Actualmente en vez de cuando trabaja como revisor de ciertas revistas profesionales, por ejemplo, para EGRSE, para el Diario o de Geología Ambiental (Revista Internacional de Ciencias de la Tierra);

# PALABRA FINAL SOBRE LA SEGUNDA EDICIÓN DEL LIBRO ZÁVĚREČNÉ SLOVO KE DRUHÉMU VYDÁNÍ KNIHY

## Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Obras Hidrotécnicas.

Inženýrsko-geologický průzkum pro hydrotechnické stavby



El estudio Ingeniero - Geológico y Geotécnico del lugar del emplazamiento de una presa y de embalse es una tarea progresiva y continua, e sin ninguna duda, muy seria e importante. Comienza por el análisis de la documentación y termina con la auscultación de la obra en servicio. La progresión de tareas comprende etapas bien definidas, correspondientes con etapas del proyecto de la obra. Precisamente para las etapas iniciales, los que son de mayor importancia para el desarrollo del proyecto, se propone por este instructivo una sistemática de trabajo, definiendo en general las tareas que forman parte de cada etapa, estableciendo las premisas y pormenorizando cada investigación en particular. Aunque este instructivo el autor terminó escribir en el año 1983 y era impreso por primera vez por el Büro Geológico Checo, es decir, hay que calcularlo ya

como el trabajo bastante viejo y en muchos sentidos superado, presentamos su nueva edición, agregando solamente algunos nuevos anexos. Es por la razón siguiente: los métodos y sistemática de trabajo de las investigaciones ingeniero geológicas y geotécnicas para las presas y embalses presentados en este libro son modernos e innovadores y no se han cambiado tanto. Lo que sí, lo que ha logrado mucho desarrollo gracias a la modernización de equipos y de técnicas de investigación, es la geofísica aplicada a la construcción.

Métodos modernos de las investigaciones geofísicas para las obras hidrotécnicas presentados en este libro en el anexo, lograron el desarrollo tan exitoso gracias a la colaboración muy estrecha entre geofísico prof. RNDr. Pavel Blaha, DrSc e ingeniero geólogo Ing. Otto Horský, CSc. En el libro presentamos además de muchos ejemplos prácticos de las repúblicas Checa y Eslovaca también ejemplos de los trabajos concretos de Peru, Cuba, España y de varios otros países. Es por la razón, que el autor del libro trabajó tres años en España y cuatro años colaboró con los especialistas cubanos como el Asesor Principal del Ministerio de las Construcciones de Cuba y los cuatro años más como el jefe de las investigaciones para la Hidroacumuladora en el Escambray.

Vydavatel: Geotest Brno, a.s.

Formát A4, barevný obal, celobarevná kniha na křídovém papíře, 290 stran textu včetně obrázků, fotografií, grafů a tabulek. Cena 24 EURO nebo 650 Kč bez DPH a bez dopravních nákladů..

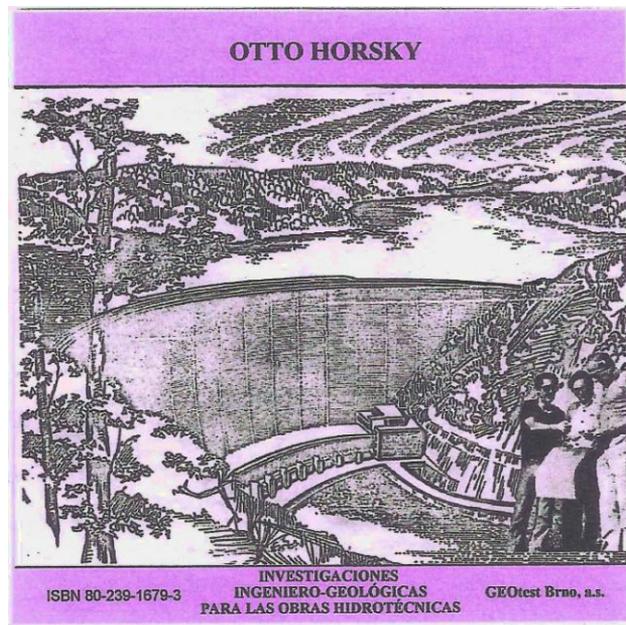
ISBN: 80-239-1679-3 © 2003

Knihu lze zakoupit na: [horsky@horsky.org](mailto:horsky@horsky.org) nebo: 602791425@seznam.cz

[www.horsky.org](http://www.horsky.org) nebo: [www.horsky.estranky.cz](http://www.horsky.estranky.cz)

## Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Obras Hidrotécnicas.

El libro en CD



Vzhledem k vysokým nákladům na tisk knihy ve formátu A4 v celobarevné podobě a na křídovém papíře a k vysokým dopravním nákladům (knihy váží 2 kg), bylo přistoupeno i k vydání knihy na nosiči CD. To umožnilo její zaslání do mnoha zemí světa, kde se mluví španělsky. Kniha je používána jako vysokoškolská učebnice v mnoha zemích světa, například na některých univerzitách v Peru, v Mexiku, ve Španělsku, na Kubě a v Kostarice.

Vydavatel: Geotest Brno, a.s.

Stran 292 včetně barevných obrázků, fotografií, grafů a tabulek. CD v pevném barevném papírovém obalu A5.

Autor přílohy „Grupo Geofísico“ prof. RNDr. Pavel Bláha, DrSc.

Cena 5 EURO nebo 137 Kč. bez DPH.

ISBN: 80-239-1679-3 © 2003

Knihu lze zakoupit na: [horsky@horsky.org](mailto:horsky@horsky.org) nebo: [602791425@seznam.cz](mailto:602791425@seznam.cz)

[www.horsky.org](http://www.horsky.org) nebo: [www.horsky.estranky.cz](http://www.horsky.estranky.cz)

## Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Obras Hidrotécnicas.

### Tercer edición en la forma electrónica

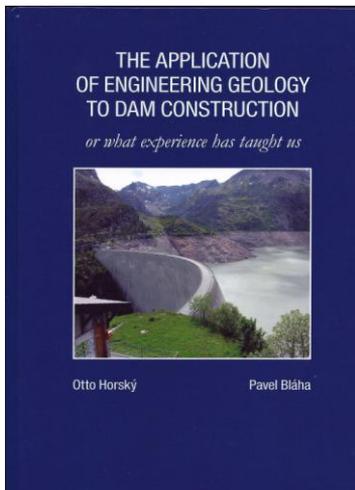
Třetí vydání, v elektronické podobě.

Knihu lze zakoupit na [www.databook.cz](http://www.databook.cz)

Vydání knihy na nosiči CD bylo prakticky rozebráno, stejně jako její předchozí vydání v papírové podobě. I když uplynulo od jejího vydání v roce 2003 mnoho času a autor knihy získal na různých přehraních stavbách doma a v zahraničí mnoho nových poznatků a zkušeností, ponechal tuto knihu k elektronickému vydání v původní podobě. V následujících letech přepracoval, graficky upravil a vydal spolu se spoluautorem, geofyzikem Doc. RNDr. Pavlem Bláhou, DrSc, všechny v této knize uvedené, ale hlavně i nově získané poznatky v knize *Inženýrskogeologický průzkum pro přehrady* ©2009, ©2015, která vyšla následně i v anglickém jazyce pod názvem *The Application of Engineering Geology to Dam Construction* ©2011, ©2015.

# The Application of Engineering Geology to Dam Construction or “What Experience Has Taught Us”

Inženýrskogeologický průzkum pro přehrady, aneb „co nás také poučilo“ v anglickém jazyce.



The present publication is intended for those interested in the procedures used and the problems encountered in carrying out engineering-geological surveys for the design and construction of dams. The intention is to provide a basis for technical dialogue between engineering geologists, geophysicists, hydrogeologists, geotechnicians and other specialists on one hand, and investors, planners and designers on the other. The book should also be of use to those involved in the operation and management of dams and reservoirs. The book has been designed so that it can be used as a text in colleges and universities. It summarizes the results of work carried out by the authors, one an engineering geologist and the other a geophysicist, at different dam sites in the Czech Republic and abroad. Both authors have had a long career serving as experts or consultants in engineering-geology, and have visited many dam projects in other countries. This book is the outcome of their combined theoretical and practical experience.

The book consists of an introduction, a conclusion, and eight technical chapters. In all of them, the authors have placed special emphasis on practical examples, since the scope of the tasks involved in carrying out and interpreting the results of engineering-geological surveys can best be understood by using case studies to illustrate the techniques used and the problems encountered. An effort has been made not to become too deeply involved in the theoretical background to the subject. Rather than dictating rigorous rules and standards, an attempt has been made to illustrate scenarios that might be encountered within the planning of a project and the operation of a dam. The authors have especially drawn attention to circumstances, the neglect of which can lead to significant increases in the costs of dam construction and that, in some cases, may make the operation of a dam impossible.

In the introductory chapters the basic criteria for the choice of dam design are discussed in relationship to the characteristics of the selected site. The roles of geology, geomorphology, climate, ecology, and other features that affect the selection of the site for a dam are discussed. The basic principles and tasks of engineering-geological surveys for dam sites are described. Importance is placed on the division of the survey into stages corresponding to the design stages, as well as on the requirement that the survey must take account of all factors that affect safety during dam construction. Great attention is paid to the strategy of the survey, including a detailed list of the separate tasks involved. An important task of the book has been to draw systematic attention to the technical specifications and the planning of survey work, in which the investor, the designer, or simply the client who contracted the survey formulates the basic requirements that the survey should meet. The procedures used for engineering-geological mapping of the area of a hydro-engineering structure are described in detail paying special attention to the dam site itself. The method used to compile special-purpose engineering-geological maps is also explained. The scope of both preliminary and detailed hydrogeological surveys is described together with the methods used to check the condition and correct function of hydrogeological boreholes using geophysical techniques, TV cameras, etc.

In the second part of the book, the applications of geophysical measurements at various stages of a survey are explained. The use of particular geophysical methods to solve specific problems is illustrated by case studies. Emphasis is placed on the importance of collaboration between the engineering geologist and the geophysicist in defining the problems to be solved, and planning and carrying out the tasks required by the survey. A description of the scope of direct survey work follows, paying special attention to the study of the site directly affected by the construction of the dam itself and to the delineation of the area to be covered by the preliminary and detailed surveys. The methodology used for comprehensive documentation of exploratory workings is assessed in great detail. The authors also pay particular attention to the general principles governing a geotechnical survey, and the methods used to carry it out. The main types of field and laboratory geotechnical tests are described. An important sub-chapter deals with the systematic correlations and the empirical relationships between the mechanical and physical properties of rocks.

In the last section of the book, the procedures used for engineering-geological surveys of the backwater areas of dams are described. Special attention is given to the modification of the banks of water reservoirs by

processes of abrasion, suffosion and landslides. The methods used to map and monitor these effects are described and examples of remedial procedures used to counteract these geodynamic processes are given.

In this book the authors have done their best to describe the procedures used for the engineering-geological and geotechnical surveys of dam sites and backwater areas, drawing attention to the problems that can be encountered in the design and construction of dams. The recommended working procedures have been described systematically. All the problems analysed in this book and the methods used to solve them are illustrated by practical examples. The authors trust that their experience of engineering geology and its applications gained over many years and described in this book will be of interest not only to experts, but also to students and the wider public interested in the global management of water resources.

Vydavatel: Repronis Ostrava

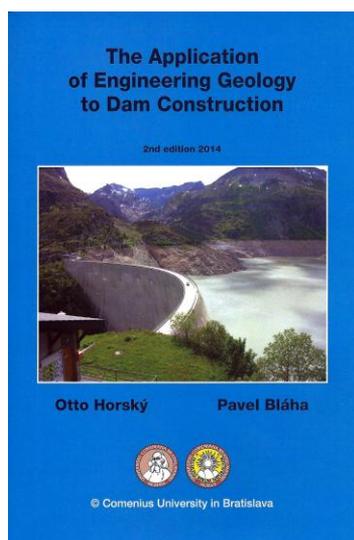
Rozšířené a doplněné vydání knihy „Inženýrskogeologický průzkum pro přehradu, aneb „co nás také poučilo“ Formát B5, pevná vazba, celobarevná na křídovém papíře, 296 stran textu v anglickém jazyce, včetně obrázků, fotografií a tabulek. Spoluautor doc. RNDr. Pavel Bláha, DrSc, cena 22 EURO nebo 610 Kč, bez DPH  
ISBN: 978-80-7329-278-2 © 2011

Knihu lze zakoupit na: [horsky@horsky.org](mailto:horsky@horsky.org) nebo: 602791425@seznam.cz

[www.horsky.org](http://www.horsky.org) nebo: [www.horsky.estranky.cz](http://www.horsky.estranky.cz)

## The Application of Engineering Geology to Dam Construction, or “what experience has taught us”

Druhé, rozšířené a doplněné vydání knihy v elektronické podobě na CD s papírovým obalem..



