

GUÍAS TÉCNICAS DE SEGURIDAD DE PRESAS

ESTUDIOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS Y DE PROSPECCIÓN DE MATERIALES



COLEGIO DE INGENIEROS DE
CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE
GRANDES PRESAS



**COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE
GRANDES PRESAS**

GUIAS TECNICAS DE SEGURIDAD DE PRESAS

GUIA Nº 3 ESTUDIOS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS Y DE PROSPECCIÓN DE MATERIALES

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE
GRANDES PRESAS



GUÍAS TÉCNICAS DE SEGURIDAD DE PRESAS

GUÍA Nº 3

ESTUDIOS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS Y DE PROSPECCIÓN DE MATERIALES

Foto portada: Presa del Naranjero
Edita: Comité Nacional Español de Grandes Presas
I.S.B.N.: 84-89567-11-5
Depósito Legal: M-38397-1999
Imprime: *Gráficas Rito*
Arroyo Bueno, 2 - 28021 Madrid

PRESENTACIÓN

Después de casi treinta años de vigencia de la "Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de grandes presas" de 1967, con la que se proyectaron y construyeron más de la mitad de las grandes presas españolas, el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente aprobó en el año 1996 el "Reglamento Técnico sobre Seguridad de presas y embalses", con el que se ponían al día los conceptos y criterios sobre seguridad de presas, que habían evolucionado de manera muy significativa desde el inicio de la década de los años setenta.

Este nuevo Reglamento, de aplicación aún parcial pero progresiva, presenta un enfoque global de la seguridad, y tiene un carácter más general y abierto que la anterior Instrucción, incidiendo más específicamente en los temas relativos a la gestión de la seguridad y a la vigilancia e inspección de las presas. Por ello es necesario el fijar los aspectos más técnicos relativos a la seguridad estructural, hidrológica, sísmica, y los referentes a las distintas fases de puesta en carga, construcción y explotación, en otro tipo de publicaciones, como son estas Guías Técnicas que produce el Comité Nacional Español de Grandes Presas, y que son un complemento esencial y necesario del Reglamento.

En cada una de las Guías Técnicas se presenta el estado del arte en diversos aspectos relativos a la Seguridad de las presas, y se dan unas recomendaciones para la evaluación y consecución de los objetivos de seguridad.

Hasta la actualidad el Comité Nacional Español de Grandes Presas ha publicado las Guías Técnicas referentes a la Avenida de Proyecto, Aliviaderos y Desagües, y Construcción de Presas y Control de Calidad. Ahora publicamos la Guía nº 3, **Estudios Geológicos-Geotécnicos y de Prospección de Materiales**, que ha sido elaborada por el Comité de Cimentaciones, bajo la presidencia de D. Jesús Yagüe, al que, al igual que a sus colaboradores, el Comité Español le agradece el esfuerzo y entusiasmo que ha dedicado en su redacción.

Igualmente quiero agradecer al Comité de Guías los trabajos dedicados a la revisión y coordinación, que han dado lugar a esta versión final, aprobada por el Pleno del Comité Nacional Español de Grandes Presas. Con el esfuerzo de todos hemos conseguido sacar otra Guía hacia delante, y así cumplir con nuestro objetivo de mejorar la tecnología española en el campo de las presas.

Finalmente mi agradecimiento a la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente por su colaboración en esta tarea común de completar el Reglamento con unas Guías Técnicas.

L. Berga
Presidente del Comité Nacional

El Comité de Guías del Comité Nacional Español de Grandes Presas está formado por los miembros siguientes:

Manuel Alonso Franco

Luis Berga Casafont

Alejandro del Campo Aguilera

Rodrigo del Hoyo Fernández-Gago

Carlos Duelo Topete

Julián García Roselló

José Alberto Herreras Espino

Eugenio Vallarino Cánovas del Castillo

Jesús Yagüe Cordova

PRÓLOGO

El conocimiento de las características del cimiento de una presa y de los materiales de construcción, junto a la estimación de la hidrología, han sido siempre aspectos fundamentales que debían ser investigados hasta un nivel satisfactorio. El conocimiento total del cimiento y de los materiales de una presa no es posible con los métodos de investigación existentes. No obstante, las experiencias obtenidas del comportamiento de las presas en servicio y los avances de las ciencias del terreno permiten un mayor acercamiento a la realidad, pudiéndose reducir las incertidumbres hasta niveles mínimos razonables. Alcanzar este nivel de conocimiento, ajustado en cada caso a las condiciones de seguridad de la presa y su embalse, es una obligación de los ingenieros y técnicos cuya importancia se ha tratado de resaltar a lo largo de esta Guía.

Uno de los objetivos que se planteó el Comité Nacional Español de Grandes Presas sobre el alcance de las Guías Técnicas fue presentar el estado del arte de un tema determinado pero conteniendo información obtenida de publicaciones especializadas y de la experiencia de expertos que no se encuentre fácilmente en libros de texto sino que complemente el contenido de estos y que facilite la labor del ingeniero en el desarrollo de sus funciones. En este sentido se ha procurado que esta Guía y sus Anejos, dentro de su alcance, contengan suficiente información de tipo práctico para cumplir el objetivo mencionado. Otro de los objetivos de la Guía es el desarrollo del Reglamento Técnico para la Seguridad de Presas y Embalses, en los temas que aquélla aborda, con el fin de orientar a los técnicos en la aplicación del Reglamento. A este aspecto se le ha prestado bastante atención y la Guía incluye frecuentes alusiones a lo que es recomendable realizar en distintas situaciones y para distintos tipos de presas. Es de esperar que hayamos conseguido alcanzar, al menos en parte, los objetivos que nos habíamos marcado.

El Comité Nacional Español de Grandes Presas tiene establecido un procedimiento de aprobación de sus Guías Técnicas según el cual, una vez redactada por el Grupo de Trabajo, debe ser aprobada por el Comité de Guías y, finalmente, por el Pleno del Comité lo que permite que cada Guía sea revisada por numerosos expertos en la materia.

La presente Guía ha sido redactada por un Grupo de Trabajo que incluye a las siguientes personas: Juan Manuel López Marinas, Claudio Olalla, Francisco Ortega, Antonio Soriano y Jesús Yagüe. También han colaborado activamente en su realización Manuel Alonso Franco, Santiago Uriel y el Comité de Guías, con valiosos comentarios. En temas puntuales ha habido otras aportaciones como la de José Manuel Martínez Solares en el Capítulo de Sismicidad.

A todos los que han colaborado en la redacción y edición de esta Guía, sin cuyo apoyo no habría sido posible realizarla, queremos manifestarles nuestro más sincero agradecimiento.

Jesús Yagüe Códova
Secretario del Comité Nacional Español de Grandes Presas
Presidente del Comité Técnico de Cimentación de Presas

ÍNDICE GENERAL

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	13
1.1.	Objeto de esta Guía	13
1.2.	El estudio del cimiento y de los materiales en relación con la seguridad de las presas	14
1.3.	Importancia del cimiento y de los materiales naturales en el proyecto de presas	16
1.4.	El Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses en relación con el tema objeto de esta Guía	18
1.5.	Contenido de esta Guía	20
2.	ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS	23
2.1.	Aspectos previos	23
2.1.1.	Calidad, extensión e intensidad de los reconocimientos	23
2.1.2.	Orden de los reconocimientos	25
2.2.	Estudio geológico regional	27
2.2.1.	Investigación geológica	28
2.2.2.	Impermeabilidad del vaso	30
2.2.3.	Estabilidad de las laderas del vaso, aterramientos y subsidencias	32
2.2.4.	Fuentes de préstamos	33
2.3.	Estudio previo de cerradas	34
2.3.1.	Estructura geológica de la cerrada	34
2.3.2.	Reconocimiento geofísico	36
2.3.3.	Estudio de la permeabilidad de la cerrada	37
2.4.	Caracterización de la cerrada	39
2.4.1.	Caracterización del macizo rocoso	40
2.4.1.1.	Trabajos de campo	40
2.4.1.2.	Ensayos de laboratorio	45
2.4.1.3.	Planta y perfiles	46
2.4.2.	Caracterización de los suelos	51

	Pág.
2.5. Estudio de problemas específicos	52
2.5.1. Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso	52
2.5.2. Permeabilidad del macizo rocoso	55
2.5.3. Obras auxiliares	57
2.5.4. Otros problemas específicos	58
2.6. Estudios durante la construcción	59
2.6.1. Cartografía geológica detallada	59
2.6.2. Controles geofísicos	60
2.6.3. Ensayos de resistencia y/o deformabilidad	60
2.6.4. Ensayos de inyectabilidad de mezclas	61
2.6.5. Otros reconocimientos	62
2.6.6. Archivo Técnico de la presa	62
2.7. Estudios de evaluación	63
2.7.1. Primer llenado	63
2.7.2. Situaciones de emergencia	63
2.7.3. Revisión y análisis general de la seguridad	64
2.7.4. Presas con Archivo Técnico deficiente	65
2.7.5. El abandono de las presas	67
3. ESTUDIOS DE SISMICIDAD	69
3.1. Introducción	69
3.2. Normativa	71
3.2.1. Instrucción de 1967	71
3.2.2. Norma NCSE-94	71
3.2.3. Normativa Comunitaria	74
3.2.4. Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses	75
3.3. Clasificación de zonas sísmicas	75
3.4. Acción sísmica para presas de categoría B y C	77
3.4.1. Aceleración sísmica de cálculo	77
3.4.2. Espectro de respuesta y acelerogramas de cálculo	78

	Pág.
3.5. Acción sísmica para presas de categoría A	79
3.5.1. Terremoto de proyecto	79
3.5.2. Terremoto extremo	80
3.6. Períodos de retorno y aceleraciones de cálculo según la clasificación de la presa y de las zonas sísmicas	81
3.7. Estudios sismotectónicos	81
3.8. Estudios geológico-geotécnicos adicionales	88
3.9. Observación de la sismicidad inducida	89
 4. PROSPECCIÓN DE MATERIALES PARA PRESAS DE MATERIALES SUELTOS	 91
4.1. Introducción	91
4.2. Requisitos básicos que han de cumplir los préstamos	91
4.2.1. Tipos de materiales	92
4.2.2. Impacto ambiental	95
4.3. Investigación de las zonas de préstamo	95
4.3.1. Identificación del material	96
4.3.2. Cubicación del préstamo	101
4.3.3. Condiciones de explotación	101
4.4. Caracterización de materiales	102
4.4.1. Materiales para núcleos	102
4.4.2. Materiales para espaldones	106
4.4.3. Filtros y drenes	112
4.4.4. Protecciones	114
4.5. Estudios especiales	114
4.5.1. Terraplenes de ensayo	114
4.5.2. Voladuras de prueba	116
4.5.3. Terraplenes experimentales	116
4.5.4. Otros estudio	116

	Pág.
4.6. Explotación de préstamos	116
4.6.1. Control de calidad en origen	117
4.6.2. Estudios complementarios	118
4.6.3. Archivo técnico de la presa	118
4.7. Informe del Proyecto	119
5. PROSPECCIÓN DE MATERIALES NATURALES PARA HORMI- GONES	121
5.1. Introducción	121
5.2. Procedencia de los materiales	122
5.2.1. Canteras	122
5.2.2. Depósitos naturales	122
5.3. Propiedades y características del material del yacimiento	126
5.4. Propiedades y características de los áridos	127
5.4.1. Características del árido fino	127
5.4.2. Características del árido grueso	129
5.4.3. Observaciones a tener en cuenta en la etapa de construcción	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEJOS	149
ANEJO I MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DEL TERRENO	153
ANEJO II ENSAYOS DE LABORATORIO	199
ANEJO III CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO ROCOSO	239
ANEJO IV PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN	255
ANEJO V INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS Y DE LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN Y MANEJO	265
ANEJO VI GLOSARIO GEOLÓGICO	279

FIGURAS

CAPÍTULO 1

Fig. 1.1	Causa de las roturas de las presas	15
Fig. 1.2	Contenido de la Guía	22

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1	Aspectos a considerar en los estudios geológicos regionales y estudios previos de cerradas	38
Fig. 2.2	Esquema de la caracterización de una cerrada	39
Fig. 2.3	Plano geológico de planta de una cerrada	47
Fig. 2.4	Perfil geológico	50
Fig. 2.5	Esquema de rotura del cimientado de una presa de gravedad	53

CAPÍTULO 3

Fig. 3.1	Mapa de peligrosidad sísmica	72
Fig. 3.2	Espectro de respuesta propuesto	78

CAPÍTULO 4

Fig. 4.1	Esquema de los tipos de materiales en una presa	93
Fig. 4.2	Planta de ubicación de préstamos	98
Fig. 4.3	Pedraplén de ensayo	115

TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1	Secuencia de los estudios del terreno	26
Tabla 2.2	Planos de edición que pueden utilizarse en la confección de un estudio geológico regional	29
Tabla 2.3	Fotografía aérea proporcionada por organismos oficiales	29
Tabla 2.4	Criterios de impermeabilización basados en ensayos de presión de agua, dados por varios autores	44
Tabla 2.5	Grados de alteración del medio rocoso	49
Tabla 2.6	Guía para evaluar la necesidad de una pantalla de impermeabilización	56
Tabla 2.7	Evaluación del Archivo Técnico de la presa	65

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1	Valores de la aceleración sísmica básica	73
Tabla 3.2	Resumen de los períodos de retorno de los sismos de cálculo	82
Tabla 3.3	Resumen de las aceleraciones de cálculo	82
Tabla 3.4	Clasificación de los documentos utilizados para el análisis de la sismicidad histórica	84

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1	Propiedades de los grupos de suelos de la clasificación USCS	94
-----------	--	----

1.

INTRODUCCIÓN

1.1. Objeto de esta Guía

El objeto esencial de esta Guía es ampliar los aspectos contemplados en el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses, sobre los estudios geológico-geotécnicos y de prospección de materiales para presas, considerando el estado del arte sobre esta cuestión y proporcionando criterios y recomendaciones que faciliten el trabajo en el proyecto, construcción y explotación de presas.

Los temas tratados en esta Guía han sido, desde siempre, objeto de elevada prioridad tanto por parte de los organismos internacionales dedicados a la ejecución y explotación de presas como de las organizaciones encargadas de recoger y divulgar los conocimientos técnicos relativos a las mismas. Ha sido frecuente durante varias décadas que diversas entidades de este tipo, que organizan foros internacionales, tales como la Comisión Internacional de Grandes Presas, la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de las Cimentaciones, la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas y la Sociedad Internacional de Ingeniería Geológica, entre otras, hayan incluido en los temarios de sus Congresos cuestiones relativas a los temas que son objeto de esta Guía.

Limitándose a la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) como Organización encargada de divulgar a través de sus Congresos y Boletines Técnicos todos los temas de interés relacionados con las presas, los aspectos tratados en esta Guía han sido incluidos en casi todos sus Congresos y en numerosos Boletines ICOLD.

De lo que se acaba de mencionar se extraen dos consecuencias fundamentales relativas a los aspectos que se consideran en esta Guía:

- 1) Han sido tratados frecuentemente porque afectan a la seguridad de las presas y ha sido necesario, y lo sigue siendo, ir avanzando en procedimientos y tecnologías que reduzcan progresivamente las incertidumbres que su consideración conlleva.
- 2) La diversidad de objetivos de las organizaciones que tratan estos temas pone de relieve su carácter multidisciplinar que sobrepasa el campo de actividad del ingeniero civil y obliga a éste a entenderse con técnicos con otra formación y, muchas veces, distinto "lenguaje" técnico. Este aspecto es muy importante porque implica la necesidad de acercar posiciones entre diversos técnicos con vistas a lograr un entendimiento sin el cual se pueden derivar riesgos para la propia presa.

1.2. El estudio del cimientado y de los materiales en relación con la seguridad de las presas

La seguridad de las presas ha constituido siempre una preocupación para los ingenieros relacionados con las mismas y ya aparece este tema reflejado específicamente en antiguos Congresos de ICOLD (Q.32), *"La seguridad de las presas desde el punto de vista de la cimentación y la seguridad de las laderas del embalse"*, Congreso de Estambul, 1967. En las décadas más recientes, este tema ha adquirido gran auge a nivel mundial, entendiéndolo como una disciplina que aglutina aspectos técnicos, socioeconómicos y administrativos, con la finalidad de reducir el riesgo de incidentes y accidentes en las presas. ICOLD, aunque había tratado este tema en sus Congresos desde mucho antes, se incorporó formalmente en 1982 a esta corriente, creando el Comité de Seguridad de Presas que desde entonces ha mantenido su actividad. Por otra parte, ICOLD ha realizado diversos estudios estadísticos sobre la casuística de incidentes de presas entre los que destacan:

- Lecciones de incidentes de presas. ICOLD, 1974.
- Deterioro de presas y embalses. ICOLD, 1983.

Estos estudios de incidentes de presas, por su importancia, no han dejado de realizarse y el último de ellos *"Análisis estadístico de rotura de presas"*, Boletín 99 de ICOLD, se ha publicado en 1995. Entre las conclusiones de este último estudio se indica que los problemas de la cimentación constituyen la causa de rotura más frecuente para las presas de hormigón (42% de los casos), mientras que para las presas de materiales sueltos la causa de rotura principal es el rebosamiento (31%), seguida por la erosión interna del cuerpo de presa (15%) y la erosión interna en el cimientado (12%).

La Fig. 1.1 ilustra la importancia del cimientado y de los materiales del cuerpo de presa en relación con la seguridad de las presas.

La consecuencia más importante que se obtiene de estos estudios estadísticos es que los fallos en la cimentación, en todos los tipos de presas, y los producidos en el cuerpo de presa, en las de materiales sueltos, constituyen una de las causas más frecuentes de la destrucción o deterioro de presas; la otra son los vertidos sobre coronación. Si la continua atención que presta ICOLD a los

estudios estadísticos sobre incidentes en las presas tiene por objeto alertar a los técnicos sobre las causas más frecuentes que los originan, con la intención de que se les preste la máxima atención, es indudable que los temas tratados en esta Guía revisten una gran importancia en relación con la seguridad de las presas.

En España se han realizado también algunos estudios, no exhaustivos, sobre los incidentes en presas. Uno de ellos [R.1] fue presentado al Congreso de Grandes Presas de Nueva Delhi en 1979 y recogía datos sobre 52 presas españolas que habían sufrido accidentes o roturas en el pasado. La actualización de estos estudios [R.2] eleva el número de casos a 111. Tanto estos estudios mencionados como otros [R.3 y R.4] realizados sobre las presas españolas, permiten sacar la misma conclusión que para los estudios de ICOLD: los problemas de la cimentación, en todas las tipologías, y de los materiales del cuerpo de presa, en las de materiales sueltos, están entre las causas más frecuentes de incidentes en las presas.

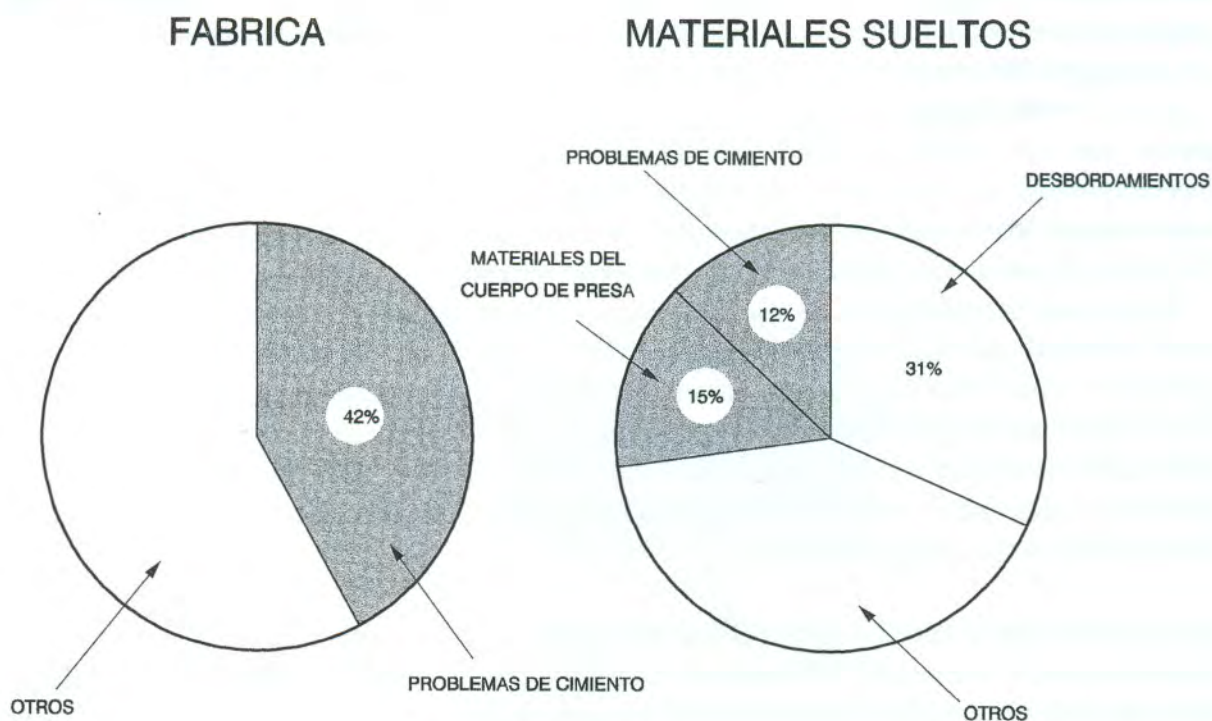


Fig. 1.1
Causas de la rotura de las presas
(importancia del cemento y de los materiales)

1.3. Importancia del cimientado y de los materiales naturales en el proyecto de presas

La cimentación de una presa es un componente estructural esencial que requiere especial atención durante toda la vida de aquélla. La cimentación debe cumplir una triple función: 1) asegurar la estabilidad de la presa sometida a diversas solicitaciones; 2) proporcionar impermeabilidad frente al agua embalsada y 3) no deformarse excesivamente bajo el peso de la presa y las fuerzas que actúan sobre ella. Si cualquiera de estas funciones se satisface solo parcialmente, el comportamiento de la presa puede ser inadecuado o inseguro. Por tanto, las condiciones de la cimentación en un determinado emplazamiento son un factor determinante en la selección del tipo de presa y su correcta evaluación es probablemente la mejor garantía de que el comportamiento global de la presa será un éxito.

El proyecto de casi todos los componentes de una presa está condicionado por las características del terreno que los soporta. Mientras que los materiales de construcción de una presa pueden especificarse y someterse a control de calidad, la cimentación ya existe y muchas de las características geológicas están ocultas. Debido a la variabilidad de la naturaleza, cada emplazamiento es diferente y la cimentación puede ser de muy variadas características, simple o con complejas heterogeneidades y oscuras deficiencias. Por ello, en la investigación del cimientado siempre quedará alguna incertidumbre y la consecuencia práctica son los numerosos casos de presas que han sufrido incidentes por lo que el objetivo a alcanzar será mantener estas incertidumbres, en cada caso, dentro de límites aceptables. No debe ignorarse que el conocimiento insuficiente de la cimentación produce, con frecuencia, modificaciones en los proyectos de presas que, aparte de los problemas de seguridad, dan lugar a incrementos de coste y demoras en la terminación de las obras que ocasionan perjuicios económicos importantes. Debe admitirse que es imposible lograr, en todos los casos, un conocimiento suficiente de la cimentación, en la fase de proyecto, que evite totalmente modificaciones posteriores de la presa y sus estructuras complementarias. Sin embargo, un estudio satisfactorio de la cimentación, en cada caso, acomodado a las características de la presa, debe redundar en proyectos bien definidos en los que se reduzcan los cambios posteriores y que den lugar a obras técnicamente bien resueltas y con costes adecuados.

En los países desarrollados, como es el caso de España, ya se han construido muchas presas y los emplazamientos con buena cimentación escasean, por lo que las cimentaciones difíciles aparecen cada vez con más frecuencia en la ubicación de los nuevos proyectos. Con el desarrollo actual de la tecnología no es aventurado afirmar que puede construirse una presa casi en cualquier emplazamiento. La dificultad que éste pueda presentar se reflejará en los tratamientos de la cimentación exigidos para garantizar la seguridad de la presa y, consecuentemente, en los costes de construcción. Éstos pueden ser tan elevados, en el caso de cimentaciones difíciles, que el proyecto no resulte viable. Es, por tanto, de la máxima importancia adquirir un conocimiento suficiente de la cimentación de una presa que pueda proporcionar una estimación lo más realista posible de los costes de su tratamiento. Así se podrán evitar situaciones, que han ocurrido en la práctica, en las que los tratamientos han continuado durante buena parte de la explotación de la presa o en las que la presa ha sido abandonada o no cumple adecuadamente con la función que le

había sido asignada porque las condiciones de la cimentación no fueron evaluadas y corregidas correctamente.

La Cuestión 66 "*Presas en cimentaciones difíciles*" tratada en el Congreso Internacional de Grandes Presas de Viena, en 1991, contiene una amplia documentación sobre todos los aspectos de interés en relación con la cimentación de las presas. En las conclusiones del Ponente General, en la sesión correspondiente, se pone de relieve lo siguiente: "La investigación de las condiciones de cimentación es frecuentemente insuficiente. El personal encargado de la investigación no tiene, en muchos casos, la suficiente experiencia y conocimientos para afrontar casos difíciles. Debido a estas condiciones la solución elegida no es, frecuentemente, la mejor" [R.5]. Estas reflexiones ponen de manifiesto la importancia que tiene el adecuado conocimiento de la cimentación de una presa para realizar el proyecto de aquella en las mejores condiciones.

En relación con los materiales naturales para el cuerpo de presa, debe hacerse una clara distinción entre los áridos para hormigones de presas y los materiales para las presas de materiales sueltos. Los problemas de seguridad derivados de los áridos para hormigón, no suelen tratarse de forma específica en la bibliografía, pero en los últimos años han proliferado bastante los estudios de envejecimiento de presas como consecuencia de la creciente edad de éstas en todo el mundo y, dentro del envejecimiento del hormigón, frecuentemente aparece entre sus aspectos más determinantes los fenómenos expansivos causados por la reacción álcali-árido. Éste es un tema importante en la explotación de las presas que ha dado lugar a problemas graves y ha sido tratado específicamente en el Boletín 79 de ICOLD [R.6]. También se describen algunos ejemplos de esta casuística de envejecimiento en el Boletín 93 de ICOLD [R.7]. En España, se han producido varios casos de fenómenos expansivos en el hormigón de algunas presas [R.2] a causa de la reacción de la sílice activa con los álcalis del cemento o de los propios áridos.

En las últimas décadas se ha avanzado bastante en el conocimiento del comportamiento de los materiales naturales para las presas de materiales sueltos y en la actualidad puede decirse que las presas más altas del mundo son de estos materiales, siendo, por otra parte, las más numerosas. Solo estos datos demuestran por sí mismos la importancia de estos materiales en la construcción de presas. Para llegar a esta situación ha sido preciso recorrer un largo camino asociado al desarrollo de la mecánica de suelos y de la maquinaria de construcción, en el que importantes profesionales han contribuido de manera decisiva, como se pone de manifiesto en un exhaustivo análisis de A. D. Penman [R.8].

Las presas de tierras, siempre que se adopte la sección adecuada, pueden construirse con materiales locales en emplazamientos de casi cualquier tipo que resultan inadecuados para otros tipos de presas. Actualmente, pueden construirse con rapidez con la moderna maquinaria existente y su seguridad queda garantizada con los métodos actuales de proyecto y construcción, todo lo cual contribuye a que se construyan cada vez más en el mundo.

1.4. El Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses en relación con el tema objeto de esta Guía

El Reglamento Técnico [R.9] dedica, dentro de su brevedad, bastante atención a los estudios geológico-geotécnicos y de prospección de materiales, aspectos que esta Guía trata de desarrollar. Para centrar los temas que se deben abordar, se revisan, a continuación, los Capítulos y Artículos del Reglamento que incluyen aspectos relacionados con la presente Guía y los Capítulos de ésta donde aquéllos se tratan.

- Capítulo II. Control de la Seguridad.

En el Artículo 5, relativo a las obligaciones del titular de la presa, se incluyen entre éstas la de realizar estudios geológicos durante las fases de proyecto y construcción, así como efectuar durante la ejecución de las obras los reconocimientos necesarios (Art. 5.2). Es también obligación del titular elaborar y mantener actualizado un Archivo Técnico de la presa (Art. 5.5) que incluirá los informes geológicos utilizados para la redacción del Proyecto de la presa y la información geológica adicional obtenida durante la ejecución y explotación de las obras.

El Artículo 6 menciona que la Vigilancia e Inspección de presas tendrá entre otros cometidos "analizar las modificaciones al proyecto que se propongan a lo largo de la fase de construcción, para hacer frente a las desviaciones respecto a las características previstas del terreno o de los materiales de construcción".

El desarrollo de estas cuestiones en la presente Guía es el siguiente:

En el Capítulo 2 se orienta y se hacen recomendaciones sobre la forma de realizar los estudios geológicos y geotécnicos en las distintas fases de una presa.

También en el Capítulo 2 de esta Guía (apartado 2.6.6.) se recogen los documentos de tipo geológico-geotécnico que debe contener el Archivo Técnico de la presa. En el apartado 2.7.3. se propone un método de evaluación de las condiciones en que se encuentra el Archivo Técnico de una presa existente y en el 2.7.4. se recomiendan las actuaciones a desarrollar cuando el Archivo Técnico es deficiente.

En los Capítulos 4 y 5 se describen los reconocimientos a realizar en relación con los materiales para presas de materiales sueltos y con los áridos para hormigones. También abundan las consideraciones y recomendaciones para verificar, durante la fase de construcción, las propiedades previamente atribuidas a los materiales para el cuerpo de presa y para áridos para hormigones.

Capítulo III. Criterios básicos de seguridad.

El artículo 18 exige comprobar el comportamiento de la presa frente a los efectos producidos por terremotos, de acuerdo con la normativa sismoresistente en vigor. El desarrollo detallado de este requisito es el objeto del Capítulo 3 de esta Guía.

El Artículo 19 exige que se analicen las características morfológicas y geológicas del vaso y del emplazamiento de la presa, que pudieran afectar a la seguridad. El alcance de las investigaciones y estudios a realizar será tal que permita conocer las características del terreno de apoyo de la presa y del vaso del embalse a fin de evaluar la resistencia, deformabilidad, permeabilidad y estabilidad físico-química del terreno. En este Artículo 19 también se exige la investigación de los terrenos con riesgo de inestabilidad en las márgenes del embalse que pudieran provocar deslizamientos en las laderas al variar rápidamente el nivel del agua.

Todos estos aspectos se tratan con gran detalle en el Capítulo 2 de esta Guía.

El Artículo 20, dedicado a los materiales, establece que deben emplearse materiales que sean susceptibles del control. El proyecto deberá definir los materiales, fijar las características que deben cumplir y concretar los procedimientos para su comprobación y control. Los materiales y obras se ensayarán y ejecutarán conforme a las prescripciones del proyecto. Para que en el proyecto se puedan concretar todos estos aspectos, es necesario realizar una investigación de materiales, cuya metodología se desarrolla en los Capítulos 4 y 5 de esta Guía, que permita fijar sus características, las cuales se establecerán en el Pliego de Prescripciones del Proyecto. Éste contendrá, además de las características de los materiales, los ensayos necesarios para su control cuya metodología de realización se trata exhaustivamente en el Anejo II de esta Guía.

Capítulo IV. Condiciones técnicas a cumplir en cada una de las fases.

En el Artículo 26, relativo al Proyecto de la presa, se mencionan los estudios que éste deberá incluir y entre los cuales se encuentran los de la geología y medio natural general de la cuenca y específicos del emplazamiento, la geología, hidrogeología, geotecnia y sismicidad de la cerrada y vaso del embalse y la procedencia y características de los materiales de construcción a emplear. El desarrollo de este Artículo cubre prácticamente la totalidad del contenido de esta Guía.

En el Artículo 27, relativo a la construcción de la presa, se indica que el equipo técnico comprobará que los materiales utilizados en la obra cumplen las previsiones del Proyecto y que se ejecutan con la calidad requerida. Asimismo, en la fase de construcción, se ampliará la información existente en el Proyecto sobre el terreno y los materiales. Aunque estos aspectos se tratan fundamentalmente en la Guía Técnica de Construcción, en ésta se incluyen algunas consideraciones al respecto.

En el Artículo 33, relativo a la Auscultación e Inspección durante la fase de explotación (así como en los Art. 5.3. y 5.8.), se menciona la obligación que tiene el titular de la presa de realizar inspecciones periódicas para evaluar la situación de seguridad de la presa. En el Capítulo 2 de la Guía (apartado 2.7.) se describen las actuaciones recomendadas, relativas al terreno de cimentación de la presa.

El Reglamento centra su contenido, respecto a los temas de esta Guía, en criterios de índole muy general. Es de carácter abierto y contiene tanto la enumeración de los aspectos técnicos que deben abordarse como los organizativos para crear las condiciones de seguridad adecuadas. Los aspectos técnicos detallados se tratan en esta Guía, a nivel de recomendaciones, recogiendo el desarrollo actual de la tecnología para la realización de estudios geológicos-geotécnicos y de prospección de materiales.

1.5 Contenido de esta Guía

La Guía pretende dar respuesta a los requisitos establecidos en el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses en los aspectos relacionados con los estudios geológico-geotécnicos relativos a la cerrada y vaso de la presa y a la prospección de materiales para presas de materiales sueltos y de áridos para presas de hormigón. Incluye además un capítulo de recomendaciones sobre los estudios de sismicidad, necesarios en algunos proyectos. En el apartado anterior se han analizado los artículos del Reglamento cuyo desarrollo es objeto de la presente Guía y los lugares de ésta donde, con carácter general, se abordan cada uno de los temas. No obstante, en cada uno de los Capítulos de la Guía hay abundantes alusiones detalladas a los aspectos del Reglamento que se están tratando.

Se ha buscado un enfoque progresivo de los estudios geotécnicos tanto del cimiento y vaso como de los materiales por entender que aquellos requieren notable flexibilidad en su planteamiento para sacar el máximo provecho de los sucesivos hallazgos y por su carácter interactivo con otras actividades del Proyecto como la propia definición del tipo de presa y sus estructuras.

Este enfoque no es inusual y se encuentra frecuentemente en la bibliografía [R.10]. En esta última referencia se plantean los estudios geotécnicos utilizando un proceso interactivo de los pasos que se resumen a continuación:

- Actividad 1 - Definir los objetivos del trabajo (o cuestiones a responder).
- Actividad 2 - Recopilar la información existente para establecer un modelo geológico tentativo de la zona.
- Actividades 3 y 4 - Definición de actividades y estimación de costes para obtener la aprobación de ejecución del programa.
- Actividad 5 - Completar los objetivos definidos en la Actividad 3 para establecer un modelo geológico-ingenieril que implique conocimiento de la geología regional, la historia geológica y la geología detallada del emplazamiento.

- Actividad 6 - Se realizan ensayos de campo y laboratorio para obtener valores cuantitativos de las propiedades del terreno, confeccionando con ellas el modelo geotécnico.
- Actividad 7 - Se lleva a cabo el análisis de proyecto relativo a la estructura propuesta y al modelo geotécnico del emplazamiento.

Si al final de la Actividad 7 se han cubierto los objetivos con suficiente confianza, la investigación se concluye. En caso contrario, se realizarán nuevos ciclos de investigación hasta alcanzar el nivel de confianza necesario.

Independientemente de los aspectos técnicos se ha tratado también de dar respuesta a exigencias de aspectos administrativos y organizativos de la seguridad recogidos en el Reglamento Técnico tales como la necesidad de redactar informes que pasarán a formar parte del Archivo Técnico de la presa y servirán para evaluar la seguridad en las revisiones periódicas. Al contenido recomendable de estos informes y a las actuaciones para completar el Archivo Técnico se les ha prestado una gran atención por la importancia que tiene que las presas estén adecuadamente documentadas para la evaluación de su seguridad.

La Fig. 1.2 representa esquemáticamente el contenido de la Guía y la relación entre los capítulos y anejos de aquélla.