Po úspěšném uvedení knihy v angličtině - dnes je již ve více než padesáti zemích světa, vydala v roce 2014 Univerzita Komenského v Bratislavě její přepracované a doplněné vydání v elektronické podobě. Toto druhé vydání knihy obsahuje i poznatky obou autorů z pracovní návštěvy nejvýkonnějšího hydroenergetického díla na světě, přehrady Itaipú v Brazílii a Paraguaji (2013). Tato kapitola je zde zpracována velmi komplexně a může sloužit jako základní informace jak pro běžného cestovatele, tak pro odborníky, kteří hodlají toto dílo, hodné zařazení mezi technické divy světa, navštívit. Kniha obsahuje 321 stran a desítky barevných fotografií, obrázků a tabulek. Všechny popisované přehrady jsou v tabulce uvedeny včetně souřadnic, takže je snadné je dohledat a navštívit. Podrobné informace možno získat od autorů na adrese: [horsky@horsky.org](mailto:horsky@horsky.org), nebo [blaha@geotest.cz](mailto:blaha@geotest.cz)

The English book edition in hardback was published in 2011 in a print run of 1,000 copies and is already 70 % sold out. This book edition on a CD is supplemented by certain other subchapters and knowledge.

Vydavatel: Univerzita Komenského v Bratislavě.

Stran 321 včetně barevných obrázků, fotografií, grafů a tabulek. CD v pevném barevném papírovém obalu A5. Spoluautor doc. RNDr. Pavel Bláha, DrSc.

Cena 137 Kč. bez DPH nebo 5 EURO.

ISBN: 978-80-223-3596-6 © 2014

Knihu lze zakoupit na: [horsky@horsky.org](mailto:horsky@horsky.org) nebo: 602791425@seznam.cz

[www.horsky.org](http://www.horsky.org) nebo: [www.horsky.estranky.cz](http://www.horsky.estranky.cz)

## **Prólogo al libro *The Application of Engineering Geology to Dam Construction***

*Otto Horsky, Pavel Blaha*

“*La aplicación de la ingeniería geológica a la construcción de presas*” es fruto de los trabajos realizados por un ingeniero-geólogo y un geofísico en varias presas en la antigua Checoslovaquia y muchas más en otros países, en las que actuaron como responsables de las investigaciones o como asesores.

El libro está destinado a los interesados en la problemática de las investigaciones a efectuar durante el proyecto, construcción y explotación de presas y embalses. Puede ser útil para la comprensión y entendimiento entre las entidades que los promueven y los proyectistas, y entre los ingenieros, geólogos, geofísicos, hidrogeólogos, geotécnicos y otros especialistas. Será igualmente útil a cuantos técnicos intervienen en el mantenimiento de presas y en la explotación de embalses. También puede servir como texto en centros de enseñanza superior.

El libro consta de la introducción, conclusiones y ocho capítulos. En todos los capítulos se exponen casos reales, considerando que la mejor forma para comprender la amplia problemática de las investigaciones es la explicación de casos concretos. Se ha pretendido reducir la parte teórica y presentar casos concretos, que hemos encontrado en las fases de proyecto, construcción y explotación, antes que exponer las normativas y las teorías. Objetivo principal es incidir en casos, en los que errores en las investigaciones originaron sobrecostes en la construcción de la presas, problemas durante la explotación, e incluso siniestros y daños catastróficos.

En los primeros capítulos se exponen los criterios básicos para el diseño de la presa, los factores que determinan la selección de su ubicación y su tipología. Se analizan los aspectos geológicos y tectónicos, morfológicos, climatológicos, ecológicos y cuantos tienen importancia para la selección de la cerrada. Continúan con la metodología para las investigaciones de Ingeniería Geológica. Se considera muy importante que las fases de las exploraciones estén de acuerdo con las fases de del proyecto, para mejorar la efectividad de los trabajos y cumpliendo con todos los aspectos relacionados con la seguridad de la obra. Se presta especial atención a la técnica de las exploraciones de Ingeniería Geológica, definiendo con detalle todas las tareas fundamentales a realizar. Es de gran importancia definir las características técnicas del proyecto, de acuerdo la entidad promotora de la presa y embalse, el proyectista y el geólogo ingeniero, que en definitiva establecen los objetivos de las investigaciones y las posibles soluciones. Se continúa con un capítulo en el que se describe con detalle el levantamiento a efectuar sobre el área de interés y en especial sobre la cerrada, ubicación de la presa. Se describe minuciosamente el proceso de cartografía y metodología para presentar todos los datos geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos. Se describe el modo y número de investigaciones hidrogeológicas necesarias,

incluido el control de sondeos y pozos hidrogeológicos por métodos geofísicos, cámaras de TV, etc.

En la segunda parte del libro, se exponen los estudios geofísicos básicos en las diferentes fases de las investigaciones. Se definen las posibilidades de los diferentes métodos de prospección geofísica para resolver problemas concretos. Se considera muy importante la estrecha colaboración entre el ingeniero geólogo y el geofísico durante todas las fases de la investigación: definición de los trabajos, realización y presentación de los resultados. Se continúa con el análisis del número e intensidad de exploraciones directas a efectuar. Especial atención se dedica al estudio del emplazamiento de la presa y del área afectada por las obras. Se define la extensión del área a estudiar en cada etapa de las investigaciones. En un capítulo se exponen los métodos de presentación de la documentación de todos los trabajos de exploración de Ingeniería Geológica y Geotecnia. Se presta mucha atención a la descripción de los criterios y procedimientos básicos en las investigaciones geotécnicas. Se reseñan los ensayos de campo y de laboratorio necesarios para definir los parámetros geotécnicos que se precisan para el proyecto de la presa. Se califican con detalle las correlaciones y enlaces entre los parámetros mecánicos y físicos de las rocas.

En la última parte del libro se describen las investigaciones de Ingeniería Geológica a realizar en el vaso del embalse para prever los procesos morfológicos de erosiones e inestabilidades de ladera. Se proponen modos de solucionar los posibles problemas y monitorizar su desarrollo.

En nuestro libro se intenta hacer un esbozo de los problemas relacionados con las investigaciones de ingeniería geológica durante el proyecto y construcción de presas y proponer soluciones y procedimientos de los trabajos. Todos los capítulos se documentan con casos concretos. Consideramos que el resumen de nuestra experiencia práctica de muchos años puede ser una ayuda e información no sólo para los profesionales, sino también para el público interesado por estas estructuras y su problemática.

En Brno, 25 de noviembre de 2009

Los autores

**Sugerencias y observaciones de Angel García Yagüe sobre el libro:**

## ***The Application of Engineering Geology to Dam Construction***

Estimados Dr. Otto Horský y Dr. Pavel Bláha:

El libro lo encuentro magnífico, muy de acuerdo con mi práctica profesional, porque siempre consideré que, en los estudios del terreno para grandes obras públicas, debía intervenir la Geología, la Geofísica con toda su gama de métodos, los sondeos mecánicos, siempre con los registros geofísicos, las galerías y zanjas para observar directamente el terreno, y como no, los ensayos in situ y en laboratorio.

Cómo es lógico, el arte, la aplicación juiciosa, prescinde de aquellos métodos cuyos resultados no compensan la información facilitada y sabe coordinar lo conseguido con todos los métodos empleados.

Esta labor obliga a poseer amplios conocimientos de quienes realizan los estudios, que vuestro equipo posee, e impone muchas horas de trabajo, que yo dedicaba por ética profesional en horas y días no obligados, y que con frecuencia no aplican las sociedades por el coste de los estudios y las limitaciones de los presupuestos.

Mi enhorabuena.

Cómo sé que se hará más de una edición, pienso iniciar su estudio y mandaros cuantas sugerencias crea pueden aclarar o complementar detalles de las descripciones sobre obras que conozco.

A lo largo del siglo XIX se han introducido técnicas y metodologías, que ahora pueden parecer normales a los estudiantes e incluso técnicos bien formados. Sin embargo, los sondeos mecánicos para investigar el terreno a efectos de cimentaciones eran poco menos que desconocidos en 1900. Tengo estudios con ellos en 1850-60 (Presa de Puentes en el Guadalentín, la reconstruida tras su destrucción por socavación en 1802, fenómeno entonces desconocido). La geofísica aplicada a la minería se desarrolla a partir de 1920, y la aplicada a la ingeniería en España después de 1940. La primera vez que se aplicaron en España inyecciones para efectuar una pantalla de impermeabilización, y creo que una de las primeras en el mundo, fue en la Presa de Camarasa, en los años 1930.

Si no se advierte que lo realizado en un determinado caso corresponde a los medios disponibles en esa época, puede introducirse una confusión. Por ejemplo, podría citarte un estudio en el que se justifica no hacer sondeos mecánicos por ser más económico construir una galería de exploración.

En el caso de túneles, antes de 1950, en España, la embocadura se realizaba cuando el techo era de 3 ó 4 m. Hoy se efectúan excavaciones y falso túnel con techos de más de 30 m. En 1940, en España, se admitían galerías para transporte de agua de 5 y 6 metros cuadrados de sección. En 1960 se consideraba no económico secciones inferiores a 10 m cuadrados.

Es tema de historia de la construcción, que nunca debe perderse de vista.

Creo puedo complementar e incluso sugerir correcciones en las descripciones que realizas sobre presas españolas.

Conozco el porqué de lo que se hizo en Boadella, sobre lo que no estaba de acuerdo y tengo la historia completa de Tous hasta su destrucción. Realicé el único informe geológico para la primera presa, del que conservo una copia, los ingenieros que participaron en el tema, errores importantes y las razones que motivaron lo que se construyó.

Es curioso que el tribunal de Valencia que actuó en el juicio llamó a declarar a cuantos intervinieron, e incluso imputó inicialmente y mantuvo en prisión unos días a un par de ingenieros superiores y un ingeniero técnico, y que pese a que el único informe existente era el mío y tenía el asesoramiento de un geólogo, a mí ni me llamaron ni me pidieron ayuda para la segunda presa, por eso de que pudiera estar "contaminado". Tengo sondeos de hasta el centenar de metros de profundidad con registros geofísicos, cortes, y sobre todo cortes geológicos de toda la zona, que son muchos km. Por supuesto, en el informe que redacté incluyo el detalle de todos los estudios previos de la zona para este embalse y para otros que no se hicieron.

### **Sugerencias sobre el libro *The Application of Engineering Geology to Dam Construction***

Conservo en mi archivo más de 400 informes sobre presas españolas, que estaban en proyecto, construcción o tenían problemas de mantenimiento desde enero de 1961 hasta marzo de 1991. En los años 1959 y 1960, proyecte tres presas de materiales sueltos.

Conocí a los ingenieros que las proyectaban y construían, recuerdo las técnicas disponibles en su tiempo y las "manías" de sus ingenieros y modas de la época. Podía extender el periodo unos años antes, pero en este caso las conocí como alumno encargado de un laboratorio de ensayos hidráulicos o como ingeniero de la empresa privada, pero no con la autoridad y medios de exploración que disponía en el Servicio Geológico de Obras Públicas. También podría extender la época hasta el año 2000 y más, pero en este caso como asesor y solo las construidas en algunas cuencas hidrográficas. El total de informes realizados supera los 700 e incluso en 1959 proyecté dos presas de materiales sueltos y una de hormigón.

Una relación de presas no construidas antes de 1952, pero ya propuestas en el plan general de Obras Hidráulicas de los años 1930, y en bastantes ocasiones ya proyectadas, están descritas, a veces con mucho detalle, en un libro clásico: "Saltos de agua y presas de embalses" de José L. Gómez Navarro y Juan Aracil (Madrid 1952; 2 tomos, 2.493 páginas). Este libro lo adquirí al terminar el 4º curso y, con paciencia lo estudié en parte y lo leí en su totalidad.

Con este bagaje espero poder facilitarte informaciones, las más de las veces válidas, para que conozcas el proceso concreto del estudio del terreno y construcción de sus pantallas o incluso de la misma presa, y puedas exponerlo con seguridad, y en pocas ocasiones, para que puedas realizar algunos cambios en las figuras o descripciones, caso de que creas conveniente modificar lo expuesto en la primera edición.

Una primera sugerencia para un libro que se estudiará por técnicos de diferentes países.

Cada vez que se cita un caso concreto, debiera indicarse en que país se encuentra.

### **Boadella (Página 26)**

En Galicia es frecuente que el granito de grano medio o grueso (granito en sensus latius, roca con granos visibles, que incluye granodiorita, sienita, diorita, ....), esté descompuesto por la acción meteórica e infiltración, con espesores que superan la decena y veintena de metros, perforados en cerradas para presas por mí estudiadas. En Galicia recibe el nombre de xabre. En la Sierra de Guadarrama (Ávila-Madrid), Sistema Central, también existe, pero con menor espesor, como una capa general que recubre el granito o asociado a fallas, y recibe el nombre de jabre. En Cataluña los espesores del jabre, que recibe el nombre de xauló, son mayores y se comenta que alcanza incluso los 100 m. En el año 1960 estaba de moda realizar pantallas con gruesos pilotes adosados, o dispuestos al tresbolillo, de lo que encontrarás referencias en el congreso de Estambul (Turquía). Este dispositivo se aplicó en la presa de La Chorrera (alto Tajo), para apantallar un collado relleno con loes, con espesor superior a la decena de metros, pero los pilotes eran de hormigón. El estudio geológico para este embalse lo realicé cuando trabajaba en EPTIS, y la pantalla la efectuó Rodio (1958), estando yo encargado de su control y dirección. En este caso se inyectaba cemento en el triángulo curvilíneo entre los pilotes dispuestos al tresbolillo.

En la presa del Jerte se encontró este problema, pues en esta zona el amplio cauce se ajusta a la traza de una falla que se extiende desde al Cabo San Vicente, al SO de la Península Ibérica, hasta el Sistema Cantábrico. En la Presa de Valtraviés, cabecera del Cofio, provincia de Ávila, el cauce sigue una falla de orientación W-E y la descomposición de las granodiritas es tan rápida, que en un par de meses la roca extraída de una galería que atraviesa la zona, se convertía en una pasta arcillosa. En este caso se consideró como más económico no profundizar la cimentación para esta presa de unos 20 m de altura, y realizar una pantalla de inyecciones de lechada de cemento posteriormente. El coeficiente de permeabilidad del jabre es algo menor de  $10^{-4}$ , con el problema de aumentar con el tiempo por el lento transcurrir del agua infiltrada. Las inyecciones compactan el jabre, y sobre todo ciegan los filones de cuarzo, que en esta zona eran de espesor centimétrico y aparecen troceados, caminos principales del agua. Esta presa se terminó en el año 1967 ó 68, aunque en el catálogo oficial conste 1970.

Con estas ideas creo manifestar que no consideré como solución adecuada la realización de una pantalla de pilotes. Si considero adecuada la construcción de pantallas de arcilla continuas, por excavación de una zanja, como por ejemplo, la realizada en los años 1990 en el embalse de Loteta, próximo a Zaragoza, y en la margen izquierda del Ebro, construida para almacenar agua trasvasada.

No olvidar que el embalse de Boadella se complementa con dos presa de pequeña altura en dos collados, que constan en el catálogo oficial, con los mismos problemas y donde quiero recordar no se realizó la pantalla de arcilla.

### **Tous (Páginas 27, 28 y 29)**

La historia es más compleja, y tanto intervine en ella que, en parte, soy responsable de su construcción final, porque tras mi informe, el Consejero de Obras Públicas encargado de

hacer la propuesta final al pleno del Consejo, que si fuese negativa supondría abandonar su construcción, me preguntó en plan confidencial: Sr. García Yagüe, ¿cree Vd. que existen razones económicas que aconsejen terminar presa de Tous?. Mi contestación fue: no es de mi competencia evaluar su rendimiento económico, pero si no se termina, deben demoler hasta el último bloque de hormigón construido, para que no sea punto de peregrinación de la ingeniería mundial, como un monumento dedicado a la mala práctica e improvisación de la ingeniería española, cuyo coste económico es incalculable. (Como es lógico, no tengo nota exacta de la conversación, pero en esencia es lo indicado, ya que se dudaba de la justificación del gasto en función de los beneficios).

Su historia es muy compleja, con influencias sociales y políticas, e incluso con enfrentamientos personales, entre dos especialistas, que casi alcanzaron el ridículo. También por mi culpa, porque pedí a M.V.P. desarrollase la conferencia de clausura del curso de Geología Aplicada a la Ingeniería (era un curso de tres meses, por la tarde, dedicado a ingenieros y geólogos). En la conferencia puso el ejemplo de Tous, y posteriormente publicó el tema en la Revista de Obras Públicas, reproduciendo un plano con la firma del autor, J.L.F.C., persona de carácter agresivo y violento, y que defendía no tenían importancia las fallas y el terreno era impermeable. Éste se molestó, porque en definitiva era una censura a sus conclusiones, escribió unas réplicas en la R.O.P e inició una demanda judicial. El tema fue muy delicado, porque los dos eran altos cargos en el MOPU. En medio de estas discusiones me encargan el informe, que forzosamente tenía que dar la razón a M.V.P. El tema era tan delicado, que pese a que el informe que hice con fecha 1972 y tenía que pasar oficialmente por el Servicio de Vigilancia de Presas, de J.L.F.C., lo llevé personalmente al Consejo de Obras Públicas, en contra del trámite oficial.

Es un buen ejemplo, que concluyó con la destrucción del embalse por una avenida extraordinaria no prevista en el proyecto, ligada a presiones políticas que inutilizaron la reserva de grupos electrógenos para la de apertura de compuertas, y finalmente con un juicio en el que se sumó la codicia humana y el afán de atacar al antiguo régimen. Por estas razones realizo con cuidado extremo este comentario, acompañando de los documentos sobre el terreno que tanto influyó, todo por un error de considerar que materiales del Mioceno eran depósitos cuaternarios. Resalto, un buen ejemplo de la importancia que tiene el estudio del terreno, y cómo cuando se terminan las obras resaltan y hasta condecoran a los últimos, a los que pintaron las barandillas y olvidan a quienes sufrieron las angustias y dudas de los primeros momentos, cuando se estudió el terreno.

La fotografía que consta en la página 28 corresponde a la presa que finalmente se hizo en la misma cerrada, pero con mayor capacidad, no por razones o necesidad de explotación del embalse, sino para laminar una avenida análoga o superior a la estimada que destruyó la presa.

Expondré los documentos que existen sobre el estudio del terreno, con la interpretación, deducción o temas en los que intervine, indicando fecha, cuando me constan.

**1933.** Informe de D. Clemente Sáenz García, fecha febrero de 1933. Incluida en el estudio de 1936. Describe geológicamente la zona, que recorre desde Cofrentes y considera factible

construir una presa de unos 30 m de altura máxima en la zona un centenar de metros aguas abajo de la incorporación del río Escalona por su derecha, donde se construyó la presa de Tous, o aguas arriba de esta incorporación, admitiendo fugas de agua a través de las calizas. D. Clemente Sáenz García era Ingeniero de Caminos, profesor de la Escuela de Formación de los Funcionarios Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, dedicado a la Geología Aplicada, miembro de la Academia de Ciencias, y Consejero de Obras Públicas. Conocía la Geología de toda España con un detalle impresionante y fue el autor de todos los estudios geológicos del Plan General de Obras Hidráulicas de los años 1930. Este informe avaló la posibilidad de realizar la presa de Tous, pese a no disponer de planos del vaso ni detallados de la cerrada.

**1936.** Informe realizado por V. G. J., fecha 31 de agosto de 1936, que denomina provisional, y que recoge los estudios con sondeos mecánicos efectuados desde 1934. Incluye 7 sondeos mecánicos, con descripciones inmejorables de los terrenos atravesados, efectuados en una cerrada, poco antes del Arroyo de los Charcos y comenta se estaba estudiando otra unos 200 m más aguas arriba, donde se construyó la presa destruida, y otras cerradas más aguas arriba de la población de Tous. Es impresionante que pudiera redactar este informe, que se pidió con urgencia en la segunda mitad del mes de julio y hasta el 31 de agosto, en Madrid, pues dependía de la Jefatura de Sondeos, Cimentaciones, e Informes Geológicos (posteriormente Servicio Geológico de Obras Públicas), en plena revolución y descontrol completo, donde no podía llevarse corbata, ni sombrero, no se podía decir “adiós”, ni llevar luto, se habían quemado la mayor parte de las iglesias y las calles estaban en poder de patrullas de milicianos y checas.

El retraso en el estudio que se inició en 1934 se justifica por la falta de medios económicos.

En el corte por el eje de la presa dibuja una zona de unos 20 m de anchura, con límites verticales donde localiza depósitos terciarios formados por areniscas y conglomerados. Supone es debido una doble falla vertical y normal al corte del terreno que presenta como resultado final del estudio. Durante la guerra civil española no se realizó ningún nuevo estudio. (sabemos que los sondistas, por su cuenta, siguieron haciendo sondeos en el embalse de Alarcón, forma de evitar la movilización de los sondistas y peones, incorporándolos al ejército).

**1942.** La zona central del cauce con materiales del terciario, cuyo fondo no alcanzó el sondeo vertical realizado en su centro teórico, motivó el rechazo de la situación de la posible presa de 30 m de altura. En 1940 se estudió de nuevo la cerrada estudiada en 1936 y las cerradas aguas arriba de la población de Tous, cerradas de Punta Hernando y Puntal del Castillo. Considera que en la primera, la próxima o coincidente con la estudiada en 1936 tiene el inconveniente de presentar fallas importantes y además inundar las huertas y la población de Tous, con un problema social y de alcance político. Por todo ello considera preferible utilizar cualquiera de las otras dos, que con igual altura de las presas sobre el cauce, podrían determinar un embalse con capacidad de 2 millones de m<sup>3</sup>.

El informe de los sondeos y conclusiones lo realizó J.M.V.D-C, ingeniero de “Jefatura de Sondeos, Cimentaciones e Informes Geológicos”, después Servicio Geológico de Obras Públicas, tiene fecha 11 de mayo de 1942 y en él se indica las inyecciones de cemento a efectuar, las profundidades de cimentación de la estructura y las cargas máximas que pueden aplicarse en el terreno.

**1952.** Fue realizado por J.L.F.C. ingeniero entonces de “Jefatura de Sondeos, Cimentaciones e Informes Geológicos”, persona de características muy singulares, para analizar la probabilidad de una construir una presa de 30 m de altura en la primera cerrada estudiada en 1936. Tiene fecha julio de 1952. Indica que se había abandonado la idea de construir la presa aguas arriba de Tous, aceptando inundar esta población. El informe se basaba en recorridos por la zona y en dos sondeos verticales de unos 50 m y dos inclinados de 100 y 150 m. Describe tres falla y algunos manantiales de la zona, y concluye es posible construir la presa en la que se haría una pantalla de inyecciones, donde las admisiones no serían importantes.

Desde el principio del informe se percibe la intención de restar importancia a la permeabilidad del vaso, que considera impermeable, a la influencia de las fallas, que dicen están rellenas de arcilla y soldadas, y al coste de la pantalla de inyecciones a realizar. Creo que las presiones de los agricultores de la zona y la necesidad de aumentar las dotaciones para el abastecimiento de aguas a Valencia debían ser muy intensas, superando los problemas de inundar Tous.

**1954.** Como era habitual en esa época, tras el estudio del terreno se efectuó un informe por la “Asesoría Geológica del Ministerio de Obras Públicas” El informe tiene fecha julio de 1954 y está firmado por el ingeniero que realizó el estudio de 1952 y tres ponentes, ingenieros especializados en la Geología Aplicada. El informe reconoce la importancia económica de este embalse, que además debería agotar las posibilidades de la zona, con cota máxima limitada por el desagüe de la central hidroeléctrica de Mijares, elevando la altura 50 m más, para conseguir una capacidad de 400 hm<sup>3</sup>, es decir construir una presa de 83 metros de altura sobre el cauce.

Incorpora dos cortes geológicos a escala 1/5.000, dirección E-W. En los cortes geológicos sitúa tres fallas verticales y estratos horizontales de calizas del Cretácico Superior y Cretácico Inferior.

Impone que debe efectuarse estudios detallados de la cerrada adoptada y además, dada la naturaleza del terreno debe construirse en dos etapas: primero hasta los 30 m de altura, y luego tras observar su comportamiento, hasta su altura final.

**1960.** El ingeniero F.M.V. del Servicio Geológico presentó con fecha diciembre de este año el “Proyecto del sistema de impermeabilización, seguridad e inspección de la presa de Tous (río Júcar-Valencia)”. De este proyecto se deduce la construcción de la presa estaba ya adelantada, terminadas ataguía aguas arriba y la contraataguía aguas abajo, el túnel de desvío, las carreteras de accesos, bloques en la margen izquierda y derecha y al encontrarse

problemas en el cauce paralizaron la obra hasta realizar nuevos estudios, pero por supuesto olvidando la construcción en dos etapas y la observación del comportamiento. Supongo que en este proyecto y por razones de tipo administrativo no indican todo lo que habían realizado.