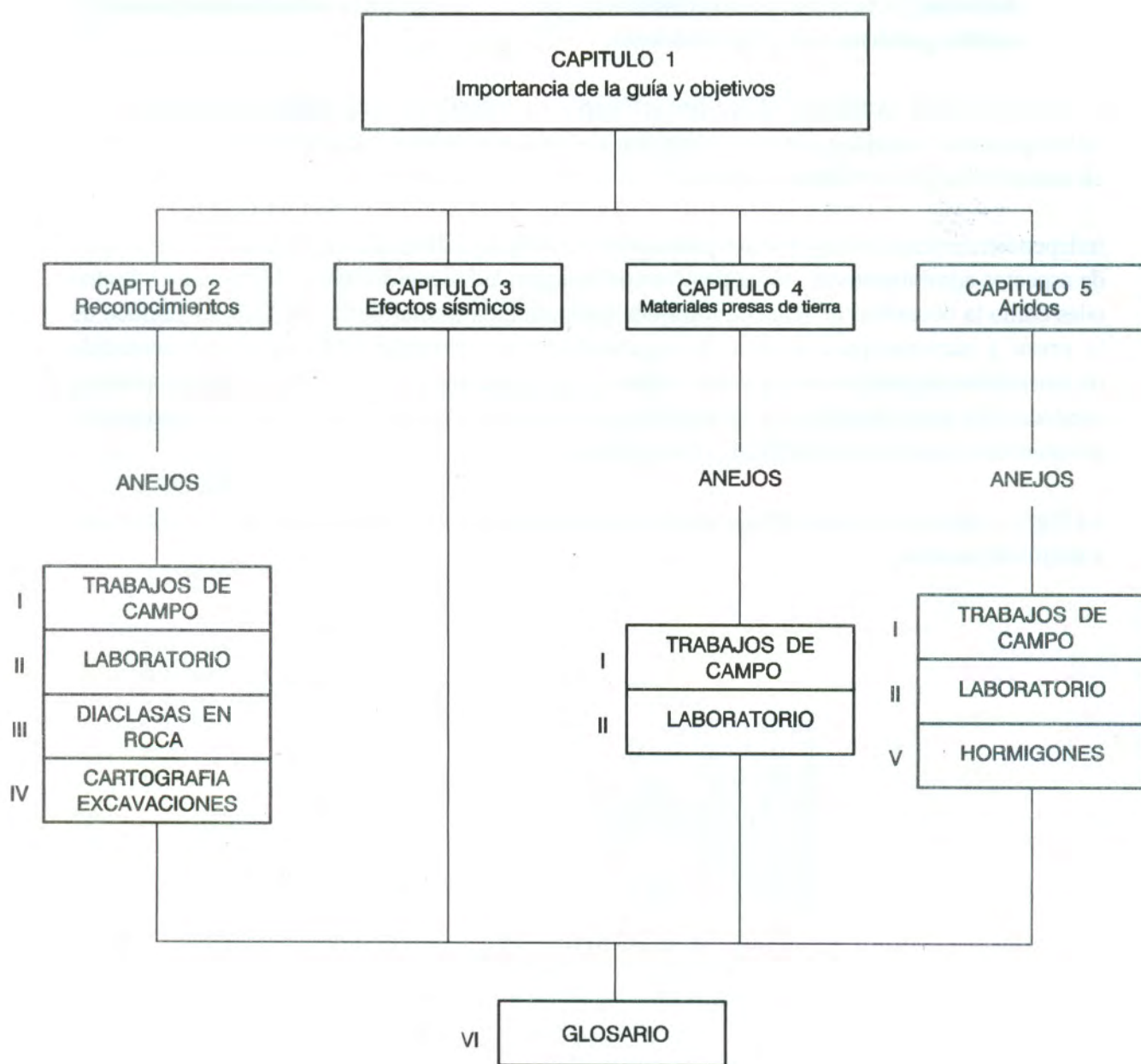


Fig. 1.2
Contenido de la Guía

2.

ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS

2.1. Aspectos previos

2.1.1. *Calidad, extensión e intensidad de los reconocimientos*

Los reconocimientos geológico-geotécnicos deben realizarse de manera que se obtengan datos fiables acerca de los aspectos que interesa conocer. Las actividades parciales que han de desarrollarse para conseguirlo deben ser, todas, objeto de atención expresa. Igual que en otras actividades de la ingeniería, en esta relativa a la geología y la geotecnia debe seguirse las pautas actuales que aseguren la calidad de los reconocimientos. En este Capítulo se trata de exponer una serie de ideas que pueden ayudar a realizar un buen reconocimiento geotécnico.

La extensión e intensidad del reconocimiento geológico-geotécnico dependerá tanto de la complejidad geológica como de la importancia de la obra. El reconocimiento debe ser suficientemente amplio para que suministre información relativa a todas las partes de la obra (la presa, su embalse, las obras anejas, los accesos, etc). En este Capítulo se indican los aspectos que comúnmente han de investigarse. En cada caso concreto pueden existir aspectos específicos que puedan ser de interés aunque aquí no se hayan destacado.

La intensidad de los reconocimientos geológico-geotécnicos, esto es el grado de detalle o la precisión con la que deben llegar a conocerse cada uno de los aspectos objeto de reconocimiento, ha de ser la adecuada a cada caso concreto: Atendiendo a la intensidad de los reconocimientos pueden establecerse las tres clases siguientes:

- CLASE I: Serían de esta clase los reconocimientos exhaustivos; una ampliación adicional de los reconocimientos sólo aportaría un aumento de precisión marginal acerca de los datos objeto de estudio.

Para ilustrar esta clase de reconocimiento puede utilizarse la investigación de la resistencia al corte según diaclasas críticas (que afectan a la estabilidad) en el cimientto en una presa de fábrica. Un reconocimiento intenso de la resistencia implicaría realización de sondeos suficientes para definir su posición, galerías que permitan acceder a zonas representativas para tomar muestras y ensayarlas en laboratorio e incluso la realización de ensayos in situ.

En términos generales, un aspecto del reconocimiento geológico-geotécnico puede considerarse que ha sido reconocido exhaustivamente cuando los últimos datos que se han ido obteniendo eran predecibles al considerar y analizar la información previa.

- CLASE II: Son de esta clase aquellos reconocimientos que aportan información cualitativa precisa acerca del asunto en cuestión e información cuantitativa aproximada; basada en algunos datos concretos y apoyándose en experiencias previas similares.

Tomando como ejemplo el mencionado anteriormente (resistencia al corte en una diaclasa) el reconocimiento de este aspecto sería de esta clase cuando la resistencia se investiga a través de sondeos (que permiten definir los rasgos principales de su estructura) y algún ensayo de resistencia en laboratorio. Las correlaciones existentes se utilizan para indicar un rango de valores de la resistencia esperable.

Un estudio geológico-geotécnico de esta clase aportaría información cuantitativa cuya precisión sería mejorable significativamente si se aumentara la intensidad de los reconocimientos. La ampliación de los reconocimientos, sin embargo, no aportaría ninguna información que pudiera considerarse contradictoria con la ya obtenida.

- CLASE III: Son de esta clase aquellos reconocimientos que sólo tratan de obtener una información cualitativa precisa y una información cuantitativa de carácter orientativo.

Volviendo al ejemplo de las resistencias de las juntas de un macizo rocoso, un reconocimiento de esta clase únicamente aportaría información acerca de la descripción de las juntas tal como se ven en superficie y en los sondeos que se hayan realizado.

Los reconocimientos de este tipo únicamente aportarían información cuantitativa aproximada y basada primordialmente en datos de ensayos sencillos (identificación) y correlaciones basadas en la experiencia.

Cada parte de un reconocimiento geológico-geotécnico puede ser de distinta intensidad (distinta clase) en función de la importancia del aspecto en estudio. Puede ser de Clase I cuando investigue la resistencia al corte de un sistema de diaclasas significativo (importante para la

seguridad) y puede ser de menor detalle (Clase II ó III) cuando investigue la resistencia al corte de diaclasas que no afecten a la estabilidad de la presa aunque sean importantes para la definición precisa de los taludes a adoptar en las excavaciones del cimientto.

No deben confundirse estas clases de reconocimientos con lo que aquí se quiere que signifique su extensión. Todos los estudios geológico-geotécnicos deben ser igualmente amplios en el sentido de considerar todos los aspectos que sean objeto de la investigación. La forma de abordarlo, sin embargo, puede ser diferente. Por ejemplo, si el objeto de estudio es la permeabilidad de la cerrada el tema de las posibles admisiones de lechada de cemento debe ser objeto de estudio siempre que ese sea uno de los procedimientos de impermeabilización a considerar. En un estudio de Clase III bastaría con una descripción cualitativa de la formación rocosa y algún ensayo de permeabilidad in situ. En un reconocimiento de Clase II los ensayos de permeabilidad se realizarían en cada uno de los tipos de formación rocosa existente y en distintas localizaciones de la cerrada. En un estudio de Clase I se realizarían, además, pruebas de inyección en cada tipo de roca previamente identificado.

Un reconocimiento de Clase I conduciría a proyectos seguros que, a su vez, darían lugar a obras con desviaciones menores sobre el proyecto de construcción. Un reconocimiento de esta clase exigiría amplias excavaciones en las zonas de obra para descubrir el cimientto y/o realización de galerías, ensayos in situ, etc.

Los reconocimientos geológico-geotécnicos más usuales tienen una intensidad limitada por cuestiones económicas y de plazo. Aún así suelen contener una información geológica fiable y suficientemente detallada. Las características geotécnicas esenciales (resistencia, deformabilidad y permeabilidad) quedan suficientemente acotadas dentro de ciertos márgenes pero dejan para la fase de construcción ciertos interrogantes de detalle (posible existencia de diaclasas críticas para la estabilidad no bien analizadas, permeabilidades y procedimientos de impermeabilización esbozados pero no contrastados, deformabilidades basadas en ensayos geofísicos o en ensayos con muestras pequeñas, etc). Los proyectos basados en ellos podrían sufrir desviaciones de tipo presupuestario pero que no contradicen esencialmente al proyecto inicial.

Atendiendo al tipo de obra en cuestión, concretamente, considerando la categoría de la presa en cuyo contexto se hacen los reconocimientos (A, B ó C según el Reglamento Técnico), estos deben hacerse con mayor o menor detalle. Se recomienda que aquellos reconocimientos de cuyos resultados dependa algún elemento esencial para la seguridad de una presa de categoría A se hagan con la máxima intensidad (Clase I) y que los reconocimientos de menor detalle (Clase III) se especifiquen únicamente en el contexto de presas de categoría C. En cualquier caso, el tipo de reconocimiento y los estudios geológico-geotécnicos deben tener la suficiente extensión y profundidad para garantizar la seguridad de la presa y de su embalse.

2.1.2. Orden de los reconocimientos

A efectos de exponer los criterios que deben guiar la realización de los estudios geológico-geotécnicos del vaso y de la cerrada se ha optado por seguir un orden temporal similar al que se

adopta en la mayoría de los casos. Primero se considera el reconocimiento geológico general de la zona, después el de la cerrada o posibles cerradas. La caracterización geotécnica de la cerrada donde ha de apoyarse la presa, así como el estudio de los problemas singulares que resulten de interés en cada caso concreto, son considerados después. Los reconocimientos geológico-geotécnicos han de proseguirse durante la construcción de la presa; ese aspecto se considera también en este Capítulo. Como parte final se incluyen algunas situaciones en las que es preciso ampliar los reconocimientos geológico-geotécnicos tras construir y llenar la presa; son las situaciones de comportamiento anormal o aquellas en las que la información que se obtuvo durante el proyecto y la construcción es insuficiente (presas antiguas) o incluso aquellas en las que se quiere proceder al abandono de la presa. Aunque el orden seguido en un caso concreto sea diferente al expuesto, se espera que las ideas que aquí se apuntan puedan ser de ayuda al equipo técnico que haya de realizar estudios de este tipo.

De acuerdo al orden anterior, el terreno se conocerá con más detalle a medida que avanza la vida de la presa tal como se ilustra en la Tabla 2.1. En las primeras etapas, el estudio geológico regional y el estudio previo de la cerrada (que son objeto de los apartados 2.2. y 2.3. de este Capítulo) permitirán definir las características principales de la presa e incluso elegir la tipología conveniente. Es bueno que el tipo de presa se decida antes de realizar los reconocimientos de detalle; esto permitirá realizarlos con un alcance y unos objetivos más definidos.

TABLA 2.1
Secuencia de los estudios del terreno

	CONOCIMIENTO DEL TERRENO	FASES DE LA VIDA DE LA PRESA
1	- ESTUDIO GEOLÓGICO REGIONAL - ESTUDIO PREVIO DE CERRADAS	- ESTUDIO DE VIABILIDAD - ANTEPROYECTO (ESTUDIO DE SOLUCIONES)
2	- CARACTERIZACIÓN DE LA CERRADA - ESTUDIO DE PROBLEMAS ESPECÍFICOS	- PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN
3	- ESTUDIOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN	- DESVÍO DEL RÍO Y EXCAVACIONES - CONSTRUCCIÓN
4	- ESTUDIOS DE EVALUACIÓN	- PUESTA EN CARGA - EXPLOTACIÓN - PRESAS ANTIGUAS - EVENTUAL ABANDONO

La redacción del proyecto de construcción requeriría manejar datos más precisos del terreno, que permitan evaluar la seguridad de la presa y de las obras anejas. Esto obliga a caracterizar la

cerrada (esto es, modelizarla y asignar valores concretos a los parámetros que rigen su comportamiento en cuanto a resistencia, deformación, permeabilidad y durabilidad) así como hacer estudios específicos destinados a resolver los problemas concretos que hayan surgido en la fase de proyecto. Estos aspectos son objeto de los apartados 2.4. y 2.5. de este Capítulo. Es recomendable que el proyecto avance simultáneamente con los reconocimientos; que ambas actividades se desarrollen en paralelo. El reconocimiento geológico-geotécnico debe aportar toda la información necesaria para proyectar, parte de ella se desvela como necesaria sólo cuando el proyecto está muy avanzado y por ello no deben darse por concluidos los reconocimientos hasta haber completado el proyecto. En ese sentido puede ser conveniente planificar los reconocimientos del terreno en diversas etapas que irían cubriendo necesidades de conocimiento específicas detectadas al realizar el proyecto.

Cuando se desvía el río y se abren las excavaciones se tiene la oportunidad de reconocer con mayor detalle el terreno afectado por las obras. Los reconocimientos más recomendables se indican en el apartado 2.6. de este Capítulo. La obtención de información en esta fase de la obra es de gran interés; permitirá ajustar la información previa y, en ocasiones, obligará a hacer ciertas adaptaciones al proyecto. En este sentido sería recomendable, cuando la situación lo permita, que esta primera parte de la obra (desvío y excavaciones) estuviera desligada de la correspondiente a la construcción propiamente dicha. Las adaptaciones que sean necesarias podrían hacerse antes de ejecutar esa segunda parte de la obra.

El Archivo Técnico de la presa dispondrá, en las siguientes fases de la vida de la presa, de la información necesaria para entender el comportamiento que se vaya observando a través de las inspecciones directas y mediante la auscultación. No obstante puede ser necesario realizar aún reconocimientos específicos puntuales para aclarar algún comportamiento anómalo que pudiera ocurrir. Estos aspectos se consideran en los apartados 2.7.1., 2.7.2. y 2.7.3. de este Capítulo.

Las presas antiguas y, en general, todas ~~aquellas~~ presas que se hayan construido antes de que existiera el Reglamento Técnico sobre seguridad de presas y embalses, pueden presentar deficiencias en el Archivo Técnico de la presa. En estos casos es conveniente realizar una revisión y un análisis de la seguridad de la presa que podría requerir también la realización de ciertos reconocimientos del terreno. Este aspecto se considera en el apartado 2.7.4.

Finalmente, siendo previsible que ciertas presas sean abandonadas y siendo obligatorio en esos casos realizar un proyecto específico de puesta en fuera de servicio, en el apartado 2.7.5. se indica alguna recomendación respecto a los reconocimientos geológicos que pudieran necesitarse.

2.2. Estudio geológico regional

El motivo de realizar un estudio geológico de carácter regional, dentro de los análisis geológicos-geotécnicos del emplazamiento de una presa, es tanto el dotar de un marco geológico a dichos estudios como el poder analizar las correlaciones de las características de tal

emplazamiento con las estructuras geológicas regionales, que para diversos aspectos, sismicidad, tensiones in situ, hidrogeología, etc pueden tener gran influencia.

Normalmente al enfocar el estudio geológico regional se conocerán ciertos detalles del embalse que se pretende construir que pueden haber sido definidos previamente por condiciones topográficas, medioambientales, económicas, etc. En estos casos la extensión de la zona en estudio puede quedar mejor definida. En los otros casos, la amplitud del estudio geológico regional debe incluir todos los vasos potenciales y las zonas geológicamente asociadas cuyo conocimiento pueda tener algún interés.

En las zonas de sismicidad elevada y cuando la presa en cuestión pueda ser de categoría A, se deberá realizar un estudio geológico regional más completo que identifique posibles fallas capaces de producir terremotos, tal como se indica en el Capítulo 3 de esta Guía.

Existen buen número de ejemplos en los que un "fallo" en la apreciación de los rasgos generales de la geología regional ha provocado después excesos de costes desproporcionados. Es posible que una concepción errónea del marco geológico conduzca a una concepción también errónea de la calidad de una cerrada. Estos errores de tipo general pueden, además, repercutir en la interpretación de otros detalles cuando se trata de caracterizar una cerrada concreta.

2.2.1. Investigación geológica

El resultado de los estudios geológicos regionales debe presentarse en forma de planos de planta y perfiles indicando la estructura interna del terreno y su proyección superficial. Esto es, mediante cartografía geológica. Antes de confeccionar ningún nuevo plano geológico conviene recopilar la información previa existente.

Por lo general, para iniciar este tipo de estudios, existe abundante documentación aunque en muchos casos dispersa. Los planos geológicos y/o geotécnicos editados por distintas Instituciones son los de mayor uso. Existe una amplia variedad de ellos; algunos se mencionan en la Tabla 2.2.

Otra información de fácil acceso y de gran utilidad es la fotografía aérea. España está totalmente volada a escala 1:30.000-1:33.000, en pares esterográficos que permiten visión en relieve pero existen otros vuelos tal como se expone en la Tabla 2.3.

Con toda la información recogida debe procederse a confeccionar un estudio geológico regional en el que se especifique la Geomorfología, Estratigrafía, Tectónica e Hidrogeología.

TABLA 2.2
Planos de edición que pueden utilizarse en la confección de un estudio geológico regional

Planos a escala 1:1.000.000	
Instituto Tecnológico Geominero (1980)	"Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares"
Instituto Tecnológico Geominero (1980)	"Mapa de lineamientos deducidos de las imágenes Landsat"
Instituto Tecnológico Geominero (1982)	"Mapa del Cuaternario de España"
Instituto Tecnológico Geominero (1986)	"Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias". Reimpresión
Instituto Tecnológico Geominero (1986)	"Mapa Nacional de Karst"
Instituto Geográfico Nacional (1992)	"Análisis Sismotectónico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias". Publicación Técnica nº 26.
Planos a escala 1:200.000	
Instituto Tecnológico Geominero (1971-1972)	"Mapa de síntesis geológica". Desde 1983 existe una nueva edición actualizada que no cubre de momento toda la Península e islas. El Instituto Tecnológico Geominero tiene mapas geológicos de carácter provincial, en una edición moderna.
Instituto Tecnológico Geominero (Diversos años)	"Mapa hidrogeológico"
Planos a escala 1:50.000	
Instituto Tecnológico Geominero (Diversos años)	"Mapa Geológico Nacional"

TABLA 2.3
Fotografía aérea proporcionada por organismos oficiales

ESCALA	ORGANISMO
1:1.000.000 (LANDSAT)	Instituto Geográfico Nacional
1:500.000 (LANDSAT)	Instituto Geográfico Nacional
1:200.000 (LANDSAT)	Instituto Geográfico Nacional
1:100.000 (LANDSAT)	Instituto Geográfico Nacional
1:70.000 (1990) (25% del territorio nacional)	Instituto Geográfico Nacional
1:50.000 (LANDSAT)	Instituto Geográfico Nacional
1:400.000 (1993) (15% del territorio nacional)	Instituto Geográfico Nacional
1:32.000	Servicio Geográfico del Ejército
1:32.000	Servicio Topográfico y Cartográfico del Ejército del Aire
1:32.000 (Costas)	Instituto Hidrográfico de la Marina
1:30.000 (1982-83 y 84)	Instituto Geográfico Nacional
1:18.000 (1985) (50% del territorio nacional)	Instituto Geográfico Nacional
1:18.000 (Algunas zonas)	Ministerio de Agricultura (IRYDA)
1:5.000 (1991) (Litoral)	Instituto Geográfico Nacional
1:3.000 (Cascos urbanos)	Ayuntamientos. Comunidades autónomas
Escalas diversas (Sólo zonas concretas)	Instituto Geográfico Nacional
Escalas varias (Zonas concretas)	Comunidades autónomas

No debe olvidarse que el alcance de este estudio no implica utilizar métodos de investigación del subsuelo y que los datos que éstos proporcionarían deben sustituirse por la información que se ha mencionado. Hay que señalar al respecto que el Instituto Tecnológico Geominero posee un amplio banco de datos sobre sondeos, incluso algunos publicados [R.1] y análisis petrográficos procedentes de muestras utilizadas para la confección de las hojas del Mapa Geológico de España.

Cuando existen estudios antiguos de la zona conviene, antes de utilizarlos, someterlos a revisión para adecuarlos a los datos aportados por nuevas investigaciones. Suele ser habitual, por ejemplo, que las denominaciones de los períodos geológicos hayan cambiado. En ocasiones, por falta de tiempo o presupuesto, se han dado por buenas ciertas cartografías existentes sin revisarlas y esto ha sido causa de errores importantes. Una cartografía poco minuciosa puede no detectar un afloramiento local poco notable que después se convierta en el hecho principal que desvela el origen de ciertos problemas.

Cabe la posibilidad de que en esta primera etapa no se cuente con planimetría del emplazamiento, por lo que será necesario dibujar sobre la foto aérea o realizar esquemas incluso con apoyo topográfico muy leve. Hay que recordar que el Instituto Geográfico Nacional y el Servicio Geográfico del Ejército proporcionan planimetría a escala 1:50.000 y 1:25.000 y que varias Comunidades Autónomas cuentan con mapas de su territorio a escala 1:10.000 y 1:5.000. En base a la documentación obtenida, deberá hacerse un levantamiento geológico del embalse de carácter previo a una escala 1:25.000 ó 1:10.000 sobre los mapas topográficos de edición. Debe llamarse la atención sobre zonas que pueden ser dudosas en cuanto a su permeabilidad y estabilidad para proceder a su estudio detallado siempre que el asunto en cuestión fuese considerado de importancia. Estos aspectos se consideran a continuación.

2.2.2. Impermeabilidad del vaso

El embalse que se pretende crear debe ser impermeable o poder impermeabilizarse con costes económicos razonables, que no hagan inviable la obra que se pretende construir. Las fugas a otras zonas (otros cursos próximos) o las fugas profundas al mismo cauce, han de analizarse con el detalle suficiente hasta demostrar razonablemente que el vaso pretendido es adecuado desde este punto de vista.

En algunos casos será preciso conocer con detalle la hidrogeología de los terrenos cubiertos por el embalse ante la posibilidad de que los acuíferos existentes puedan verse afectados. Habrá que evaluar en qué medida son afectados, particularmente si están en explotación.

La creación de un embalse suele alterar la hidrogeología de la zona en general elevando el nivel freático de la misma. El estudio de la hidrogeología existente en el vaso antes de su llenado suele ser complicada. En algún caso se contará con trabajos de la zona, de hecho el Instituto Tecnológico Geominero tiene publicadas hojas del Mapa Hidrogeológico a escala 1:200.000 que cubren parte de España y a escala 1:50.000 algunas zonas concretas. Puede encontrarse otro tipo de información en publicaciones de los entes autonómicos y en tesis de Universidades y Escuelas.

Las filtraciones en el vaso pueden estar ligadas a formaciones permeables o a discontinuidades que lo conecten con valles periféricos. Para que se produzca flujo es preciso que exista un gradiente importante entre el punto de carga en el embalse y el de descarga en los valles anexos. Las formaciones más propicias para que se produzcan tales filtraciones son las calizas y las dolomías, algún tipo de areniscas, determinadas rocas volcánicas y terrenos cuaternarios. Habrá que centrar por tanto la investigación en este tipo de materiales.

La investigación detallada de la permeabilidad del vaso en aquellos puntos donde se sospeche falta de estanqueidad se hará siguiendo los métodos expuestos más adelante al hablar de la cerrada. Cuando las investigaciones previas indiquen una posibilidad de filtración en una zona determinada habrá que proceder a un levantamiento topográfico detallado, que permita cuantificar con exactitud la cota de los posibles puntos de alimentación y salida de la zona filtrante.

Cuando la filtración pueda producirse a través de alguna discontinuidad ésta debe ser analizada con todo detalle. En principio habrá que definir su posición con ayuda topográfica para conocer con exactitud los puntos de entrada y salida de una posible filtración. Al igual que se ha dicho anteriormente será preciso contar con planimetría de detalle. Es de gran importancia conocer el relleno de las posibles fallas conductoras de filtraciones, caso que lo tengan, su naturaleza, estado, etc. La investigación se llevará a cabo con métodos similares a los empleados en la cerrada.

La investigación puede ser muy complicada cuando se trata de rocas carbonáticas dada la dificultad de detectar la red cárstica existente. El problema se agrava cuando estas zonas de gran disolución se encuentran en el cauce y están cubiertas por espesos mantos de aluvial. La experiencia demuestra la complicación de tal investigación y la importancia de la misma. Cabe la posibilidad de que zonas como las que se comentan pasen desapercibidas durante esta etapa de investigación y se hagan patentes al llenar el embalse.

Todo el estudio se basa en datos superficiales obtenidos de visu y en la información publicada que antes se citó. Sin embargo, dado lo rápido de su ejecución se harán análisis petrográficos de las matrices rocosas principales que están presentes en la zona. Debe tenerse en cuenta que ésta es la única manera de definir con exactitud una roca, a la vez que da idea de su mineralogía, textura y alteración.

Tras este estudio preliminar debe deducirse si son necesarios más reconocimientos para calificar adecuadamente la permeabilidad de un determinado vaso. No deben proseguirse estudios de más detalle encaminados a otros aspectos (estabilidad, aterramientos, etc) si un determinado vaso no resulta adecuado respecto a la permeabilidad.

No siempre una posible filtración implica la inutilidad de un vaso o que sea necesaria su corrección. Es preciso cuantificar la posible pérdida y el tiempo en que se producirá, pudiendo, a la vista del resultado obtenido, desestimar el vaso, recomendar su tratamiento o aceptarle con sus condiciones naturales.

A este respecto quiere destacarse que la estanqueidad requerida puede ser diferente según el tipo de utilización a que se vaya a destinar el embalse. Vasos y cerradas permeables y cuya corrección fuese muy costosa no serían adecuados para crear presas de embalse pero pueden ser adecuados para presas de defensa contra avenidas. También cabe destacarse que existen situaciones en las que la estanqueidad del vaso es corregible con tratamientos de coste moderado y que en consecuencia algunos vasos y cerradas inicialmente permeables pueden servir para construir embalses de almacenamiento. En cualquier caso, la calificación previa de la situación correspondiente al caso en estudio es necesaria hacerla en las primeras fases del reconocimiento geológico-geotécnico.

2.2.3. Estabilidad de las laderas del vaso, aterramientos y subsidencias

Es relativamente frecuente que las laderas de los embalses resulten inestables bien durante la construcción de la obra o, más frecuentemente, al explotar los embalses que inundan sus pies.

La estabilidad de las laderas del vaso es un asunto de importancia vital para decidir la viabilidad de la presa, particularmente cuando existe algún riesgo de deslizamiento próximo a la cerrada.

La presencia de agua provocará un cambio en las condiciones del terreno afectado que tendrán repercusiones más notorias en las zonas de borde pudiendo dar lugar a deslizamientos. La mayor tendencia a movimientos será en materiales aluviales y coluviales aunque también pueden producirse en rocas blandas masivas o estar causados por intercalaciones de rocas plásticas. Pueden reactivarse antiguos movimientos que el paso de los años ha enmascarado por completo.

La primera investigación debe llevarse a cabo mediante fotografía aérea, en la que se señalarán aquéllas zonas potencialmente deslizables. También pueden hacerse recorridos eligiendo itinerarios desde donde se domine el embalse. La morfología de la zona puede ser esclarecedora para el reconocimiento de los deslizamientos pretéritos o futuros.

La vegetación o las coberturas pueden enmascarar los factores capaces de activar las masas de terreno. Debe tenerse en cuenta que en algún caso la presencia de capas arcillosas con espesores centimétricos, difícilmente detectables, pueden ser la causa del movimiento.

Una vez detectadas esas zonas se destacarán, para mayor estudio, las que pueden resultar peligrosas porque afecten a las estructuras auxiliares de la presa o a ella misma, a poblaciones, carreteras, ferrocarriles, canales o cualquier estructura situada en el borde o sean capaces de dar lugar a olas que puedan dañar a esas estructuras.

Incluso determinados deslizamientos, que a priori no cumplen las condiciones señaladas, deben ser estudiados. Se trata de aquellos que situados en zonas muy estrechas pueden dar lugar a barreras en el cauce aunque estas queden ocultas por las aguas. Si por algún motivo se produce un desembalse rápido éstas "presas" pueden ser un gran peligro por su rotura brusca y el arrastre de los materiales que la constituyen. En algún tipo de aprovechamientos, aunque no exista peligro potencial, pueden invalidar el funcionamiento de la instalación al no permitir el paso normal de las aguas o disminuir en tal grado la capacidad del embalse que éste no sea utilizable.

Una vez señalados los deslizamientos potencialmente peligrosos se procederá a su estudio in situ realizando un levantamiento geológico. La determinación de los límites del posible movimiento, la superficie del deslizamiento y el volumen capaz de activarse son los objetivos primordiales de este levantamiento. Si la peligrosidad del fenómeno es muy grande será necesario asegurar su definición mediante sondeos y geofísica. Incluso se debe instrumentar un red de vigilancia mediante referencias, controladas topográficamente, que deben ser utilizables durante el llenado.

En general la sedimentación de los embalses puede convertirse en un problema de suma importancia en presas con vaso reducido o en áreas de escasa vegetación con materiales fácilmente erosionables. La investigación del embalse puede definir aquellas zonas de la cuenca que son susceptibles de aportar material de forma continua y abundante. La primera investigación se basará en la fotografía aérea y en los planos geológicos 1:50.000 ó 1:200.000 a fin de determinar las zonas que potencialmente pueden ser alimentadoras de material.

La subsidencia del terreno (asientos y hundimientos) como consecuencia del llenado del embalse puede tener lugar en zonas de rocas carbonáticas con grandes cavidades superficiales y en otras formaciones (yesos) cuyo techo pueda hundirse. Estas zonas pueden identificarse por algún síntoma previo de subsidencia natural, aunque si no han tenido gran repercusión externa, han podido pasar desapercibidos. Aunque no tuvieran repercusión en la seguridad de la obra puede ser de interés localizarlas, más a efectos de filtraciones que de hundimientos.

También puede originar ciertas subsidencias en el vaso los hundimientos de antiguas zonas mineras. Si las labores mineras han sido de importancia pueden ser un sumidero que no debe quedar ignorado. Habrá que proceder a definir las entradas situadas en el embalse para proceder en etapas posteriores a su sellado.

2.2.4. Fuentes de préstamos

La construcción de la presa requerirá la utilización de préstamos para obtener áridos para hormigones y, en caso de presas de materiales sueltos, suelos impermeables y materiales para los espaldones, filtros, drenes y protecciones. Independientemente de lo que se indica específicamente en los Capítulos 4 y 5 de esta Guía, la cartografía geológica regional debe dedicar una atención específica a este aspecto.

En ese sentido, deben fijarse los posibles lugares y tipos de rocas aptos para abrir una cantera y préstamos para materiales granulares. Suele ser de gran utilidad el consultar los Mapas de Rocas Industriales editados por el Instituto Tecnológico Geominero, completando su información con el banco de datos que tiene ese organismo. A resultas de estas investigaciones deberán decidirse los posibles emplazamientos de canteras y yacimientos granulares que deban ser objeto de una investigación más profunda. Del mismo modo deben identificarse posibles yacimientos de materiales impermeables ya sean suelos aluviales, coluviales o de alteración o rocas arcillosas que, debidamente trabajadas, pudieran constituir el elemento impermeable de eventuales presas de tierra.

En el Proyecto Base (o Anteproyecto) deberían contemplarse distintos materiales para soluciones alternativas. Igualmente se deberían definir zonas en las que depositar los materiales procedentes de excavaciones, de forma que su impacto ambiental fuese mínimo.

2.3. Estudio previo de cerradas

Elegido un tramo de río suele procederse a la elección del mejor emplazamiento para la presa, lo que implica el estudio de varias cerradas. Este estudio debe abordar al menos los aspectos siguientes: estratigrafía del emplazamiento; situación de afloramientos; determinación de zonas superficiales de roca alterada y cubiertas por derrubios; estructura geológica; discontinuidades tectónicas que afectan al emplazamiento; zonas movidas; permeabilidad; carsticidad; fuentes.

El estudio de cada cerrada puede orientarse de diferente manera según se trate de la construcción de una presa de fábrica o de una de materiales sueltos e incluso, dentro de esas dos tipologías básicas, la forma de la solución puede influir de manera notable en los detalles del estudio que conviene hacer. En términos generales, si la cerrada es fundamentalmente rocosa y se piensa construir una presa de materiales sueltos el aspecto de la resistencia del cimientado puede tener menos importancia que si se piensa en construir una presa arco.

Se recomienda que el reconocimiento geológico-geotécnico de la cerrada que se realice tenga en cuenta todos los tipos de presa posibles que no hayan sido previamente descartados con argumentos irrefutables. Deben evitarse situaciones, por desgracia frecuentes en el pasado, en las que un cambio de tipología de la solución obliga, en un momento quizás poco adecuado, a plantear reconocimientos que en su día no se hicieron; esto puede conducir a retrasos y sobrecostes importantes. Sólo en aquellas ocasiones en las que, por algún motivo claro, se haya decidido previamente el tipo de presa que se piensa construir, los reconocimientos geológico-geotécnicos podrán ser menos complejos habida cuenta de la definición previa de la obra a construir.

2.3.1. Estructura geológica de la cerrada

Antes de proceder a ningún reconocimiento específico debe elaborarse un esquema de la estructura geológica de la cerrada. Este esquema servirá para detectar los aspectos más importantes que conviene precisar y, en consecuencia, cuales deben ser los reconocimientos específicos necesarios para proceder a su caracterización detallada.

Todo reconocimiento debe apoyarse en un plano geológico previo; son las incertidumbres que en él se detectan las que deben marcar las campañas de investigación, nunca debe procederse a la inversa: levantamiento geológico posterior a las investigaciones. Debe tenerse en cuenta que una profunda investigación no implica un mejor conocimiento de la cerrada, si la investigación se ha emplazado en zonas que no aportan información o lo hacen en cuantía escasa.

La estructura geológica de la cerrada debe investigarse mediante la cartografía geológica de los afloramientos superficiales de las zonas del entorno. Es imposible definir a priori cual puede ser

la superficie a cubrir por la investigación. La importancia de la estructura puede ser solo indicativa ya que la necesidad de información dependerá primordialmente de la complejidad del emplazamiento y ésta, en muchos casos, sólo es conocida en su totalidad al realizar las excavaciones y eso no siempre.

Como complemento pueden realizarse, donde sea de mayor interés, rozas que descubran la roca, zanjas, calicatas o pocillos. Este tipo de reconocimientos está indicado tanto en laderas como en el fondo del valle y debe emplearse para el estudio de la zona afectada por la presa y las obras auxiliares. En la ladera dos o tres zanjas puede ser un número normal. En el fondo del valle o zonas llanas los puntos de investigación se deben distribuir de tal forma que toda la zona afectada por la presa o las obras anejas quede cubierta más o menos uniformemente. Su disposición dependerá del tipo de terreno, estructura y alteración. Así, unos estratos horizontales o con suave buzamiento requieren más zanjas o calicatas que rasguen la ladera de arriba a abajo, por el contrario en una estratificación vertical, transversal al río, lo correcto son labores paralelas a él.

El reconocimiento de cerradas con sondeos mecánicos profundos debe realizarse en una fase posterior. En ciertas ocasiones, sin embargo, puede estar indicado realizar algún sondeo en esta fase previa para identificar algún elemento que pueda resultar clave en la interpretación geológica.

Con ayuda de estos reconocimientos deben identificarse los rasgos principales de la estructura geológica de la cerrada, definiendo en la medida de lo posible los accidentes más importantes (posibles fallas) así como las familias de discontinuidades que fragmentan al macizo rocoso.

En las plantas y perfiles que se preparen para definir la estructura geológica de la cerrada se deben identificar los suelos y las rocas con nomenclaturas y signos que resulten inteligibles para todos los técnicos que han de usarlos.

La definición exacta de la roca permite unificar el lenguaje de todos los que en mayor o menor grado intervienen en el proyecto y construcción. No suele ser raro que se produzca la intervención de diferentes especialistas que emitan sus correspondientes informes con nomenclaturas variadas. Conviene por ello unificar criterios desde el principio y uno de los más importantes es la denominación de las matrices rocosas existentes en el emplazamiento. Existen varios criterios muy similares entre sí. Quiere señalarse el recomendado por la ISRM (1980) [R.2], publicado por la IAEG (1979) [R.3]. Para suelos puede usarse la clasificación USCS que suele ser habitual en los estudios geotécnicos.

Conviene también definir desde el principio las simbología y colores a emplear en los planos, lo que redundará en una mejor claridad y eficacia en la utilización de la información por parte de diversos usuarios, procedentes de distintas disciplinas. Evidentemente puede elegirse una simbología normalizada como la UNE 22-601-74 [R.4], pero para la mayoría de los casos resulta excesivamente minuciosa por lo que puede recomendarse un sistema más sencillo como el indicado en el Anejo I. Cuando se utilizan colores es recomendable la gama del Mapa Geológico Nacional, que es la normalizada y permite ligar un color a un período geológico, tal

como se expone en el Anejo I. Cuando las tramas o los colores pueden restar claridad a los planos se pueden utilizar en su lugar letras. Lo más normal es que sean las iniciales de los términos geológicos.

Es recomendable que, desde el principio, los símbolos y colores adoptados se utilicen en todas las etapas del estudio.