Se deduce que se había comenzado la presa en la cerrada elegida, inmediatamente aguas abajo del anchurón del río donde se asentaba Tous, población que ya había sido expropiada, y para evitar problemas, destruidas todas las viviendas, y no autorizando continuar con el cultivo en los terrenos aún no inundados. El **primer error** fue comenzar por las laderas sin conocer las características del terreno en el amplio cauce del Júcar, porque no existía ni un solo sondeo previo en esta cerrada.

Con la aprobación del proyecto se realizó parte de la pantalla de inyecciones, 37 sondeos mecánicos en cuadrícula para determinar el techo de las calizas bajo los acarreos, y un pozo y galerías bajo el cauce. El **segundo error** fue clasificar los materiales descubiertos como Cuaternario, que rellenaba un cauce labrado en las calizas con profundidad por debajo del nivel del mar en la costa valenciana. La cota del cauce es la +50 y el fondo lo sitúan por debajo de la -50. En definitiva, pienso que, al no realizar un estudio del terreno en una amplia zona no pudieron entender la disposición estructural de la zona.

Mi primer contacto directo con Tous fue el 11 y 12 de noviembre de 1963, fechas en el que realicé personalmente unos perfiles de sísmica de refracción en los hastiales de una galería horizontal, a unos 20 m bajo el cauce, a la que se accedía por una escalera de patas. En una reunión posterior celebrada en el ministerio, en la que participaban una docena de ingenieros, me opuse a clasificar como materiales pleistocénicos lo observado en la galería, dije que había visto la falla, con escasa milonita y ésta muy apretada, y lo clasificado como cuaternario, era una arenisca algo arcillosa con velocidad de ondas P superior a 3.000 m/s, que sería Terciario o más antiguo, datos que la hacían en principio apta para construir sobre ella los bloques de una presa de 90 m de altura. En mi opinión bastaría establecer juntas entre los bloques cimentados en calizas y los cimentados en terciario, o buscar otros dispositivos. Por supuesto me oyeron en silencio y no me echaron por la formalidad del acto, en el que se decidían temas muy serios.

En 1969 me encargaron estudiar la cimentación del aliviadero de hormigón, que al decidir una presa mixta, con estribo derecho, aliviadero en superficie en este estribo, estribo izquierdo de hormigón, y parte central de materiales sueltos (núcleo de arcilla y espaldones de escollera). Se hicieron 17 sondeos mecánicos para asegurar el apoyo del aliviadero, especialmente el cajero izquierdo, dispuesto sobre el límite de la caliza, sobre la que se ajustaba el núcleo de arcilla (Informe 10 de abril de 1970). Posteriormente realicé un perfil según el eje de la presa de la pantalla a construir, y unos sondeos aguas arriba de la pantalla como parte del sistema de control del efecto de la pantalla de inyecciones a realizar. Este perfil es muy detallado, con registros de rayos gamma en todos los sondeos, y correlación de niveles muy precisa, salvo en la margen derecha, donde se la presencia de conglomerados, de calizas con cemento calcáreo, no pude relacionarlos con los niveles de la margen izquierda.

Conservo este perfil, que nadie me ha pedido ni tampoco pude incluir en un informe, pues tras el accidente y hasta que se resolviese judicialmente el tema todo era secreto, y cuando concluyó a nadie le interesaba saber el colosal error de considerar como Cuaternario los

conglomerados y areniscas arcillosas o margosas, que hubieran permitido cimentar sobre ellas una presa de hormigón, aunque tomado precauciones.

**1972.** El Consejo de Obras Públicas informó no puede aprobar el proyecto de la presa mixta porque no ha sido estudiada la impermeabilidad del vaso, y en todos los informes, menos en el realizado por J.L.F.C., se advierte de la posibilidad de fugas. En junio de 1971 me encargan del estudio de la permeabilidad del vaso, pues de ello dependía la altura de la presa, según el Consejo de O. P., altura fijada en la cota 83 ó 135, y no se podía evaluar el coste de las posibles pantallas.

Al recoger la documentación resulta que los únicos planos existentes de la zona de la cerrada son: uno a 1/5.000 y otro, que cubre sólo la zona del cauce, donde se habían realizado los sondeos, a escala 1/1.000. Aunque no era de mi competencia, encargué y aboné un vuelo para obtener el plano del vaso a escala 1/10.000, para evaluar la capacidad del vaso, porque se había calculado con los planos topográficos nacionales a escala 1/50.000; un plano de una amplia zona de la cerrada para obtener un plano a escala 1/2.000 y un ortofotoplano, para poder situar con la mayor precisión posible las fallas en la cerrada. En febrero de 1972 me comunican oficialmente que debido a necesidades varias, el informe debe estar disponible en marzo de 1972. Esta nueva petición obligó a no realizar más de ocho piezómetros, dispuestos en ambas laderas en el vaso, que se incluyen en el informe, con el nivel de agua al principio y fin de jornada y registros de radioactividad natural, con los que podía analizarse el comportamiento del agua embalsada y su fuga o no a las cuencas próximas y hacia aguas abajo.

La labor realizada fue intensa, consiguiendo: un detallado corte geológico de la zona gracias a la intervención del paleontólogo, especialista en microfósiles, Dr. José Luis Saavedra, que también realizó el plano geológico<sup>1</sup> a escala 1/50.000, con extensión de unos 800 km<sup>2</sup>; superponibles a la fotografía aérea de una amplia zona, de la cerrada, a escalas 1/33.000 y 1/15.000, en los que colaboró la geóloga Concepción Bonet; cinco cortes geológicos, a escala horizontal 1/25.000 y escala vertical 1/10.000, transversales a la dirección general de río Júcar, hasta alcanzar los límites laterales de su cuenca.

El objetivo fundamental de los planos era situar las fallas, y fracturas importantes y describirlas en lo posible, conociendo ya que en las galerías de la cerrada se habían atravesado en la margen derecha dos niveles de cuevas a cota inferior a la 135 y superior a la del cauce. Puse nombre a todas las fallas importantes, nombre que se han conservado en los estudios posteriores.

Los anticlinales y sinclinales tienen orientación NW-SE, que coincide con la dirección del cauce. Las fallas principales tenían igual dirección general, se extendían a lo largo de más de 30 km y había sufrido presiones normales de compresión y posteriormente de descompresión, generando unos grandes bloques hundidos, rellenados por materiales terciarios sobre los que labró su cauce el río Júcar. Las fallas más importantes paralelas al cauce eran: Barranco de los

---

<sup>1</sup> Existía el Plano Geológico Nacional a escala 1/50.000, que nos sirvió de ayuda, pero que tuvimos que adaptar y situar en él las fallas definidas en las fotografías aéreas, que eran mucho más numerosas que las representadas en éste plano.

Charcos, Sumarcárcel y Tous. Los cortes geológicos y los planos geológicos a partir de los recorridos por la zona, y fotogramas aéreos a escala 1/33.000 y 1/20.000 los hice personalmente, confrontando con los resultados del Dr. José Luis Saavedra y Concepción Bonet y los planos del Instituto Geológico y Minero a escala 1/50.000. Había otras muchas fallas y fracturas de menor extensión, cruzando a las anteriores, que explicaban lo obtenido en los sondeos en el cauce. En el informe se incluyen 50 fotografías que apoyan las descripciones del terreno, de las fallas y su relación con las señales de carstificación.

Posteriormente estudiamos un taladro para inyecciones en la margen derecha, en el que se habían introducido varias toneladas de cemento sin conseguir su cierre. Pese a utilizar registros de sondeos y el televisor, no pudimos localizar hueco alguno que justificase las admisiones registradas al efectuar la pantalla. Posteriormente, en la primera subida del nivel del agua, terminada la presa, se produjo un remolino en la superficie, que coincidía con un sumidero destapado sobre la falla del Barranco de los Charcos, próximo al estribo derecho de la presa, con fuga superior al  $m^3/s$  y afloramiento en el barranco de Charcos, junto a su incorporación al Júcar, unos 800 m aguas abajo de la presa.

La presa construida era de hormigón en los estribos, y en el derecho, inmediato al cauce, sobre calizas, un aliviadero con tres vanos, de 15,35 m, cada uno, compuertas verticales, cota del umbral la 77,00, capaz de evacuar  $1.329 m^3/s$  a la cota de explotación, la 84,00. La avenida máxima prevista era de  $6.968 m^3/s$ , posible de evacuar sin alcanzar la máxima cota de coronación, la 98,50. La parte central de la presa, sobre el cauce, era de escollera, con núcleo de arcilla. La capacidad del embalse con la cota de explotación, la 84,00, máxima para respetar la presa hidroeléctrica de Millares, era de  $52 hm^3$ .

Lluvias extraordinarias, imprevisibles según el Servicio Meteorológico Nacional, se produjeron el 19 y 20 de octubre de 1982. En la amplia cuenca del Júcar y sus afluentes se registraron más de 500 mm, con más de 100 mm/hora en la mañana del día 20. La tormenta inutilizó el suministro de energía a la presa. Las compuertas disponían de un grupo electrógeno, pero el grupo se encontraba al pie de la presa, junto al estribo izquierdo, donde se iniciaba un túnel, por el que suministraban agua al abastecimiento de Valencia, traslado realizado por petición oficial. Intentaron trasladar el grupo a la margen derecha, pero resultó imposible por el temporal, intentaron subir las compuertas a mano, método válido si no hubieran estado en carga, y también resultó imposible. Por la mañana se presentaron dos puntas de avenida de  $6.000 m^3/s$ , una por la mañana a las 11 y otra a las 16 horas. El nivel del embalse, al no funcionar los aliviaderos, alcanzó la cota de coronación la 98,50, vertiendo sobre las compuertas y la escollera del espaldón. La destrucción de la presa se inició cuando la cota en el embalse era la 99,60. A las 19<sup>h</sup> 19<sup>m</sup> del día 20 un gran ruido indicó probablemente la rotura del muro izquierdo del aliviadero, límite entre el hormigón del estribo y presa de escollera.

Tras un proceso judicial lento, que paralizó toda actuación, en el que demandaban daños por 265.000 millones de pesetas (dos o tres mil millones de euros actuales), y responsabilidad penal por fallecimiento de dos personas, se pudo construir una nueva presa de materiales sueltos en el mismo sitio de la destruida, para aprovechar la pantalla de inyecciones, coronación a la cota 130,50; aliviadero capaz de  $5.270 m^3/s$  y avenida máxima igual que la

original; capacidad de embalse 340,4 hm<sup>3</sup>.

Respecto a la destruida se aumentó la capacidad del aliviadero para nivel de explotación máximo, y se aumentó la capacidad del embalse para poder almacenar y laminar las avenidas previsibles.

En la R.O.P. junio de 1933, existe un resumen del informe de expertos, que emitieron a petición del Juez. Conocí a todos los que hicieron el informe final y a los que firman el publicado. No puedo olvidar el respeto e incluso temor que tenían éstos al por mi señalado como disidente, por su poder de decisión en el MOPU, tan obsesivo con su ideas, que organizó excursiones a Tous para enseñar que no existía la falla de Los Charcos, .... Los autores del artículo huyen de los temas espinosos, al citar cinco especialistas en Geología aplicada, pues no señalan que los materiales blandos que rellenan el cauce eran del Mioceno, ni tampoco señalan que, uno de los citados, consideraba impermeable la cerrada y el vaso.

Por desgracia es un buen ejemplo de que la naturaleza a veces es imprevisible, y que las rencillas y personalismos también afectan a los ingenieros. Me reservo otras consideraciones, por no insistir en lo mismo.

En Internet puedes localizar el artículo citado y fotografías aéreas de la presa destruida.

### **Beleña** (páginas 30 y 31)

La presa de Beleña no es de contrafuertes, como visteis en la visita y se comprueba en la panorámica de la figura 2.3.15.

La historia es muy compleja. En el proyecto original era de contrafuertes, y así se inició la construcción, pero la empresa constructora quebró y no estuvo conforme con la liquidación para el abono de lo construido. Desgraciadamente en España la justicia es muy lenta, con posibilidades de apelaciones a sucesivos tribunales superiores. Su construcción era urgente, pues abastecería a Alcalá de Henares, ciudad de crecimiento acelerado. La solución fue buscar otra cerrada aguas arriba, que yo estudié con prospección sísmica. Pero resulta que la cerrada estaba seleccionada por un anteproyecto previo para un salto hidroeléctrico, con nuevas complicaciones y retrasos, por lo que decidieron otra cerrada entre ambas, en la que finalmente se construyó, con proyecto nuevo, que es la construida.