Otro tipo de análisis que puede efectuarse en esta etapa es el paleontológico, sobre los fósiles encontrados en la cerrada lo que permite definir con exactitud el período a que pertenecen los materiales del emplazamiento. Además de esto puede ser muy útil después para la correlación de materiales encontrados en distintos sondeos o afloramientos, y para determinar la afinidad entre los labios de una falla con exactitud lo que permite dibujar perfiles.

2.3.2. Reconocimiento geofísico

La geofísica es una labor de prospección auspiciada por su rapidez, sencillez de ejecución y costo, en comparación con otros medios de investigación. Debe ser propuesta con base en el plano geológico.

La interpretación de los datos geofísicos es más precisa cuando se dispone de apoyo de sondeos mecánicos. Por ello la investigación geofísica del emplazamiento debe planearse de forma que cubra la posterior ubicación de los sondeos mecánicos.

Los métodos geofísicos más habituales son el sísmico, eléctrico, magnético gravimétrico, radiactivo, etc. De ellos los más utilizados en estudios de presas son el sísmico de refracción, el eléctrico resistivo y el de obtención de la radioactividad natural. En el Anejo I se da una información resumida de estos procedimientos.

La prospección sísmica requiere en gran número de casos la utilización de explosivos y por tanto los permisos correspondientes, una preparación del terreno que permita la extensión del aparillaje, función de la profundidad a alcanzar, y un perfil topográfico con la situación de emisores y geófonos.

Los datos que interesa obtener de los reconocimientos geofísicos son los siguientes:

- Espesor de acarreos
- Espesor de coberturas
- Situación del sustrato rocoso
- Espesor aproximado de la roca alterada o muy fracturada
- Situación de algún accidente importante
- Definición de cavernas o huecos
- Definición de zonas movidas
- Potencia de capas
- Determinación de constantes dinámicas del macizo, módulo elástico y coeficiente de Poisson.

Para realizar una prospección eléctrica se requiere contar con acceso y la preparación del terreno para poder extender los cables. La presencia de líneas eléctricas puede crear problemas en la realización. La definición de los perfiles eléctricos debe ser tomado topográficamente situándolos sobre el plano geológico del emplazamiento.

La investigación eléctrica resistiva está especialmente indicada para la definición de niveles freáticos, filtraciones y por extensión de capas porosas, aunque también puede aportar datos sobre zonas de recubrimiento, zonas alteradas, cavidades y definición de capas.

El empleo de eléctrica resistiva en presas suele ser menor que el que se hace de sísmica. Al igual que se ha indicado al hablar de ésta hay que añadir que se trata de una investigación complementaria cuya interpretación sólo será precisa con el apoyo de los sondeos que después se puedan realizar.

2.3.3. Estudio de la permeabilidad de la cerrada

El estudio de las posibles cerradas debe de completarse con una evaluación específica relativa a su permeabilidad antes de proceder a su caracterización detallada. La zona de mayores gradientes hidráulicos y donde pueden producirse mayores fugas (siempre en términos generales) es el entorno de la propia cerrada. Por este motivo, la permeabilidad de la cerrada debe tratarse como un asunto preferente. Para caracterizar la permeabilidad de la cerrada (o las posibles cerradas) será necesario disponer de una cartografía geológica previa y un estudio preliminar de las distintas formaciones rocosas que la conforman así como de los suelos que las pudieran recubrir. Esta primera evaluación ha de hacerse con medios sencillos; antes de proceder a utilizar ensayos costosos, deben agotarse las posibilidades que ofrece el estudio de los rasgos geológicos superficiales. El estudio previo de la permeabilidad de las cerradas tiene como propósito no sólo programar los reconocimientos ulteriores que convenga realizar sino también ir preformando la idea del tipo de tratamiento necesario para conseguir la adecuada impermeabilidad de la cerrada que, en la mayoría de los casos, consistirá en una pantalla de impermeabilización más o menos intensa.

Los factores geológicos que influirán en la definición de la pantalla serán: los tipos de rocas presentes, la estructura geológica, la fracturación y la existencia de discontinuidades singulares o zonas alteradas. Estos aspectos deben ser destacados en el estudio previo de la cerrada.

En materiales competentes la fracturación es un factor de primer orden, siendo la dirección y buzamiento de la familia de fracturas que más puede influir en las filtraciones una de las características más a tener en cuenta a la hora de aportar información para el proyecto de la pantalla. Como quiera que los taladros deberán, siempre que sea posible, colocarse lo más normal a los planos de fracturación, de forma que el número de discontinuidades interesadas sea el máximo y la inyección tenga la mayor eficacia, será conveniente destacar este aspecto en los planos y memorias que se editen para describir la cerrada.

Debe prestarse especial atención a las zonas cársticas en donde las posibilidades de filtración son mayores. Cuanto mejor sea su definición mayor garantía hay de poder asegurar su corrección.

Por esto suele ser necesario acudir a una investigación más cuidadosa y específica.

En presas cimentadas sobre materiales sueltos o en obras auxiliares como ataguías y contraataguías, las inyecciones pueden ser sustituidas o complementadas con una pantalla continua. Para ayudar en la definición de esta pantalla se realizarán las investigaciones oportunas. En primera instancia mediante geofísica, que permita dibujar un corte transversal al río en el que se detalle la situación del sustrato en donde deberá apoyar la pantalla. Después, en una fase más avanzada de la investigación, tras elegir la cerrada más adecuada, mediante los oportunos sondeos de reconocimiento geotécnicos ubicados en los lugares más estratégicos que pudiera haber revelado el reconocimiento geofísico.

La Fig. 2.1 representa sintéticamente los aspectos que deben contemplarse al realizar el estudio geológico regional y el estudio previo de cerradas.

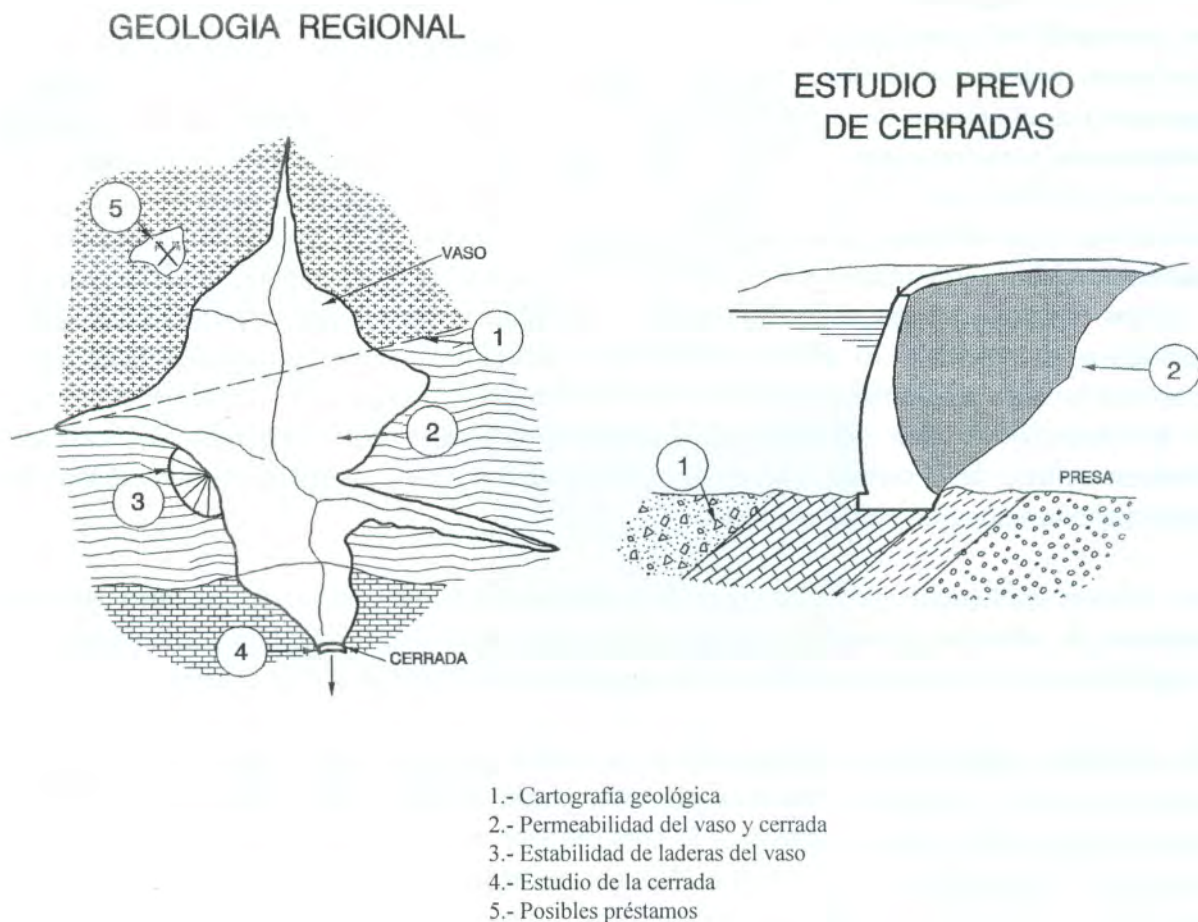


Fig. 2.1

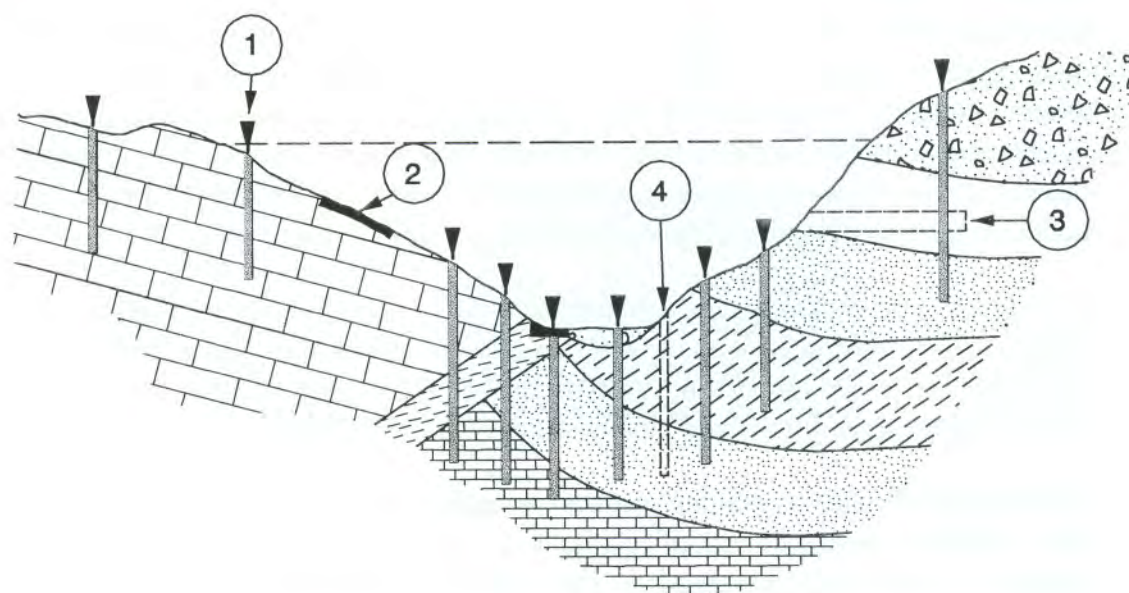
Aspectos a considerar en los estudios geológicos regionales y estudios previos de cerradas

2.4. Caracterización de la cerrada

La caracterización geológico geotécnica de la cerrada consiste en la definición específica (con datos numéricos fiables) de su resistencia, deformabilidad y permeabilidad, así como otros detalles de interés para el proyecto de la presa y de sus obras anejas. Los estudios necesarios para realizar esta caracterización permitirán, además, aportar nuevos detalles y precisiones a los planos geológicos previos que deben existir como resultado de los estudios de la estructura geológica de la cerrada, del reconocimiento geofísico previo así como de los datos ya existentes acerca de los rasgos conocidos relativos a su permeabilidad.

La caracterización de la cerrada requerirá un cierto esfuerzo. Por ese motivo, esta tarea suele realizarse en una sola cerrada previamente elegida tal como se indicó en el apartado anterior. Del mismo modo es altamente recomendable que antes de proceder a la realización de las tareas de caracterización se haya decidido sobre el tipo de presa a construir siempre que tal decisión sea clara y esté apoyada en argumentos sólidos. Esto simplificaría los trabajos y los haría más efectivos. Si esto no fuera posible la caracterización deberá ser más extensa y deberá cubrir las necesidades de proyecto de las tipologías de presa no descartadas previamente.

Una representación esquemática de los posibles trabajos a realizar para la caracterización de una cerrada se muestra en la Fig. 2.2. La descripción de tales trabajos se realiza en los siguientes apartados.



- 1.- Sondeos de reconocimiento (muestras, diagráfias y ensayos in situ)
- 2.- Rozas y calicatas
- 3.- Eventuales galerías de reconocimiento. Ensayos en galerías
- 4.- Eventuales pruebas de inyección

Fig. 2.2

Esquema de la caracterización de una cerrada

2.4.1. Caracterización del macizo rocoso

La caracterización superficial de los afloramientos del macizo rocoso (si los hubiere) no suele ser suficiente para garantizar el conocimiento necesario para el adecuado proyecto de la obra. Sólo en condiciones muy excepcionales sería viable caracterizar un macizo rocoso sin realizar reconocimientos en profundidad. En el otro extremo, en zonas donde existe un gran recubrimiento de suelos (valles aluviales amplios con depósitos de suelos potentes) puede no ser necesario un reconocimiento intenso del fondo rocoso si la tipología de la presa así lo sugiere (presa de materiales sueltos de poca altura, por ejemplo).

El reconocimiento geológico-geotécnico necesario para determinar los parámetros que caracterizan a la cerrada consistirá en una combinación adecuada de las distintas técnicas de reconocimiento disponibles. Las más usuales se comentan brevemente a continuación.

2.4.1.1. Trabajos de campo

a) Galerías de reconocimiento

Las galerías son un medio de investigación de gran interés pues permite conocer en directo la constitución del medio rocoso, pero son de coste elevado por lo cual suelen hacerse únicamente cuando se ha decidido el emplazamiento y la tipología de presa definitivos. Su implantación debe estar guiada por las necesidades del reconocimiento geológico. Además conviene que queden comunicadas con las de la presa de forma que pueda accederse a ellas a través de éstas, ya que en el período de explotación, como se indicará en su momento, pueden ser un magnífico sistema de control y drenaje del terreno. Incluso si de antemano se prevé la necesidad de tener que tratar el macizo con inyecciones, parte de éstas podrán llevarse a cabo desde estas galerías. Igualmente, cuando sea posible, se integrarán en el sistema de drenaje del terreno. Por todo esto para definir su trazado y longitud debe tenerse en cuenta todo lo antes dicho.

Uno de los aspectos que pueden examinarse mejor en las galerías es la alteración del macizo y la profundidad que alcanza, en especial cuando se hacen varias galerías repartidas por la cerrada. En los sondeos el testigo obtenido en estas zonas alteradas puede perderse o ser de tan mala calidad que apenas aporte información.

La ejecución de galerías permite analizar en detalle discontinuidades (planos de debilidad, fracturas, planos de estratificación, etc) que afecten a la presa de forma notoria, pudiendo conocer en profundidad las características anteriormente enumeradas, con la ventaja de observarlas sin las alteraciones que se producen en superficie. En caso de que se haya detectado en varias galerías puede estudiarse su desarrollo y su comportamiento.

Por supuesto los análisis estadísticos de la fracturación se ven muy enriquecidos por los datos obtenidos en galerías, más claros y de mejor calidad que en el exterior. Hay que señalar que alguna de las familias, cuya dirección coincida con el eje de la galería, puede quedar minimizada por lo escaso de su presencia.

No puede determinarse a priori el número de galerías a excavar en un emplazamiento ya que al igual que en otro tipo de investigaciones será la importancia de la estructura y la complejidad del emplazamiento las que marquen el número de ellas. Así, una presa de gravedad de escasa altura ubicada en un macizo granítico en general no necesitará la realización de galerías, por el contrario una bóveda en un macizo sedimentario de litología variada, estructura compleja y densa fracturación puede requerir varias galerías por estribo.

Al realizar los trabajos de construcción algunas de las galerías deberán ser cegadas a fin de que no se conviertan en vías de filtraciones.

No siempre las galerías son indicadas. En emplazamiento de rocas blandas pueden ser contraproducentes al constituir un hueco que debilite la resistencia del cimientado. En cerradas en suelos no suele ser habitual el emplear este tipo de investigación.

b) Sondeos

El tipo de investigación más habitual en el estudio de una cerrada son los sondeos. Ellos nos permiten acceder a zonas profundas del terreno y recuperar testigos o muestras representativas.

La definición de una campaña de sondeos viene determinada por la geología del emplazamiento, en otras palabras: debe apoyarse en un plano geológico. Serán los interrogantes que éste plantea los que marcarán el número, disposición, profundidad e inclinación de los sondeos y los ensayos y muestras que deberán hacerse y tomarse en ellos. Generalmente se sitúan en filas transversales y longitudinales al río. En valles constituidos a favor de fallas o fracturas deben hacerse perforaciones que permitan conocer la situación, profundidad, relleno, ya sea de materiales aluviales o de otro tipo, y su prolongación en profundidad.

En algún caso la necesidad de abordar algún aspecto especial como la definición de un estrato o una falla, puede hacer que la ubicación de los sondeos no se atengan a la norma general de perfiles.

En presas de tierra cuando no se retiran los materiales cuaternarios, apoyando la estructura sobre ellos, es necesario estudiarlos con todo detalle a fin de conocer su naturaleza y disposición, tal como se indica más adelante, en el apartado 2.4.2.

La función principal del sondeo es tomar una muestra continua (testigo), que permite conocer las características del terreno. El análisis de ese testigo es por tanto fundamental, debiendo obtener de él la mayor información posible.

A fin de obtener la información más detallada y completa que se pueda, el sondeo debe realizarse en las condiciones adecuadas a los fines propuestos y al terreno en el que debe

trabajarse. Conviene por ello preparar unas especificaciones técnicas sobre requerimientos de los sondeos a hacer, indicando desde la profundidad e inclinación hasta el tipo de corona a emplear o el tratamiento que debe darse al testigo. Debe tenerse en cuenta que un testigo de mala calidad no solo no aporta información sino que puede inducir a error. En el Anejo I se señalan algunos de los requerimientos de la perforación.

En esta Guía no se considera conveniente señalar, excepto de forma general, la profundidad de los sondeos, así como su número, inclinación y disposición. Cada cerrada a estudiar es un caso único que precisa una investigación específica que será función de la naturaleza y estructura de los materiales y de la importancia de la presa a proyectar. En bastantes casos, los sondeos se disponen de manera que después, al correlacionar sus resultados, se puedan preparar perfiles geológicos representativos. En una cerrada de gran claridad geológica o para una estructura pequeña podría ser suficiente un único perfil transversal al río con un número orientativo de seis sondeos, dos por cada ladera y fondo de valle. En estructuras importantes o en cerradas con estructuras geológica compleja puede ser necesario investigar varios perfiles geológicos, particularmente a lo largo del pie de aguas abajo en las presas de fábrica. En otras ocasiones son las condiciones concretas del emplazamiento las que marcan la disposición.

La profundidad máxima a alcanzar también es difícil de determinar. A este respecto debe tenerse en cuenta que en valles con laderas abruptas es frecuente la caída de bloques de grandes dimensiones que quedan embebidos entre los acarreos finos. La perforación puede suponer, al alcanzarles, que se trata del sustrato rocoso. En rocas estratificadas esta situación puede detectarse por una disposición de las capas discordante con la general de la zona.

Desde que se comienza el estudio de una obra hasta que se ve concluida puede transcurrir mucho tiempo, por lo que es necesario que todos los testigos obtenidos sean debidamente fotografiados, almacenados y conservados, incluso hasta después de construida la estructura, ya que puede ser necesario volverlos a examinar durante la vida de la obra. No debe olvidarse que se trata de una información cara y difícil de obtener.

Al finalizar la investigación con sondeos los resultados obtenidos debidamente analizados, pueden indicar la necesidad de una nueva campaña en puntos o zonas concretas que presentan dudas en su interpretación. El proceso de caracterización de una cerrada no debe darse por concluido antes de terminar el proyecto que motivó los reconocimientos.

c) **Diagrafías**

Un testigo escaso o muy fragmentado, a causa de una mala ejecución o de la naturaleza del terreno, impide obtener conclusiones de los datos obtenidos, por ello, puede ser un complemento valioso, incluso con testigo de calidad, realizar diagrafías y conocer ciertos datos numéricos de los parámetros de perforación: velocidad del avance, presión,

etc. (Ver Anejo I). No siempre está indicado hacerlas. Serán las condiciones del trabajo las que impongan su empleo. Por lo general puede decirse que la investigación de macizos constituidos por rocas competentes o estructuras homogéneas requieren menos empleo de diagrafas.

d) Ensayos geosísmicos en sondeos

Es recomendable el empleo de métodos especiales de investigación como el cross-hole, el up-hole o el down-hole. En el Anejo I se habla acerca de estos métodos. En el primero se crea una onda elástica a cierta profundidad en la pared de un sondeo que se recoge a una profundidad similar en otros situados a corta distancia, lo que permite definir capas con diferentes módulos dinámicos. El ensayo down-hole consiste en medir a lo largo de un sondeo la velocidad de onda elástica creada en superficie en un punto cercano a la boca. En el up-hole las señales se emitirían en el fondo del sondeo y se recibirían a distintas profundidades.

e) Ensayos de permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad más habituales en el estudio de presas se realizan en sondeos y son el Lefranc y el Lugeon. El primero está indicado para suelos y rocas blandas bastante permeables mientras el segundo se efectúa en medios rocosos más competentes. En ambos se aísla la zona del sondeo que se ensaya y se introduce agua en ella.

No se pueden determinar a priori un número de taladros y ensayos que conviene realizar ya que son función del tipo de terreno existente en el emplazamiento. En un taladro pueden hacerse varios ensayos dependiendo de los niveles permeables que se quieran analizar.

Es recomendable representar los resultados de permeabilidad en los perfiles geológicos, en especial los que coincidan con el eje de la presa, superpuestos a los datos geológicos, lo que permite estudiar la posible correlación filtraciones-tipo de terreno.

Existen criterios diversos para recomendar el tratamiento del medio rocoso, algunos de los cuales se exponen en la Tabla 2.4. Cuando las permeabilidades, medidas mediante ensayo Lugeon o similares sean inferiores a los valores indicados en esa tabla, el tratamiento con inyecciones convencionales reducirá poco la permeabilidad; esa permeabilidad natural sería, en muchos casos, aceptable.

Durante los ensayos, en especial en los taladros en estribos, conviene vigilar las laderas para ver si se producen surgencias de agua, ya sea a favor de fracturas o de capas de mayor permeabilidad. Igualmente si existe algún manantial este debe examinarse de forma especial.

TABLA 2.4
Criterios de impermeabilización basados en ensayos de presión de agua,
dados por varios autores

AUTOR	Caudal obtenido por el ensayo de permeabilidad		Conversión a un criterio común de presión	
	Caudal Ensayos de Permeabilidad (l/min.m)	Presión (bar)	Caudal Ensayos de Permeabilidad (l/min.m)	Presión (bar)
1. Lugeon (1932)				
a) $H \geq 30$ m	1	10	0.3	3
b) $H < 30$ m	3	10	0.9	3
2. Jähde (1953)				
a) Taladros de inyección	0.1	3	0.1	3
b) Taladros de control	0.5-1.0	3	0.5-1.0	3
3. Terzaghi (1929)	0.5	0.1	1.5	3
4. Keil	0.2	3	0.2	3
5. Blatter	0.33	10	0.1	3
6. USA	3-4	10	0.9-1.2	3
7. USSR				
a) $H \geq 30$ m	0.05	0.1	1.5	3
b) $H < 30$ m	0.03	0.1	0.3	3
H = altura de presa				

Tomada de Ewert (1985) [R.5]

f) Toma de muestras

La realización de ensayos de laboratorio para caracterizar la cerrada implica la toma de muestras que puede hacerse en afloramientos, zanjas, calicatas y sondeos.

Las muestras deben cumplir al menos los siguientes requisitos:

Ser representativas: Los ensayos que con ellas se hagan deben permitir caracterizar los distintos materiales que constituyen el medio rocoso y su estado.

Estar adecuadamente tomadas: Deben obtenerse en función del ensayo al que se destinan, es decir, en las condiciones y cantidades requeridas. En ocasiones convendrá tomarlas inalteradas que conserven estructura, densidad y humedad natural.

Estar convenientemente referenciadas: Se debe hacer una descripción visual de ellas, definir el punto en que ha sido tomada, incluso con coordenadas topográficas, y su ubicación geológica según los conocimientos que se tengan de la zona en el momento de la toma. En el Anejo II se dan algunos datos sobre la toma muestras.

La situación de las muestras tomadas debe quedar situada en el plano geológico y perfiles o en los gráficos de los sondeos cuando han sido obtenidos por ese procedimiento.

g) Ensayos de inyectabilidad de mezclas

Aprovechando los sondeos de investigación pueden hacerse ensayos de inyectabilidad de mezclas para la ejecución de la pantalla de impermeabilización. Esta práctica sería recomendable en reconocimientos que, por algún motivo, hayan de ser minuciosos (Clase I). Los ensayos pueden realizarse en los mismos tramos en que se han hecho las pruebas de permeabilidad o solo en aquellos en que las filtraciones son mayores. Serán por tanto los resultados de los estudios de permeabilidad los que marquen las zonas a ensayar.

No se puede dar a priori criterios sobre las mezclas a ensayar en cada tramo ya que serán función de las permeabilidades encontradas. Como norma general, en rocas competentes y con permeabilidades moderadas (< 10 UL), se puede comenzar por una lechada 2/1, agua-cemento en peso, que se inyectará a una presión mayor que la altura de agua que deba soportar el tramo del ensayo con la presa llena siempre que esta presión no provoque la fracturación hidráulica del macizo rocoso. Se puede marcar como límite de inyectabilidad el mantenimiento de la presión durante un cierto tiempo ó una cantidad de lechada, por ejemplo 2.000 litros en un tramo de 5 m. Si se alcanza esta cantidad sin conseguir "cerrar" puede cambiarse la densidad de la mezcla a 1/1 y posteriormente, si tampoco se cierra, a 0,5/1 o mezclas con arena o productos especiales.

Estos ensayos pueden dar idea sobre las mezclas a utilizar después en la ejecución de la pantalla y el tratamiento de consolidación.

Cuando se aprecien consumos grandes deben vigilarse los taladros vecinos a aquel en que se efectúa el ensayo para ver las posibles conexiones que pueden existir.

Los ensayos de inyectabilidad deben comprobarse con otros sondeos de control en los que se tomen testigos y se hagan pruebas de permeabilidad, alguna diagráfia u otras pruebas.

h) Otros ensayos en los sondeos

Existen una serie de técnicas de ensayo en sondeos (dilatómetros y presiómetros, entre ellos) que pueden ser de interés. En el Anejo I se describen los de uso más frecuente.

2.4.1.2. Ensayos de laboratorio

Los análisis y ensayos de laboratorio que conviene realizar son función de las incógnitas que plantea el levantamiento geológico, los materiales presentes y la estructura a ubicar. En la práctica habitual y atendiendo a las distintas técnicas de ensayo, los materiales a ensayar han de

clasificarse como suelos o como rocas. En el Anejo II se hace una descripción de los distintos ensayos que se pueden realizar en cada uno de estos dos grupos de materiales.

Al igual que ya se ha dicho de otro tipo de investigaciones los análisis de laboratorio deben estar integrados en el conjunto de exploraciones que se hacen en la cerrada y su conveniencia es función de los datos necesarios requeridos para el proyecto. Por tanto a priori no puede definirse ni su situación ni su número. Serán las condiciones geológico-geotécnicas de cada emplazamiento las que marquen esas características.

Los ensayos de laboratorio permiten analizar las características de la matriz o matrices rocosas que forman el macizo rocoso o de los suelos que lo recubre, pero no definen el comportamiento global del conjunto. La integración e interpretación de los resultados de los ensayos es una tarea esencial del reconocimiento que debe plasmarse en el correspondiente informe.

2.4.1.3. Planta y perfiles geológico-geotécnicos

Con los datos de los sondeos y con los resultados de los ensayos de laboratorio deben completarse la descripción geológico-geotécnica de la cerrada. Debe hacerse un plano geológico detallado que incluya la planta de la zona a ocupar por las obras y cuantos perfiles sean necesarios para que se comprenda la estructura del macizo rocoso que la conforma. Este plano debe tener una base topográfica a escala 1:1000, 1:500 o incluso 1:200, en función de la complejidad geológica que presente. Debe realizarse con apoyo topográfico tomando contactos, fallas, afloramientos, límites de zonas cubiertas o alteradas etc. En él deben situarse también todas las investigaciones de campo realizadas en la etapa anterior: sondeos, zanjas, pocillos, geofísica, toma de muestras, ensayos de permeabilidad, etc, así como los resultados más significativos de los ensayos de laboratorio. La Fig. 2.3 representa un plano geológico de planta de una cerrada.

En rocas sedimentarias y metamórficas deben reflejarse en el plano los rasgos estructurales: estratificación, pliegues, cabalgamientos, etc. Su influencia en el proyecto de la presa es decisivo. Las unidades litológicas presentes en la cerrada deben ser bien diferenciadas para posteriormente ser restituidas topográficamente y dibujarlas en el plano. Independiente de la restitución de los contactos debe hacerse una/s columna/s estratigráfica/s que cubran ampliamente todos los niveles de la cerrada. Ligados a esos niveles se deben situar los puntos en que se han tomado las muestras para los distintos ensayos realizados.

La definición topográfica de los contactos entre capas permite la determinación, de la dirección y buzamiento, aspecto primordial para definir la ubicación de la presa. Además deben hacerse con brújula numerosas medidas de dirección y buzamiento de los distintos niveles que después se representarán en proyección estereográfica.

En rocas carbonáticas o evaporíticas, susceptibles de presentar fenómenos cársticos, habrá que señalar los que sean visibles e incluso, de aquellos que sean accesibles, habrá que realizar la planimetría adecuada que muestre su desarrollo y morfología.

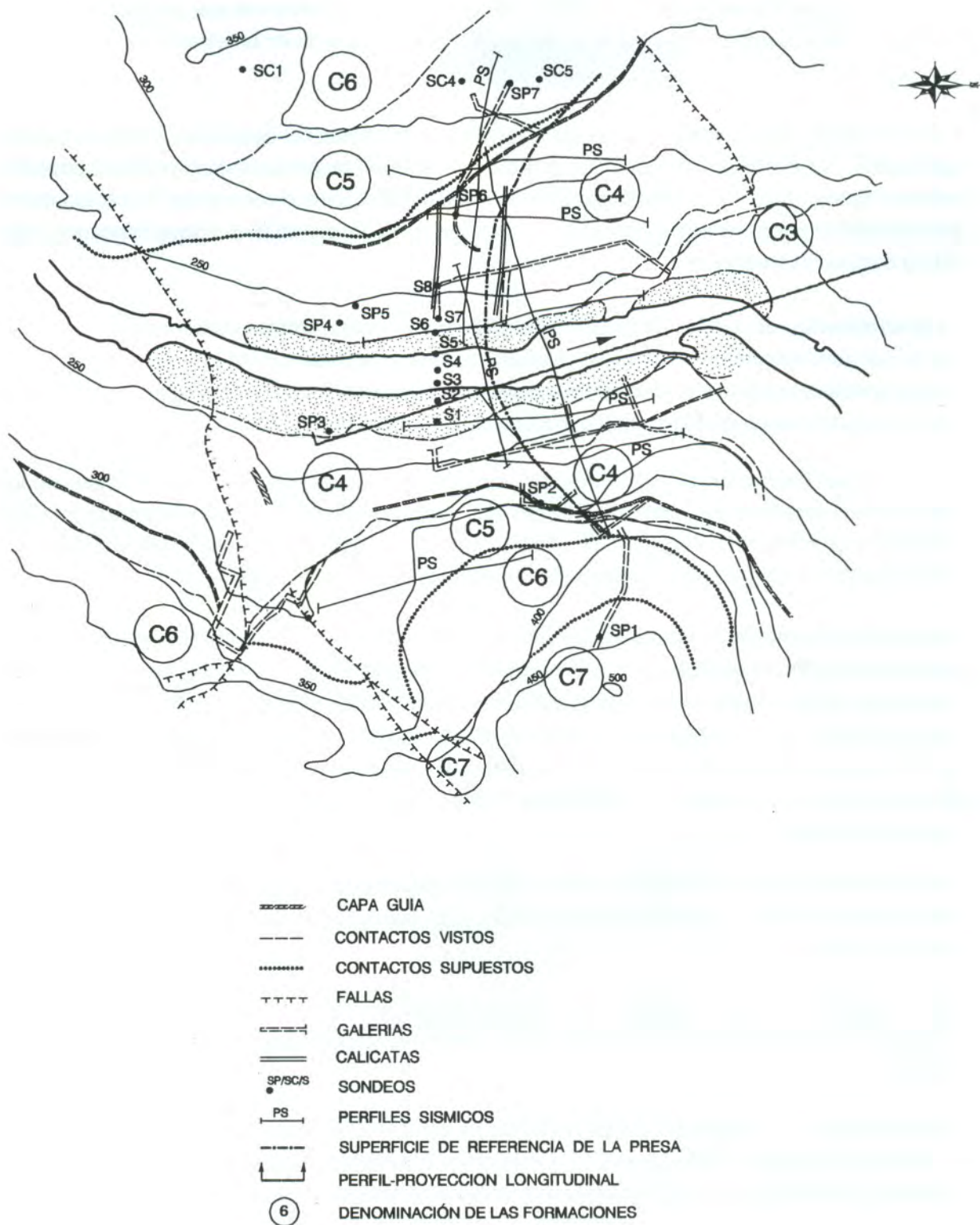


Fig. 2.3

Plano geológico de planta de una cerrada

En rocas metamórficas es esencial definir con exactitud las foliaciones que pueden existir. En bastantes casos su influencia sobre la presa puede ser mayor que la de la estratificación o incluso que la fracturación.

Los cabeceos de ladera, típicos de las rocas de grano fino, deben ser detectados y posteriormente analizados. Debe tenerse en cuenta que la presencia de estos fenómenos suele producir estrechamientos de los valles y por tanto lugares idóneos para la ubicación de una presa. El escaso movimiento sufrido por la masa rocosa movida y la vegetación, en especial en climas húmedos, hace difícil detectar el fenómeno.

La determinación de niveles de escasa entidad de rocas incompetentes como margas o arcillas, puede ser fundamental si a su favor pueden producirse deslizamientos. En muchos casos su escasa potencia puede hacer que pasen desapercibidos y solo sean visibles o bien cuando han sido el vehículo de un deslizamiento o al excavar la cimentación.

En rocas ígneas la menor variación litológica facilita el levantamiento. Aunque por lo general los tipos pétreos presentes no serán muchos hay que situar los enclaves de rocas distintas a la que constituye el macizo, los diques de cierta entidad, las zonas cubiertas y las alteradas. La definición de los distintos tipos pétreos debe hacerse con análisis petrográficos.

Aspecto importante para la implantación de una presa en un medio rocoso es la fracturación de que está afectado. Su análisis debe hacerse a dos niveles distintos: discontinuidades importantes (litoclasas, fallas, cabalgamientos) con entidad suficiente para ser representadas a la escala del plano geológico y discontinuidades menores que sirven para analizar la tendencia o tendencias de la fracturación del medio rocoso, y por ende los esfuerzos a que se ha visto sometido. Las primeras deben ser tomadas topográficamente para poder situarlas en la cartografía geológica con toda exactitud.

Las discontinuidades de carácter tectónico y las de descompresión, raramente aparecen aisladas sino formando grupos y familias con una orientación similar que muchas veces va variando de forma paulatina.

Las características que definen una discontinuidad tectónica o de descompresión son: orientación, espaciamiento, continuidad, forma, apertura, relleno y rugosidad y se exponen en el Anejo III.

Las presas tipo arco, particularmente, requieren un estudio más detallado de la exacta definición de las discontinuidades individuales lo que permite la compartimentación del medio rocoso en bloques y el estudio de su comportamiento ante los esfuerzos a que será sometido.

Además, en la cartografía geológica, deben señalarse los contactos de las zonas de coluvial y aluvial, así como las de roca alterada. Este último aspecto puede tener una repercusión importante especialmente en medios rocosos constituidos por rocas ígneas o por algunas metamórficas (gneis). Una profunda alteración puede obligar a excavaciones muy importantes. Conviene investigar a fondo la alteración del macizo que suele estar ligada a la presencia de

fracturas, ya que a través de ellas se produce la alteración de la matriz rocosa. La ISRM ha dado una clasificación del medio rocoso en función de su alteración que se expone en la Tabla 2.5 [R6]. La caracterización del medio rocoso en zonas con distinto grado de alteración puede ser de gran utilidad a la hora de proyectar. Por ello debe exigirse que en la cartografía geológica figuren con el grado adjudicado.

Debe aspirarse a que la cartografía geológica sea un instrumento de trabajo para el proyectista. Por este motivo deben incorporarse a él tanta información del terreno como sea posible. Así se incluirán los gráficos de densidades de fracturación indicando la zona a la que representan, los datos obtenidos en los diversos ensayos amén de los aspectos geológicos ya comentados.