En el tipo de presa proyectado y construido ha influido mucho en España la disposición de medios, por razones económicas. Entre los años 40 y 60 había una carencia de cemento y no se disponía de maquinaria pesada, por el embargo internacional tras la derrota de Alemania. Al no disponer de maquinaria para movimientos de tierra las de estos materiales eran las menos económicas, mientras que las de contrafuertes y bóvedas tenían muchos atractivos. Después, al subir el coste de la mano de obra, especialmente los encofradores, las de contrafuertes aumentaron su coste y perdieron atractivo.

Yo trabajé en el año 1960 en una presa de contrafuertes, ya construida, llamada San Juan (Collado), que complementa el embalse de San Juan, en el río Alberche, junto a San Martín de Valdeiglesias (Madrid). Altura 19,5 m y 391 m de longitud de coronación. El terreno es granito, con algún problema por la presencia de jabre, o granito descompuesto. El problema que resolví era explicar los movimientos, un tanto elevados de los desplazamientos de las cabezas de los contrafuertes. Si os interesa creo recordar cuanto realicé personalmente y la

explicación sorprendente, con informe final avalado por Haefeli (director entonces del Laboratorio de Geotecnia de Zurich .

### **Quéntar** (página 33)

Convenía añadir situación, provincia de Granada. Sería preferible citar “Inventario de presas españolas. 1986”, porque es más moderna y acompaña la descripción con un corte algo diferente del dibujado y una fotografía de la presa y embalse<sup>2</sup>. Es una pena que no se diferencie en inglés entre presa arco y presa bóveda. En este caso es una bóveda, muy esbelta, de 133 de altura sobre cimientos y 200 m de longitud de coronación. Es un magnífico proyecto de Carlos Fernández Casado. Intervine en esta presa realizando unos ensayos de carga en la galería de la margen derecha, creo que a dos tercios de su altura, junto con prospección sísmica. La roca es muy singular, porque corresponde a dolomías del Triásico Marino, del Penibético, que ha cabalgado decenas de km, durante los movimientos Alpinos, entre el Oligoceno y el Mioceno. La roca está totalmente fracturada, hasta el punto que en contacto con el aire en algunas zonas se descompone en una gravilla o arena gruesa, utilizada como tal para hormigones. Si embargo la descomposición es lenta hasta el punto de poder utilizar para este fin en la construcción de Canales, junto a Granada. Es muy compacta, con densidades superiores a 2,7, y difícil de excavar. Su módulo de deformación es elevado, superior a los 10.000 MP (100.000 kg/cm<sup>2</sup>).

### **Susqueda** (página 33)

No está situada en Pirineos, sino muy próxima a Gerona, en el río Ter (Cota del cauce la 230, como señala muy bien la figura 2.3.21). No he leído el libro de Rebollo, que citas en la bibliografía, pero personalmente me dijo consto como autor del estudio geológico y de prospección sísmica de la cerrada, pese a que en el estudio está firmado por M. Fernández Bollo, porque me dijo que el detalle sólo podía corresponder a mi autoría y se enteró había trabajado allí en el año 1957. Sé que hubo muchos problemas y que en el Ministerio no estaban a gusto con cosas que se hicieron. Yo no diría gneis y dioritas, sino gneises y granitos (s.l.), y suprimiría “intensa fracturación”, que al menos en la cerrada no era tanta. Al estudiar un túnel construido hacía varios años y entonces abandonado, de varios km, en la margen derecha, inmediatamente después de la cerrada, encontré toda clase de rocas y hasta baritina, pero la roca no estaba intensamente fracturada ni en la cerrada ni a lo largo del túnel. En el túnel, pese a su sección de 10 a 15 m<sup>2</sup> y estar sin revestir, pude realizar perfiles de sísmica de refracción en su totalidad, salvo en el cruce de un par de fallas con derrumbes del techo. En definitiva, en la zona, la roca metamórfica era muy variada, y existían fallas y fracturas, pero no de modo excepcional. Cuando el valle no presenta unas laderas con pendiente uniforme, ni es posible por excavaciones, regularizar los apoyos laterales, es frecuente construir dos estribos de gravedad, que reciben los esfuerzos de los arcos superiores y complementan el

---

<sup>2</sup> Lo mismo pudiera hacerse con la presa de Beleña, donde consta el corte de la presa y una fotografía de presa y embalse. Es curioso, porque el nombre de Beleña es el nombre de una planta venenosa, que existe en el valle de este río.

cierre, “gravity abutment”, modo de regularizar los esfuerzos laterales<sup>3</sup>.

### **Valmayor** (Río Aulencia, Madrid, página 35, figura 2.3.22)

La zona es de granito (*sensus latius*) (granitos, granodioritas, sienitas, ...). El granito podía utilizarse como gravas para el hormigón, el único problema sería conseguir las arenas, pues en las proximidades no hay graveras explotables. El granito machacado facilita cantos y gravas de buena calidad (gruesos para el hormigón) pero las arenas obtenidas son de mala calidad, con ausencia de finos y en ocasiones, demasiado porcentaje de mica. En la cerrada creo que no se hizo hicieron sondeos mecánicos o muy pocos. Personalmente realicé prospección sísmica de refracción, en pleno invierno, con el agua de los arroyos helada. Para una presa de materiales sueltos el problema era encontrar la arcilla. Se discutió mucho el tema, pues se convertía en la primera presa española importante realizada con membrana asfáltica, tras fracaso en otra presa de altura parecida en zona no muy alejada. En este caso los recubrimientos sobre el granito eran mínimos. El único inconveniente fue no estudiar la cantera de granito para extraer la roca, pues tuvieron que prescindir de una montera, capa superficial de varios metros de espesor, porque el granito estaba algo alterado. La pantalla aguas arriba de capa asfáltica obligaba a que los asientos fuesen mínimos, con una compactación muy controlada. El río Aulencia pasa junto a El Escorial.

### **Genal** (Página 36)

Indica “Cordillera Bética”. ¿No será Genil?. Si es un caso español, lo desconozco. Es algo difícil de entender. Debiera acompañarse con un corte del terreno, como el de la figura 2.3.24 para la presa de Orlik. En el río Genil (Granada) tuve un caso para el contraembalse (pequeño embalse aguas debajo de la presa principal, para la regulación de caudales diarios, semanales, o para origen de un canal). Son bastantes los casos en los que se abandonó una cerrada topográfica por deslizamientos del terreno, a veces descubiertos por la fotografía aérea o la inspección directa en el terreno, otras mediante sondeos mecánicos o geofísicos. Si el volumen no era importante, se optó por retirarlo, o por atravesarlo para la cimentación en esta zona. Por ejemplo, la importante presa de Yesa, en el río Aragón Zaragoza), tiene el estribo derecho incrustado en una zona de flysh eoceno, con todos los síntomas de estar movida o muy alterada por un deslizamiento rocoso en su fase inicial, que durante la construcción, hace ya más de 70 años, motivo profundizar la cimentación hasta alcanzar la roca estable, no descomprimida y alterada. Durante la explotación, lo situado inmediatamente aguas arriba del estribo izquierdo se desplazó y siguió desplazándose lentamente, pese al estudio y remedios efectuados. Creo que más adelante citáis esta presa y entonces comentaré el tema. Más importantes son los deslizamientos de una morrena lateral junto al estribo izquierdo de la presa de Búbal, río Gállego (Huesca) y el situado aguas arriba junto al estribo derecho de la

---

<sup>3</sup> En el “Congreso internacional de grandes presas de Estambul”, el anterior al de Madrid, obsequiaron con un magnífico diccionario de presas en turco, francés, inglés, alemán, español, italiano, portugués. Para evitar confusiones, en las páginas pares existen dibujos detallados y en las impares los términos correspondientes. Cuando tengo dudas acudo a este diccionario.

presa de Lanuza, unos 15 km aguas arriba del anterior. Son bastantes los casos de deslizamientos en presas y embalses que he tenido que estudiar, últimamente localizar todos. Evaluarlos y señalar su evolución con el tiempo en la presa del río Flumen, junto a Huesca.

### **Malpasset** (Página 39).

Muy poco antes, en la revista de O. P. había unas declaraciones de su proyectista, considerado entonces el mejor proyectista n empresas bóvedas del mundo, en las que decía. *“lo difícil de un presa bóveda, no es proyectarla o construirla, lo difícil es destruirla”*. Murió poco después, consecuencia, dicen, de esta catástrofe.

### **Vajont** (página 40 y 41).

Creo recordar que el autor del proyecto estuvo muy preocupado con el estribo derecho de la presa, que fue reforzado con inyecciones para asegurarlo, y que resistió fenomenalmente. En esta zona existían y existen enormes deslizamientos, incluso en la misma cerrada, que en mi opinión despreciaron. Algunos la achacaron a un terremoto, cuando es lo contrario, fue la liberación de energía la que motivó los sismos previos y el final, y es la liberación de energía la que explica las velocidades finales de la masa desplazada, que en el terremoto del Perú (31 de mayo de 1970) alcanzó los 370 km/hora junto a Yungay. Es curioso que esta zona estableciera Dante el infierno.

**Página 41.** Convendría indicar qué significa  $\alpha$ , porque es un texto en inglés, que leerán o estudiarán geólogos de otros países, donde no representen el valor con este símbolo. Es fácil deducirlo leyendo todo el apartado, pero se agradecería tener la explicación junto a la primera vez que se cita.

### **Efectos sísmicos** (Página 44)

Las figuras 2.3.36 fueron dibujadas por mí. Corresponden a la hoja nº 2, titulada: “Proceso de formación del posible diapiro y planta y cortes geológicos esquemáticos”. En esta hoja se han dibujado el proceso de formación del diapiro desde el inicio hasta el final, en seis figuras; la sexta, titulada “Fase actual con el embalse” es **exactamente** igual que la que consta en la figura del libro, salvo los colores. Coinciden las flechas y hasta los pliegues de las pizarras del fondo. Junto a estas figuras se adjunta en esta misma hoja de planos nº 2 el “Croquis de planta”, que es **exactamente** igual, salvo las fallas, que en el informe que te cito son de línea continua y en negro, mientras que en la figura del libro son de trazos y en rojo. Esta hoja de planos pertenece al “Informe definitivo sobre los movimientos sísmicos registrados en las proximidades de la presa de Camarillas, sobre el río Mundo (Albacete)” (Servicio Geológico de Obras Públicas. Asesoría Geológica. Madrid 23 de diciembre de 1964). Está firmado por Fernando Reig Vilaplana, José María Ríos García, Ángel García Yagüe y Joaquín Gómez de Llarena. Sin título alguno, pues firman como vocales de la Asesoría. Todos, salvo yo, creo que han fallecido.

Fernando Reig Vilaplana era Dr. Ing, de C. C. y P., funcionario del M.O.P.U., con una

memoria prodigiosa y muy al día en todo lo referente a la Geología; José María Ríos era profesor de Geología de la Escuela de Ingenieros de Minas, geólogo muy conocido, autor de numerosos trabajos en la zona levantina española; Joaquín Gómez de Llarena, era Dr. en Ciencias, Profesor e investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, con múltiples publicaciones y traducciones de investigaciones geológicas alemanas.

Yo era el más joven y vocal más reciente y, en consecuencia, encargado de la edición, incluyendo los dibujos, planos y fotografías. Ninguno de los anteriores tenía interés por los terremotos.

El informe es “definitivo”, porque existe otro titulado “Informe previo sobre la naturaleza de los ruidos subterráneos y movimientos sísmicos registrados en las proximidades de la presa de Camarillas” con fecha 1 de marzo de 1962, de la misma entidad, realizado por José María Ríos García, Fernando Reig Vilaplana y Angel García Yagüe, informe realizado con urgencia por la alarma originada por “múltiples ruidos subterráneos” en los habitantes de las poblaciones próximas y en los responsables del embalse. Este informe ofrecía tres posibles causas de los ruidos, la tercera eran terremotos producidos por asentamientos de grandes bloques rocosos, cuyas milonitas habían sido lubricadas por el agua infiltrado del embalse.

Los informes de la Asesoría eran leídos por todos los vocales (hubo hasta 21), que eran científicos o ingenieros especializados en Geología, Geotecnia o construcción de obras hidráulicas y debían exponer su opinión, en el caso de no estar conformes<sup>4</sup>.

Hubo oposición, con escritos que hube de contestar personalmente, porque era el más convencido de ser terremotos inducidos, escritos que pasaba a los otros vocales de la comisión para su visto bueno, y posteriormente al presidente de la Asesoría (D. José María Valdés Diaz-Caneja). Del estudio propuesto en el informe de 1962 me encargaron a mí, y una vez analizados y estudiados todos los datos, observaciones muy meticulosas que constaban en el “libro de la presa”<sup>5</sup> y los facilitados por el Servicio Sismológico Nacional (solo un sismo registrado), se preparó el informe definitivo, añadiendo un nuevo vocal. Es forzoso indicar que la idea inicial de ser terremotos inducidos fue de F. R. V., y que la Geología de la zona fue aportación de Reig con el asenso de Ríos y G. Llarena, que yo traducía en los cortes geológicos. El estudio de los datos y cuanto se refería a los sismos fue labor personal.