Como complemento del plano geológico deben realizarse perfiles geológicos que muestren la estructura y naturaleza del terreno en profundidad. Dos al menos son imprescindibles: uno según el eje de la presa y otro coincidente con el río. También son convenientes otros, a lo largo del pie de aguas abajo y según distintos elementos de la presa como aliviaderos, túnel de desvío, etc. En ellos se ubicarán los sondeos y los resultados de las demás investigaciones, incluso de los ensayos de laboratorio.

TABLA 2.5
Grados de alteración del medio rocoso

GRADO	DESCRIPCIÓN	DENOMINACIÓN
I	No se aprecian señales de roca alterada: quizás leve teñido en las superficies de las principales discontinuidades	Fresco
II	La tensión, indica alteración de la roca y de las superficies de las discontinuidades. Todo el material rocoso puede estar teñido por alteración y puede ser superficialmente más débil que estando sano	Levemente alterado
III	Menos de la mitad de la matriz rocosa está descompuesta y/o disgregada como un suelo. También se aprecia roca fresca o teñida o ambas, formando un esqueleto discontinuo o núcleos	Medianamente alterado
IV	Más de la mitad de la matriz rocosa está descompuesta y/o disgregada como un suelo. También se aprecia roca fresca o teñida o ambas, formando un esqueleto discontinuo o núcleos	Altamente alterado
V	Toda la matriz rocosa está descompuesta y/o disgregada. La estructura original de la masa rocosa está aún bastante intacta	Completamente alterado
VI	Toda la matriz rocosa está convertida en suelo. La estructura del medio y la textura de la matriz están destruidas. Hay un cambio grande de volumen pero el suelo apenas se ha movido.	Suelo residual

Tomado de Brown, (1981) p.31

Es posible que en casos complicados haya que realizar otros cortes que aclaren determinadas zonas del emplazamiento. Tanto estos cortes como los considerados imprescindibles deben señalarse en el plano geológico. Sus escalas horizontales y verticales conviene sean iguales ya que de otra manera la representación de los buzamientos quedaría alterada.

Es de sumo interés que en la cartografía geológica incluya a ser posible, en función de las investigaciones hechas, una interpretación de la roca subyacente bajo los acarreo y coluviones. Esta interpretación debe figurar también en los cortes que afecten a la zona del cauce.

Una representación de un perfil geológico se muestra en la Fig. 2.4.

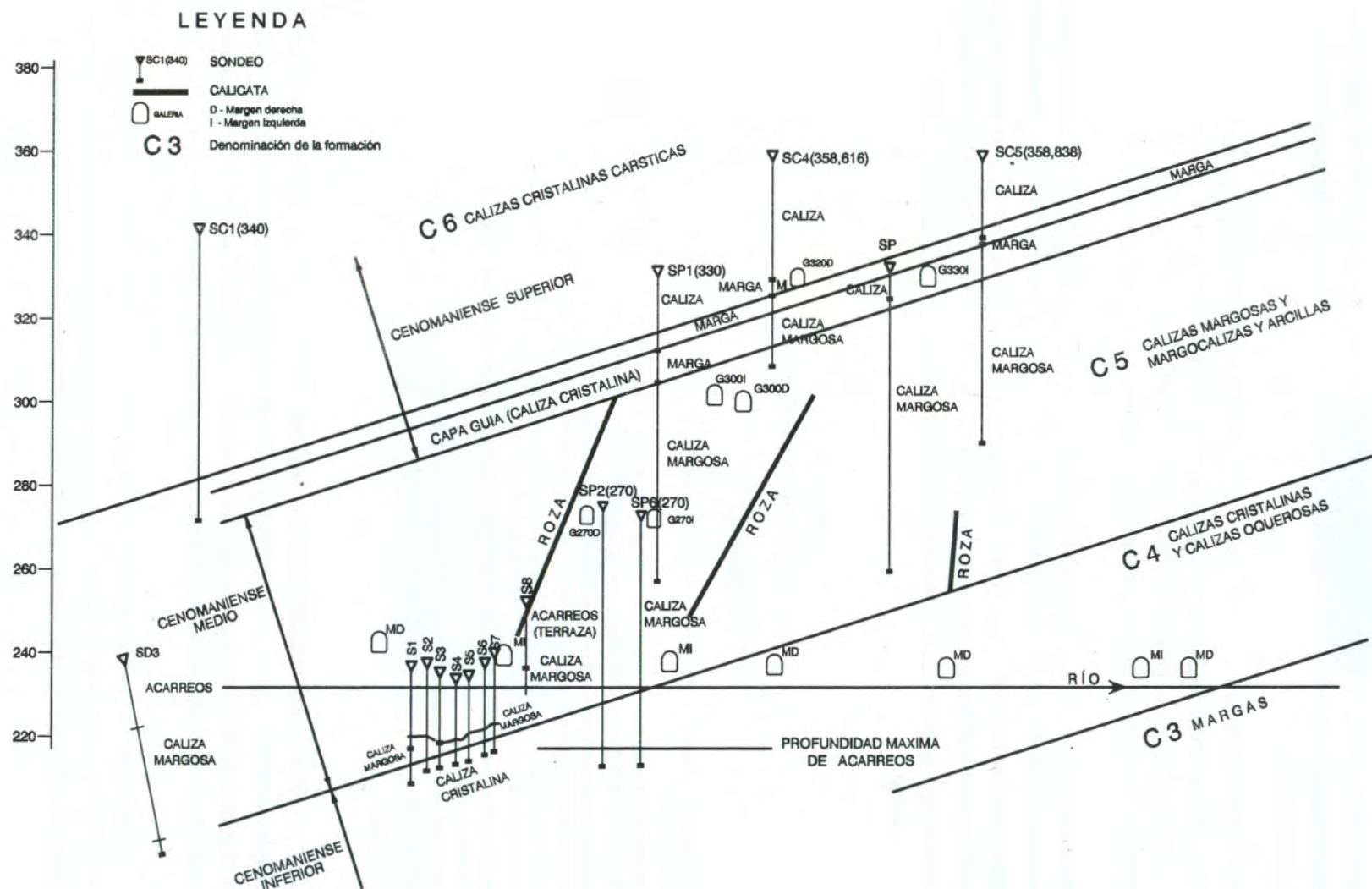


Fig. 2.4
Perfil geológico. Proyección, según la dirección de las capas,
correspondiente al plano de la figura 2.3.

2.4.2. Caracterización de los suelos

La construcción de presas de fábrica normalmente implica la eliminación de todos los suelos que puedan existir en la zona de apoyo de la presa y probablemente también en las ubicaciones de las obras anejas.

En el caso de presas de materiales sueltos, su flexibilidad hace posible construirlas sobre suelos. Es más, en algunas ocasiones, esta es la única solución razonable. Siempre que los suelos hayan de permanecer en el entorno de la cerrada y puedan afectar de uno u otro modo a la obra, será necesario proceder a su caracterización geotécnica.

El objeto de esa caracterización es permitir la evaluación posterior frente a posibles situaciones en obra, entre ellas las siguientes:

- Estabilidad global del cuerpo de presa. La rotura de las presas de tierra a lo largo de superficies de deslizamiento que afectan al propio cimiento puede ocurrir (ha ocurrido en varias ocasiones) cuando la resistencia de los suelos (o zonas de alteración de la roca) es escasa. El estudio de la resistencia del cimiento, en este sentido es esencial. En particular es de especial interés identificar posibles mecanismos de rotura progresiva (tensiones cíclicas debidas al llenado y vaciado) de aquellos materiales que puedan ser susceptibles de este tipo de comportamiento (en general arcillas de gran actividad y muy sobreconsolidadas).
- Asientos que pueden inducir en el cuerpo de presa. A estos efectos conviene examinar su deformabilidad. Normalmente, en caso de arcillas blandas, este aspecto se investigará mediante ensayos edométricos realizados con muestras inalteradas tomadas en sondeos.
- Permeabilidad de los suelos que puedan quedar bajo la presa. Esta investigación se hará mediante ensayos en sondeos aunque este aspecto puede completarse con ensayos de laboratorio. En casos de especial importancia pueden ser necesarios ensayos de bombeo y/o pruebas de inyección de mezclas de cemento o de otros productos (inyecciones químicas) que puedan considerarse adecuados para corregir la permeabilidad, si esto fuera necesario.
- Estabilidad de las excavaciones. Las excavaciones que hayan de realizarse para construir la obra estarán condicionadas por la resistencia al corte de los materiales más débiles de las zonas que quedan tras los desmontes. La decisión de los taludes en desmonte a realizar ha de basarse en datos concretos de estos parámetros que habrán de obtenerse mediante ensayos in situ o laboratorio.

En los Anejos I y II se relacionan los distintos tipos de ensayos que se pueden realizar, en campo y en laboratorio, respectivamente, para caracterizar a los suelos del entorno y obtener los parámetros de cálculo necesarios para analizar los problemas antes enunciados u otros específicos de la cerrada en cuestión que se puedan identificar con antelación.

2.5. Estudio de problemas específicos

La caracterización de la cerrada debe contener información suficiente para concretar ciertos aspectos del proyecto de la obra en cuestión. El proyecto de la presa y sus estructuras anejas debe desarrollarse en paralelo e identificar las carencias de los reconocimientos geológico-geotécnicos. Es esencial que el proyecto de las estructuras a construir, entre ellos y como pieza clave la propia presa, identifique los posibles modos de fallo que conviene prevenir y, de esa manera, permita planificar los reconocimientos complementarios más convenientes. La Fig. 2.5 muestra un esquema con posibles modos de rotura del cimientado de una presa de gravedad.

Esta forma de proceder es probablemente la única sensata para realizar un reconocimiento geológico geotécnico efectivo y preciso. La idea sencilla de proceder "en serie", realizando las tareas de proyecto en función de un reconocimiento del terreno completado por otros, sólo es válida en situaciones muy simples, que no suelen ser habituales.

De entre los problemas específicos que pueden plantearse, quieren considerarse algunos que pueden ocurrir con mayor frecuencia, dando algunas recomendaciones acerca de la forma en la que los reconocimientos pueden aportar información para estudiarlos debidamente.

2.5.1. Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso

En las presas de fábrica, especialmente en las tipologías de bóveda y arco, la roca del cimientado puede ser solicitada con tensiones elevadas. Los reconocimientos geológico-geotécnicos deben suministrar información suficiente relativa a la deformabilidad y resistencia del macizo rocoso para evaluar el estado tensional correspondiente y valorar la seguridad del cimientado y de la propia estructura.

La deformabilidad y la resistencia de los macizos rocosos está fuertemente condicionada por las características de las fracturas que lo atraviesan y no tanto por las correspondientes a la propia roca.

Cuando el efecto de la deformabilidad es importante o cuando la resistencia del macizo rocoso es crítica, resultará necesario hacer estudios específicos de estas características.

Dada la complejidad que tiene este tema, diferentes autores han propuesto distintos modelos teóricos para valorarla. Probablemente es el modelo de Barton [R.7] el más utilizado, si bien conviene consultar la literatura técnica especializada. Suele ser conveniente hacer ensayos de laboratorio.

El estudio de la seguridad frente al deslizamiento requiere conocer la resistencia de los distintos elementos del macizo rocoso (matriz rocosa, diaclasas, juntas de estratificación, fallas, etc) ante varios tipos de sollicitación. Las correlaciones simples entre las clasificaciones geomecánicas (RMR, Q, etc) y la resistencia del macizo rocoso no están bien establecidas para cimentaciones de presas.

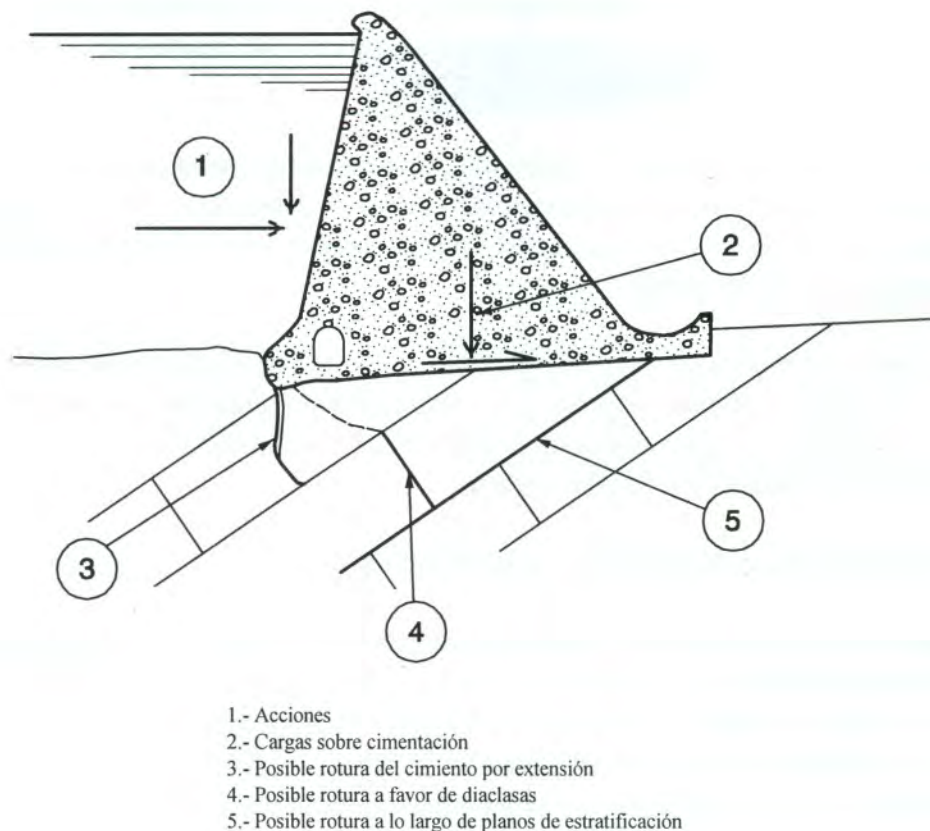


Fig. 2.5
Esquema de rotura del cimiento de una presa de gravedad

a) Resistencia de las juntas del macizo rocoso

No todas las juntas influyen de igual manera en el problema de estabilidad de la presa o de sus obras anejas. Dependiendo de su ubicación y orientación, existirán juntas "críticas", aquellas cuya resistencia controla la estabilidad de la obra y existirán otras que juegan un papel secundario. Es una tarea conveniente identificar aquellas juntas críticas cuya resistencia conviene conocer. De otro modo el esfuerzo de investigación no sería efectivo.

En la tecnología actual, la caracterización de cada sistema de juntas de un macizo rocoso conviene hacerla de manera unificada, de acuerdo a las recomendaciones dadas por la ISRM [R.6] y que se sintetizan en el Anejo III.

La resistencia de la roca encajante puede hacerse en laboratorio, ensayando a compresión simple probetas de roca tomadas en el entorno de las juntas.

Como quiera que en los propios planos de separación de la roca, ésta puede ser algo más débil, conviene analizar la resistencia local de manera indirecta, en el propio plano, con un martillo

esclerométrico. Un tarado previo para el tipo de roca en cuestión permitirá estimar la resistencia de la roca en los labios de la junta en función de los resultados de ensayos de compresión simple en probetas talladas en la roca del entorno próximo.

El ángulo de rozamiento básico y el ángulo de rozamiento residual pueden determinarse mediante ensayos de laboratorio adecuados. El ensayo de laboratorio de más interés es el de corte directo a lo largo de diaclasas. Estos ensayos exigen una definición específica de los mismos pues no están normalizados.

Cuando la junta está rellena de material más flojo conviene hacer ensayos de resistencia de ese material. Los ensayos pueden hacerse con muestras representativas remoldeadas (ensayos triaxiales por ejemplo) o mejor, ensayando testigos de la junta inalterada en la caja de corte o en otros dispositivos especiales que puedan idearse.

b) Ensayos in situ de resistencia y deformabilidad

En cualquier caso, si la resistencia de una determinada junta (o familia de juntas) resulta crítica, entonces debe procederse a la realización de ensayos in situ sobre las juntas en cuestión. Antes de iniciar las obras, el mejor procedimiento para hacer el ensayo in situ de la resistencia de las juntas es la ejecución de galerías con cámaras de ensayo especialmente proyectadas para el trabajo específico en cuestión. Estas excavaciones permitirán además, obtener más información de interés.

Los ensayos in situ deben ser representativos de las distintas zonas de la cimentación. Están generalmente encaminados a proporcionar datos sobre las características geomecánicas, tales como la resistencia y deformabilidad del medio rocoso y de discontinuidades limpias o con relleno, que pueden ser utilizadas para verificar la seguridad de la presa y de las estructuras anejas.

La clase de ensayos a realizar y la cantidad de cada uno de ellos serán función tanto del tipo e importancia de la presa como de la complejidad que muestre el medio rocoso.

Pueden agruparse en:

- Ensayos de resistencia al corte
 - Corte del medio rocoso
 - Corte a lo largo de la superficie de una discontinuidad
 - Corte en el contacto roca - hormigón
- Ensayos de deformabilidad
 - Ensayos de carga con placa
 - Ensayos en cámara de presión
 - Otros ensayos

Los ensayos deben definirse con todo detalle indicando el lugar en que deben realizarse, la zona o tamaño y tipo concreto del ensayo, las direcciones de carga, la velocidad de aplicación, etc. Es necesario preparar unas especificaciones técnicas en las que se indique el proceder en la realización del ensayo así como los aspectos señalados en el párrafo anterior, ya que los ensayos in situ suelen ser específicos para cada obra.

En rocas susceptibles de presentar anisotropía, como por ejemplo rocas sedimentarias tableadas o rocas metamórficas con acusada foliación, los resultados de los ensayos dependen mucho de la orientación lo cual debe tenerse en cuenta a la hora de analizarlos.

Los ensayos in situ suelen ser costosos por lo cual deben utilizarse cuando la información que aporten sea esencial para la evaluación del comportamiento de la obra. En cerradas donde se puede proyectar una presa de materiales sueltos no suele ser necesario estudiar con excesivo detalle la resistencia y deformabilidad del medio rocoso, por lo que este tipo de ensayos suele hacerse sólo en algunos casos. Caso contrario son las presas arco-gravedad o bóveda en las cuales la resistencia y deformabilidad del cimientto pueden ser determinantes, especialmente en estribos, por lo que los ensayos in situ pueden ser fundamentales. La interpretación de los resultados debe ser siempre cautelosa, contemplando el posible efecto de escala y la representatividad de la zona ensayada respecto al conjunto de la cerrada.

En el Anejo I se exponen sucintamente estos ensayos así como los resultados que se obtienen.

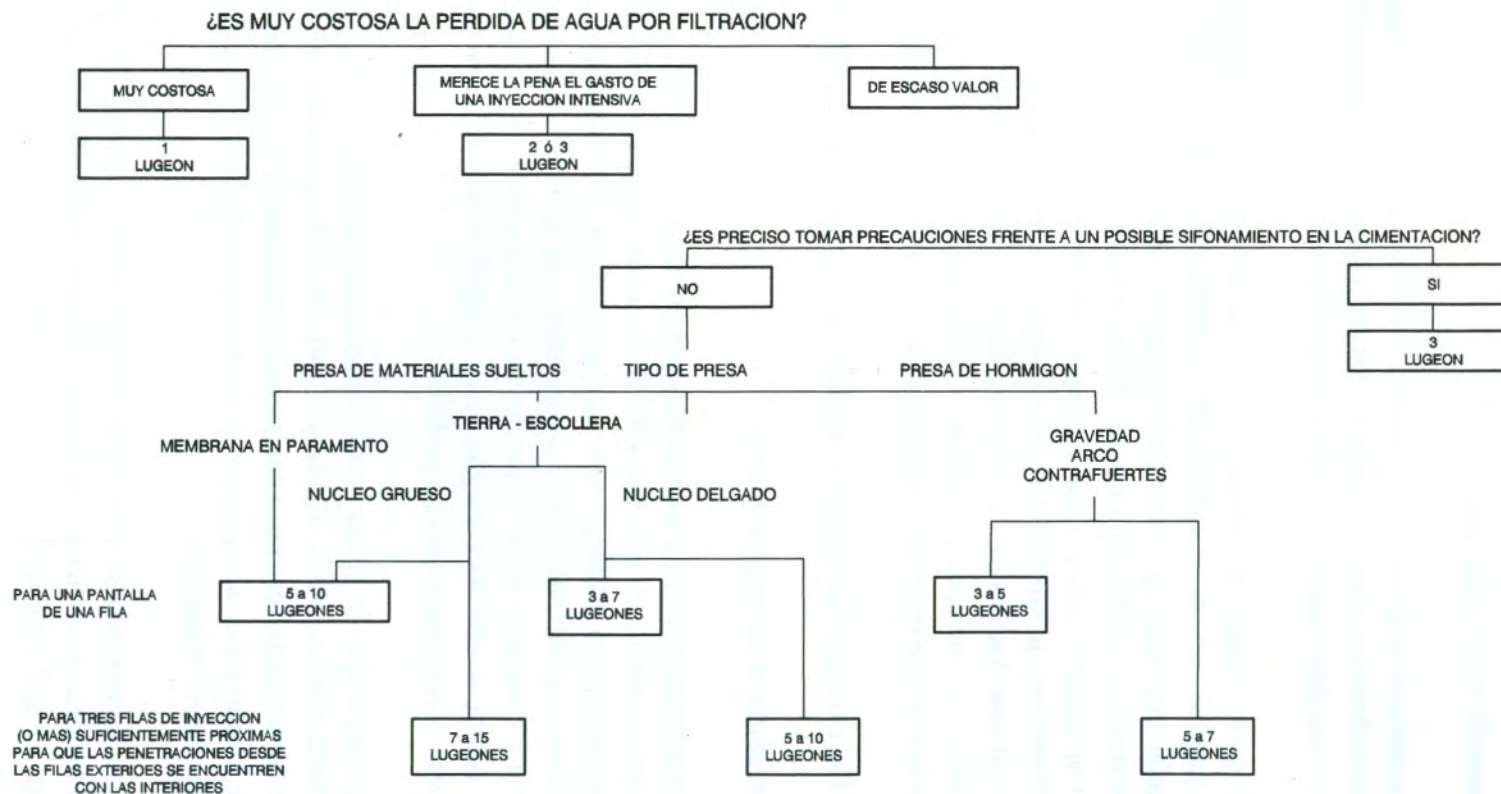
2.5.2. Permeabilidad del macizo rocoso

Es evidente que existen terrenos permeables por su naturaleza como las gravas, arenas, ciertas areniscas, o por la evolución que han sufrido, resultado de la cual es la existencia de grandes huecos, como sucede con las rocas carbonatadas o a favor de discontinuidades del terreno como fallas o diaclasas, especialmente si están orientadas en la dirección del cauce. Cabe por tanto, suponer que la presencia de estos materiales en el cierre puede ser causa de tener que hacer una pantalla, por contra las arcillas y margas por lo general pueden ser garantía de impermeabilidad, y puede evitarse la realización de una pantalla.

También es evidente que en muchos casos la necesidad de una pantalla no ofrece dudas pero en otros tal necesidad no es obvia. Houlby (1990) [R.8] ha preparado una guía, Tabla 2.6, que orienta sobre cuando debe realizarse una pantalla, partiendo de la importancia que tiene el caudal que se pierde. Como puede apreciarse y el mismo autor señala, son los casos dudosos en los que se necesita una mayor matización.

Aunque este tema será tratado en la guía correspondiente a criterios de proyecto, aquí se hará alusión a los factores geológicos y las características de los materiales que inciden en el diseño de la pantalla ya que esos factores y esas características son los que deben obtenerse en el contexto de los reconocimientos, para que con ellos, después, se pueda fijar la profundidad a alcanzar con la pantalla, la dirección de los taladros de inyección y su disposición en planta.

TABLA 2.6
Guía para evaluar la necesidad de una pantalla de impermeabilización



El proyectista de la pantalla de inyección más adecuada para la presa en estudio puede seguir el camino indicado u otro que, a su criterio, pueda resultar más conveniente. En cualquier caso, la información necesaria para proceder al proyecto estará basada principalmente en la caracterización detallada de la permeabilidad (que puede medirse en unidades Lugeon en medios rocosos fracturados y en términos de coeficientes de permeabilidad en caso de los suelos permeables).

También se necesita una evaluación expresa de la admisión de lechada y de la eficacia de estos tratamientos en la corrección de las posibles filtraciones y además, tal como se destaca en la tabla precedente, es vital analizar, dentro del contexto de los reconocimientos, la estabilidad de las rocas frente a un posible problema de sifonamiento.

2.5.3. Obras auxiliares

Las obras auxiliares que se suelen construir en el entorno de las presas pueden ser de gran importancia y requieren un reconocimiento geológico-geotécnico especialmente dedicado a resolver la problemática específica que conllevan.

a) Túneles de desvío

Los túneles de desvío suelen atravesar la cerrada de manera que la información obtenida para la propia presa suele ser de utilidad para resolver el proyecto adecuado de estos túneles. La información ya obtenida puede ser suficiente pero en general será necesario completarla con algún estudio específico.

En este sentido conviene que la zona de la cerrada afectada por los túneles que hubiera que construir sea clasificada con alguno de los sistemas de clasificación geomecánicos al uso. El sistema RMR [R.9] parece el más indicado al respecto.

Los reconocimientos específicos para el proyecto de los túneles conviene programarlos de acuerdo con el estado del arte en esta cuestión que debe consultarse en la bibliografía específica que se sale ya del alcance de esta Guía.

b) Carreteras y caminos de acceso

La tecnología de carreteras está bien desarrollada y no es objeto de esta Guía describir los criterios necesarios para programar y realizar los reconocimientos geológico-geotécnicos correspondientes. Se llama la atención, no obstante, de manera que este aspecto no se infravalore en el contexto de las investigaciones a realizar. Estas deben cubrir suficientemente las zonas donde hayan de construirse las carreteras y caminos de acceso de manera que se obtenga la necesaria información.

c) **Cimentaciones**

Cabe destacar como obras importantes que se suelen construir como anejas a las presas de tierra, las tomas y los puentes pasarela asociados. Son frecuentes también las centrales de pie de presa adosadas, los canales, las cámaras de válvulas, estanques de regulación, etc, asociados a cualquier tipo de presa.

La cimentación de cada una de esas obras debe quedar suficientemente reconocida realizándose los trabajos de campo y laboratorio que establece la práctica habitual en los estudios de cimentación de cada uno de esos tipos de estructuras.

Cabe citar, además, las instalaciones auxiliares de la construcción (plantas de machaqueo, grúas, silos, etc). Su cimentación debe ser objeto específico de un estudio geotécnico particular. En ocasiones el fallo de alguna de estas cimentaciones ha sido causa de graves inconvenientes. En particular quiere destacarse la importancia de las cimentaciones de los puntos fijos y de los caminos de rodadura de los blondines, suelen ser elementos que transmiten grandes cargas y que requieren una información geotécnica específica para realizar el adecuado proyecto.

2.5.4. Otros problemas específicos

No es posible hacer una lista completa de los temas cuya solución puede requerir información geológico-geotécnica específica. En cada caso puede existir alguna singularidad que requiera un reconocimiento especial.

Sólo a título orientativo y sin pretender hacer una relación exhaustiva, se quieren citar los siguientes aspectos que pueden requerir un reconocimiento específico del terreno.

- Estabilidad de alguna ladera del vaso.
- Inyectabilidad de alguna formación rocosa.
- Permeabilidad de formaciones aluviales (ensayos de bombeo) y de su inyectabilidad (pruebas de inyección).
- Alterabilidad de las rocas de cimentación en función del tiempo de exposición tras su excavación.
- Eficacia de las inyecciones de consolidación con pruebas hechas antes y después del tratamiento (ensayos geofísicos e incluso ensayos de carga).

2.6. Estudios durante la construcción

La construcción de las presas suele comenzar con la preparación de las obras de desvío y las excavaciones del cimiento de la propia presa así como de otras posibles obras anejas. Por muy bien estudiado que esté el emplazamiento de una presa sólo se conocerá como es realmente su cimentación cuando ésta se haya excavado.

La realización de las excavaciones ha de aprovecharse para proseguir en la caracterización geológico-geotécnica del cimiento de la presa y de las obras anejas. Los reconocimientos más usuales en la práctica actual y cuya realización se recomienda son los que se comentan a continuación.

2.6.1. *Cartografía geológica detallada*

En los cimientos de las presas de tierra pueden existir zonas cuyo fondo de excavación quede en suelos. Los suelos existentes en los fondos de excavación deben identificarse con los oportunos ensayos de laboratorio. También conviene determinar su densidad y humedad naturales (método de la arena o en su defecto el método nuclear contrastado localmente). Con estos datos deben prepararse planos de planta que definan con precisión suficiente los suelos que después se cubrirán con el cuerpo de la presa. Cuando se realicen zanjas o pantallas (pantallas de impermeabilización continua) conviene, además, describir los suelos encontrados mediante perfiles geológico-geotécnicos detallados, lo que conllevará la realización de los ensayos de laboratorio pertinentes.

Los afloramientos rocosos que hayan de servir de apoyo a la presa han de cartografiarse con detalle antes de que sean cubiertos. Esta tarea es especialmente importante en el apoyo de los núcleos de las presas de materiales sueltos y en el apoyo de los bloques de hormigón de las presas de fábrica. La metodología a seguir debe ser similar en ambos casos. Este levantamiento deberá efectuarse con la roca completamente limpia por lo cual deberá hacerse inmediatamente antes de proceder al hormigonado o a su cubrición con el núcleo, aprovechando la limpieza que para tal fin se hace de la roca. Debe realizarse con apoyo topográfico que ayude a situar con exactitud los distintos elementos que deben ser tenidos en cuenta. Para mayor eficacia en el trabajo, el geólogo señalará con pintura los puntos a tomar a la vez que realiza un croquis. Posterior o simultáneamente el topógrafo puede proceder a tomar los puntos marcados.

El levantamiento puede hacerse por bloques y puede ser de gran ayuda el señalar una cuadrícula en la superficie, que facilite el trabajo del geólogo para croquizar la cimentación. También debe indicarse, con pintura o mediante señal móvil, el norte magnético y la dirección del río.

Los elementos que deben reflejarse en el plano de cimentación dependerán del tipo de presa y las características del terreno. Entre otros puede señalarse los siguientes:

- Estratos con indicación de dirección y buzamiento.
- Fracturas importantes con indicación de dirección y buzamiento.

- Fallas con espesor de rellenos e indicación de dirección y buzamiento.
- Diques.
- Esquistosidad.
- Puntos de surgencia.
- Marmitas.
- Zonas de fracturación densa.
- Zonas alteradas.
- Zonas cársticas.

En el Anejo IV se muestran ejemplos de levantamientos de la cimentación de un bloque de presa en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas respectivamente.

En los planos del levantamiento geológico debe incluirse la situación de las investigaciones que se hayan podido realizar en esta etapa. Se recomienda acompañar cada plano con una fotografía, lo más vertical posible, del bloque que se esté levantando. En esa fotografía debe quedar reflejada la cuadrícula y los puntos señalados para la restitución topográfica. Igualmente deben incluirse fotografías puntuales de aquellas zonas que se consideren más relevantes y aporten mayor información al conocimiento del cimientto. En ocasiones será interesante realizar pares fotográficos que permitan la posterior visión del relieve.

Simultáneamente al levantamiento del plano geológico deben medirse las roturas de carácter menor que permitan dibujar gráficos de densidades de fracturación. Estos gráficos son de gran utilidad a la hora de diseñar los posteriores tratamientos de la cimentación. A la vez se podrán indicar las partes del cimientto que necesitan retoques, como por ejemplo la eliminación de bloques sueltos, la cubrición con malla de zonas de densa fracturación o rellenos de fallas, etc.

2.6.2. Controles geofísicos

Un tipo de investigación geofísica habitual en la etapa de construcción de presas de fábrica es la sísmica. Aparte de los problemas concretos que puedan presentarse al realizar la excavación de cimienttos, por ejemplo la presencia de una zona alterada o cárstica cuya existencia se desconocía, la sísmica puede ayudar a determinar la profundidad de la roca dañada por los trabajos de excavación y por tanto el desarrollo del tratamiento de consolidación siempre que otros factores no condicionen su profundidad. Para ello, finalizada la excavación de la presa, se efectuarán una serie de perfiles transversales y longitudinales. Aunque el diseño concreto dependerá de la naturaleza del macizo y de la entidad de la presa, puede recomendarse varios perfiles transversos al valle (al menos dos), que cubran toda la cimentación, y algunos según la dirección del río.

2.6.3. Ensayos de resistencia y/o deformabilidad

La excavación del cimientto de la presa abre una oportunidad para confirmar los datos de resistencia con los que se ha realizado el proyecto. Las zonas cuya resistencia es más crítica

(juntas que pudieran controlar la estabilidad) quedan más accesibles y puede ser conveniente ensayar nuevamente su resistencia. Puede ser también adecuado realizar ensayos de deformabilidad sobre el cimientto una vez descubierto por la excavación.

No se puede recomendar, de manera general, que estos ensayos se hagan o se omitan. Son las circunstancias concretas de cada caso las que pueden decidir si esta nueva oportunidad se aprovecha o no para completar la caracterización del cimientto. Se han realizado ensayos de este tipo en algunas presas al abrir las excavaciones. En otros casos este tipo de ensayo, posteriores a las excavaciones e incluso después de la construcción, se han realizado únicamente tras advertirse los primeros síntomas de comportamiento patológico.

2.6.4. Ensayos de inyectabilidad de mezclas

A pesar de la buena calidad de un macizo constituido por rocas competentes los trabajos de excavación afectan a la roca en mayor o menor profundidad, según haya sido el cuidado puesto en realizar tales trabajos, el tipo de roca y lo fracturada o alterada que se encuentre. Por ello puede ser necesario hacer una regeneración de la roca mediante inyecciones (tratamiento de consolidación) que a la vez mejore la adherencia hormigón-roca. Por ello es conveniente conocer la profundidad de la roca afectada y las posibilidades de admisión de lechadas, siendo adecuado hacer sondeos cortos, geofísica e inyecciones de prueba.

Los factores necesarios para determinar el tratamiento serán: la disposición, inclinación, profundidad, y diámetro de los taladros, así como la presión de inyección, las mezclas a utilizar y las proporciones en que entrarán sus componentes. El efecto de estos parámetros es el que conviene investigar mediante ensayos previos de inyectabilidad de mezclas.

Después de realizar las pruebas de consolidación conviene perforar unos taladros de control para analizar el estado en que queda el cimientto inyectado, pudiendo completar está investigación con prospección sísmica.

En caso de que existan fracturas con rellenos de un cierto espesor, constituido por material blando, convendría proceder a su lavado previamente a efectuar las inyecciones. Para ello se inyectará agua en los taladros dando lugar a una circulación que vaya arrastrando el material de relleno. Las pruebas comentadas pueden hacerse sobre parte de estos accidentes para ver la eficacia de distintos procedimientos.

El proyecto de pantalla de impermeabilización estará basado en la información aportada por los levantamientos geológicos generales y de la cimentación, los resultados de los sondeos de reconocimiento y las pruebas de permeabilidad en ellos realizadas. Al realizar las excavaciones deberán controlarse todos estos aspectos, a fin de comprobar la bondad de los datos previos. También puede resultar conveniente realizar ensayos de inyectabilidad más profundos para evaluar la eficacia de distintos procedimientos de inyección.

Las pruebas que pueden hacerse consistirían, precisamente, en tantear diferentes procedimientos de perforación e inyección y contrastar sus resultados con ensayos de permeabilidad realizados antes y después del tratamiento. La ubicación más lógica de estas pruebas será en la propia pantalla que se piensa construir, eligiendo aquellas zonas que puedan resultar más representativas de los distintos tipos de roca a impermeabilizar.

2.6.5. Otros reconocimientos

Dependiendo de las circunstancias concretas de cada caso, puede ser conveniente realizar algún tipo de prospección específica una vez que la excavación esté abierta. Puede tratarse del reconocimiento específico de alguna singularidad local (relleno de alguna falla, zona de alteración de algún paquete de roca, posibles conductos de disolución, etc). Dependiendo de la importancia de la singularidad en cuestión y del tipo de problema que pueda causar, el reconocimiento específico debe plantearse de una u otra manera. Únicamente cabe advertir que este tipo de reconocimientos son más fáciles de realizar con la obra en marcha que después de la construcción cuando los medios disponibles y las posibilidades de acceso son más reducidos.

2.6.6. Archivo Técnico de la presa

El Archivo Técnico de la presa debe constituirse durante la construcción y debe contener, como mínimo, los siguientes documentos de tipo geológico-geotécnico:

- 1.- Los informes que se utilizaron para elaborar el proyecto de construcción que, normalmente, estarán integrados en dicho proyecto.
- 2.- La cartografía detallada de los fondos de excavación junto con los reconocimientos geofísicos que se hayan realizado tal como se indica en los puntos 2.6.1 y 2.6.2.
- 3.- Los resultados de los ensayos y análisis realizados durante la construcción para corroborar los parámetros de cálculo utilizados en proyecto para justificar la estabilidad de la presa y de sus obras anejas, tal como se indica en el punto 2.6.3. Esta información puede englobarse en el conjunto de ensayos de "comprobación de la calidad de las obras" a los que hace referencia el Reglamento Técnico (Apdo 5.4.c).
- 4.- Un informe relativo al tratamiento del cimientto que incluya los detalles de las inyecciones de consolidación que hayan podido realizarse así como de las pantallas de impermeabilización y drenaje que se hayan construido. Es recomendable que este informe haga una previsión de las posibles tareas de inyección pendientes o de otros tratamientos del terreno, que convenga realizar durante la puesta en carga y/o durante la explotación del embalse.
- 5.- Cualquier otra información adicional del terreno obtenida durante la ejecución de las obras. En particular aquella que haya motivado alguna modificación de la obra proyectada.

El Archivo Técnico de la presa será después completado durante las fases de puesta en carga, explotación y eventual abandono de la presa añadiendo los resultados de los reconocimientos del terreno que se hayan realizado para cumplir los requisitos de seguridad que estipula el Reglamento Técnico.

2.7. Estudios de evaluación

Es posible que, una vez finalizada la construcción de una presa, sea necesario hacer nuevos reconocimientos del terreno. En lo que sigue se identifican algunas de esas situaciones.

2.7.1. Primer llenado

Un aspecto esencial a contemplar, ligado al terreno, son las posibles filtraciones aguas abajo. Estas pueden haber surgido al efectuar el llenado o puede tratarse de fuentes ya existentes que ven aumentado su caudal. Por este motivo es conveniente hacer un inventario de los manantiales próximos al vaso y susceptibles de presentar alguna conexión con él. Se debe realizar un control antes y después del llenado, manteniendo este último durante algún tiempo.

Durante la fase de puesta en carga de la presa no es usual que se necesiten nuevos reconocimientos del terreno o de la propia presa salvo que se observen comportamientos anómalos que requieran ser investigados. Los comportamientos anómalos suelen detectarse, en la mayoría de los casos, mediante observación directa y en ocasiones menos frecuentes, a través de los datos de la auscultación. La explicación de esos comportamientos podrá hacerse con garantías suficientes apoyándose exclusivamente en la información existente en el Archivo Técnico de la presa pero puede ser necesario, en circunstancias excepcionales, realizar reconocimientos específicos. Tales reconocimientos deben ser planificados de acuerdo con las circunstancias concretas de cada caso.

Se recomienda que, en caso de hacerse sondeos en presas ya construidas se tenga presente el posible daño que los reconocimientos pueden causar. Especialmente se recuerda la sensibilidad a la hidrofracturación de los núcleos de las presas de tierra; la técnica habitual de ejecución de sondeos con extracción de detritus mediante agua o aire a presión no es aceptable para este tipo de sondeos.

2.7.2. Situaciones de emergencia

Siempre que la presa haya pasado por una situación de emergencia se debe hacer una revisión especial que puede requerir, en algunas circunstancias, reconocimientos del terreno para investigar algún daño local.

Los movimientos sísmicos, las elevaciones súbitas de nivel de las aguas provocados por riadas o los vaciados rápidos pueden dar lugar a deslizamientos en el embalse. Por este motivo convendrá efectuar un reconocimiento del vaso después de alguna de las situaciones indicadas.

Dependiendo de su importancia, de la influencia que hayan tenido sobre la presa y estructuras anejas, o de la posibilidad de su remoción, se puede requerir el efectuar una investigación consistente en un levantamiento geológico, realización de geofísica y sondeos y posibilidad de instalar elementos de auscultación.

La investigación detallada de algún daño específico (agrietamientos, aumentos bruscos de filtraciones, etc) pueden requerir la utilización de técnicas de reconocimiento del terreno (sondeos, geofísica, etc) para detallar la amplitud del daño y evaluar sus consecuencias, la necesidad de reparación y, en su caso, facilitar la labor del proyecto de adecuación más indicado.

2.7.3. *Revisión y análisis general de la seguridad*

El Reglamento estipula que, con cierta regularidad, se haga una revisión y análisis general de la seguridad de la presa y el embalse. Este trabajo debe ser realizado por un equipo técnico independiente del equipo técnico de explotación y debe concluir con el informe correspondiente. En el informe de revisión se deben indicar expresamente las modificaciones que sea necesario realizar para garantizar la seguridad de la presa.

Normalmente, estas revisiones periódicas comenzaran por una inspección visual de la presa y de sus obras anejas, dejando constancia documental de ella en los escritos, dibujos, croquis, fotografías, videos, etc, que sean adecuados para que terceros puedan conocer con el mayor detalle posible, el resultado de esa inspección.

Una parte esencial de la revisión consistirá en el examen de los documentos que existen en el archivo técnico de la presa. El equipo técnico que realice la revisión debe comprobar si existen los documentos relativos al terreno que se han mencionado en esta Guía y debe evaluar su precisión. Como ayuda en este tipo de revisión, en la tabla 2.7. se incluye una posible lista de comprobación y un posible criterio de calificación de los distintos documentos relacionados con el terreno.

A estos efectos las clases de reconocimiento I, II y III descritas en el apartado 2.1.1. pueden considerarse equiparables a las calificaciones I, II y III indicadas en la Tabla precedente.

En presas que hayan sido ya revisadas con anterioridad, la nueva revisión puede extenderse únicamente al período posterior a la revisión anterior, salvo que alguna circunstancia excepcional motive una investigación más amplia.

En las presas que tengan un Archivo Técnico actualizado se evitará la realización de nuevos reconocimientos del terreno; su seguridad podrá evaluarse con sólo la información técnica existente. En presas con un Archivo Técnico deficiente, en particular algunas presas antiguas, es recomendable proceder a realizar los reconocimientos geológico-geotécnicos necesarios para completar la documentación existente. En el apartado que sigue se hacen algunas recomendaciones relativas a los reconocimientos necesarios para evaluar la seguridad de presas que están en explotación y que presentan deficiencias en su Archivo Técnico.

TABLA 2.7
Evaluación del Archivo Técnico de la presa

Documentos	Calificación			
	I	II	III	0
1.- Estudios geológico-geotécnicos de proyecto				
2.- Cartografía geológica de las excavaciones				
3.- Ensayos de comprobación durante la construcción				
4.- Descripción de los tratamientos del cimient (consolidación, tratamientos locales, pantallas de impermeabilización y drenaje)				
5.- Documentación geológico geotécnica de posibles modificaciones del proyecto				
6.- Comportamiento del cimient durante la puesta en carga				
7.- Reconocimientos del terreno posteriores a la construcción				

Calificación:

- I Difícilmente mejorable con las técnicas actuales
- II Descripción completa
- III Descripción somera
- 0 No existe

2.7.4. Presas con Archivo Técnico deficiente

En los apartados precedentes de esta Guía se ha identificado el alcance de la información que se necesita del terreno para proyectar y construir debidamente una presa y sus estructuras anejas. En el caso de presas ya construidas el Archivo Técnico debe contener la información necesaria para explotar, mantener y eventualmente, abandonar la presa; su contenido mínimo, en lo que respecta al terreno, se recomienda que sea el siguiente:

1.- Información geológica regional

Debe tener el mismo alcance que se indica en el apartado 2.2. de este Capítulo de la Guía. En los temas de permeabilidad del vaso y la cerrada, los estudios que allí se requieren pueden ser sustituidos por un adecuado análisis e interpretación de los datos de observación de la presa. Algo similar puede hacerse en lo que respecta a los estudios relativos a la estabilidad de las laderas del vaso; los datos de observación habidos durante la explotación podrían suplir los reconocimientos de otra forma necesarios. Evidentemente, los estudios de zonas de préstamo de materiales pueden no ser ya necesarios en presas en explotación salvo que hayan de realizarse nuevas obras para garantizar su seguridad.

2.- Caracterización de la cerrada

La estructura geológica de la cerrada debe ser conocida con el mismo grado de detalle para explotar una presa que para construirla. Únicamente en aquellas presas que lleven ya cierto tiempo en explotación y que hayan superado sin incidentes notables uno o varios llenados completos pueden explotarse con una caracterización resumida que, en cualquier caso, debe contener el Archivo Técnico de la presa. Se recomienda que en ese mínimo consten al menos los siguientes elementos:

- Estructura geológica definiendo los distintos tipos de roca y sus discontinuidades (fallas, planos de estratificación y/o esquistosidad, en su caso, y sistemas de diaclasas de la cerrada).
- Identificación de las discontinuidades que puedan resultar críticas en los estudios de estabilidad.
- Estudio de la resistencia de las discontinuidades, más críticas del macizo rocoso, de la resistencia de los suelos que puedan rellenar a las diaclasas o fallas más críticas de la obra y de los suelos sobre los que pudiera apoyar la presa. Esto con el mismo grado de detalle que se indica en los apartados precedentes para el proyecto y construcción de presas nuevas. Únicamente una información fehaciente del comportamiento observado, debidamente analizada e interpretada podría sustituir algún aspecto de los reconocimientos a realizar.

3.- Datos de la construcción

En aquellas presas construidas y cuyo Archivo Técnico de la presa, en la parte relativa a la construcción, sea deficiente será necesario recomponer cierta información mínima necesaria para la evaluación posterior de la seguridad.

Si la cartografía geológica del cimiento no existiera será preciso realizar algunas prospecciones específicas para describir el contacto hormigón-roca o el contacto núcleo-terreno o en general, el cimiento de la presa de manera que se obtenga información fehaciente de, al menos, los siguientes extremos:

- a) Cota de los contactos presa-terreno
- b) Naturaleza del terreno en el contacto en las zonas esenciales
- c) Resistencia y permeabilidad de la zona de contacto. Investigación de la posible existencia de tratamientos de consolidación del terreno.
- d) Eficacia de la pantalla de impermeabilización. Este aspecto puede investigarse mediante ensayos de campo realizados desde las galerías que la presa pudiera

tener. Esta información puede ser sustituida por datos fehacientes de la auscultación hidráulica debidamente analizados.

Será relativamente frecuente que en los trabajos de revisión y análisis general de seguridad de presas antiguas sea necesario caracterizar el propio cuerpo de presa. En las presas de materiales sueltos, estos trabajos pueden hacerse con las mismas técnicas que se usan para reconocer el terreno. Únicamente cabe repetir lo ya indicado en el apartado 2.7.1.: los reconocimientos podrían dañar a la obra y esto debe evitarse. Las técnicas no destructivas deben primar en estas circunstancias.

4.- **Estudio de problemas específicos**

Si la presa en cuestión, durante su construcción y/o explotación presentó algún problema específico puede ser necesario realizar reconocimientos del terreno especialmente encaminados a aclarar este asunto.

Si como consecuencia de la revisión técnica se deduce la necesidad de emprender ciertas actuaciones sobre la presa o sobre sus obras anejas, tal actuación debe ser objeto de un proyecto específico. Su redacción puede requerir la realización de reconocimientos adicionales si la información existente no es suficiente.

5.- **Otros datos**

Dependiendo del tipo de presa y del tipo de obras auxiliares correspondientes, así como de los accesos, puede ser necesario ampliar el Archivo Técnico de la presa para describir las cimentaciones de las estructuras anejas, los rasgos geológicos de posibles túneles (desagües de fondo o tomas), así como los aspectos geológico-geotécnicos más necesarios de los accesos, prestando especial atención a aquellas zonas que presenten algún síntoma de inestabilidad.

2.7.5. *El abandono de las presas*

El abandono de las presas requiere un proyecto que defina los trabajos a realizar para su puesta en fuera de servicio. Este proyecto puede requerir estudios específicos del terreno.

Los estudios del terreno necesarios para el proyecto de puesta en fuera de servicio serán aquellos que permitan asegurar que la presa resultará estable tras el abandono salvo que, excepcionalmente, se pueda demostrar que su rotura no causa daños inadmisibles.

Para asegurar la estabilidad de una obra abandonada será necesario conocer la presa y sus cimientos con cierto grado de detalle. En este sentido las recomendaciones dadas en los apartados precedentes pueden ser de utilidad.

Como aspecto específico de este tipo de proyecto se quiere destacar el reconocimiento geotécnico necesario de los tarquines del vaso ya que su naturaleza y, en particular su resistencia al corte, su susceptibilidad tixotrópica y su resistencia a la licuefacción frente a movimientos sísmicos, pueden ser un elemento de interés en este tipo de proyecto.

3.

ESTUDIOS DE SISMICIDAD

3.1. Introducción

Las presas y los embalses han de ser sismorresistentes; así lo establece el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (Art. 18). El ingeniero ha de comprobar, mediante las investigaciones y los estudios que sean necesarios, que esta seguridad existe. Los caminos que pueden seguirse para verificar la seguridad frente a los terremotos pueden ser muy variados y de ahí la necesidad de definir unos requisitos mínimos que hayan de cumplir los estudios sísmicos de las presas.

En este Capítulo de la Guía se incluyen algunos comentarios a la normativa relacionada con la seguridad de las presas frente a los terremotos. En función de esa normativa se identifican los puntos que requieren cierta aclaración y que, en consecuencia, son objeto de desarrollo en los apartados siguientes.

Para cumplir las prescripciones del nuevo Reglamento sobre seguridad de presas y embalses es preciso "comprobar el comportamiento" frente a los efectos producidos por las acciones sísmicas. Aquí no se ampliará este concepto; las comprobaciones que hayan de hacerse son objeto de la guía de criterios de proyecto. Sin embargo, para hacer las comprobaciones pertinentes será necesario definir los "parámetros de cálculo" del sismo o de los sismos correspondientes. Es objeto de esta guía ayudar en esa definición.

La definición completa del movimiento que puede causar un terremoto en un determinado lugar requeriría la utilización de un gran número de datos. A efectos prácticos la definición puede simplificarse y para la mayor parte de las aplicaciones será suficiente conocer el espectro de res-

puesta elástico y la aceleración sísmica (con sus componentes horizontal y vertical). Estos datos son los que se contemplan en esta guía y los que son objeto de definición en lo que sigue. En aquellos casos en los que por alguna circunstancia sea necesario conocer otros datos del terremoto (duración, por ejemplo) será necesario recurrir a las publicaciones técnicas que traten del tema para obtener cierta información.

En este Capítulo se definen los procedimientos que se creen más recomendables para definir los parámetros de cálculo de la acción sísmica. Estos procedimientos serán diferentes en función de la sismicidad de la zona y de la categoría de la presa. Para describirlos se ha creído conveniente la ordenación siguiente:

- En los apartados 3.2. y 3.3. se incluyen unas consideraciones de tipo general que se creen necesarias para el desarrollo posterior.
- En el apartado 3.3. se identifican aquellas zonas que por su baja sismicidad hacen que no sea necesario considerar el efecto sísmico en ningún tipo de presa.
- En el apartado 3.4. se consideran las presas de categorías "B" y "C" situadas en las zonas de sismicidad media o elevada. Para estas situaciones se cree suficiente una definición sumaria de la acción sísmica tal como se apunta en ese apartado.
- En el apartado 3.5. se consideran las presas de categoría "A" situadas en zonas de sismicidad media. En ese apartado se dan definiciones de los terremotos de cálculo o comprobación que pueden ser suficientes para evaluar la seguridad.
- En el apartado 3.6., se dan valores de los periodos de retorno y las aceleraciones de cálculo en función de la categoría de la presa y la zona sísmica.
- En el apartado 3.9. se dan algunas recomendaciones que pueden servir de guía para realizar los estudios sismotectónicos que el nuevo Reglamento requiere para las presas de categoría A situadas en zonas de sismicidad elevada.
- Dado que es obligatorio considerar los efectos producidos por la posible sismicidad inducida por los embalses, en esta guía se apuntan algunas ideas al respecto en el apartado 3.8.

Siendo el propósito general de esta guía los reconocimientos geológico-geotécnicos, se indicará en este Capítulo aquellos reconocimientos complementarios que hayan de realizarse con motivo de las comprobaciones del comportamiento sísmico a las que hace referencia el Reglamento.

Se ha creído conveniente incluir en cada parte algunas consideraciones sobre las comprobaciones a realizar con las acciones sísmicas. Aunque este tema es propio de los criterios de proyecto, se han querido adelantar algunas consideraciones que deben ser tenidas en cuenta complementariamente a lo que en la guía nº 2 "Criterios para proyecto de presas y sus obras anejas" se diga a este respecto.

3.2. Normativa

3.2.1. Instrucción de 1967

La Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas de 1967 dedica uno de sus artículos (Art. 34) a la consideración del efecto sísmico.

La acción sísmica se define mediante un parámetro básico: la "aceleración sísmica horizontal"^{*}. Para ayudar en la estimación de ese parámetro, la Instrucción facilita un plano del territorio nacional donde se distinguen zonas de sismicidad baja, media y alta.

En las zonas de sismicidad baja, según la Instrucción, no es necesario tener en cuenta las posibles acciones sísmicas.

En las zonas de sismicidad media, la Instrucción indica que se calculen las estructuras vitales para la seguridad para un sismo cuyo período de retorno sea $T = 500$ años. A efectos orientativos se dice que la aceleración sísmica horizontal estará comprendida entre el 5% y el 10% de la aceleración de la gravedad. La componente vertical de la aceleración sísmica sería la mitad de la horizontal.

En las zonas de alta sismicidad se indica que ha de realizarse un estudio sismológico y tectónico que justifique las acciones previsibles.

En los treinta años transcurridos desde la edición de esta Instrucción el conocimiento de la sismicidad española ha evolucionado y también lo ha hecho la normativa de obligado cumplimiento. En particular ha de considerarse la NCSE-94.

3.2.2. Norma NCSE-94

La Norma de construcción sismorresistente española NCSE-94 (BOE nº 8 de febrero de 1995) es de obligado cumplimiento en España. [R.1] Sustituye y deroga a la antigua Norma PDS-1 (1974) [R2]. En lo que atañe a las presas, únicamente son aplicables los aspectos generales y uno de ellos es el mapa de peligrosidad sísmica del territorio nacional (Fig. 3.1). Completando este mapa, la NCSE-94 incluye un listado de municipios indicando los parámetros sísmicos cuando la aceleración sísmica básica supera el umbral de 0.04 g.

En este mapa se indican valores de dos parámetros sísmicos que son:

$$\begin{aligned} a_b &= \text{aceleración sísmica básica} \\ K &= \text{coeficiente de contribución} \end{aligned}$$

^{*} La aceleración sísmica horizontal es, lógicamente, variable durante el terremoto. En la Instrucción de 1967 se pretendía dar un valor de la aceleración sísmica horizontal "equivalente". Ese valor se utilizaba después para hacer un cálculo pseudoestático equivalente y por lo tanto debe interpretarse como la aceleración constante que produce un efecto similar al real en ciertos problemas de estabilidad. En la tecnología más reciente se define la acción sísmica mediante una aceleración sísmica horizontal más próxima a la máxima (cierto valor característico). Ambos conceptos son diferentes aunque se haya mantenido el mismo nombre. Esto explica que los valores actuales de las aceleraciones sísmicas (las que se indican en esta guía) sean claramente superiores (del orden del doble) a los que en su día se incluían en la Instrucción de 1967.

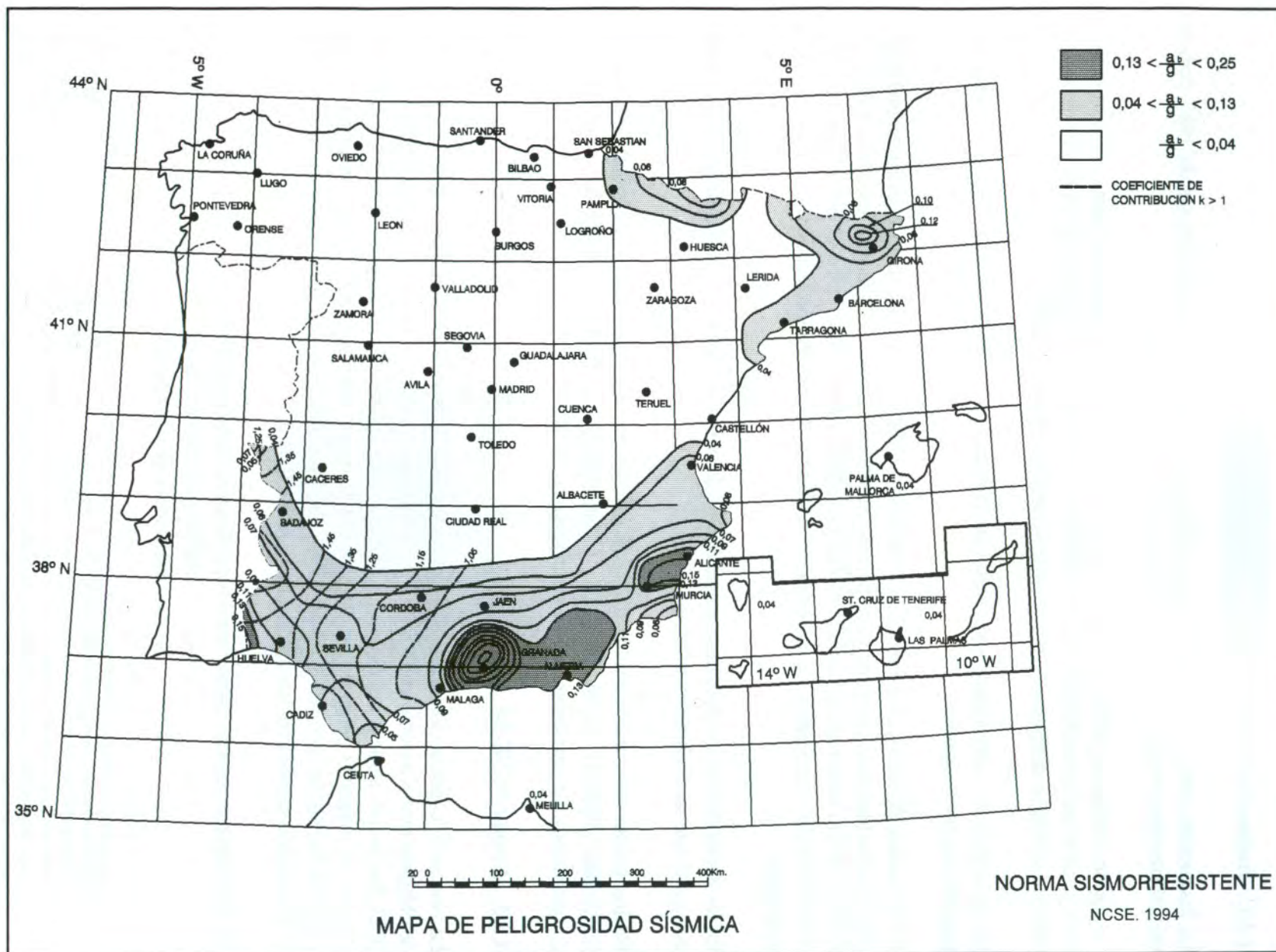


Fig. 3.1

El significado de estos dos parámetros es complejo y por eso se remite al lector a las explicaciones de la Norma. De todas formas conviene incluir aquí una breve reseña.

La aceleración sísmica básica sería, en términos generales, un valor característico de la aceleración horizontal de un terreno llano y firme y correspondería a un período de retorno de 500 años.

La mayor parte de la historia de la sismicidad española está escrita en término de intensidades (escala MSK). Existe una correlación entre la aceleración sísmica básica y la intensidad del terremoto asociado, que, según se cita en la Norma, es la siguiente:

$$\log_{10} a_b = 0.30103 I - 0.2321 \quad (a \text{ en cm/s}^2)$$

Algunos valores típicos, deducidos de esta expresión, son los siguientes:

Tabla 3.1
Valores de la aceleración sísmica básica

Intensidad, I	Aceleración sísmica básica, a_b
VI	0.04 g
VII	0.08 g
VIII	0.15 g
IX	0.31 g

donde g es la aceleración de la gravedad.

Los mapas de intensidad MSK de la antigua Norma PDS1-1974 [R.2] y de la Instrucción (1967) [R.3] pasan ahora a ser mapas de aceleraciones sísmicas básicas o, como se denomina en la nueva Norma, mapas de peligrosidad sísmica.

Se dice también, en nuestra Norma, que de acuerdo con los estudios de sismicidad realizados, para períodos de retorno, P_R , distintos de 500 años se podría obtener la aceleración sísmica básica multiplicando el valor listado en su catálogo de municipios por el factor $(P_R/500)^{0.37}$.

El otro parámetro que da la Norma, el factor de contribución K, trata de considerar el efecto que tiene, en cada población, la sismicidad asociada a la falla Azores-Gibraltar que ha causado grandes terremotos con cierta regularidad. El factor K afecta al contenido de frecuencias del terremoto y, por lo tanto, se utiliza en la definición del espectro de respuesta con el que se deben hacer los cálculos. No es obligatorio, para el caso específico de las presas, utilizar el factor K; sólo es de uso obligado en los edificios. Más adelante se explicarán brevemente las razones que llevan a recomendar su uso, con alguna modificación, para aplicarlo también al caso de las presas.

La Norma NCSE-94 especifica que para "calcular" las presas se adopte una "aceleración sísmica de cálculo", a_c , mayor que la "aceleración sísmica básica", a_b . El factor de mayoración es denominado " ε ". Esto es:

$$a_c = \varepsilon \cdot a_b$$

La forma en que se introduce este factor de mayoración es conceptualmente complicada. Se dice que el factor " ε " está asociado al "período de vida" de la obra, que se denomina " t " y viene dado por la expresión:

$$\varepsilon = \left(\frac{t}{50} \right)^{0.37} \quad (t \text{ en años})$$

Como se ve, esta ley de variación de la acción sísmica con el tiempo es la misma que ya se mencionó al considerar el efecto del período de retorno en la definición de a_b .

La NCSE-94 califica a las presas como "construcciones de especial importancia" ya que supone que su destrucción interrumpiría un servicio importante y produciría efectos catastróficos. Se dice, además, que, para el cálculo de las presas, se suponga siempre $t \geq 100$ años. Como consecuencia el factor " ε " resulta igual a 1.3 y la aceleración sísmica de cálculo es:

$$a_c \geq 1.3 a_b$$

Con esta idea, parece deducirse que la intención de la NCSE-94 es que la probabilidad de que la aceleración sísmica de cálculo sea sobrepasada, sea menor que 10^{-3} por año, en todas las presas.

3.2.3. Normativa comunitaria

La actividad normativa de la comunidad europea incluye la redacción de un código relativo al efecto sísmico bajo el título "Estructuras en zonas sísmicas. Proyecto" [R.4]. El borrador actual (1998) tiene cinco partes, la primera dedicada a las acciones sísmicas y a las reglas de diseño de los edificios. Las partes siguientes quedarían destinadas al proyecto específico de "puentes", "torres y chimeneas", "silos, depósitos y tuberías" y finalmente "cimentaciones, muros y aspectos geotécnicos".

No parece que la normativa europea dedique una parte expresa a los estudios sísmicos de las presas y de los embalses. Será sin embargo de aplicación a las estructuras auxiliares de las presas.

Probablemente sea de aplicación a las presas y los embalses la parte 1.1 del eurocódigo E-8, titulada "acciones sísmicas". Es de esperar que en este aspecto el eurocódigo y la NCSE-94 sean compatibles.

3.2.4. Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses

El nuevo Reglamento Técnico dedica el artículo 18 a la consideración de los efectos sísmicos. Los tres apartados correspondientes se transcriben a continuación:

18.1 Se comprobará el comportamiento de la presa frente a los efectos producidos por las acciones sísmicas tanto sobre la presa misma como sobre el embalse, de conformidad con la normativa sismorresistente en vigor.

Se justificará el procedimiento utilizado para considerar el efecto hidrodinámico de agua del embalse sobre la presa y sus estructuras anejas. Para las presas de categoría A se hará una comprobación para otro seísmo extremo razonablemente superior.

18.2 En las zonas de sismicidad elevada, y para las presas clasificadas en la categoría A, se realizarán los estudios sismotectónicos necesarios para determinar la sismicidad en la zona y los seísmos de proyecto, con sus parámetros de cálculo correspondientes.

18.3 Se considerarán los efectos producidos por la posible sismicidad inducida por el embalse.

De esta redacción puede deducirse que tanto el antiguo mapa de zonas sísmicas de la Instrucción de 1967 como los valores de las aceleraciones horizontales que allí se indicaban quedan derogados, ateniéndose ahora a lo que indique la normativa sismorresistente en vigor que es la NCSE-94.

3.3. Clasificación de zonas sísmicas

La peligrosidad sísmica es diferente de unos lugares a otros y ha sido práctica habitual calificar los territorios en función de esa peligrosidad. Así se hizo en la antigua Instrucción, así se hace en la nueva Norma NCSE-94 y así se sugiere también en los borradores del Eurocódigo E-8. En este apartado se recomienda clasificar la peligrosidad sísmica del territorio nacional, a los efectos de la comprobación sismorresistente de las presas, los embalses y sus obras anejas, en tres grupos según se detalla a continuación.

a) Zonas de baja sismicidad

Se pretende definir como zonas de baja sismicidad aquellas en las que no se necesitaría hacer una comprobación expresa del comportamiento sísmico de las presas, los vasos o las obras anejas. El umbral de peligrosidad que delimita estas zonas ha de ser fijado por la experiencia. Las presas, en general, soportan bien los sismos.

Estudios realizados para analizar la relación existente entre el daño en las presas afectadas y la magnitud del terremoto (aproximadamente) indican que, siendo mucho

más frecuentes los sismos de magnitudes bajas, los daños que se han listado sólo ocurren con magnitudes superiores a 5. Aunque es difícil correlacionar estas magnitudes con las aceleraciones que el sismo haya podido causar en las presas, se intuye que existe un umbral mínimo necesario para que se pueda producir algún daño de consideración en alguna presa.

En España apenas existen datos de presas afectadas por terremotos aunque existen algunos acelerogramas registrados (terremoto de Almuñecar de 1984, que dio lugar en la presa de Beznar, a 0.02 g de aceleración, y terremoto de Almería de 1993, que causó una aceleración de 0.06 g, entre otros). [R.5].

La experiencia pasada relativa a los daños que causan los terremotos en las estructuras construidas por el hombre y en la naturaleza se ha ido acumulando en las escalas de intensidad. En Europa, de manera oficial, se utiliza la escala de intensidades MSK donde, a cada grado de la escala, se le atribuyen ciertos daños. En otros países son de uso escalas similares, como la Mercalli modificada. Los daños atribuibles a cada intensidad pueden verse en los textos que definen estas escalas.

De la lectura de esa experiencia puede colegirse que para la intensidad sísmica VII de la escala MSK se puede producir algún deslizamiento ocasional de las obras de tierra; algún terraplén a media ladera especialmente poco estable puede deslizarse como consecuencia de un terremoto que provoque esa intensidad. La aceleración horizontal de cálculo que se asocia a esta intensidad es 0.08 g. Con esta idea puede decirse que en aquellos emplazamientos donde la aceleración sísmica de cálculo resulte menor que 0.08 g no sería necesario hacer ninguna consideración expresa del sismo. Las estructuras bien construidas deben soportar sin deterioro esta intensidad y esta aceleración sísmica.

En la Norma NCSE-94 se identifica una amplia zona del territorio nacional donde la aceleración sísmica básica es menor que 0.04 g. Este umbral de aceleración corresponde a sismos cuya intensidad fuese aproximadamente VI (MSK). Es difícil que en esas zonas se produzca un sismo cuya intensidad supere el grado VII. La probabilidad de ocurrencia de un sismo que provoque en el emplazamiento el grado VIII debe considerarse prácticamente nula.

En consecuencia se propone que todas aquellas zonas que la NCSE-94 identifica con $a_b < 0.04$ g sean consideradas como zonas de baja sismicidad. En ellas no sería necesario hacer ninguna comprobación expresa del efecto sísmico excepto si la presa en cuestión es especialmente sensible a la acción sísmica (rellenos hidráulicos, por ejemplo).

b) Identificación de zonas de elevada sismicidad

El Reglamento sobre seguridad de presas y embalses indica que las presas de categoría A en zonas de elevada sismicidad deben ser objeto de una consideración especial. Conviene definir qué se entiende por "elevada sismicidad".

La NCSE-94 distingue tres intervalos en la aceleración sísmica de cálculo separados por los valores 0.08 y 0.12 g donde se hacen diferentes requerimientos a las construcciones. Podría pensarse que el valor $a_c \geq 0.12$ g sería un índice de que la sismicidad es elevada.

El Eurocódigo E-8, según los borradores consultados, califica como elevada sismicidad aquellas zonas donde tal aceleración efectiva de pico es superior a 0.20 g.

El mapa de peligrosidad sísmica de la NCSE-94 indica tres categorías separadas por las aceleraciones sísmicas básicas de 0.04 g y 0.13 g.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se recomienda que, a efectos de aplicación del Reglamento sobre seguridad de presas y embalses, se considere que son zonas de "elevada sismicidad" aquellas que se identifican en la NCSE-94 con una aceleración sísmica básica $a_b \geq 0.13$ g.

c) Zonas de sismicidad media

Evidentemente, una vez definidas las dos zonas antes mencionadas, cabe recomendar que se denomine como "sismicidad media" aquellas zonas en las que la aceleración sísmica básica esté comprendida en el intervalo siguiente:

$$0.04 < a_b < 0.13 \text{ g}$$

3.4. Acción sísmica para presas de Categorías B y C

Todas las presas, independientemente de su categoría, son clasificadas como construcciones de especial importancia en la NCSE-94. La acción sísmica que se define en su parte general es de obligado cumplimiento y es la que habrá de considerarse para verificar la seguridad frente a los sismos.

Parece evidente que las presas que queden clasificadas en la categoría "C" es decir, aquellas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas, no serían equiparables a las construcciones de "especial importancia" definidas en la NCSE-94. A pesar de ello y viendo que se podría incurrir en el incumplimiento de la normativa legal se recomienda que las presas de categorías B y C sean consideradas como construcciones de especial importancia a la hora de definir el terremoto de cálculo.

3.4.1. Aceleración sísmica de cálculo

Siguiendo la idea de la NCSE-94, y cumpliendo con la filosofía que inspira el Reglamento sobre seguridad de presas y embalses, se recomienda que las presas de categoría B ó C se comprueben frente a la acción sísmica de un terremoto cuya aceleración horizontal de cálculo sea la siguiente:

$$a_c = 1.3 a_b$$

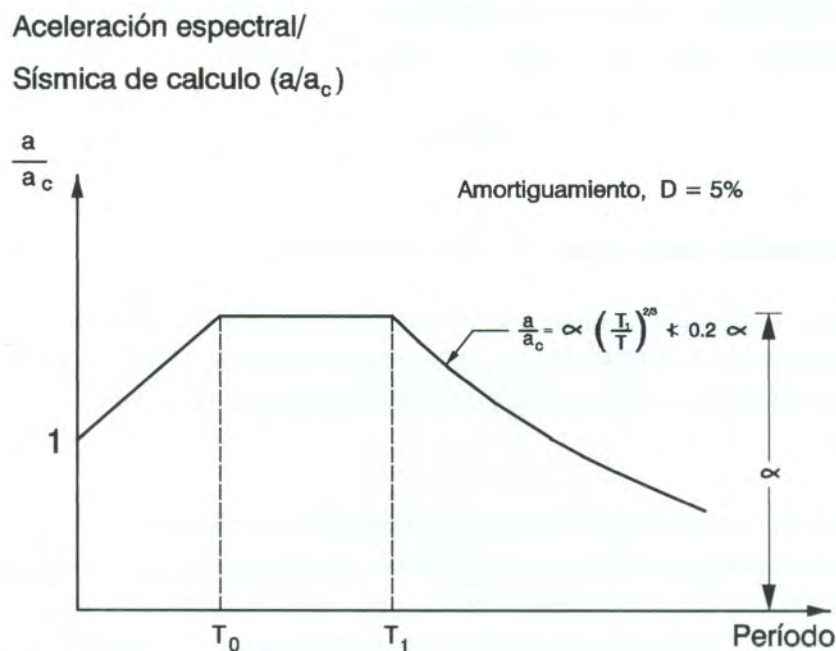
siendo " a_b " la aceleración sísmica básica que se indica en la NCSE-94 para cada punto del territorio nacional.

Para aquellos casos en que sea necesario utilizar la componente vertical de la aceleración, se supondrá que ésta es un 70% de la componente horizontal.

3.4.2. Espectro de respuesta y acelerogramas de cálculo

Atendiendo a lo que se recomienda en la guía n° 2 "Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas", las comprobaciones que hayan de realizarse pueden requerir o no la utilización de espectros de respuesta y/o de acelerogramas de cálculo.

En caso de ser necesario utilizar un espectro de respuesta se recomienda utilizar el que se define en la NCSE-94 con alguna modificación tal como se indica a continuación. (Fig. 3.2).



$$\alpha = (3C - 3.8)(K - 1.25) + 2.30$$

$$T_0 = 0.125C + 0.2K - 0.175$$

$$T_1 = \frac{0.215K(5C - 1)}{\alpha}$$

Fig. 3.2
Espectro de respuesta propuesto

Para otros amortiguamientos D:

$$\alpha = \left(\frac{D}{5} \right)^{0.4}$$

Valores de K en el mapa de la NCSE-94

Valores de C en la NCSE-94

El espectro de la NCSE-94 está basado en el mejor análisis que hoy puede hacerse de la sismicidad española y por lo tanto es difícilmente mejorable salvo que se haga un estudio especial que lo justifique en algún emplazamiento concreto.

La única corrección que se recomienda hacer en su aplicación a las presas está en la zona de altos períodos de vibración donde la información existente es menos segura y donde, además, pueden estar modos principales de vibración de algunas presas. En esa zona se ha optado, tal como ya queda recogido en el diagrama precedente, por una postura más conservadora que se indica en algunas publicaciones técnicas (variación de la aceleración espectral con $(T_1/T)^{2/3}$ en lugar de T_1/T) y donde además se ha fijado un umbral de aceleración espectral mínimo igual al 20% de la aceleración de cálculo (así se propone también en el mencionado borrador del Eurocódigo E-8).