Se habían observado 181 sismos de muy pequeña intensidad y uno de intensidad IV (Mercalli modificada), único que pudo facilitar el Servicio Sismológico Nacional<sup>6</sup>, y con localización muy imprecisa.

---

<sup>4</sup> Conservo los escritos de los oponentes y los manuscritos míos que contestaban a estas objeciones, manuscritos que luego pasaban a máquina las secretarías.

<sup>5</sup> En el libro se anotaban por el ingeniero encargado de la presa todas las incidencias: niveles de agua, precipitaciones, visitas y cualquier anomalía, como en este caso los “ruidos”, descritos con gran detalle.

<sup>6</sup> En aquel tiempo sólo consiguieron registrarlo en los observatorios de Almería, Granada y Málaga, con medios muy primitivos. Aún no habíamos superado nuestra gran crisis de la guerra civil, la amenaza de Alemania para que le facilitáramos ayuda de todo tipo, como pago de la ayuda a Franco, y apenas hacía un par de años empezó la ayuda de USA a cambio de las bases militares, que terminó con el embargo internacional acordado en la ONU, sólo incumplido por la Argentina del General Perón. Estábamos en pleno plan de estabilización.

Los restantes vocales que intervinieron en los dos informes no volvieron a intervenir en ningún fenómeno relacionado con terremotos, naturales o inducidos, mientras que yo estuve obligado a participar en la “Comisión Nacional Encargada de Redactar las Normas Sismorresistentes”, fui nombrado experto de la UNESCO para el estudio de terremotos, fundé la Asociación Española de Ingeniería Sísmica y estudié, ya con instrumental más adecuado la sismicidad inducida en los embalses de Almendra y Canales.

Lo sorprendente de Camarillas<sup>7</sup> es su poca altura: sobre cimientos, 48,50 m y sobre el cauce 36 m; capacidad máxima del embalse 35,84 hm<sup>3</sup>; presa gravedad, volumen 24.700 m<sup>3</sup>, longitud de coronación 24,70 m (la mitad de ellos excavados en la roca).

En 1968 J. P. Rothé publicó en *New Scientist*, el artículo: “Fill a lake, start an earthquake”, que produjo la alarma mundial, pero establecía que los sismos se originaban cuando la altura de agua almacenada superaba los 100 m. Lo sorprendente del caso Camarillas era que los temblores se iniciaron en marzo de 1961, con carga de agua de 23 m, es decir con un volumen aproximado de agua almacenada de 12 hm<sup>3</sup> y la máxima altura alcanzada 24 m. Tras el descenso hasta 12 m en septiembre de 1961, desapareciendo los sismos, volvieron a presentarse en noviembre de este mismo año, con nivel de agua 21 m, con máxima frecuencia hasta febrero de 1962, con altura del nivel de agua de 22 m.. Continuaron con mucha menor frecuencia, hasta que desaparecieron en agosto y no volvieron a registrarse.

En 1973 publiqué en la *Revista de Obras Públicas*<sup>8</sup> un artículo en el que describía casos internacionales y españoles y comentaba los posibles orígenes de los seísmos<sup>9</sup> relacionados con los embalses. En este trabajo describo con detalle el caso de Camarillas, primero estudiado en España.

En El Grado II, río Cinca (Huesca) (tipo gravedad, altura 130 m desde cimientos, 120 m desde cauce, 399 hm<sup>3</sup>) el 14 de diciembre de 1966, cuando el nivel de agua en el embalse alcanzaba dos tercios de la altura máxima, se produjo un terremoto de intensidad Mercalli-Modificada a las 01<sup>h</sup> 40<sup>m</sup>, que despertó a los vecinos de la población El Grado, situada a 1,5 km de la presa, con alteración del caudal de una fuente, y al día siguiente otro análogo. Lo relacionamos con el embalse sin encontrar una explicación lógica para su origen. En diciembre de 1988, 22 años después, se sintieron varios terremotos muy débiles en la población de El Grado. Éstos no tenían explicación, porque durante más de una decena de años no había variado el nivel del agua en el embalse. En la zona próxima existe una serie de diapiros, con extrusión de los materiales salino-arcillosos del Triás de facies germánica. Evalué la pérdida de energía cuando evolucionan en su ascenso, y tomando valores inferiores a los que se admiten internacionalmente, explicaban una liberación de energía compatible con la liberada por los débiles terremotos observados, solución que acepté pues no podían

---

<sup>7</sup> El caso de Camarillas se cita sin comentario alguno en: “Dams and Earthquakes”; H. K. Gupta y B. K. Rastogi; Elsevier 1976; pag 110.

<sup>8</sup> “Terremotos y embalses. Dr. Ángel García Yagüe. *Revista de O. P. Madrid*. Agosto 1973; págs 743 a 760.

<sup>9</sup> Los términos “seísmo y sismo “ tienen origen griego. “Terremoto” origen latino. Los tres son correctos, pero seísmo es menos usado.

relacionarse estos sismos con el embalse, por no estar de acuerdo con ninguna de las observaciones y características de los sismos por ellos inducidos.

Los terremotos de origen tectónico, se originan al sobrepasar las tensiones la capacidad de almacenar energía en la zona. Si los terremotos son inducidos únicamente por el embalse, porque en la zona no existen datos de la presencia de terremotos y es una área culta, poblada desde milenios, supondría que la energía liberada en la serie de los relacionados con el embalse equivaldría a la almacenada en el terreno por la carga de la presa y el agua almacenada.

Las tensiones y deformaciones se transmiten en profundidad, aumentando las presiones efectivas, que por la infiltración del agua en profundidad disminuyen lentamente hasta eliminar las debidas a la carga de agua. Se puede estimar el incremento de energía almacenada al construir el embalse y proceder a su llenado, concluyendo, que salvo en el caso de embalses extraordinariamente grandes los sismos liberados no pueden ser muchos ni de magnitud elevada. Si en el terreno existiesen presiones tectónicas próximas a superar la capacidad de almacenamiento, se originarán terremotos, pero no superiores a los que de forma natural se originarían. Estos son las conclusiones obtenidas de los estudios efectuados sobre el embalse de Almendra (río Tormes), Canales (río Genil) y recientemente Itoiz (río Irati).

La tesis doctoral de Ambraseys, profesor de Imperial College en London, trató sobre las presas de materiales sueltos, concluyendo que eran muy sensibles a los terremotos, tesis que publicada motivó una gran desconfianza a este tipo de estructuras. Cuando analicé los casos analizados en 1964, concluí que ninguna de las destruidas cumplían las normas mínimas de construcción de los años 1950. Los daños durante el terremoto de San Fernando (9 de febrero de 1971) en Upper San Fernando Dam y Down San Fernando Dam, demostraron que las presas construidas por relleno hidráulico no soportan las aceleraciones sísmicas, pero este tipo de construcción ya estaba proscrito y estas presas estaban muy controladas, sin permitir su llenado total. Es cierto que se han medido grandes asientas en presas de escolleras, y registrado grietas según coronación en presas con núcleos de arcilla, daños previstos a largo plazo en el primer caso, y reparables en el segundo.

Las presas de fábrica no han experimentado daños irreparables, pese soportar la de Koyna (gravedad), en la India, 0,6g, medido en una galería y más de 1,0g la presa bóveda de Pacoima, en el terremoto de San Fernando, aceleración registrado en la roca junto al estribo izquierdo.

El tema en conjunto es muy complejo, y hacéis bien resumiendo, pero personalmente no sería tan tajante en lo referente a las presas bóvedas. Tampoco recomendaría un estudio de la estructura geológica en profundidad, con el objetivo de predecir sismos inducidos. Es más, en España ha existido un afán de buscar terremotos y fallas activas, con escritos ridículos, como uno que tuve que informe a la presidencia del gobierno sobre el embalse de Reinosa (León) en los años 1980, pese a estar firmado por diez “profesores e investigadores”, que en el tema de sismicidad manifestaban su ignorancia, y su afán de oponerse al embalse por razones que ellos sabrían.

Defensa del medio ambiente.

Se inicia este parte en 2.3.5. Construction materials.

Las normas en España han variado mucho desde los años 1950 hasta la fecha. En aquel tiempo era vital la regulación de los ríos españoles y la construcción de embalses, con dos finalidades: suministro de energía eléctrica y creación de regadíos, actividades prioritarias, con ayudas de todo tipo. Por ejemplo el “Plan Badajoz”. Estas circunstancias, la inexistencia de organizaciones ecológicas y la presencia de una dictadura, suave, ya en situación de dictablanda, hacía las cosas más fáciles. Por ejemplo: se trasladaron pueblos enteros, se desmontaron y trasladaron monumentos románicos y pre-románicos, y aunque pedían que las canteras se tratasen de forma tal que no constituyeran un atentado contra el paisaje, etc., en realidad no siempre se hacía caso y, en cualquier caso, eran normas internas, no impuestas por protestas de poblaciones.

Hoy las cosas han cambiado hasta el punto de oponerse a embalses imprescindibles por eliminar inundaciones, efecto que se olvida con frecuencia, y que no se pueden construir porque se oponen organizaciones, más políticas que científicas. Además, existe un grave problema para situar las canteras, que deben estar en la zona inundada o realizar informes e “informes de medio ambiente” y un plan para embellecimiento posterior.

Estas situaciones totalmente diferentes a las actuales, se adaptan a los condicionantes de los diferentes países, según la densidad de población en la zona donde situar el embalse, y según el nivel de desarrollo y situación política.

Es claro que un embalse modifica el ambiente, pero también lo modifica la presencia de un solo hombre y no vamos a impedir nazcan más humanos, condenando todos al aborto. Creo sabes no soy partidario de dictaduras, y mucho menos las de carácter marxista. Pues con este pensamiento me parece injusto los que atacan la construcción de la presa de las “Tres gargantas” china, sin tener en cuenta que en el siglo XX las inundaciones del río Amarillo (Yang Tse) causaron cinco millones de víctimas mortales. Claro que un embalse modifica el ambiente y crea un ecosistema diferente, pero en España el ecosistema creado ha sido mejor que el árido existente y los daños de las inundaciones evitadas superan muy ampliamente el coste de la obra y cambios que pudieron haberse producido.

Como absurdo puedo asegurarte que en Aranjuez, la autopista NIV, no admitieron su trazado racional en una zona, obligando a unas curvas peligrosas, porque era allí se criaba de forma natural una mariposa, que ni conozco, ni conocen, salvo los entusiastas de oponerse a todo y por todo. Las consecuencias han sido varias víctimas mortales por las curvas inadecuadas.

En la figura 2.3 39, me parece que mejoraría comprender el proceso si aumentáis la inclinación que dais del nivel de agua después del llenado en la presa y embalse. También me parece que el límite de la zona de influencia, en realidad es límite de la zona con influencia apreciable, o indicar es convencional, porque la zona de influencia apreciable, dependerá de la sensibilidad de los equipos que la miden.

El trabajo que habéis realizado en el apartado 3 es impresionante. Es una descripción detalladísima de cuanto hay que realizar en casos extremos. El tema tiene tantos condicionantes, que en la primera clase que desarrollé en los 10 cursos de “Geología Aplicada para ingenieros y geólogos”, les contaba dos chistes, o historietas un tanto cómicas. La

primera es la siguiente:

Jaimito, (personaje singular en chistes españoles) le expulsan de uno y otro colegio, porque era insoportable. Sus padres buscan un colegio especializado en niños difíciles y quieren explicar al director las peculiaridades de su hijo. El director lo rechaza, porque es el director un colegio especializado en niños difíciles. Jaimito ingresa en el colegio, y siempre que le preguntaban algo, decía: depende señor profesor.

Ya harto, un día el director le pregunta: Vamos a ver, Jaimito, ¿cuántos son dos y tres?

Jaimito le contestó: depende señor profesor, porque 2 elevado a 3 son 8; 3 elevado a 2 son 9; 2 por 3 son 6; 3 menos 2 son 1, y 3 más 2 son 5.

El director rabiaba al máximo y al final no pudo menos de decirle: Jaimito, eres un hijo de puta.

Jaimito sin dudarle le contestó: depende señor profesor, porque si soy de mi padre y mi madre, no; pero si soy hijo de mi padre y su mujer sí.

La conclusión es clara, en nuestra tarea, todo depende.

Tan es así, que los informes que he realizado, han tenido en cuenta los destinatarios. Si éstos se oponían resaltaba los puntos favorables, y si éstos eran partidarios resaltaba los problemas, forma de, sin ocultar nada, frenaba las tendencias no imparciales de quienes habían de decidir la construcción y facilitar los medios económicos necesarios.

La segunda historieta también es instructiva: previendo su inmediata muerte un anciano le pide a su hijo que pinte la habitación, donde vendrían los parientes y amigos a dar el pésame. El hijo se opone, porque no da tiempo a encargar a nadie el trabajo, pero el padre insiste que él puede hacerlo y que para el techo, le sujetará la escalera. En plena pintura el padre deja de sujetar la escalera, y el hijo cae al suelo. Cuando se queja al padre, éste le contesta que ésa es la última y más importante lección que le daba: no te fíes de nadie, ni de tu padre. Conclusión: en nuestro trabajo no debemos fiarnos de nada y debemos comprobar todo.

La presa de Valmayor, terminada en 1975, 60 m de altura, 124 hm<sup>3</sup> de capacidad, en el río Aulencia (Madrid), creo que se efectuó sin realizar sondeos, claro que correspondía a un plan urgente para asegurar el abastecimiento de agua a Madrid (Solución Oeste), a base de bombear agua desde el embalse de Picadas, en el río Alberche, al Aulencia, que carece de cuenca suficiente para su llenado y explotación, con cerrada y vaso en rocas graníticas. En una ocasión concedí el “visto bueno” para la construcción de una presa, en Toledo, ya salida de cimientos, sin ningún estudio, porque todo el vaso se desarrollaba en granito y la cerrada era granito de muy buena calidad.

En la figura 4.4.2. (pág. 88) debéis cambiar el origen, porque citáis al autor por el segundo apellido, por el que apenas se le conoce. Su nombre es Manuel Ramón Llamas Madurga, dos nombres y dos apellidos y en todos sus trabajos suele constar como Manuel Llamas, o Manuel Llamas Madurga, pero nunca por su segundo apellido. Le conozco bien pues es compañero de curso e ingresó en el Servicio Geológico al mismo tiempo que yo y con los mismos objetivos. Cinco años después abandonó el tema de Geología Aplicada a la Ingeniería y se dedicó a la Hidrogeología, terminando como Catedrático en la Universidad de esta asignatura, y capitaneando una ofensiva contra los embalses, a los que pretendía substituir por el agua subterránea. Incluso abonó construir presas para que el agua se infiltrara y alimentara el agua

subterránea, idea correcta siempre que no se exagere.

La presa de Foix, en el río Foix (Barcelona) se terminó en el año 1928, altura 38 m y capacidad del embalse 4,85 hm<sup>3</sup>. Es uno de los fracasos por permeabilidad de la cerrada y vaso. No se hizo estudio que yo sepa ni trabajos de impermeabilización. Pero mucho más importantes son las presas: Camarasa<sup>10</sup>, que batió el récord de altura (río Noguera Pallaresa, Lérida), 103 m, y capacidad de embalse 163,4 hm<sup>3</sup>, terminada en 1920, donde por primera vez se utilizaron inyecciones de cemento para disminuir las fugas, con aceptable éxito; Montejaque, terminada en 1924, en el río Gadares (Málaga), bóveda, 83,75 m y capacidad 36 hm<sup>3</sup>, donde nunca consiguió llenarse, que cierra un cañón en una gigantesca dolina, que termina medio km aguas abajo en la entrada a la Cueva del Gato, conducto cárstico estudiado que termina en el río Guadiaro. Esta presa se construyó aceptando el riesgo, por las enormes ventajas y en ella se realizaron varias campañas de inyecciones, sin éxito.

Para mí la más interesante es Pontón de la Oliva, río Lozoya (Madrid), terminada en 1858, 32 m de altura, 3,0 hm<sup>3</sup> de capacidad, en la que se ensayaron impermeabilizaciones exteriores, sin éxito, y en la que intervinieron figuras señeras de la Geología española. Yo la he visto verter por coronación en avenidas, pese estar actualmente controlado el río Lozoya aguas arriba.

Lo mismo tenéis que hacer en la figura 5.2.2, es decir, citar a Llamas y Domenech. Por cierto, debéis cambiar la fecha, porque el Congreso de Grandes Presas de Turquía fue en el año 1967. Modificar también la fecha en la figura 4.4.2 y en “References” (pág. 279).

El embalse de Guiamets, en el río Asmat (Tarragona) se construyó con urgencias para aliviar el abastecimiento de agua a Tarragona y zona próxima en una época de sequía. Sospecho que se aceptó la posible pérdida de agua por fugas.

Yo nunca pretendo que los embalses sean impermeables. Mantengo que el objetivo es que las posibles fugas de agua no impidan los objetivos del embalse. Lo cual está justificado porque siempre se ha exigido un caudal mínimo aguas bajo de la presa, hoy llamado ecológico. Para pérdidas no importantes, si hacemos números nos encontramos en la imposibilidad de conocer las pérdidas exactas, porque suelen ser mayores las de evaporación, difíciles de calcular, lo mismo que las aportaciones del río principal y sus afluentes.

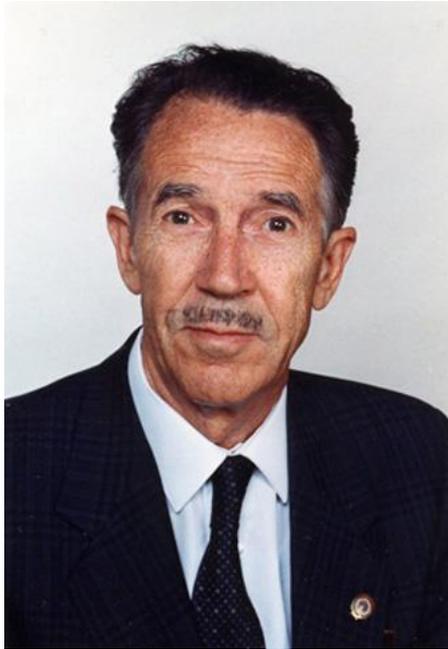
Por ejemplo, en el caso de el caso de Entrepeñas, en el río Tajo, no aconsejé realizar una pantalla de inyecciones para evitar fugas muy superiores al m<sup>3</sup>/s, porque la inversión no justificaba los beneficios.



---

<sup>10</sup> Camarasa, Montejaque y otros embalses franceses, tunecinos y Canelles están descritos en “Recherche sus l’etancheité des lacs de barrage en pays karstique” de R. Théron. 1973.

## Palabra final de profesor Angel García Yagüe



Creo que esta publicación facilitará la formación y estudio de los alumnos en las universidades y en las escuelas técnicas y ayudará a los ingenieros, ya inmersos en la actividad profesional, porque no se pensó sólo como algo que, aprobada la asignatura ha de olvidarse, sino también como un sucinto manual a consultar en el futuro.

Modelar el terreno, determinar sus características y deducir la respuesta ante el cambio de tensiones que implica la construcción es objetivo de la Geología Aplicada. Los estudios se materializan en informes, con la dificultad de usar métodos de estudio del terreno cada vez más numerosos, especialmente los de prospección geofísica, a los que se da un tratamiento más extenso, con bibliografía que permita su posterior ampliación. En cada tipo de terreno se citan

ejemplos que ayudaran a quienes han de construir análogas estructuras en análogos terrenos. La descripción de deslizamientos de ladera y la metodología general para eludirlos y en su caso dominarlos, también creo será de utilidad, especialmente a quienes tratan con las obras lineales.

Ángel García Yagüe

Licenciado en Matemáticas.

Dr. Ingeniero de C. C. y P.

Profesor Emérito de U.P.M.

1.12.2012

Libros de Angel García Yagüe:

**Temas de geología aplicada a las obras públicas** by Angel García Yagüe( Book )

3 editions published between 2003 and 2004 in Spanish and held by 5 WorldCat member libraries worldwide

**Aplicación del método eléctrico resistivo a la determinación del estado de los**

**revestimientos en túneles** by Angel García Yagüe( Book )

1 edition published in 1965 in Spanish and held by 1 WorldCat member library worldwide

**Resistividad de las aguas selenitosas** by Angel García Yagüe( Book )

1 edition published in 1965 in Spanish and held by 1 WorldCat member library worldwide

**Métodos de prospección geofísica aplicados en las obras públicas** by Angel García Yagüe(

Book )

1 edition published in 1989 in Spanish and held by 1 WorldCat member library worldwide

**Métodos de prospección geofísica aplicados en las obras públicas** ( Book )

in Spanish and held by 1 WorldCat member library worldwide

## CURRICULUM VITAE

**Ing. Otto Horský, PhD. (1938, Prostějov)**



Otto Horský, nacido el 13 de abril de 1938, ingeniero geólogo de profesión, viajero, escritor y destacado peruanista checo, tuvo desde su infancia un marcado espíritu de aventura y de acercamiento a otras latitudes, especialmente manifestaba su voluntad de acercamiento a las culturas tradicionales peruana y cubana. El anhelo de estudiar dichas culturas, así como el idioma castellano y, paralelamente lograr buen nivel técnico como ingeniero geólogo, se cumplió en el año 1974, a los 36 años de edad, cuando fue nombrado al cargo diplomático de Agregado Comercial de la Embajada Checoslovaca en el Perú, asumiendo además la función de Jefe de la Oficina Técnica de Cooperación mutua entre el Perú y Checoslovaquia. Entre los varios proyectos en los que participó muy activamente, cabe destacar su

labor en la ampliación del potencial hidroenergético de la Central Hidroeléctrica de Machu Picchu, en los estudios geotécnicos para la Central del Mantaro y aquellos relativos a la estabilidad del derrumbe en el reservorio de Tablachaca, considerados estos últimos como un ejemplo a nivel mundial para evitar catástrofes. Sobre sus actividades en los años 70 del siglo pasado escribió un libro titulado „Recuerdos del Perú“ (Peruanské postřehy – 2004), que es un testimonio de los años vividos en el Perú, de sus actividades profesionales como diplomático y geólogo, experiencias personales y apreciaciones sobre diversos aspectos de la sociedad, historia, civilización y geografía peruanas.

Entre los años desde el 1978 hasta 1982 trabajó en Cuba en el Ministerio de las Construcciones como el asesor principal en el área Ingeniero - Geológica y Geotécnica y como el Jefe Coordinador de los Expertos Checoslovacos en la Construcción (más de 30 expertos) en los trabajos de cooperación bilateral entre Checoslovaquia y Cuba. Desde el año 1984 hasta el 1988 trabajó en Cuba como el Jefe del equipo de los técnicos y peritos checoslovacos (más de 30 especialistas) para el estudio y proyecto hidroeléctrico de la Hidroacumuladora de Escambray, además dirigiendo los trabajos ingeniero-geológicos para el proyecto de la Hidroacumuladora en Provincia Oriente. Los resultados de sus trabajos y de la vida vivida en Cuba entre los años 1978 hasta 1988 publicó en el libro „Ocho años en Cuba“ (Osm roků na Kubě - 2008). Su experiencia de trabajo ingeniero-geológico le han servido como una de las materias primas para escribir el libro prescrito - Investigaciones Ingeniero Geológicas para las Obras Hidrotécnicas.

Desde el año 1991 hasta 1993 trabajó en España como Director General de la Sociedad anónima mixta checo-española en rama de la construcción e investigaciones. Entre otras cosas, ha realizado las investigaciones para el tunel 42 km largo de derivación del agua entre Guadiaro – Genal y varios estudios para las presas y embalses, estudios geofísicos para el metro Moncloa en el Madrid, estudios geofísicos del río Jaramá y estudios hidrogeológicos en la zona norte de España. Desde el año 1993 como el socio de la Sociedad limitada GEOINZA, S.L., realizó los trabajos geofísicos para la presa „Pontillón do Castro“ en el norte de España, para el río Guadalmez, para la Refinería Santa Cruz del Tenerife, trabajos de encauzamiento del río Segura en Orihuela, entre varios otros trabajos. Sobre los trabajos mencionados y sobre la vida en España publicó el libro „Buenos días España“ (2012).

El gran interés por el Perú lo llevó a participar en la organización de la “Expedición Titicaca 2004”, la cual, además de efectuar estudios topográficos, de ciencias naturales y socioeconómicos del Altiplano peruano, tuvo por finalidad elaborar una documentación visual sobre el paisaje y la presencia del hombre alrededor del lago Titicaca, así como sobre la forma de vida y costumbres de las comunidades campesinas que habitan la región. El estudio se centró especialmente en la evolución morfológica del lago y sus alrededores, incluyendo amplia documentación del contexto geográfico y biológico, que abarca hasta el estado actual del patrimonio material y cultural de la población, que habita en las orillas e islas del lago y documenta el paisaje y la presencia humana encontrada en 2004.