En caso de ser necesario utilizar acelerogramas de cálculo para hacer las comprobaciones oportunas se recomienda utilizar acelerogramas sintéticos que se ajusten al espectro anterior. Se recomienda también que la comprobación se haga al menos con varios acelerogramas obtenidos por distintos procedimientos y utilizar como resultado para la comprobación de la seguridad un valor medio del que se obtenga con cada uno de ellos.

3.5. Acción sísmica para presas de Categoría A

El nuevo Reglamento sobre seguridad de presas y embalses indica que las presas de categoría A han de comprobarse frente a la acción de dos sismos diferentes. Uno que sería el mismo que se utilizaría en caso de tratarse de presas de categoría inferior y otro "seísmo extremo razonablemente superior".

El primero de los terremotos mencionados conviene que sea llamado Terremoto de Proyecto, el otro mayor conviene llamarlo Terremoto Extremo. Sobre estos dos conceptos y sobre la forma de evaluarlos se dan a continuación algunas recomendaciones.

3.5.1. Terremoto de proyecto

En la tecnología nuclear y también en la reciente tecnología de presas es común definir dos sismos de cálculo. Uno, más frecuente, se suele denominar como OBE (operating basis

Para otros amortiguamientos D:

$$\alpha = \left(\frac{D}{5} \right)^{0.4}$$

Valores de K en el mapa de la NCSE-94

Valores de C en la NCSE-94

El espectro de la NCSE-94 está basado en el mejor análisis que hoy puede hacerse de la sismicidad española y por lo tanto es difícilmente mejorable salvo que se haga un estudio especial que lo justifique en algún emplazamiento concreto.

La única corrección que se recomienda hacer en su aplicación a las presas está en la zona de altos períodos de vibración donde la información existente es menos segura y donde, además, pueden estar modos principales de vibración de algunas presas. En esa zona se ha optado, tal como ya queda recogido en el diagrama precedente, por una postura más conservadora que se indica en algunas publicaciones técnicas (variación de la aceleración espectral con $(T_1/T)^{2/3}$ en lugar de T_1/T) y donde además se ha fijado un umbral de aceleración espectral mínimo igual al 20% de la aceleración de cálculo (así se propone también en el mencionado borrador del Eurocódigo E-8).

En caso de ser necesario utilizar acelerogramas de cálculo para hacer las comprobaciones oportunas se recomienda utilizar acelerogramas sintéticos que se ajusten al espectro anterior. Se recomienda también que la comprobación se haga al menos con varios acelerogramas obtenidos por distintos procedimientos y utilizar como resultado para la comprobación de la seguridad un valor medio del que se obtenga con cada uno de ellos.

3.5. Acción sísmica para presas de Categoría A

El nuevo Reglamento sobre seguridad de presas y embalses indica que las presas de categoría A han de comprobarse frente a la acción de dos sismos diferentes. Uno que sería el mismo que se utilizaría en caso de tratarse de presas de categoría inferior y otro "seísmo extremo razonablemente superior".

El primero de los terremotos mencionados conviene que sea llamado Terremoto de Proyecto, el otro mayor conviene llamarlo Terremoto Extremo. Sobre estos dos conceptos y sobre la forma de evaluarlos se dan a continuación algunas recomendaciones.

3.5.1. Terremoto de proyecto

En la tecnología nuclear y también en la reciente tecnología de presas es común definir dos sismos de cálculo. Uno, más frecuente, se suele denominar como OBE (operating basis

earthquake) o DBE (design basis earthquake) en la bibliografía en inglés [R.6] y que podría traducirse como terremoto de operación o mejor y más simple como Terremoto de Proyecto, TP. El otro, menos frecuente, se considera en el apartado que sigue.

El criterio que lleva a definir el terremoto de proyecto es, normalmente, el período de retorno correspondiente. Dependiendo del riesgo aceptable este período puede oscilar entre 100 años (el ICOLD recomienda períodos de retorno bastante bajos) y más de diez veces esa cantidad.

No es excesivamente grave fijar un período de retorno más o menos alto. Importa conocerlo y, en consecuencia exigir después coeficientes de seguridad o garantías de comportamiento frente a él más o menos severas en función del período de retorno que se considere.

La aceleración sísmica de cálculo a_c que la NCSE-94 indica para las presas tiene teóricamente un período de retorno del orden de $T = 1.000$ años. Este período de retorno parece adecuado para el sismo de proyecto a considerar en la comprobación del comportamiento correcto de las presas que queden clasificadas en la categoría A. En consecuencia, el terremoto de proyecto para las presas de categoría A sería el mismo que se define en el apartado 3.4. para las presas de categoría inferior, excepto cuando estén situadas en zonas de sismicidad elevada en cuyo caso sería de aplicación lo que más adelante se indica en el apartado 3.6.

A diferencia de las presas de inferior categoría, en las de categoría A es necesario comprobar el comportamiento adecuado, además, con otro sismo que se define a continuación.

3.5.2. *Terremoto extremo*

En la práctica habitual del análisis de estructuras de alto riesgo se considera un sismo mayor que el de proyecto para hacer unas comprobaciones extremas. Aunque este sismo provoque daños graves debe existir cierta garantía de que no provoca una rotura catastrófica.

Este sismo se denomina en la tecnología nuclear americana con las iniciales SSE (Safe Shutdown Earthquake) que podría traducirse como terremoto de parada segura. También existe el concepto de MCE (maximum credible earthquake). Este terremoto se suele evaluar como el máximo posible o el máximo creíble, etc... Aquí, en esta guía, se recomienda denominar a este evento como "Terremoto extremo" TE.

La NCSE-94, tal como se ha indicado en el apartado 3.2.2., no considera el distinto tipo de riesgo implícito en las distintas categorías de presas ni tampoco explica como se puede definir "otro sismo extremo razonablemente superior" necesario para hacer ciertas comprobaciones en las presas de categoría "A". Conviene por lo tanto hacer alguna aclaración complementaria en este sentido.

Aquí se aclara que, salvo en las zonas de sismicidad elevada que más adelante se definen, se considera que un sismo es razonablemente superior al terremoto de proyecto cuando su probabilidad de ocurrencia es un orden de magnitud inferior (o su período de retorno un orden de

magnitud superior) que el sismo anterior. Esto es, sismos cuyo período de retorno esté en el entorno de los 10.000 años. La información existente en España no permite, sin estudios específicos, evaluar la aceleración sísmica de seísmos tan poco frecuentes. La fórmula de extrapolación temporal que recoge la NCSE-94 es necesariamente conservadora en las zonas de altos períodos de retorno.

En las zonas de sismicidad baja y moderada, el terremoto de período de retorno de 500 años es muy próximo al máximo terremoto físicamente posible. Es difícil que, en esas zonas, puedan producirse intensidades MSK que sean superiores en un grado a la correspondiente al sismo de 500 años. Un grado más, en esa escala, supondría duplicar la aceleración horizontal correspondiente.

Considerando estos aspectos y a falta de un estudio específico, se recomienda que se adopte como aceleración extrema para realizar las comprobaciones complementarias pertinentes de las presas de categoría "A" el siguiente valor:

$$a_c (\text{extrema}) = 2 a_b$$

Esta relación no es válida para las zonas de elevada sismicidad donde se debe realizar un estudio específico tal como se indica en el apartado 3.7.

Atendiendo a lo dispuesto en la NCSE-94, la aceleración sísmica vertical de cálculo será un 70% del valor correspondiente de la aceleración sísmica horizontal.

Los espectros de respuesta correspondientes a este sismo extremo y los acelerogramas de cálculo que pudieran ser necesarios, pueden obtenerse como se indica en el apartado 3.4.2.

3.6. Períodos de retorno y aceleraciones de cálculo según la clasificación de la presa y de las zonas sísmicas

Las Tablas 3.2 y 3.3 resumen los períodos de retorno y las aceleraciones de cálculo recomendadas, respectivamente, en las distintas situaciones de clasificación de las presas y de las zonas sísmicas que pueden presentarse.

3.7. Estudios sismotectónicos

Es difícil conocer la "acción sísmica" esperable en un determinado lugar con mejor precisión que la indicada en la Norma NCSE-94. De todas formas, en los casos especiales de presas de clase A en las zonas de alta sismicidad conviene y así se indica en el Reglamento sobre Seguridad, hacer un esfuerzo por conseguirlo.

Tabla 3.2
Resumen de los períodos de retorno
de los sismos de cálculo

Clasificación de la presa	Sismicidad		
	Baja	Media	Elevada
C	N.A.	TP = 1.000 años	
B			
A		TP = 1.000 años TE = 3.000 a 5.000 años	TP = 1.000 años TE = 10.000 años

Tabla 3.3
Resumen de las aceleraciones de cálculo
(componente horizontal)

Clasificación de la presa	Sismicidad		
	Baja	Media	Elevada
C	N.A.	TP, $a_c = 1.3 a_b$	
B			
A		TP, $a_c = 1.3 a_b$ TE, $a_c = 2 a_b$	E.E.

NA $\hat{=}$ No es necesaria la consideración explícita de la acción sísmica

TP = Terremoto de proyecto

TE = Terremoto extremo

a_b = Aceleración sísmica básica. NCSE-94

a_c = Aceleración de cálculo

EE = Estudio sismotectónico especial. Ver apartado 3.7.

Nota: Las comprobaciones a realizar y los daños admisibles en condiciones sísmicas pueden verse en la Guía nº 2 "Criterios de proyecto".

Para definir la acción sísmica con mayor detalle y, dentro de lo posible, con igual o mayor rigor que lo hace la Norma NCSE-94, se requiere la colaboración de expertos que tengan ya un conocimiento previo importante de estas materias. Los trabajos que deben llevarse a cabo para mejorar el conocimiento de la posible acción sísmica, serían, entre otros, los que se consideran en los epígrafes siguientes.

a) **Sismicidad local**

En la mayoría de los casos el elemento de mayor peso en la estimación de la acción sísmica esperable es la "sismicidad histórica". En muchos de ellos, también la instrumental.

Buena parte de la historia de los sismos españoles está registrada en varias publicaciones. La mayoría de los sismos importantes están bien catalogados en el archivo bibliográfico del IGN, donde existe una descripción suficiente de los parámetros principales. De todas formas, para mejorar el conocimiento en este aspecto se recomienda que, en estos estudios sismotectónicos, se haga una revisión específica de los sismos históricos más importantes y más próximos al lugar. Podría tratarse, a modo de ejemplo, de conocer los detalles de todos los sismos que hubieran podido provocar en el área de estudio una intensidad local igual o mayor que la máxima esperable menos un grado, en la escala MSK.

La revisión de la información histórica de un determinado sismo puede hacerse consultando distintos tipos de fuentes de información. A título de ejemplo se relacionan una serie de las más comunes, en la Tabla 3.4.

Un sismo se considera suficientemente bien revisado cuando se puede asegurar razonablemente que no existe más información relevante que la que ya se ha obtenido. Esa información debe ser leída y analizada por expertos y finalmente evaluada hasta concluir, con la precisión posible, acerca de las coordenadas del epicentro, la fecha de ocurrencia, la intensidad epicentral asignada, el posible mapa de isosistas y la duración de la fase fuerte.

Se recomienda que toda la información manejada de cada terremoto sea encuadrada conjuntamente con el análisis correspondiente de manera que, posteriormente, tanto los analistas como los directores de estos estudios puedan conocer los detalles del pasado sísmico de la región.

b) **Estudios geológicos locales**

El estudio geológico de la cerrada y el vaso de una presa debe ser suficientemente detallado como para no requerir ningún complemento a la hora de evaluar el efecto sísmico. En las presas de clase A situadas en las zonas de mayor sismicidad conviene ampliar estos estudios al objeto de conocer mejor la capacidad y la actividad de las fallas locales. Se trataría de profundizar en el conocimiento de las estructuras geológicas locales.

TABLA 3.4
Clasificación de los documentos utilizados para el análisis de la
sismicidad histórica

A. Fuentes de transmisión escrita

1. Específicas
 - 1.1. Lista de terremotos del Servicio de Sismología del IGN y organismos de las comunidades autónomas.
 - 1.2. Referencias bibliográficas de terremoto del Servicio de Sismología del IGN.
 - 1.3. Mapas de epicentros de las zonas de interés del IGN.
 - 1.4. Estudios monográficos sobre sismos determinados.
 - 1.5. Estudios de sismicidad de zonas geográficas concretas (Informes de sismicidad para emplazamientos de presas y C.N., ya existentes).
 - 1.6. Encuestas macrosísmicas (cuestionarios enviados por el I.G.N. a las zonas afectadas).
2. Inespecíficas
 - 2.1. Obras bibliográficas
 - 2.1.1. Catálogos bibliográficos
 - 2.1.2. Tratados de geografía
 - 2.1.3. Estudios demográficos
 - 2.1.4. Tratados de historia
 - 2.1.5. Estudios monográficos sobre Instituciones Civiles
 - 2.1.6. Estudios sobre temas urbanos
 - 2.1.7. Estudios monográficos sobre construcciones civiles de interés histórico-artístico
 - 2.1.8. Tratados sobre Instituciones Eclesiásticas
 - 2.1.9. Almanques, calendarios, anuarios y manuales estadísticos antiguos
 - 2.1.10. Estudios monográficos sobre calamidades públicas, exceptuando terremotos
 - 2.1.11. Observaciones de fenómenos meteorológicos y astronómicos
 - 2.1.12. Referencias de caídas de meteoritos
 - 2.1.13. Epistolarios
 - 2.1.14. Libros de viajes
 - 2.1.15. Trabajos académicos
 - 2.1.16. Novelas y narraciones
 - 2.1.17. Poesías
 - 2.1.18. Novenas y jaculatorias
 - 2.2. Publicaciones periódicas
 - 2.2.1. Prensa periódica
 - 2.2.2. Publicaciones de sociedades científicas y técnicas: revistas, boletines, memorias, etc
 - 2.3. Fondos de archivos
 - 2.3.1. Archivos históricos de gran ámbito territorial
 - 2.3.2. Archivos de Corporaciones Civiles
 - 2.3.3. Archivos de Instituciones Eclesiásticas
 - 2.3.4. Archivos de Instituciones Militares

B. Fuentes de transmisión oral

1. Tradiciones transmitidas oralmente
2. Entrevistas con testigos presenciales

C. Fuentes arqueológicas

1. Inscripciones en lápidas
2. Restos de edificios
3. Medallas y monedas

Se recomienda que el estudio geológico local analice, primero, la capacidad y la actividad de fallas que pueden cruzar la cerrada para evaluar el riesgo de fallamiento superficial. Después las fallas más alejadas. Dada la sismicidad de España no se considera necesario extenderse más allá de 100 Km de la cerrada en el estudio específico de la capacidad y actividad de las fallas.

A efectos de nomenclatura se entiende aquí que una falla es **capaz** cuando cumple alguna de las tres condiciones siguientes:

- 1) Movimiento en la superficie, o cerca de ella, al menos una vez en los últimos 35.000 años, o un movimiento de naturaleza recurrente en los últimos 500.000 años.
- 2) Macrosismicidad determinada instrumentalmente, con registros de suficiente precisión, que permitan demostrar una relación directa con la falla.
- 3) Relación estructural con otra falla capaz definida por alguna de las características anteriores (1) ó (2), de forma que un movimiento en una de las fallas pueda ser acompañado por un movimiento en la otra falla.

Del mismo modo, se entiende que una falla es **activa** cuando ha tenido algún movimiento dentro del régimen tectónico actual.

Es evidente que todas las fallas activas son también capaces. Las fallas activas, según se recomienda aquí que se considere, serían aquellas fallas capaces que tienen síntomas más claros de movimientos recientes. La diferencia semántica puede tener cierta importancia. Así como una falla activa puede tener cierta repercusión en la definición de terremotos de proyecto (TP), dado que su período de retorno en la generación de sismos puede ser relativamente breve, las fallas capaces, pero no activas, no habrían sufrido movimientos tan recientes y en consecuencia deberían afectar menos en la definición del terremoto de proyecto, únicamente podrían afectar notablemente en la evaluación del terremoto extremo, TE.

Para calificar una falla como activa o capaz (en otro caso se denominaría "extinguida") es preciso conocer el régimen tectónico actual y datar su último movimiento. Los estudios necesarios para definir el régimen tectónico actual requieren la colaboración de especialistas en neotectónica.

Los estudios de datación requieren también la intervención de especialistas, en este caso más dispares ya que existen diversos procedimientos de datación de movimientos [R.7], tales como los siguientes:

- Métodos cronográficos (paleosismicidad, paleontología, etc)
- Datación absoluta del carbono 14

- Datación absoluta Potasio-Argón
- Datación absoluta Uranio 235-238
- Datación relativa mediante termoluminiscencia
- Estudios de paleomagnetismo

El procedimiento más directo y preciso para conocer la actividad de una determinada falla, sin embargo, es la observación directa de su actividad mediante una red de microsismicidad (o a partir de datos instrumentales que pudieran existir). Esta red, instalada con fines de estudios previos o de proyecto, puede servir después como red de auscultación de posibles temblores originados por el llenado.

Además de estudiar la capacidad y la actividad de las posibles fallas que puedan afectar a la peligrosidad de la cerrada, deben hacerse los estudios teóricos necesarios para evaluar la magnitud del terremoto que podría causar su movimiento y evaluar el riesgo de ruptura o fallamiento superficial a que pudiera dar lugar.

c) Características de los terremotos

Para analizar el comportamiento de la presa, el embalse y sus estructuras anejas, el proyectista requerirá conocer las características del terremoto extremo así como los de otros posibles terremotos más frecuentes.

El concepto de "terremoto extremo" ya sea probable o sea razonablemente posible, es complicado. Su determinación es poco precisa y por eso se suele recurrir a especialistas en el tema. El terremoto extremo puede determinarse por distintos procedimientos, ninguno de ellos suficientemente avalado por la experiencia ni universalmente admitidos por la comunidad técnica.

En esta Guía se quieren mencionar algunas aproximaciones de distinta filosofía para que sean de general conocimiento para los ingenieros no especialistas, implicados en esta tarea. Entre los métodos de análisis que pueden conducir a la definición del "terremoto extremo" existen los siguientes.

- **Método determinista.**- Parte de la sismicidad acaecida (intensidades, magnitudes y leyes de atenuación deducidas de los mapas de isosistas) para evaluar la intensidad local máxima que puede ocurrir en el emplazamiento.
- **Método probabilista.**- Parte, igualmente, de la misma sismicidad conocida, la representa por una serie de ecuaciones con parámetros aleatorios y conduce a una relación matemática intensidad-período de retorno aplicable al emplazamiento. Este procedimiento se ha utilizado para confeccionar el mapa de riesgo de la Norma NCSE-94 y no estaría justificada su reaplicación a nuevos casos salvo que se modifiquen, en algún modo significativo y justificado, los datos de partida. Se recomienda que si se hace esto se consideren como variables aleatorias todas las posibles incertidumbres.

- **Sistema experto.**- Parte también de la misma sismicidad histórica y plantea todas las posibles dudas sobre su interpretación, sobre las posibles variantes alternativas y cada una es sopesada y ponderada mediante el conocimiento de una serie de expertos.

Los dos primeros procedimientos se basan en la "continuidad" de la sismicidad (modelos de Poisson). Existen también métodos de análisis basados en la hipótesis, quizás más realista, de "discontinuidad" que son sólo aplicables cuando se dispone de una observación instrumental precisa del movimiento de la falla o fallas causantes de la actividad sísmica, su aplicación en otros casos no es viable.

Aunque no está claramente aceptado, se suele convenir, y así se recomienda aquí, que el terremoto cuyo período de retorno teórico alcanza 10.000 años en los métodos probabilistas, es el "terremoto extremo".

Aparte de la intensidad local que pueda provocar el terremoto extremo, interesa conocer otras características cara a las comprobaciones posteriores. Son las relativas a su contenido de frecuencias y su duración. Estas características suelen estimarse en función de los datos instrumentales de aceleración obtenidos en la observación de temblores en otros lugares (en España apenas existen registros de sismos fuertes) cuya tectónica se asemeje a la del emplazamiento en estudio.

d) Características de los terremotos más frecuentes

La comprobación de la seguridad sismorresistente se hará siguiendo los métodos que se indiquen en los criterios del proyecto. En general, esa comprobación requerirá el conocimiento de las características de otros terremotos más frecuentes.

Los estudios de sismicidad realizados para determinar el terremoto extremo permitirán conocer las características de otros terremotos más frecuentes. Los expertos que realicen el estudio especial de la acción sísmica que se viene considerando deben describir, entre sus resultados, las características (aceleración máxima, contenido en frecuencias y duración, principalmente) de los terremotos de distintos períodos de retorno.

En cada obra y para cada aspecto en estudio, puede ser más crítico o condicionante un terremoto con aceleración menor y mayor contenido en frecuencias bajas que otro de mayor aceleración y mayor contenido en frecuencias altas. También puede ocurrir lo contrario. Por este motivo, la descripción de los terremotos esperables es un tema de importancia que debe detallarse lo más posible en el contexto de los estudios sísmicos.

e) Efectos de amplificación local

Normalmente los parámetros que definen un terremoto se estiman para condiciones de terreno llano y firme. El efecto de la amplificación local debida a la topografía o a la falta

de compacidad del terreno es un tema que compete al proyectista o analista. El reconocimiento geológico-geotécnico debe proporcionar, sin embargo, la información necesaria para realizar estos estudios.

Los estudios de amplificación local requieren conocer la distribución de la velocidad de propagación de las ondas de corte hasta una profundidad tal que éstas superen ya las de un terreno firme. A estos efectos se puede suponer que esa velocidad es de $v_s = 800$ m/s.

Si los reconocimientos geológico-geotécnicos no han aportado esta información y se requiere un estudio sísmico especial, será preciso realizar los trabajos oportunos para aportar esta nueva información. Generalmente el método más adecuado será la realización de ensayos cross-hole en sondeos suficientemente profundos. En ocasiones, cuando la profundidad es excesiva, los expertos pueden proponer otros métodos indirectos alternativos.

f) Espectros de respuesta y acelerogramas de cálculo

Conocidas las características de los terremotos que pueden afectar a la presa, al embalse y a sus obras anejas se deben concretar los datos de manera que se pueda proceder a realizar cálculos comprobatorios.

Dependiendo del tipo de cálculo a realizar puede ser necesario uno u otro tipo de información. Puede ser conveniente utilizar espectros de respuesta elásticos para el análisis modal-espectral de una presa de fábrica o puede ser conveniente un acelerograma para el cálculo no lineal, en el dominio del tiempo, de una presa de materiales sueltos.

El asunto de la definición de espectros de respuesta y acelerogramas de cálculo es más propio de los expertos en cálculo que de los geólogos, sismólogos, historiadores, geotécnicos, etc, que intervienen en la definición de la acción sísmica. Por ese motivo se cree más conveniente que estos datos concretos sean definidos no sólo por el equipo de trabajo sismotectónico sino también con la colaboración de los proyectistas, que ya están familiarizados con la obra.

La Norma NCSE-94 define un procedimiento de estimación del espectro de respuesta que se considera aceptable para aplicarlo, en la forma que se indica en el apartado 3.4.2, también al caso de las presas de clase A en zonas de sismicidad elevada. A falta de mejor información, tal procedimiento sería aplicable.

3.8. Estudios geológico-geotécnicos adicionales

En las zonas de sismicidad baja, en las que no es necesario considerar el efecto sísmico, lógicamente no será necesario hacer ninguna investigación adicional relativa al comportamiento dinámico.

En las zonas de sismicidad media no serán necesarios, en general, cálculos de comprobación complejos que requieran la caracterización dinámica de los materiales (cerrada y cuerpo de presa) excepción hecha, como en el caso anterior, de materiales que puedan ser especialmente sensibles al efecto sísmico. En cualquier caso, si se tratara de presas de categoría A se recomienda que cualquier material que sea susceptible a las vibraciones (suelos del cimiento arenosos, filtros de presas de materiales sueltos, etc...) sean ensayados en laboratorio para investigar su comportamiento dinámico. Este mismo tratamiento debe hacerse con presas de categoría B o C en zonas de sismicidad elevada.

En el apartado anterior ya se han explicado los reconocimientos geológicos que deben hacerse específicamente cuando la zona es de elevada sismicidad y la presa correspondiente es de categoría A.

En general, la realización de un estudio sismorresistente de una presa de categoría A en zona de sismicidad elevada requerirá el conocimiento de las características dinámicas de los materiales involucrados en el cálculo. Estas características deben investigarse en el contexto de los reconocimientos geológico-geotécnicos. Para los materiales rocosos, en general, será suficiente con conocer la velocidad de propagación de las ondas de corte en campo. Velocidades que pueden determinarse como se dice en el Capítulo anterior de esta guía mediante adecuados reconocimientos geofísicos. Para las rocas blandas y sobre todo para los suelos, será preciso determinar, además, su resistencia, su deformabilidad y su amortiguamiento en condiciones dinámicas. Estos datos se pueden obtener mediante ensayos de laboratorio tales como:

- Columna de resonancia (deformación y amortiguamiento)
- Corte simple cíclico (deformación, amortiguamiento y resistencia)
- Triaxial dinámico (resistencia)

En el caso de materiales de construcción de elementos esenciales de presas de tierra (filtros, núcleos y espaldones) estos ensayos deben completarse con reconocimientos geofísicos in situ sobre áreas de ensayo, siempre que sea posible.

La resistencia a la licuefacción de las arenas para los filtros y algunos cimientos arenosos de las presas de tierra es un asunto de importancia que puede estudiarse realizando ensayos de corte simple dinámicos o, en su defecto, ensayos triaxiales dinámicos, con los oportunos factores de corrección que reproduzcan en el laboratorio, de manera lo más fielmente posible, las condiciones tensionales que se esperan in situ.

3.9. Observación de la sismicidad inducida

El llenado del embalse supone una carga adicional sobre la corteza terrestre. Las rocas que encierran el vaso han de soportar un nuevo peso y han de encontrar un nuevo equilibrio; es un proceso de acomodación que puede implicar ciertos movimientos relativos y como consecuencia cierta actividad sísmica.

No es de esperar que la actividad sísmica inducida por el llenado de un embalse suponga un peligro mayor que la actividad sísmica natural. Los sismos que se suelen generar son de magnitud menor. De todas formas, en zonas especialmente activas, donde existen fallas en movimiento (activas) conviene considerar este efecto y dedicarle cierta atención.

Parece prudente que en las presas de categoría A situadas en zonas de sismicidad elevada se establezca una red de observación del fenómeno de la sismicidad inducida por el llenado del embalse. La forma de observación de esta actividad está estrechamente ligada a los resultados del estudio sismotectónico del que se habla en el apartado 3.6.

En los estudios sismotectónicos que han de realizarse para todos los emplazamientos de presas de categoría A en zonas de sismicidad elevada, deben identificarse las fallas capaces de producir un terremoto y dentro de ellas las fallas activas. Una vez identificadas estas fallas conviene definir la red de observación correspondiente que permita detectar la posible actividad sísmica. En los casos conocidos de observación no siempre ha resultado fácil identificar las fallas causantes de los movimientos sísmicos y como consecuencia, la red de observación ha consistido en una serie de estaciones sísmicas distribuidas de manera más o menos homogénea en el entorno de la obra.

El proyecto específico de la red de observación debe realizarse en el contexto del estudio sismotectónico de manera que se preste especial atención a aquellas fallas o a aquellas zonas donde se presuma mayor actividad sísmica.

La red de observación de la sismicidad debe instalarse antes del llenado del embalse de manera que se pueda tener un contraste entre la actividad sísmica natural antes del llenado y la correspondiente tras el llenado del embalse.

La tarea del IGN en la observación de la actividad sísmica del territorio nacional no debe ser ajena a esta otra de la observación de la actividad sísmica en el entorno de los embalses. Siempre sería razonable que estas redes de observación fueran gestionadas y/o mantenidas por dicho Instituto.

No obstante, en la estructura de la propia presa deben disponerse, en su caso, equipos de auscultación sísmica. Así lo especifica la guía de criterios de proyecto. Estos equipos pueden ser acelerómetros triaxiales que deben instalarse en puntos estratégicos del cuerpo de presa y/o de la cerrada. Tratarán de medir el movimiento sísmico en la base de la presa y en los puntos de mayor interés (estribos, coronación).

Tanto la red de observación de la actividad sísmica como la auscultación dinámica de la propia presa son asuntos que se comentan también en las Guías nº 2.- "Criterios para Proyecto de Presas y sus Obras Anejas" y nº 7.- "Auscultación de las Presas y sus Cimientos".

4.

PROSPECCIÓN DE MATERIALES PARA PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

4.1. Introducción

El objeto general de la investigación de materiales es obtener suficiente información sobre estos para satisfacer las necesidades de su utilización en la presa que se considere. Debe quedar definido que existen materiales de características geotécnicas satisfactorias, a distancias razonables y en cantidades suficientes para la construcción de la presa.

Como en el caso de los estudios geológicos y geotécnicos (Capítulo 2 de esta Guía), en la investigación de los materiales se procederá secuencialmente de manera que se alcance un conocimiento progresivo de los materiales, optimizando el coste y plazo de la investigación. Este enfoque del estudio se considera muy recomendable porque el progresivo conocimiento de la geotecnia del emplazamiento y de los materiales puede dar lugar a decisiones que afecten al Proyecto de la presa y éstas, de manera recíproca, pueden influir en las investigaciones geotécnicas.

4.2. Requisitos básicos que han de cumplir los préstamos

Hace algunas décadas se tenía la idea de que se precisaba disponer de materiales de características determinadas para la construcción de una presa de materiales sueltos. Hoy día se acepta que puede utilizarse casi cualquier material situado en las proximidades del emplazamiento de la presa pero, naturalmente, adaptando el Proyecto a esos materiales, lo que puede convertirlo, si los materiales no son buenos, en antieconómico.

Deben existir, no obstante, unos pocos materiales básicos que se encuentren disponibles en grandes cantidades en las cercanías de la cerrada para que la presa se pueda construir en condiciones económicas satisfactorias. Estos materiales constituyen la base de cada alternativa de Proyecto, mientras que otros materiales, como los filtros, pueden no ser críticos en el sentido de que sea necesaria su búsqueda a grandes distancias, sin que esto tenga consecuencias económicas decisivas en el Proyecto.

Los materiales naturales pueden desempeñar, dentro del cuerpo de presa, diferentes funciones básicas: impermeabilización, resistencia, filtro, drenaje y protección externa de la presa, aunque en algunos casos, como en las presas homogéneas, un mismo material pueda cumplir más de una de estas funciones. Este aspecto funcional que deben cumplir los materiales hace que, entre los disponibles en la naturaleza, unos sean más aptos que otros para cada una de las funciones mencionadas. La idoneidad de los materiales a emplear estará siempre condicionada a que los rellenos ejecutados con ellos se puedan controlar, de manera que sus características de resistencia, deformabilidad, permeabilidad y estabilidad interna queden dentro de los márgenes que aseguren el correcto comportamiento de la presa.

La figura 4.1 constituye un ejemplo de los materiales más frecuentemente utilizados en una presa de materiales sueltos.

Las características de los materiales a utilizar deben determinarse mediante ensayos de laboratorio que se describen en el Anejo II.

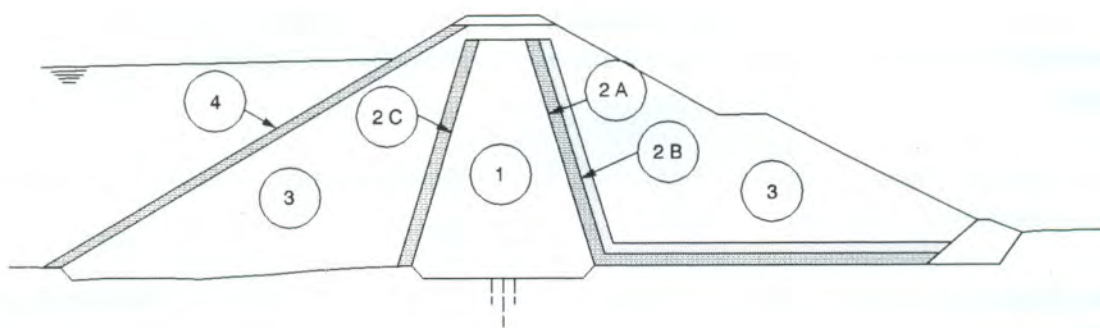
4.2.1. Tipos de materiales

Atendiendo a su disposición y funciones dentro del cuerpo de la presa, los materiales naturales habitualmente empleados en las presas de materiales sueltos son:

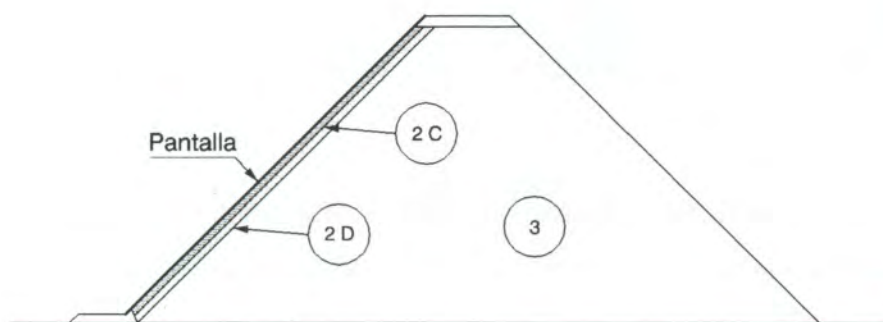
- materiales impermeables para núcleo o para presas homogéneas
- materiales granulares para espaldones
- materiales granulares para filtros y drenes
- escollera para espaldones
- escollera de protección

Estos materiales constituyen masas rocosas y depósitos sueltos. Una descripción detallada de estos depósitos puede encontrarse en las R.7 y R.23.

Es conveniente disponer de un método para identificar y clasificar los suelos y las rocas en categorías o grupos que tengan propiedades similares para que todos los involucrados en los trabajos hablen un lenguaje común que facilite el intercambio de datos y experiencias.



a) PRESA DE NÚCLEO CENTRAL



b) PRESA CON PANTALLA DE HORMIGÓN O ASFÁLTICA

- 1.- Material impermeable, núcleo
- 2A.- Filtro
- 2B.- Dren
- 2C.- Filtro aguas arriba (Núcleo y apoyo de la pantalla)
- 2D.- Capa de transición
- 3.- Material resistente, espaldones
- 4.- Protección

Fig. 4.1**Esquema de los tipos de materiales en una presa**

Los suelos se pueden clasificar de diversas formas [R.2 - Cap. X] siendo los dos tipos de clasificaciones de mayor interés los siguientes: 1) clasificaciones que atienden básicamente a la composición del suelo y a algunas propiedades concretas y medibles, entre las que destaca por su amplia aceptación el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) y 2) las clasificaciones denominadas genéticas que se fundan en el proceso por el cual han llegado a formarse los suelos (suelos residuales, suelos coluviales, suelos aluviales, sedimentos eólicos, etc).

En la clasificación USCS los suelos se clasifican atendiendo al tamaño de las partículas (estableciendo dos divisiones principales: partículas gruesas, arenas y gravas, y partículas finas, limos y arcillas), a la granulometría del suelo y a la plasticidad de los finos.

Los suelos que contienen grandes cantidades de limo y arcilla son problemáticos porque cambian sus propiedades físicas con la variación del contenido de humedad o al alterar su estado natural.

Los limos son finos, plásticos o no plásticos, inestables en presencia de agua. Son generalmente poco permeables y difíciles de compactar.

Las arcillas son materiales finos y plásticos. Presentan poca resistencia a la deformación cuando están saturados y son impermeables y difíciles de compactar cuando tienen alto contenido de humedad. Cuanto mayor es su límite líquido son más compresibles.

En la Tabla 4.1 se indican algunas propiedades de los grupos de suelos del USCS. La relación entre las propiedades del suelo y su clasificación es útil para el ingeniero que desea tener una orientación sobre el previsible comportamiento del suelo que ha clasificado.

TABLA 4.1
Propiedades de los grupos de suelos de la Clasificación USCS

NOMBRES DE GRUPOS DE SUELOS	SÍMBOLOS DE GRUPO	PROPIEDADES IMPORTANTES			TRABAJABILIDAD COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN
		Permeabilidad compactado	Resistencia al corte compactado y saturado	Compresibilidad, compactado y saturado	
Gravas bien graduadas, mezclas arena-grava, pocos o ningún fino	GW	Permeable	Excelente	Despreciable	Excelente
Gravas mal graduadas, mezclas arena-grava, pocos o ningún fino	GP	Muy permeable	Buena	Despreciable	Buena
Gravas limosas, mezclas de limo, arena y grava mal graduada	GM	Semipermeable a impermeable	Buena	Despreciable	Buena
Gravas arcillosas mezclas de arcilla, arena y grava mal graduada	GC	Impermeable	Buena a media	Muy baja	Buena
Arenas bien graduadas, arenas gravelosas, pocos o ningún fino	SW	Permeable	Excelente	Despreciable	Excelente
Arenas mal graduadas, arenas gravelosas, pocos o ningún fino	SP	Permeable	Buena	Muy baja	Mediana
Arenas limosas, mezclas de limo y arena mal graduada	SM	Semipermeable a impermeable	Buena	Baja	Mediana
Arenas arcillosas, mezclas de arcilla y arena mal graduada	SC	Impermeable	Buena	Baja	Buena
Limos inorgánicos y arenas muy finas, arenas finas arcillosas o limosas con baja plasticidad	ML	Semipermeable a impermeable	Mediana	Media	Mediana
Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravelosas, arcillas arenosas, arcillas limosas	CL	Impermeable	Mediana	Media	Buena a mediana
Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	OL	Semipermeable a impermeable	Mala	Media	Mediana
Limos inorgánicos, suelos arenosos o limosos finos micáceos	MH	Semipermeable a impermeable	Mediana a mala	Alta	Baja
Arcillas inorgánicas de alta plasticidad	CH	Impermeable	Mala	Alta	Baja
Arcillas orgánicas de plasticidad media o alta	OH	Impermeable	Baja	Alta	Baja
Turba y suelos muy orgánicos	PT	-	-	-	-

Para la clasificación geológica de las rocas se recomienda utilizar, como criterio general, la clasificación de la IAEG, incluida en el Anejo I de esta Guía.

Actualmente se admite que todo tipo de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas) se pueden utilizar como escollera compactada [R.4].

Las rocas muy alteradas y fracturadas con índices físico-mecánicos reducidos, se consideran rocas blandas. Algunos de estos materiales no pueden considerarse realmente escolleras porque producen un relleno en el que los fragmentos de tamaño inferior a una pulgada son muy abundantes y al compactarlos dan como resultado cuerpos de presa que se comportan como terraplenes.

4.2.2. *Impacto ambiental*

La utilización de un préstamo estará siempre condicionada por la afección medioambiental que pueda producir su explotación, cuya evaluación deberá realizarse desde la fase inicial de la investigación. La afección medioambiental es un factor importante a tener en cuenta en la selección de préstamos y alguno de estos puede resultar rechazado en beneficio de otros de peores características, si aquella afección resulta ser significativa.

Es preferible que el préstamo esté localizado dentro del vaso, aunque en niveles del mismo que no resulten inundados durante la construcción de las obras. De no ser así, deberá procederse, una vez concluida la explotación, a la restauración medioambiental adecuada para recuperar el entorno natural.

Es también muy importante prever los posibles desechos de material de préstamos no utilizable para lo que deben habilitarse las zonas adecuadas para su depósito y el tratamiento medioambiental conveniente de estos depósitos.

La afección medioambiental de la explotación de un préstamo no debe limitarse al entorno de éste sino que también debe contemplar aspectos como la afección de las obras de acceso al préstamo y la producida por el transporte del material. En ocasiones, se han rechazado préstamos de material de buena calidad porque el transporte de aquél debía atravesar poblaciones, causando los correspondientes trastornos a los habitantes.

4.3. *Investigación de las zonas de préstamo*

Al mismo tiempo que se realizan los estudios geológicos y geotécnicos de la cerrada y embalse es necesario proceder a la búsqueda de materiales en las proximidades del emplazamiento. Por ello, las diferentes etapas de investigación de materiales tendrán una correspondencia con los estudios geológico-geotécnicos del vaso y la cerrada.

La investigación de los materiales debe iniciarse en las proximidades de la cerrada, considerando como posible préstamo para la construcción de la presa los materiales procedentes de las

excavaciones. Después de las zonas más próximas, puede ser necesario estudiar otras más alejadas hasta que se encuentren materiales adecuados para las diferentes necesidades de la presa. Deben estudiarse las características geotécnicas de los materiales, volúmenes disponibles, distancia y accesos a los yacimientos, impacto ecológico de su explotación, etc.

Las zonas a investigar deben ser las que puedan proporcionar volúmenes de 1,5 a 2 veces los necesarios si la investigación es detallada, ampliándose estos valores en reconocimientos previos.

Dentro del proceso de investigación, los métodos aplicables se interrelacionan entre sí y la información obtenida de uno condiciona, muchas veces, el alcance de otros. También es recomendable que exista redundancia de resultados en la definición de los parámetros esenciales de caracterización de los materiales.

En relación con la intensidad de la investigación a realizar se recomienda considerar los criterios establecidos en 2.1.1.

El equipo humano que realizará los trabajos debe tener suficiente cualificación para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Es insustituible la visita a campo del personal que dirige la investigación para definir los diferentes métodos a aplicar.

Los métodos más usuales de investigación de materiales son los siguientes [R.23]:

- Investigación sobre planos geológicos, en especial los de rocas industriales.
- Fotografías aéreas.
- Datos sobre canteras del Instituto Geotecnológico y Minero y del Ministerio de Fomento.
- Investigación sobre planos topográficos.
- Métodos geofísicos.
- Calicatas, zanjas y pozos.
- Sondeos mecánicos.

La utilización de todos, o sólo algunos de estos métodos de investigación, en mayor o menor medida, dependerá del volumen y categoría de la presa y de que los yacimientos y las propiedades de los materiales queden bien definidos. En el Anejo I se describen algunos de estos métodos.

4.3.1. Identificación del material

Antes de proceder a realizar ninguna exploración específica, debe recopilarse y analizarse toda la información disponible como planos geológicos y geotécnicos, fotografía aérea, informes existentes, mapas de rocas industriales, etc. Haciendo un examen minucioso de toda esta información, generalmente se localizarán las áreas que deben examinarse en el campo.

Los datos obtenidos en la fase inicial de investigación serán fundamentalmente descriptivos y están basados en el análisis de la documentación existente, complementada con reconocimientos

de campo realizados por un especialista. La investigación en esta primera fase debe conducir a un conocimiento de las condiciones generales de los posibles depósitos de materiales en sitios alternativos dentro del área de proyecto. Puesto que esta etapa de investigación está basada fundamentalmente en reconocimientos superficiales, las áreas de préstamo deben ser considerablemente mayores que las realmente necesarias. En la Fig. 4.2 se incluye un esquema de la ubicación de posibles préstamos para la construcción de una presa. Complementariamente con el reconocimiento superficial de campo es recomendable realizar algunas calicatas en los depósitos considerados para obtener un conocimiento más preciso de los materiales realizando ensayos de laboratorio de identificación (granulometría, límites, humedad natural) y de compactación. El número de calicatas y ensayos será el mínimo necesario para poder realizar una comparación preliminar de los préstamos y de los tipos de suelo disponibles.

La búsqueda de materiales adecuados para escollera, canteras, se efectúa siguiendo el mismo procedimiento general que para la búsqueda de suelos. Después de estudiar toda la información disponible de planos geológicos, fotografía aérea, mapas de rocas industriales, etc, se podrán reflejar en los planos las canteras existentes, los afloramientos de roca y otras zonas con probabilidades de ser utilizadas para, conjuntamente con el reconocimiento de campo, dejar definidas las posibles canteras a utilizar en el entorno de la presa.

Posteriormente, entre los posibles préstamos considerados, se determinarán los más convenientes y se ampliará su estudio para tener un conocimiento más preciso de los mismos.

La exploración se completará en fases progresivas mediante calicatas o sondeos, espaciados considerablemente, para obtener la identificación más precisa. Una vez identificados los materiales predominantes se complementará la exploración con calicatas intermedias para definir una cuadrícula que permita un conocimiento detallado de los materiales y su distribución. La información puede completarse, cuando se estime conveniente, con la excavación de zanjas, sondeos mecánicos y geofísica. En general, serán más útiles los sondeos en préstamos de gran espesor y las calicatas en yacimientos extensos pero poco profundos.

Para las escolleras la exploración preliminar consistirá en un reconocimiento superficial de los afloramientos y puede resultar necesaria complementarla con la ejecución de algún sondeo.

En todo este proceso debe realizarse la descripción de las calicatas o perforaciones en base al examen de los materiales recuperados. (Ver Anejo I). Las exploraciones realizadas deben tener el apoyo topográfico necesario para poder definir los perfiles de los préstamos.

Uno de los objetivos esenciales de la investigación de materiales debe ser conocer sus características geotécnicas. Para ello es necesario realizar ensayos de laboratorio en las muestras de suelo obtenidas.

Los ensayos a realizar pueden ser de identificación, estado natural del material, propiedades mecánicas, de compactación y de comportamiento ante la carga de agua.

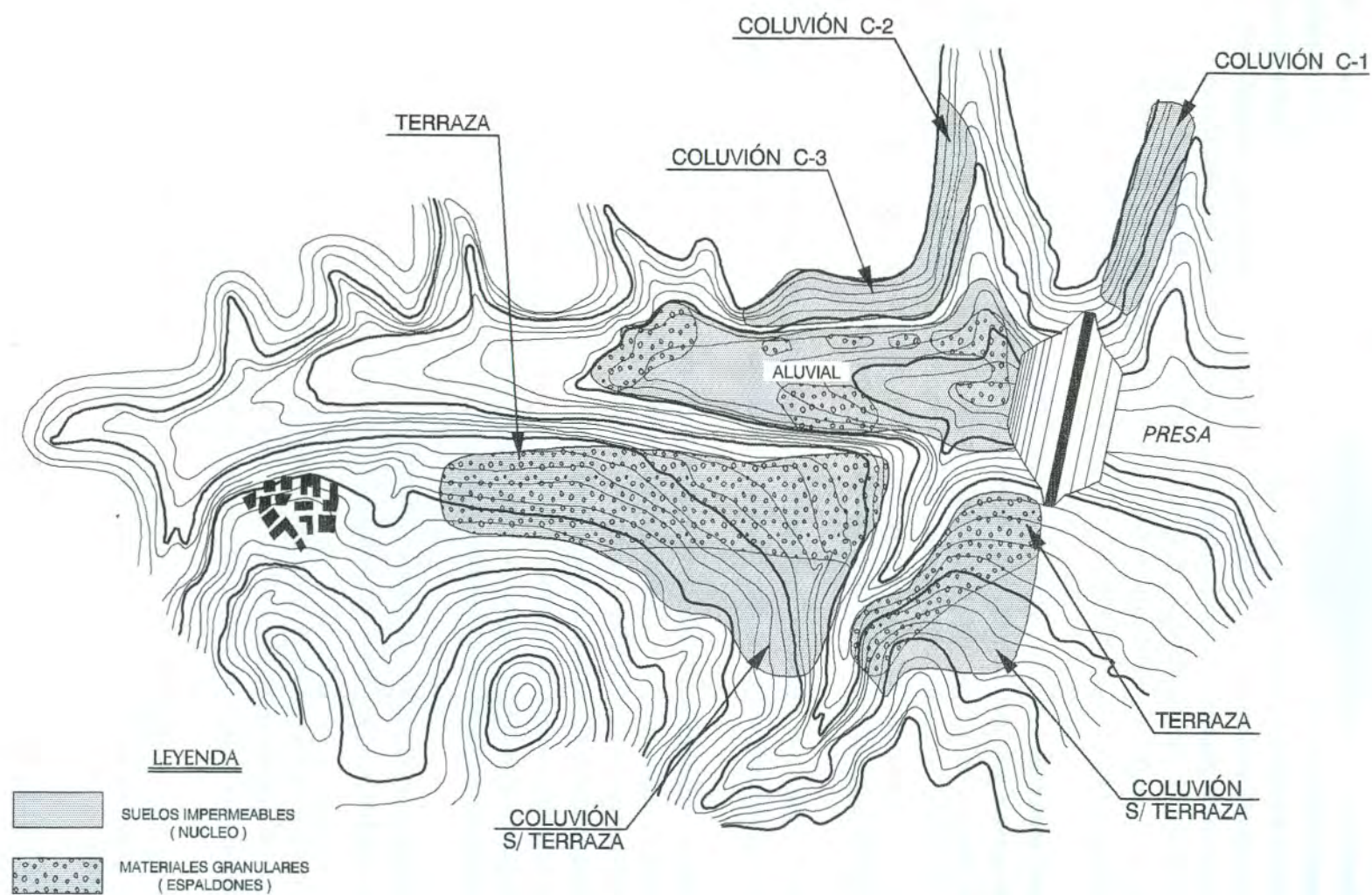


Fig. 4.2
Planta de ubicación de préstamos

Las muestras deben ser representativas puesto que, de no serlo, pueden conducir a conclusiones erróneas. Esto es esencial por la variabilidad de los depósitos naturales. Es relativamente fácil obtener muestras representativas en calicatas, zanjas y afloramientos del terreno porque pueden observarse visualmente los diferentes tipos de materiales. En los sondeos helicoidales no se pueden obtener muestras representativas. Las muestras que se obtienen suelen ser alteradas y pueden ser representativas de un solo estrato, o tipo de suelo, o de varios.

La información de humedad y densidad naturales es esencial para el Proyecto de la presa. La primera orienta sobre el tratamiento de humectación o desecación que deberá darse a los materiales impermeables en función de las condiciones de colocación que el Proyecto establezca. La densidad natural indicará las condiciones de expansión o reducción de los materiales del préstamo en relación con su puesta en obra.

Los ensayos de laboratorio que conviene realizar^{*} son distintos para los diferentes tipos de materiales a emplear en el cuerpo de presa, entre ellos los siguientes:

a) Materiales para núcleo

- Granulometría por tamizado y por sedimentación.
- Límites de Atterberg.
- Contenido en sulfatos, carbonatos y materia orgánica.
- Composición mineralógica de las arcillas.
- Peso específico de las partículas.
- Densidad seca y humedad natural.
- Ensayos de compactación^{**}
- Permeabilidad en muestras compactadas al Proctor Normal.
- Ensayos triaxiales o de corte directo en muestras compactadas al Proctor Normal.
- Dispersividad.
- Ensayos edométricos.
- Ensayos de expansividad y colapso.

b) Filtros y drenes

- Granulometría por tamizado.
- No plasticidad de los finos.
- Contenido de materia orgánica.
- Contenido de elementos blandos, arcilla, sulfatos y mica.
- Coeficiente de forma de los gruesos (para drenes).
- Ensayo de Vaughan (o de falta de cohesión).

^{*} Las muestras se suelen preparar en las condiciones esperables en la obra (típicamente al 95% del Proctor Normal, aunque en ocasiones puede ser necesario establecer otras condiciones de compactación).

^{**} Es especialmente importante determinar las condiciones de compactación del material del núcleo para lo cual se realizarán los ensayos de compactación que sean necesarios, no sólo el Proctor Normal sino el Modificado y Harvard.

- Densidad máxima y mínima.
- Ensayos directos del filtro y el material.

c) Escolleras

- Resistencia a compresión simple en testigos de la roca.
- Peso específico y absorción.
- Ensayos de alterabilidad (ataque por sulfatos, humedad-sequedad, Los Ángeles y otros).
- Estudio petrográfico en lámina delgada.
- Slake durability test (Sehudes), en algunos tipos de escollera.
- Ensayos triaxiales.*
- Coeficiente de forma.

d) Zahorras y otros materiales para espaldones

- Naturaleza de los fragmentos de roca.
- Granulometría.
- Mineralogía de los fragmentos rocosos.
- Peso específico finos.
- Permeabilidad.
- Triaxiales.
- Plasticidad finos.
- Contenido sulfatos, carbonatos, etc.

El número de ensayos depende de la variación de los resultados obtenidos, no siendo posible establecerlo previamente. En las distintas etapas de la investigación se realizará el número suficiente para definir las características predominantes de los materiales con una variación razonable.

El proceso progresivo de investigación mencionado debe corresponderse con los estudios geológico-geotécnicos del cimiento porque ambos tipos de investigación pueden influirse mutuamente. La investigación de las zonas de préstamo debe concluir, en la fase de proyecto, cuando se hayan estudiado con un nivel de detalle adecuado una serie de préstamos que garanticen la existencia de material suficiente y de características bien definidas para redactar el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Proyecto. No obstante, hay que tener presente que los medios de investigación en la fase de proyecto no son los mismos que durante la construcción, por lo que en esta fase se continuarán las investigaciones para ampliar el conocimiento de los materiales previamente estudiados. En algún caso, estas nuevas investigaciones podrían revelar diferencias apreciables con las características de los materiales definidas en la fase de Proyecto, lo que puede dar lugar a las modificaciones del Proyecto que resulten aconsejables.

* Sólo en casos especiales de grandes presas o escolleras especiales se haría este ensayo que se completaría con ensayos granulométricos.

4.3.2. Cubicación del préstamo

Uno de los objetivos básicos de la investigación de préstamos es disponer de volúmenes de material adecuado bastante superiores a las necesidades de la presa. La cubicación de los materiales del préstamo es un proceso progresivo que se va precisando a medida que se dispone de un mejor conocimiento del material. En las etapas iniciales de la investigación se deben obtener volúmenes muy superiores a las necesidades y se estimarán con métodos tales como planos topográficos y fotos aéreas, una vez que se haya realizado un reconocimiento de campo y se hayan ejecutado algunas calicatas. A medida que la investigación se va completando con más calicatas, zanjas y métodos de investigación en profundidad, como sondeos y geofísica y suficiente número de ensayos de laboratorio, se va obteniendo un conocimiento más preciso del préstamo que permite cubicarlo con mayor exactitud. En esta cubicación deben tenerse en cuenta las características de heterogeneidad propias de los materiales naturales de manera que lo que se contabilice sea el material realmente utilizable, una vez eliminada la montera, estratos de material inadecuado, etc. Sólo cuando se tiene garantía de que las características de resistencia, deformabilidad y permeabilidad de los materiales del préstamo son bien conocidas, así como las condiciones de compactación, será aceptable que el volumen del mismo sea como mínimo del orden de 1,5 veces las necesidades de material. En caso contrario, esta cubicación deberá ser claramente mayor.

4.3.3. Condiciones de explotación

Es importante conocer bien las condiciones de explotación de un préstamo, no solo por consideraciones económicas sino también porque pueden incidir en la calidad de ejecución de la presa y, en definitiva, en su seguridad. Aspectos como la heterogeneidad pueden hacer que la explotación sea complicada, bien porque sea necesario seleccionar algún tipo de material y rechazar otros o porque se considere la posibilidad de mezclar los materiales heterogéneos para formar uno único, en cuyo caso las características del material resultante deben ser bien estudiadas y conocidas. Por tanto, para poder establecer estas condiciones de explotación, es preciso tener un buen conocimiento de las características de los materiales que forman el préstamo. A partir de este conocimiento pueden anticiparse los problemas que puede ocasionar su explotación y adoptar las medidas oportunas.

Existen muchas otras circunstancias que pueden ser problemáticas y requieren ser suficientemente estudiadas. Por ejemplo, en ocasiones es necesario utilizar rocas arcillosas como núcleo, cuya transformación en suelo es difícil de anticipar en la etapa de investigación. En estos casos resulta recomendable realizar terraplenes de prueba durante la fase de investigación de materiales. Una situación más frecuente es el contenido de humedad natural de las arcillas que puede superar o ser inferior, de manera significativa, a la humedad correspondiente a la máxima densidad del Proctor Normal. En estos casos, puede ser necesario un tratamiento del material en un acopio intermedio previamente a su utilización en la obra, consideraciones que deben establecerse en el estudio de los materiales.

En relación con las rocas, para su empleo en escolleras, hay diversos aspectos a tener en cuenta en la explotación de una cantera. En algunos casos, se produce una clara variación de

propiedades con la profundidad, ya sea por alteración de las zonas más superficiales o por alternancia de distintos materiales, que debe ser definida. Por otra parte, la fracturación permite anticipar el tipo de material que se obtendrá y condiciona el método de explotación de la cantera.

Además de los aspectos mencionados, relativos a las características del propio material, existen otros factores como la accesibilidad, la cota de préstamo, los métodos de excavación y su seguridad y la afección medioambiental que deben contemplarse para definir las condiciones de explotación de un préstamo.

4.4. Caracterización de materiales

4.4.1. Materiales para núcleos

La función de impermeabilización del cuerpo de una presa de materiales sueltos corresponde al núcleo que puede construirse con distintos tipos de materiales impermeables o semipermeables. Los materiales adecuados pueden ser, entre otros, los siguientes:

- Arcillas.
- Limos.
- Arenas arcillosas o limosas.
- Gravas arcillosas o limosas.
- Otros tipos de materiales impermeables.

La relación anterior no agota, naturalmente, las posibilidades e incluso es importante destacar la diversidad de procedencias que pueden tener estos suelos: depósitos fluviales, depósitos glaciares, suelos residuales, rocas blandas debidamente tratadas, etc. En España, se han empleado, con frecuencia, materiales singulares, de naturaleza lutítica, margosa o de otros tipos [R.10, R.11 y R.12], como núcleo o espaldones de presas homogéneas, con buen comportamiento.

En el pasado, se consideraba que la arcilla era el mejor material para la construcción del núcleo impermeable, lo que propiciaba, en ocasiones, el transporte de ese material a grandes distancias a un coste considerable, aunque estuviera disponible en las inmediaciones del emplazamiento un gran depósito uniforme de excelente arena limosa sin cohesión [R.13 y R.14]. La arcilla se consideraba superior a los materiales impermeables sin cohesión porque sería más deformable y más capaz para adaptarse, sin agrietarse, a las deformaciones producidas por los asientos diferenciales y porque tendría mayor resistencia a la erosión si se producía una fuga concentrada. Parece estar demostrado que con buenos filtros se pueden utilizar una diversidad de materiales como núcleo, con garantías suficientes.

También se han conseguido, en ocasiones, buenos materiales de núcleo mezclando dos materiales de propiedades diferentes. Actualmente se tiende a evitar esta práctica utilizando cada material de la posible mezcla en zonas adecuadas de la presa.

En resumen, la tendencia actual es utilizar para el núcleo el material de menor coste de los suelos impermeables disponibles, aunque no tenga cohesión y sea relativamente erosionable cuando está sometido a fugas concentradas. En muchas partes del mundo [R.13] y en algunas presas españolas no existían arcillas plásticas para la construcción de presas y se han construido éstas con núcleos impermeables sin cohesión de arenas limosas, limos arenosos, limos arenosos con gravas, etc, procedentes de granitos descompuestos, morrenas glaciares, arenisca meteorizada y rocas similares, lo que avala la tendencia actual antes recomendada. Una excepción a la práctica general de utilizar el material impermeable de menor coste se produce cuando hay que colocar tales materiales sin cohesión directamente sobre un cimientado de roca dura con el riesgo de que el material impermeable se escape por las grietas del cimientado, aunque este último haya sido sellado. Por esta razón, cuando el cimientado sea de estas características, la investigación de materiales debería contemplar la búsqueda de suelos arcillosos como alternativa a los suelos erosionables como núcleo de presas o para colocar, directamente sobre el cimientado, una capa delgada de un material impermeable que no sea fácilmente erosionable a través de las pequeñas grietas de la roca, si esa fuera la medida de proyecto más adecuada frente a otras alternativas como, por ejemplo, sellar el cimientado con hormigón.

Las características geotécnicas de los materiales que conviene investigar para que el proyectista evalúe el comportamiento esperable del material y disponga las medidas pertinentes para su utilización como elemento impermeable del cuerpo de presa pueden clasificarse en tres grupos:

- **Identificación:** son aquellas que proporcionan, a través de las clasificaciones de suelos existentes, una valoración cualitativa sobre la idoneidad del empleo del material. Entre estas características cabe citar la granulometría, plasticidad, peso específico de las partículas, contenido de sustancias nocivas, mineralogía de las arcillas, etc.
- **Estados de compactación:** son aquéllas que permiten anticipar las condiciones en que quedarán los rellenos de la presa y los procedimientos para conseguir la trabajabilidad necesaria de los mismos. Entre estas características cabe citar la humedad natural y las humedades y densidades correspondientes a los diferentes procedimientos de compactación.
- **Caracterización:** son aquéllas que permiten cuantificar el comportamiento del material en la presa. Se obtienen a través de diversos tipos de ensayos que, fundamentalmente, son ensayos de laboratorio realizados en probetas remoldeadas en las condiciones de compactación establecidas para el relleno ejecutado. Entre estas características cabe citar la resistencia, compresibilidad, expansividad, en su caso, permeabilidad y dispersividad.

Alguna de estas características se describen a continuación:

- **Mineralogía**

El conocimiento de los minerales del material es importante en relación con algunas características del mismo, como la expansividad y la dispersividad. También es

importante conocer la presencia de yeso y otras sales solubles que no serían admisibles más que en porcentajes mínimos, a menos que se hagan estudios suficientes o exista experiencia previa. Existen núcleos de presas en España con elevada proporción de carbonatos [R.10] con buen comportamiento. La mineralogía de las arcillas es, en cualquier caso, un factor esencial en el comportamiento del núcleo y debe conocerse bien, incluso con ensayos redundantes.

- **Granulometría y plasticidad**

La granulometría del material investigado, por sedimentación y tamizado, proporciona una información importante de tipo cualitativo sobre el comportamiento del material de núcleo y sus condiciones de compactación. Un suelo puede resultar suficientemente impermeable con porcentajes pequeños del material que pasa por el tamiz 200 de la serie ASTM (del orden del 10%). Es también importante la forma de la curva granulométrica que puede ser de graduación uniforme o de graduación amplia. En este último caso se compacta mejor el material y da lugar a rellenos más resistentes, menos deformables y más impermeables que en el caso de suelos uniformes. La única precaución es considerar su estabilidad interna para cuyo estudio se realizarán los oportunos ensayos de laboratorio.

Al estudiar un préstamo se debe prestar atención a los tamaños máximos del material encontrado para prever su acomodación al espesor de la tongada compactada, limitándose aquél a un tamaño algo inferior a este último espesor. Debe prestarse especial atención a que los tamaños gruesos no sean de rocas evolutivas cuya degradación con el tiempo pueda dar lugar a grandes deformaciones.

Los límites de Atterberg de la fracción fina de los suelos son indispensables para identificarlos y clasificarlos debidamente. Su utilización en los pliegos de condiciones de los proyectos está muy extendida. Por esas razones, cada tipo de material que se investigue como posible préstamo para núcleo de una presa debe ser sometido a este tipo de ensayo.

- **Dispersividad**

La tendencia a la erosión por dispersión de un suelo dado depende de diversas variables como la naturaleza química y mineralógica de la arcilla, las sales disueltas en el agua intersticial y el agua de erosión. La singularidad de las arcillas dispersivas parece corresponder a la naturaleza de los cationes contenidos en el agua de los poros de la masa de arcilla. Las arcillas dispersivas tienen preponderancia de sodio en el agua intersticial, mientras que las ordinarias tienen preponderancia de calcio, potasio y magnesio [R.16].

Es esencial identificar las arcillas dispersivas en un proyecto de presa con el fin de tomar las precauciones necesarias. Los estudios realizados en filtros han demostrado que las

arcillas dispersivas se pueden utilizar con seguridad si se emplean filtros bien proyectados [R.17, R.18 y R.19]. En este sentido cabe citar las presas españolas de Zahara y Barbate con su elemento impermeable de material dispersivo que han mostrado un óptimo comportamiento favorecido por los cuidados aplicados a la definición y construcción de un filtro adecuado.

En años recientes, se han construido varias presas importantes en el mundo con zonas impermeables de arcillas dispersivas [R.20] a las que se aplicaron diversas precauciones especiales, lo que demuestra que estos materiales no son descartables al hacer la investigación de materiales, aunque debe tenerse en cuenta que su empleo deberá ir acompañado de la adopción de medidas adecuadas.

- **Resistencia y deformabilidad**

Son importantes para el Proyecto de la presa la determinación de los parámetros de resistencia, ángulo de rozamiento interno y cohesión, a corto y largo plazo y en tensiones totales y en tensiones efectivas, sobre muestras compactadas en las condiciones exigidas en el Proyecto. La resistencia del material permite comprobar la estabilidad de la presa sometida a distintos estados de carga y, por ello, es esencial que los parámetros que la definen sean representativos del material utilizado.

La compresibilidad del material es, asimismo, una característica geotécnica importante que permitirá evaluar el asiento de la presa y, en general, su deformabilidad.

- **Expansividad y colapsabilidad**

Hay que caracterizar las propiedades del material de núcleo que experimentan cambios de volumen, como colapsabilidad y expansividad. Los materiales con estas propiedades, aún sin ser deseables, no son descartables pero requieren estudios suficientes para caracterizar bien el material.

Se han construido diversas presas, incluso en España, con arcillas expansivas sin que esto represente ningún problema una vez que se reconoce esta circunstancia y se toman las medidas adecuadas.

La colapsabilidad que se manifiesta ante la presencia de agua en el material puede dar lugar a deformaciones bruscas y, en definitiva, agrietamientos en el cuerpo de presa, por lo que debe anticiparse esta propiedad del material que, en general, está relacionada con las condiciones de humedad con que se coloca el material.

- **Permeabilidad**

La permeabilidad del material de núcleo es un factor esencial para la viabilidad del Proyecto. En el caso de las arcillas, éstas son, generalmente, suficientemente

impermeables, por lo que con disponer de algunos ensayos para comprobar esta característica será suficiente. En materiales con poca proporción de arcilla la permeabilidad puede ser más crítica y su determinación precisa ser más exigente por lo que deberá determinarse con la ejecución de un número de ensayos suficiente. En principio, no hay un límite para la permeabilidad del material de núcleo, excepto en lugares donde el valor del agua sea muy elevado. Cuando no se dispone de materiales muy impermeables, esta característica puede ser crítica y para su determinación precisa es recomendable la ejecución de ensayos in situ, en terraplenes de prueba, con el material puesto en obra en las condiciones previstas en el Proyecto.

- **Humedad natural y relaciones humedad-densidad**

La humedad natural que presenten los préstamos investigados es un factor decisivo para la construcción del núcleo impermeable por las dificultades que implica modificarla sustancialmente y para definir el posible tratamiento que debe darse al material de núcleo para su compactación. En la investigación de préstamos debe anticiparse este tratamiento que se limita, en muchos casos, a un ajuste de la humedad a valores cercanos a la óptima y, a veces, a un almacenamiento intermedio que permite una homogeneización del material y de su contenido de humedad que resulta recomendable. En ocasiones, se prolonga el tiempo lo suficiente para permitir una cierta meteorización, especialmente cuando el material de núcleo procede de rocas arcillosas que se agrietan al excavarlas y en las que la penetración del agua favorece su degradación. Cuando el préstamo tiene exceso de humedad, su eliminación puede ser problemática, aunque pueden aplicarse diversas medidas como desecación y drenaje en el almacenamiento intermedio.

El control de la compactación se realiza mediante el ensayo Proctor, generalmente el Proctor Normal, aunque en ocasiones (presa de Barbate) se ha utilizado el ensayo MCV (Moisture Condition Value). Se deben realizar los ensayos necesarios para establecer la humedad óptima y la densidad máxima y el rango de variación de estas características del material.

4.4.2. Materiales para espaldones

Se emplean distintos materiales para los espaldones de las presas de materiales sueltos tales como la escollera, zahorras, todo-uno y tierras (mezcla de distintos tipos de suelo).

La utilización de rocas como escollera para espaldones de presas de materiales sueltos ha evolucionado de forma notable a lo largo del tiempo. Pueden distinguirse tres períodos [R.3]:

- Período inicial (1850-1940): Presas de escollera vertida en las que se utilizaban rocas con una elevada resistencia a la compresión simple, colocándose la escollera en capas de gran espesor (hasta 18 a 60 m).
- Período de transición (1940-1965): Se construyeron grandes presas con escollera vertida en menores espesores que en el período anterior, pero se inicia la construcción de presas

con escollera extendida en tongadas de 3 a 4 m o menores, compactadas con el tráfico de obra o bien con compactadores vibratorios.

- Período moderno (1965-actualidad): Las presas de escollera, con pantalla o con núcleo, se construyen con escollera extendida en tongadas delgadas (menos de 2 m) y compactada con rodillos vibratorios lisos. Con estos equipos se consiguen una alta resistencia y baja compresibilidad. Incluso se pueden utilizar escolleras formadas por rocas blandas, que se compactan en tongadas relativamente delgadas, a veces complementada con la aplicación de agua para conseguir una alta densidad.

Si la roca es lo suficientemente resistente para soportar el tráfico de obra y la acción del rodillo vibratorio de 10 T cuando está húmeda, se puede considerar aceptable como escollera compactada. En el caso de escolleras compactadas formadas por rocas blandas, muchas veces se tienen que incorporar al Proyecto de cuerpo de presas zonas de escollera permeable para asegurar su drenaje interno, si se observa un deterioro excesivo de la roca blanda durante la compactación [R.3].

La resistencia a compresión simple de los testigos de roca, utilizados para presas de escollera, puede variar desde 10-20 MPa (muy baja) a más de 250 MPa (las más altas), con la mayoría oscilando en el rango de 50-150 MPa. Como regla general, se puede considerar como roca adecuada para escollera aquélla que tenga una resistencia a la compresión simple igual o superior a 30 MPa [R.21].

La roca no tiene que satisfacer especificaciones equivalentes a las de áridos para hormigón. Se han utilizado con éxito rocas blandas como limolitas, areniscas, esquistos, argilitas y otras. Las escolleras procedentes de rocas con resistencias de 30-40 MPa no son necesariamente más compresibles que las de rocas más duras y, por el contrario, la escollera de rocas de resistencia baja tienen la ventaja de ser menos costosas en perforación y voladura. Por otro lado, producen menor deterioro del equipo de construcción.

También es frecuente el empleo de zahorras y gravas como material de espaldones, bien solas o en combinación con la escollera. Son menos deformables que la escollera, excepto en el caso de zahorras que contienen arcilla y además, en general, su puesta en obra es más económica. Algunas de las presas más altas del mundo están construidas con espaldones de grava como la presa de Nurek, de 305 m de altura y las de Oroville y Mica con 244 m de altura.

Estos materiales sirven, en ocasiones, como cuerpo de presa para las presas de pantalla puesto que al ser poco deformables, si están libres de finos plásticos, se adaptan bien a este tipo de presas.

Las características geotécnicas de los materiales para espaldones, según sean de escollera o de zahorras y gravas, son las siguientes:

a) **Características de los materiales para espaldones de escollera**

Las características que deben tenerse en cuenta en la investigación de estos materiales pueden agruparse de la siguiente manera:

- . **Caracterización de las rocas:** resistencia a compresión simple de la roca seca y saturada, peso específico de las partículas, durabilidad, absorción de agua.
- . **Caracterización del pedraplén:** compactación del material.
- . **Estado de la puesta en obra:** granulometría, densidad, resistencia al corte, deformabilidad, permeabilidad, colapso.

Algunas de estas características se describen a continuación:

- **Resistencia a compresión simple de la roca**

Esta propiedad de las rocas constituye una buena indicación para anticipar el comportamiento de la escollera. Los ensayos de compresión simple de la roca no son sencillos y se requiere una cuidadosa preparación de las muestras, por lo que deben aplicarse con rigor las normas de ensayo que se indican en el Anejo II.

Muchas rocas con alta absorción de agua reducen su resistencia cuando se ensayan saturadas. Sin embargo, pueden utilizarse como escollera con métodos adecuados de colocación, tales como el riego de la misma y menor espesor de tongada, por lo que el conocimiento de esta pérdida de resistencia con la saturación es de gran interés para el proyectista.

Si las rocas utilizadas son alterables o de naturaleza evolutiva no deben considerarse como material de escollera. Su utilización como material asimilable a los suelos, para otro tipo de presas, se trata más adelante.

- **Granulometría**

En la escollera compactada, cuanto mejor graduado esté el material más elevada será la densidad del material puesto en obra. En cualquier caso, una capa de escollera constituida por roca sana siempre estará sometida a una segregación importante durante el vertido y extensión del material lo que presenta diversas ventajas: los finos de la capa superficial ayudan a reducir el desgaste de neumáticos de los camiones y la capa segregada de roca dura es ideal para obtener la máxima compactación con un rodillo vibratorio. Con rocas blandas, los procedimientos de construcción (espesor de tongada, compactación, riego, etc) se eligen para asegurar la rotura de partículas y obtener una alta densidad.

Para la mayoría de las formaciones de roca dura, la escollera obtenida de ellas tiene menos del 30% de partículas menores de 2,5 cm. Por esto, se ha especificado frecuentemente que la escollera no debe contener más del 30% de partículas inferiores a 2,5 cm; pero rocas de cantera con el 50% de partículas menores de 2,5 cm han producido una excelente escollera.

No es frecuente la realización de ensayos de granulometría de la escollera dado el buen comportamiento de este material con un amplio rango de granulometrías que no exigen mayores precisiones. Sin embargo, es recomendable realizar algunos ensayos granulométricos periódicos para caracterizar el material. Para ello, se dispondrá en cantera la instalación de cribado necesaria.

- **Densidad de la escollera**

La densidad de la escollera compactada depende fundamentalmente del peso específico de la roca, de su composición granulométrica, esfuerzo de compactación, espesor de tongada y del equipo de compactación. Con roca sana, las tongadas tienen, generalmente, un espesor de 1 m a 2 m. En el centro de la tongada, la densidad de la escollera compactada alcanza valores medios, habitualmente, entre 2,0 y 2,1 Tn/m³. Con rocas blandas, las tongadas deben tener menores espesores, generalmente, un espesor de 0,6 m a 1,2 m o incluso menor.

La información de densidad de la escollera sólo se obtiene durante la fase de investigación del material en el caso de que se ejecuten pedraplenes de prueba.

- **Deformabilidad**

El módulo de deformación expresa la capacidad de la escollera para disminuir de volumen bajo el efecto de una carga externa, como consecuencia de la rotura de los bordes de los bloques, reorganización de los mismos y compactación. El riego reduce la deformación pero tiene menos ventajas con rocas de poca absorción de agua (hasta el 2%). Sin embargo, con rocas de baja resistencia a la compresión y alta capacidad de absorción, el riego puede ser más efectivo y considerarse recomendable, incluso con presas pequeñas, para evitar o reducir el fenómeno de colapso.