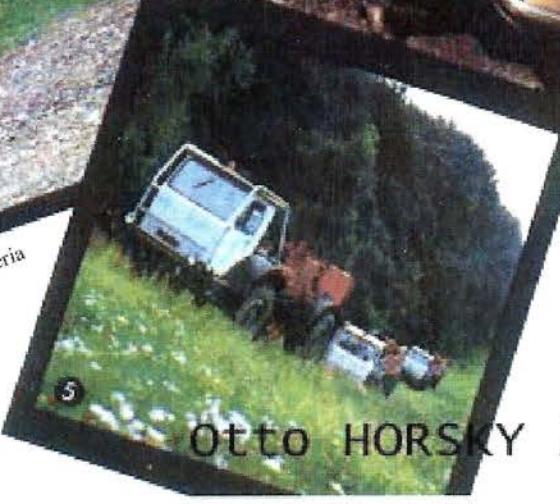
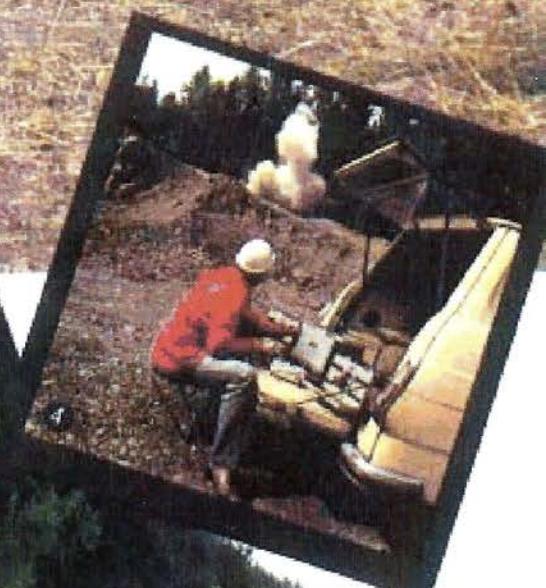
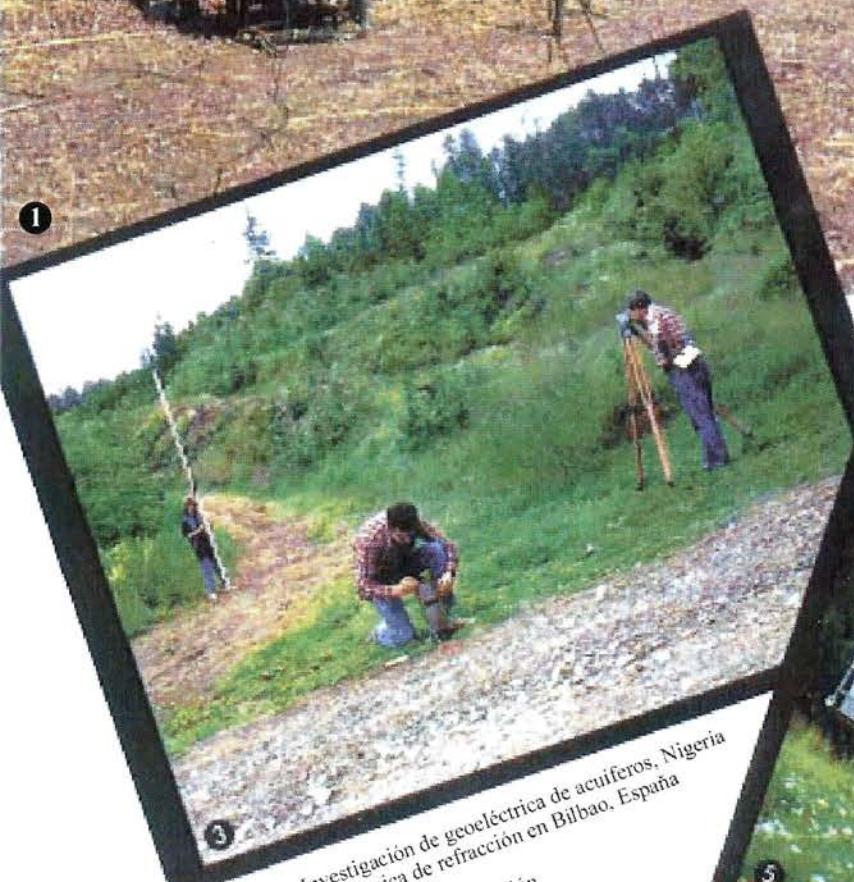
En los últimos años, además de asesoramientos técnicos y negocios en Ingeniería geológica, las actividades principales se centran al trabajo literario en las áreas profesional y populares. En el año 2003 era emitido en colores la segunda edición de su libro “Investigaciones Ingeniero-Geológicas para las Obras Hidrotécnicas”, de 289 pg., en el cual se hacen referencias sobre las investigaciones geofísicas e ingeniero geológicas para la ampliación de la Hidrocentral Machu Picchu, sobre los trabajos geotécnicos en la HC Mantaro – Restitución en Perú y sobre las investigaciones ingeniero geológicas para la Central Hidroeléctrica en el Escambray en Cuba, entre otras. A finales de 2014, tuvo emitidos en total de 14 libros y más de 180 publicaciones en la República Checa y distintos países del mundo, entre otros en España, Brasil, Perú, Rusia, Países Bajos, Australia, Portugal, Grecia, Tailandia, Etiopía y Cuba. Sobre su libro, escrito junto con el co-autor prof. Dr. Pavel Blaha, MD, "Application of Engineering Geology to Dam Construction" (2011) se hace actualmente referencia en 58 países. Ya se ha publicado la Segunda edición del libro ampliada sobre tres capítulos nuevos (2014) y actualmente se está preparando su traducción al ruso.

## SUMARIO

Prólogo	3
Introducción	5
<b>Capítulo I - Criterios de diseño de una presa</b>	<b>8</b>
I.1. Introducción	8
I.2. Selección del lugar de una obra hidrotécnica	8
I.3. Factores básicos que determinan la selección del tipo de la cortina	9
I.3.1. Aspectos geológicos y tectónicos para elegir la cortina	10
I.3.2. Aspectos geomorfológicos del eje	14
I.3.3. Factores climatológicos	19
I.3.4. Aspectos sísmicos	20
I.3.5. Materiales de construcción	20
<b>Capítulo II – Bases metodológicas para el desarrollo de las investigaciones ingeniero-geológicas</b>	<b>22</b>
II.1. Introducción	22
II.2. Generalidades	22
II.3. Principios básicos de la investigación	24
II.3.1. Principio de las etapas	24
II.3.2. Principio de complejidad	25
II.3.3. Principio económico en la investigación	25
<b>Capítulo III – Técnica de exploración ingeniero-geológica</b>	<b>26</b>
III.1. Introducción	26
III.2. Elección del método de investigación	28
III.3. Incorporación de las investigaciones ingeniero-geológicas a otras invest.	30
<b>Capítulo IV – Etapas de las investigaciones ingeniero-geológicas</b>	<b>31</b>
IV.1. Etapa de tarea de proyección	31
IV.2. Etapa de proyecto técnico	32
IV.3. Etapa de proyecto ejecutivo	32
<b>Capítulo V – Tarea técnica y programa de las investigaciones</b>	<b>34</b>
V.1. Tarea técnica	34
V.2. Confección de programa de investigaciones	35
<b>Capítulo VI – Tareas fundamentales a realizar las investigaciones del Conjunto Hidráulico</b>	<b>37</b>
VI.1. Estudio ingeniero-geológico regional	37
VI.2. Estudio ingeniero-geológico detallado	39
VI.3. Itinerarios (marcharutas)	41
VI.4. Levantamiento ingeniero-geológico	41
<b>Capítulo VII – Investigaciones hidrogeológicas</b>	<b>50</b>
VII.1. Estudio hidrogeológico regional	50
VII.2. Estudio hidrogeológico detallado	53
VII.2.1. Proyecto técnico	53
VII.2.2. Proyecto ejecutivo	56
<b>Capítulo VIII – Labores de exploración</b>	<b>57</b>
<b>Capítulo IX – Investigaciones geofísicas</b>	<b>60</b>
IX.1. Selección de los métodos geofísicos	61
IX.2. Tareas principales de geofísica en las investigaciones de las obras hidrotécnicas	63

IX.3. Tareas de geofísica para el levantamiento ingeniero-geológico del embalse	63
IX.4. Tareas de la geofísica en la investigación del cierre	66
IX.4.1. Macizo rocoso con rupturas y sistema de grietas muy desarrollado	67
IX.4.2. Macizos rocosos poco agrietados	70
IX.4.3. Formaciones recientes poco consolidadas	71
IX.4.4. Macizos rocosos heterogéneos y rocas volcánicas	72
IX.4.5. Cambios de las características geotécnicas en el macizo rocoso en el tiempo	72
IX.5. Investigaciones de las deformaciones en los taludes	75
IX.6. Estudio de la sismicidad del área	77
IX.7. Investigación durante la construcción de obra y en su explotación	77
IX.8. Investigación del agua subterránea	77
<b>Capítulo X – Documentación completa ingeniero-geológica y geotécnica de los laboreos de exploración</b>	<b>83</b>
X.1. Documentación completa de galerías y calicatas	83
X.2. Documentación de pozos de exploración	93
X.3. Índice de calidad de la roca RQD	96
<b>Capítulo XI – Estudio de mecánica de rocas</b>	<b>100</b>
XI.1. Introducción	100
XI.2. El macizo rocoso y su análisis estructural	102
XI.3. Objetivo de las investigaciones de las propiedades mecánicas del Subsuelo de las obras hidrotécnicas	109
XI.4. Métodos básicos para investigar las propiedades mecánicas del subsuelo	110
XI.4.1. Ensayos de laboratorio	111
XI.4.2. Pruebas de campo	112
XI.4.3. Instrumentación	112
XI.4.4. El método de analogía	112
XI.5. Tipos básicos de pruebas de campo	113
XI.6. Condiciones generales para realizar pruebas de campo	113
XI.7. Selección de lugar y cantidad de pruebas de campo	114
XI.7.1. Selección del lugar de la prueba	114
XI.7.2. Cantidad de pruebas	116
XI.8. Principios de preparar lugar de prueba de campo	114
<b>Capítulo XII – Resistencia a la compresión</b>	<b>116</b>
<b>Capítulo XIII - Ensayo de resistencia al cortante</b>	<b>120</b>
<b>Capítulo XIV – Ensayos de deformabilidad</b>	<b>126</b>
<b>Capítulo XV - Criterios de permeabilidad de la roca y problemas relacionados con la cortina de impermeabilización</b>	<b>130</b>
<b>Capítulo XVI – Movimientos de las laderas en las áreas del estudio de obras hidrotécnicas</b>	<b>138</b>
XVI.1. Introducción	138
XVI.2. La estabilidad de las laderas	138
XVI.3. Clasificación de los movimientos de las laderas	141
XVI.3.1. Tipos básicos de los movimientos de tierra	142
XVI.3.2. Otros criterios de clasificación de los movimientos de las laderas	144
XVI.3.3. Ejemplos de movimientos de tierra y tablas	145

Bibliografía relacionada	163
<b>ANEXOS :</b>	
<b>Anexo I - Confección de los programas de investigaciones</b>	<b>169</b>
<b>Anexo II – Normalización de investigaciones ingeniero-geológicas para las presas</b>	<b>176</b>
<b>Anexo III – Empleo de métodos geofísicos para el estudio del lugar de presa en las etapas preliminares</b> (Pavel Bláha, Otto Horský, Martin Vlastník, 2002)	<b>191</b>
<b>FOTOGRAFÍAS</b>	<b>207</b>
<b>GRUPO GEOFÍSICO DE GEOTEST BRNO</b>	<b>243</b>
<b>La Sociedad Geotest Brno se presenta (P.Bláha)</b>	<b>245</b>
<b>Ejemplos de la utilización de los métodos geofísicos en distintos tipos de obra (P.Bláha)</b>	<b>248</b>
<b>Figuras acompañantes de los distintos métodos geofísicos y de las investigaciones geofísicas para los distintos tipos de obra en cuestión (P.Bláha)</b>	<b>267</b>
<b>Palabras sobre el autor del libro</b>	<b>288</b>
<b>Palabra final sobre la segunda edición del libro</b>	<b>290</b>
<b>Prólogo al libro “The Application of Engineering Geology</b>	<b>294</b>
<b>Sugerencias de Prof. Angel García Yagüe</b>	<b>296</b>
<b>Palabra final de Prof. Angel García Yagüe</b>	<b>315</b>
<b>Curriculum Vitae de Otto Horsky</b>	<b>316</b>



1. Investigación de geoelectrónica de acuíferos, Nigeria
2. Geosísmica de refracción en Bilbao, España
3. Gravimetría
4. Geosísmica de reflexión
5. Prospección sísmica