Los módulos de la escollera calculados después de la construcción a partir de datos de deformación en presas de pantalla sometidas a la carga de agua son de 1,5 a 3 veces mayores que los calculados a partir de la deformación vertical obtenida durante la construcción.

La deformabilidad de la escollera, por este motivo y por la dificultad de realizar ensayos de laboratorio, raramente se determina en la fase de investigación de materiales. No obstante, existen en algunos laboratorios edómetros de grandes dimensiones que se pueden utilizar en casos especiales.

- Resistencia al corte

En los parámetros de resistencia al corte de la escollera influyen diversos factores tales como la calidad de la roca, la densidad de puesta en obra y su humedad correspondiente, las presiones de confinamiento, la forma y dimensiones de las partículas y la granulometría. No todos estos factores influyen de la misma manera; por ejemplo, el tamaño máximo de los fragmentos de roca no tiene un efecto significativo en la resistencia al corte. La densidad inicial de la muestra influye en la resistencia al corte. La resistencia al corte disminuye con el aumento de la presión de confinamiento. Para iguales presiones de confinamiento, el ángulo de resistencia al corte difiere unos 4° según que el ensayo triaxial se haga en condiciones de deformación triaxial o de deformación plana [R.4], lo que debe tenerse en cuenta en el estudio de estabilidad, siendo superior en el ensayo de corte.

En rocas duras, la resistencia al corte se produce fundamentalmente por el acúñamiento entre bloques de roca, mientras que en rocas blandas, la resistencia al corte se consigue fundamentalmente con un relleno de alta densidad.

Existe bibliografía [R.6] donde se realiza un análisis exhaustivo sobre la evaluación de la resistencia al corte de escolleras y métodos de ensayo desarrollados en diversos países del mundo (incluido España).

- Compactación

Se establece especificando el espesor de tongada, número de pasadas del compactador y las características de éste. En los reconocimientos se determinarán las características de la escollera mediante los correspondientes ensayos de laboratorio y campo. Para roca dura se suele especificar un espesor de tongada incluso superior a 1 m y 4 pasadas de un compactador vibratorio liso de 10 Tn (o algo más) de peso estático. Cuando se trata de roca blanda, cada caso es diferente y se especifican capas más finas, más pasadas del compactador y riego durante la colocación, todo lo cual se recomienda determinarlo en un pedraplén de ensayo.

b) Características de los materiales para espaldones de zahorras y gravas

De cara a su empleo como espaldones, deben investigarse los siguientes aspectos:

- **Caracterización de los constituyentes:** tipos de roca de los fragmentos gruesos, granulometría, plasticidad de la fracción fina, contenido de sustancias nocivas.
- **Caracterización del relleno:** compactación del material.
- **Estado de la puesta en obra:** resistencia, deformabilidad, permeabilidad, colapso.

Dada la posible heterogeneidad de estos materiales en estado natural, es fundamental investigar aquélla en los préstamos. Tiene interés determinar las siguientes características y su representatividad:

- **Granulometría**

La grava y la zahorra constituyen un excelente material para espaldones cuando su contenido de finos sea pequeño (del orden o inferior al 5%) y estén razonablemente bien graduadas. Su granulometría, debido al origen fluvial o glacial, suele ser extendida y puede haber riesgo de segregación si en ella no existe suficiente porcentaje de arenas.

- **Resistencia al corte. Deformabilidad**

El comportamiento de las zahorras y gravas en relación con estas características es, en general, muy bueno [R.3 y R.22] con valores del ángulo de rozamiento interno superiores a 35° , si los finos no tienen plasticidad.

El módulo de deformación suele ser mayor que el de las escolleras compactadas.

La resistencia y deformabilidad se pueden medir en laboratorio, mediante ensayo triaxial o ensayo de corte, o en terraplenes de ensayo.

- **Permeabilidad**

Se ensayará la permeabilidad mediante los correspondientes ensayos de campo y laboratorio. Depende notablemente del contenido de finos (material que pasa por el tamiz 200). Si éste es reducido, inferior al 7%, se puede considerar en general un material permeable. A medida que se incrementa el contenido de finos deberá verificarse la permeabilidad con objeto de estimar la capacidad drenante. Pueden ser indicados los estudios de autoestabilidad.

- **Compactación**

Se suelen alcanzar densidades muy elevadas en el relleno, entre 1,9 y 2,1 Tn/m^3 . Sus características de compactación se pueden determinar por ensayos de laboratorio, Proctor y Modificado, hasta tamaños importantes que se establecen en el Anejo de ensayos de materiales.

Un contenido de finos bajo, a partir de 5-6%, puede influir mucho en la compactación, particularmente si son plásticos, y determina que el material sea sensible al contenido de humedad. La compactación suele hacerse en tongadas superiores a 30 cm y, a veces, superiores a 50 cm, lo que dependerá del tipo de material y grado de compactación deseada. Todo ello se comprobará, en su caso, en los correspondientes terraplenes de ensayo.

- **Otros materiales para espaldones**

Los materiales formados por mezclas de roca y suelo (todo-uno) que pueden proceder de las excavaciones de la obra, los coluviones y otros préstamos heterogéneos, y, en

general, cualquier material cuya ejecución sea controlable, se utilizan, a veces, como material para espaldones. Las características de estos materiales, dada la diversidad de los mismos, son muy variables y conviene, en cada caso, realizar estudios específicos para definir el proceso de puesta en obra y sus características geotécnicas finales. Es recomendable que estos estudios estén basados en rellenos de prueba especialmente proyectados para cada ocasión.

También pueden utilizarse tierras, mezclas de distintos tipos de suelos, para espaldones resistentes. Esta situación puede producirse en presas homogéneas o en presas zonadas donde se seleccionan los materiales disponibles más impermeables para el núcleo y los más resistentes para los espaldones.

Las características geotécnicas básicas de estos materiales, resistencia, deformabilidad y permeabilidad, y las de puesta en obra deben estudiarse en cada caso particular mediante ensayos de laboratorio, para establecer las condiciones en las que se base el Proyecto de la presa, tales como inclinación de los taludes, asientos previsibles y medidas para contrarrestarlos, para garantizar la seguridad de la misma.

Las características de estos materiales se determinan con las mismas técnicas de ensayos de campo y laboratorio empleadas para los materiales precedentes.

4.4.3. *Filtros y drenes*

En las últimas décadas se ha investigado bastante en la definición de criterios de filtro para presas de materiales sueltos y en los métodos de ensayo del material. Como consecuencia del debate que se ha producido, ha salido fortalecido el papel que juegan en la seguridad de las presas. En consecuencia, la determinación de sus características y propiedades es esencial y debe prestárseles la máxima atención.

Las características esenciales que hay que determinar en estos materiales son:

- **Características del material:** tipo de roca, durabilidad, ausencia de sustancias nocivas, pérdida en el ensayo de ataque por sulfatos, durabilidad física y química del material grueso.
- **Características de elaboración y puesta en obra:** granulometría, machaqueo, lavado, compactación.
- **Características del material colocado:** granulometría, permeabilidad, capacidad de retención, falta de cohesión.

Algunas de las características esenciales se comentan a continuación:

Granulometría

Los materiales naturales para filtros y drenes serán materiales granulares, naturales o artificiales, cuya granulometría debe establecerse con notable precisión, puesto que debe satisfacer los criterios de filtro y drenaje que imponga el Proyecto según el caso. Esto hace difícil, frecuentemente, que se encuentren materiales procedentes de depósitos naturales que cumplan tales exigencias sin clasificación y lavado, por lo que muchas veces se obtiene el material por procesos de machaqueo. No deben contener más de una pequeña proporción de material que pase por el tamiz n° 200, por lo que esta característica debe evaluarse con detalle.

El material debe ser autoestable, es decir, internamente estable, lo que implica que la fracción gruesa del filtro debe ser capaz de retener a la fracción más fina del material.

Calidad

No todas las rocas son adecuadas para su empleo como filtros y drenes. En general, un material de filtro o dren de buena calidad estará formado por partículas resistentes y durables que no se degraden como resultado de un ataque químico, físico o biológico. Tampoco contendrá, en grado apreciable, sustancias nocivas. Deben evitarse [R.25] los materiales que:

- 1) como resultado de un ataque químico o biológico aumenten su cohesión, se cementen o se colmaten con el tiempo
- 2) cambien notablemente su granulometría como resultado del proceso de manipulación, colocación y compactación
- 3) cambien su granulometría como resultado del ataque de agentes externos
- 4) cambien su granulometría bajo tensiones elevadas de compresión y de corte como las que se producen en la base de presas altas de materiales sueltos

Los ensayos que se emplean normalmente para evaluar la calidad de los posibles préstamos de áridos para hormigón, deben utilizarse también para estudiar los materiales de filtro. (Ver Anejo II). La calidad del material debe comprobarse en todas las etapas de investigación y ejecución.

El material deberá tener suficiente permeabilidad para que las filtraciones que penetren en el núcleo puedan ser conducidas segura y rápidamente sin excesivo gradiente hidráulico y capacidad de retención suficiente con respecto al material que protege.

Falta de cohesión

El filtro no debe tener cohesión. El filtro debe permanecer sin cohesión, de forma que no exista en él ninguna tendencia al agrietamiento cuando el núcleo adyacente pueda resultar dañado por fisuración.

Un ensayo sencillo, el ensayo de Vaughan, permite comprobar esta propiedad (Anejo II).

El filtro no tendrá capacidad de cementarse como resultado de acciones químicas, físicas o biológicas. En caso de utilizar filtros calizos, o de algún material en los que se sospeche un posible proceso de cementación, se realizarán estudios específicos.

- **Compactación**

Un exceso de compactación puede producir rotura de partículas, reducir la permeabilidad y, en algún caso, incrementar el porcentaje de finos en una cantidad superior a los límites especificados. Una densidad relativa mínima del 70% suele ser recomendada por algunas instituciones mundiales [R24]. A efectos de controlar este parámetro, es necesario determinar la densidad máxima y mínima de laboratorio mediante los ensayos correspondientes.

4.4.4. Protecciones

Debe hacerse mención expresa de las características exigidas a la escollera cuando se emplea como protección del paramento de aguas arriba de las presas. En este caso [R.5], la escollera, tanto si es vertida como colocada a mano, debe tener una alta proporción de partículas superiores a la dimensión mínima necesaria para resistir la acción del oleaje. Esto exige que la escollera esté constituida por partículas de roca densa, sana y durable, con un coeficiente de forma aceptable. La investigación de estos materiales debe incluir los estudios necesarios para obtener estas características del material y la posibilidad de conseguir los tamaños previstos. A estos efectos se realizarán los ensayos correspondientes para determinar la calidad de la roca.

4.5. Estudios especiales

4.5.1. Terraplenes de ensayo

Con los materiales procedentes de préstamos heterogéneos o cuyas características geotécnicas sean difíciles de establecer por los métodos habituales, se construyen los pedraplenes o terraplenes de ensayo, en los que se estudian los métodos de puesta en obra, los equipos de compactación más adecuados y las características geotécnicas del material compactado. Los rellenos de prueba se localizarán preferiblemente en zonas adyacentes o próximas a los préstamos y se establecerán diversas alternativas de equipos a utilizar y métodos de trabajo de los mismos modificando diversos parámetros de ejecución tales como el espesor de tongada, número de pasadas del compactador, humedad de compactación y distintas condiciones granulométricas, etc. Se establecerán los ensayos para caracterizar el material compactado. Si el volumen de la presa es grande, estos terraplenes de prueba son muy convenientes y con ellos se definirán los métodos constructivos y las características de los materiales a emplear. La Figura 4.3 es un ejemplo de pedraplén de ensayo.

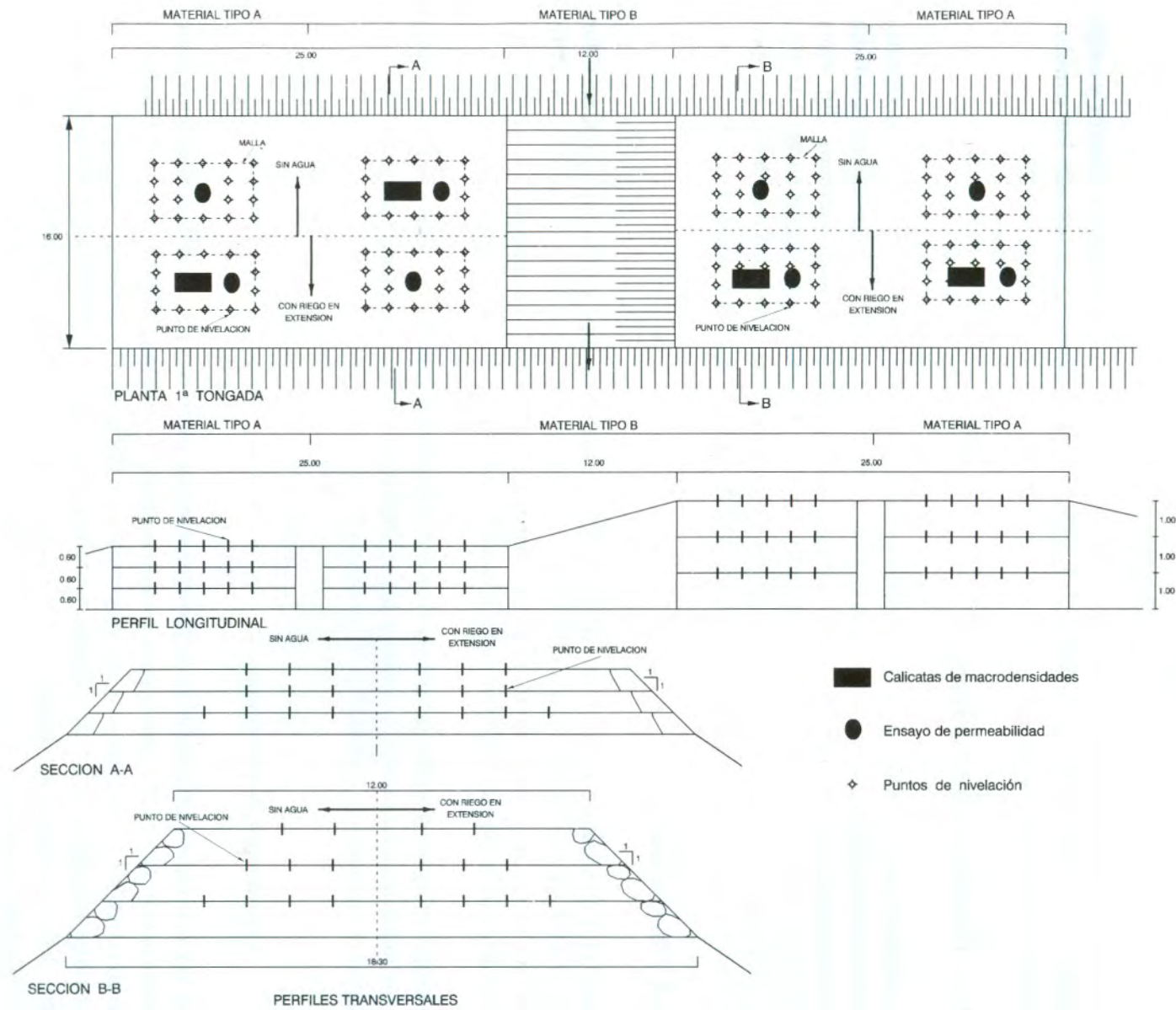


Fig. 4.3
Pedraplén de ensayo

4.5.2. Voladuras de prueba

En algunos casos, especialmente en yacimientos heterogéneos o canteras de escollera, generalmente en grandes proyectos, se pueden realizar excavaciones o voladuras de prueba con objeto de determinar las características del material a obtener y las condiciones adecuadas de explotación del yacimiento o cantera.

La definición de la prueba de voladura debe incluir, al menos, la disposición de taladros y carga a utilizar. La prueba debe completarse con ensayos granulométricos, incluyendo los tamaños grandes del material producido.

4.5.3. Terraplenes experimentales

En algunos casos, determinados materiales pueden requerir la ejecución de terraplenes experimentales además de los terraplenes de ensayo habituales en los que básicamente se estudia la compactabilidad del material y sus propiedades geotécnicas más comunes. En estos terraplenes experimentales se estudian algunos aspectos específicos, mediante ensayos in situ, como pueden ser la fisurabilidad de un material de núcleo, la permeabilidad o la deformabilidad del material compactado. En el Anejo I se incluye información adicional sobre estos terraplenes.

4.5.4. Otros estudios

Cuando los materiales a emplear presenten alguna singularidad, por ejemplo expansividad, o sus propiedades de resistencia, deformabilidad o permeabilidad no sean asimilables a otros materiales cuyo comportamiento es bien conocido, se harán estudios especiales para lograr que las características de su comportamiento queden bien definidas en todos los casos.

En presas situadas en zonas de elevada sismicidad podrá ser conveniente determinar la respuesta de los materiales del cuerpo de presa a las solicitaciones sísmicas mediante la ejecución de los ensayos dinámicos que se describen en el Anejo II.

4.6. Explotación de préstamos

Una vez realizada la investigación de préstamos, deben establecerse determinados criterios sobre la explotación de los préstamos para garantizar que los materiales obtenidos son asimilables a los investigados y se adaptan a las exigencias del Pliego de Condiciones. En ocasiones, los materiales naturales requerirán tratamientos específicos previos a su utilización en el cuerpo de presa. Los más habituales pueden ser la clasificación y lavado de materiales granulares y la corrección de humedad de las arcillas. Para realizar estos tratamientos se requieren instalaciones adicionales en el propio préstamo o en otro lugar que deben ser previstas. En el caso de materiales de núcleo puede ser conveniente disponer de un acopio intermedio para la corrección de humedad, lo que se considera parte de la explotación del préstamo.

Los materiales impermeables que requieren tratamiento de humectación en el préstamo necesitan el correspondiente suministro de agua que debe ser estudiado.

El estudio de una cantera requiere analizar los siguientes factores:

- Tipo de roca y sus variaciones locales
- Extensión de la cantera
- Heterogeneidades
- Alteración superficial y montera
- Fracturación

Concretados estos aspectos con los métodos de exploración adecuados, se procederá al levantamiento geológico-geotécnico del yacimiento con la información suficiente para poder definir las condiciones de explotación. En éstas el aspecto económico puede ser relevante y la montera, la alteración superficial y la heterogeneidad son factores que pueden influir notablemente en aquél.

En todo caso, deben evaluarse los trabajos necesarios para la apertura de un préstamo o cantera y es necesario, asimismo, establecer las zonas de escombrera para el depósito de los materiales desechados.

4.6.1. Control de calidad en origen

Debe especificarse el control de calidad de los materiales, en origen, antes de su traslado a la obra, definiéndose los dos aspectos fundamentales del control:

- Plan de ensayos
- Criterios de aceptación

Como consecuencia de la investigación de materiales realizada habrán quedado definidas las características de los materiales y su rango de variabilidad. Esta información se utilizará para definir los parámetros a utilizar en el Proyecto de la presa y, por tanto, las características de los materiales en el préstamo deberán controlarse para comprobar que se ajustan razonablemente a lo especificado. Se establecerán también la frecuencia de ensayos a realizar y los criterios de aceptación o rechazo, según los resultados de los ensayos y pruebas realizadas.

Los materiales naturales se controlarán en su lugar de procedencia (cantera, depósitos naturales o excavaciones de la presa), en los acopios intermedios y en la propia obra antes de la ejecución de la misma.

La evaluación de los resultados de los ensayos podrá realizarse por dos procedimientos:

- Exigiendo siempre el cumplimiento de los valores mínimos establecidos en las especificaciones.

- Aplicando métodos estadísticos en los que se admita que un pequeño porcentaje de los ensayos realizados esté por debajo de un cierto límite establecido en las especificaciones.

4.6.2. Estudios complementarios

La investigación de préstamos durante la fase de proyecto habitualmente queda limitada por los medios utilizados. Cuando la obra comienza, se dispone de medios adicionales del Contratista que deben utilizarse para verificar y completar las investigaciones realizadas previamente. En estos estudios, necesarios para conocer a fondo las características de los materiales y su representatividad, se concretará la clasificación de los materiales y el volumen de materiales disponibles de cada tipo en las áreas a explotar y se definirán los procesos de tratamiento que fueran necesarios para adecuarlos a los requisitos exigidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas. Los reconocimientos necesarios se harán mediante sondeos o calicatas y se realizarán los ensayos y pruebas necesarios para que las características de los materiales a utilizar en el cuerpo de presa queden bien establecidas y se garantice su control. Uno de los aspectos importantes a tener siempre en cuenta es la representatividad de las muestras y de los ensayos con ellas realizados. Por ello, estos deben hacerse en número razonablemente suficiente para que puedan interpretarse, sin grandes incertidumbres, los resultados obtenidos. Los ensayos a realizar para determinar las características afectadas por la puesta en obra como la resistencia, deformabilidad, expansividad y permeabilidad de los materiales deben efectuarse sobre muestras que representen lo mejor posible las condiciones esperables en el cuerpo de presa.

4.6.3. Archivo técnico de la presa

Un documento importante para incorporar al Archivo Técnico de la presa es el informe geológico-geotécnico de los materiales para el proyecto que debe contener toda la información obtenida de las exploraciones y ensayos de los materiales, así como las recomendaciones a tener en cuenta en el Proyecto. La terminología empleada en este informe será adecuada a la variabilidad de técnicos que han de utilizarla.

Este informe final debe dar respuesta a todas las incertidumbres geológico-geotécnicas que se planteen en el Proyecto sobre los materiales y debe contener un **inventario** de los préstamos de material impermeable, permeable y de canteras de roca para escollera y escollera de protección. Los principales aspectos cubiertos por este inventario serán:

- (1) Fotografías, mapas y planos deseables para mostrar la situación de emplazamientos y de las exploraciones.
- (2) Mapa del depósito y del emplazamiento de presa, con referencias topográficas, en el que debe figurar la localización de las exploraciones realizadas y los perfiles geotécnicos.
- (3) Plano geológico del depósito o cantera en el que figuren las investigaciones realizadas y los cortes geológicos.
- (4) Descripción de topografía y vegetación.
- (5) Espesor estimado del depósito. Perfiles geológico-geotécnico, mostrando las características de los materiales.

- (6) Extensión del depósito.
- (7) Tipo y espesor del recubrimiento.
- (8) Estructura y discontinuidades del yacimiento rocoso.
- (9) Columna litológica de sondeos y descripción de zanjas y calicatas.
- (10) Cubicación estimada del depósito.
- (11) Descripción general de los materiales.
- (12) Granulometría y variabilidad de tamaños de los depósitos naturales.
- (13) Descripción de la forma y angularidad de fragmentos de roca encontrados en taludes de depósitos de roca y de la manera y tamaños en que la roca rompe en voladura.
- (14) Caracterización geotécnica de los suelos encontrados.
- (15) Resultados de ensayos y su variabilidad.
- (16) Accesibilidad del préstamo.
- (17) Condiciones de expropiación.

4.7. Informe del Proyecto

El informe del Proyecto debe reflejar la procedencia de los distintos materiales, los métodos de exploración empleados, los lugares de toma de muestras y el tipo de muestra, los ensayos de laboratorio realizados, el análisis de los resultados obtenidos en dichos ensayos, incluido el rango de variación, valores medios, dispersión, etc, la exploración y el programa de ensayos adicionales requeridos. El informe debe contener planos de situación de las exploraciones, secciones geotécnicas de los préstamos, gráficos de registro de las exploraciones (sondeos, calicatas), resultados de los ensayos realizados y definición de las características de los materiales a utilizar en el Proyecto de la presa.

El registro de datos de las exploraciones constituye una valiosa información que debe reunir todos aquellos relativos a los materiales y a las condiciones encontradas durante las exploraciones.

Cada registro debe contener toda la información relevante sobre los distintos materiales encontrados, la identificación del lugar de la exploración, cotas, fechas de ejecución, tamaño de la exploración y equipo utilizado. Debe indicarse, asimismo, la situación de las muestras tomadas y la presencia, o no, de niveles freáticos cuyas fluctuaciones periódicas en sondeos deberán registrarse. Es importante determinar el porcentaje en volumen de bolos y tamaños gruesos encontrados en la exploración de los terrenos sueltos.

La descripción de los testigos de los sondeos debería prepararla preferentemente un especialista y debe contener el nombre típico de la roca con datos sobre sus detalles litológicos y estructurales, condición física, incluyendo alteración, y cualquier detalle geológico, mineralógico o físico convenientes para la interpretación de las condiciones subterráneas del terreno.

Además del informe geológico-geotécnico de materiales elaborado para el Proyecto, se irá incorporando al Archivo Técnico de la presa toda la información relativa a investigación de

materiales que se realice en las etapas posteriores, tanto previas a la construcción como durante ésta, para el progresivo conocimiento de las características de los materiales.

5.

PROSPECCIÓN DE MATERIALES NATURALES PARA HORMIGONES

5.1. Introducción

Nos referimos aquí a los aspectos singulares de la explotación de préstamos para la consecución de áridos para hormigones. No hacemos referencia a los aspectos generales, que ya han sido tratados en otros capítulos de esta Guía.

La prospección de materiales que puedan servir de base para la obtención de los áridos de los hormigones de una presa, se deberá desarrollar con una amplitud y nivel de detalle acordes a la etapa en que se encuentra el proceso de desarrollo de dicha presa.

- En la etapa de estudio de viabilidad deberá considerarse el mayor número de alternativas posibles tanto en el ámbito de los materiales sueltos (ríos, terrazas, coberturas de ladera, depósitos glaciares, etc) como en el de las rocas, tratando de brindar a quienes realicen los estudios o actuaciones posteriores un amplio abanico de posibilidades. En esta etapa el estudio se basará, fundamentalmente, en la documentación sobre la geología del área de la presa y en los inventarios de rocas industriales o de canteras mencionados en otros capítulos de esta Guía, complementándolos con la información que pueda recogerse en la propia zona. Se intentará definir, en cada caso, la situación del yacimiento y su comunicación con la presa, la naturaleza del material y su homogeneidad, así como una estimación, aunque sea grosera, del volumen explotable y del impacto medio ambiental que dicha explotación pudiera acarrear.
- En la etapa de proyecto se debe elegir un yacimiento, para lo que será preciso seleccionar, para un estudio más profundo, dos o tres alternativas. Para la elección de

éstas se aplicarán criterios de distancia, impacto ambiental, cercanía a puntos de energía, dificultades de explotación o acceso, calidad del material, etc.

- Por último, en la etapa de construcción, deberán estudiarse, con detalle, los aspectos que permitan optimizar el coste de la explotación y el de la maquinaria o medios auxiliares que intervienen en el proceso de preparación de los áridos a partir de los materiales del yacimiento.

También, en esta etapa, es conveniente, tomar en consideración alguna de las alternativas desechadas en la fase de proyecto ya que, al tener en cuenta costes de oportunidad, la decisión podría inclinarse hacia la utilización de alguna de ellas.

5.2. Procedencia de los materiales

En cualquier caso, y en cualquiera de las etapas, los medios de investigación difieren según se trate de rocas competentes (canteras) o de rocas sueltas (depósitos o graveras).

5.2.1. Canteras

5.2.1.1. Etapa de viabilidad

En la etapa de viabilidad, o de localización, la investigación de una cantera, debe intentar aportar datos que permitan conocer, en una primera aproximación, las siguientes características del árido: [R.7 y R.8].

- Naturaleza
- Tamaño máximo posible
- Homogeneidad
- Forma previsible
- Parámetros económicos (costes de explotación y preparación)
- Datos para estudio de impacto ambiental

Para ello se deberá apreciar en cada posible cantera:

- Naturaleza de la roca
- Fragilidad
- Densidad del material
- Dureza
- Estratificación en su caso
- Fracturación y estado de diaclasas
- Exfoliación en su caso
- Espesores y zonas explotables
- Montera

- Distancia a la obra
- Topografía general
- Cantidad explotable

Deberá hacerse un levantamiento geológico y, aunque sea a partir de muestras superficiales, ensayos de análisis petrográfico, densidad, sustancias extrañas, etc.

5.2.1.2. Etapa de Proyecto

En la etapa de Proyecto, o de reconocimiento, una vez decidida la localización, deberán confirmarse las apreciaciones hechas, para lo que será necesario reconocer, en profundidad, el macizo. [R.3].

Es de gran utilidad la realización de ensayos geofísicos, por ejemplo, de tipo sísmico.

Es muy recomendable, recurrir a la ejecución de algunos sondeos de reconocimiento cuyo número será función del volumen que se pretenda extraer, de la potencia del macizo rocoso y de su homogeneidad. No deberían ser menos de tres, dos de ellos situados en la línea extrema del frente de explotación previsto, y el tercero hacia el centro de la zona a explotar, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, debe estudiarse una zona capaz de producir un volumen superior, al menos en un cincuenta por ciento, al que se prevé utilizar de dicha cantera. La profundidad de estos sondeos será entre un diez y un veinte por ciento mayor que la altura de explotación estimada, al menos, de dos metros más.

Como regla general puede decirse que la distancia entre sondeos no debe ser mayor de 150 a 200 metros estableciendo siempre una fila en la línea de frente final prevista y otra u otras filas al tresbolillo con esa y manteniendo los mismos criterios de distancia.

Sin duda, en ocasiones, el propio resultado de los sondeos aconsejará establecer un sistema de explotación distinto al inicialmente concebido, lo que puede llevar aparejada la conveniencia de ejecución de algún sondeo adicional. No hay que olvidar, por otra parte, que la misión fundamental de los sondeos es la de conformar o matizar las hipótesis planteadas sobre la base de los estudios geológicos por lo que, aisladamente, tampoco serán absolutamente definitivos.

La información obtenida en esta etapa debe permitir realizar los estudios de coste de explotación de los materiales a utilizar.

5.2.1.3. Etapa de construcción

En la etapa de construcción, habrán de conseguirse, de la información existente, los datos para desarrollar el estudio y proyecto de explotación y precisar los estudios de coste, para los que serán determinantes el conocimiento de la montera y la localización y dimensiones de las zonas alteradas. En algunos casos convendrá hacer algún reconocimiento adicional con estos fines.

De los testigos extraídos, con diámetro mínimo de 50 mm, o mayor si la calidad de la roca lo aconseja, habrán de obtenerse muestras para hacer un estudio mineralógico, y determinar: densidad, resistencia a compresión simple, dureza, abrasividad y porosidad. Así mismo, la observación y estudio de los testigos, permitirá profundizar en el conocimiento de la fracturación y confirmar o corregir las estimaciones de tamaño máximo posible y de forma de árido. La investigación debe comprender otros dos aspectos. El estudio detallado del impacto medioambiental y las afecciones a terceros o a la propia obra.

De todas formas la investigación en esta etapa no debería considerarse finalizada hasta haber hecho voladuras y haber procesado los productos en la instalación correspondiente. Por esto siempre que sea posible, es muy conveniente, como final del proceso de investigación propiamente dicho, hacer unas voladuras de prueba y producir áridos en una instalación dotada de máquinas de machaqueo del mismo tipo que las que se estén pensando emplear en la presa en cuestión. En ocasiones, estas pruebas dan luz sobre matices que pueden ser de gran incidencia técnica y económica. Al mismo tiempo suministran áridos que permiten iniciar los ensayos para definición del hormigón.

5.2.2. Depósitos naturales

La investigación de depósitos naturales comprende tres etapas: la de localización, la de reconocimiento y la de pruebas. [R.8].

5.2.2.1. Etapa de localización

En la etapa de localización, propia del estudio de viabilidad, se trata de comprobar la existencia de los depósitos a investigar y determinar, aunque sea de forma grosera, su extensión, su espesor, el tipo o tipos de roca que lo constituyen, el tamaño máximo esperado del árido, y la proporción aproximada de finos y su naturaleza. Para ello, en general, será necesaria, en una primera inspección, la realización de alguna calicata, la toma de alguna muestra y algún ensayo sencillo.

5.2.2.2. Etapa de reconocimiento

La etapa de reconocimiento es la propia del Proyecto y tiene por objeto la determinación de las características del material de los yacimientos seleccionados. [R.3].

Se debe desarrollar sobre un programa de ejecución de catas distribuidas de una forma sistemática previamente definida, normalmente formando una cuadrícula, de amplitud acorde con las necesidades y con la extensión del yacimiento (considerando a efectos de investigación una cantidad del orden del doble del volumen de áridos a emplear en el hormigón de la presa) estableciendo una equidistancia de los puntos de la cuadrícula, que vendrá determinada por la superficie y el espesor del yacimiento, por su grado de homogeneidad y por el nivel de detalle de la investigación, de tal manera que, en esta etapa, se recomienda una equidistancia del orden de

100 m para extensiones superiores a una Ha, no debiendo hacerse menos de tres en extensiones menores.

Se tomarán muestras de las catas, directamente de la pared, no de los montones del material extraído, a distintas alturas si hay discontinuidades apreciables, y de cada una de ellas se harán los ensayos que permitan determinar, en el conjunto, cual puede ser el tamaño máximo a emplear en el hormigón, el huso granulométrico del depósito, la cantidad y las características de los finos, la forma del árido, la cantidad y características de las adherencias, la cantidad de sobrantes, la existencia de partículas blandas y en su caso, sus características. También se debe calcular el volumen que podría extraerse teniendo en cuenta los sobrantes (finos y gruesos). Si por la cantidad de gruesos sobrantes, o por la mejora del coeficiente de forma, o por la disminución del posible efecto perjudicial de las adherencias, se considerara conveniente triturar alguna parte del material, se deberán aplicar los criterios que se han expuesto en el apartado dedicado a la investigación de canteras y llevar a cabo los ensayos correspondientes.

Es importante preparar una buena cartografía de detalle en la que se sitúen las catas efectuadas. De cada una de las catas se deben describir los cortes verticales, referenciando la situación de la toma de muestras.

En el caso de depósitos profundos con nivel freático alto será necesario hacer pozos, salvo que el depósito tenga extensión superficial sobreabundante y pueda obviarse el trabajo a niveles profundos.

En cualquier caso en el Proyecto se debe definir el yacimiento elegido y todas las características del material.

5.2.2.3. Etapa de construcción

En la etapa de construcción se intentarán conocer los detalles característicos del yacimiento; la distribución de los materiales dentro de él, la potencia de cada zona y la influencia del nivel freático. Para ello se utilizarán los datos de la etapa de reconocimiento (que deben figurar en el Proyecto) y con ellos se podrá calcular el volumen de terreno de cobertura a eliminar, y determinar, si hay lugar, las zonas en que se dan características diferentes a fin de ordenar la explotación. Podrá ser necesaria la ejecución de nuevas catas que se intercalarán entre las llevadas a cabo en la etapa anterior, utilizando los mismos procedimientos.

A veces es conveniente llevar a cabo algún reconocimiento geofísico (sísmico o eléctrico) sobre todo para calcular la potencia del yacimiento.

Por último, y de la misma forma que se señalaba en el caso de canteras, aunque aquí con más facilidad, es de gran interés preparar árido suficiente para poder llevar a cabo ensayos previos de hormigones. Lo ideal en este caso, es emplear el mismo tipo de proceso que se piensa usar en la obra utilizando instalaciones de la misma especie.

Por otra parte, en la etapa de construcción, es conveniente revisar las razones por las que el proyectista se decidió por el yacimiento elegido ya que, consideraciones de índole económica pueden hacer más interesante algún yacimiento de los que se desecharon.

5.3. Propiedades y características del material del yacimiento

Sea cual sea su procedencia, de cantera o de depósito natural, el material del que se va a obtener el árido para hormigones de presa, debe cumplir algunos requisitos, por la influencia que determinadas características tienen en alguna de las propiedades del hormigón o en el proceso de fabricación del árido, tal como se detalla en el Anejo V. Algunas de estas características son: [R.1 y R.6]

- **Densidad:** La densidad aparente debe ser mayor que la del hormigón que se pretende conseguir, pudiéndose establecer como límite inferior el de $2,5 \text{ Tn/m}^3$.
- **Resistencia a compresión simple:** También debe ser mayor que la que se especifique para el hormigón.
- **Absorción:** Debe ser menor del 3% por su influencia en el proceso de hidratación.
- **Contenido de sustancias perjudiciales:** El material no debería tener, en forma libre, mica, sílice, sulfuros oxidables, yesos, ni sustancias de baja densidad.
- **Solubilidad:** El material no debe ser soluble en agua.
- **Reactividad:** La composición mineralógica no debe incluir elementos que tengan una potencial capacidad de reacción expansiva con los álcalis u otro tipo de reacciones peligrosas para la durabilidad del hormigón [R.2]. Se recomienda hacer estudios específicos de estas alteraciones que están influyendo notablemente en algunas presas antiguas.

Estas características deben ser contrastadas en la etapa de viabilidad aunque, en cualquier caso, será en los hormigones preparados con los áridos procedentes del material en cuestión donde habrá de estudiarse la influencia real de estos condicionantes.

Además, en la etapa de proyecto, por su influencia en las propiedades del hormigón, es conveniente conocer: la capacidad de absorción de agua, el coeficiente de dilatación térmica, y el calor específico; y, por su influencia en la definición de los equipos e instalaciones de proceso, deben determinarse la fragilidad y la resistencia a la abrasión.

5.4. Propiedades y características de los áridos

En cualquiera de las etapas de la investigación no debe olvidarse que el objetivo final es conseguir unos áridos que permitan asegurar las características de densidad, impermeabilidad, resistencia y durabilidad exigibles a cada uno de los hormigones del Proyecto, que permitan obtener, de forma homogénea, la docilidad necesaria para su colocación en obra y que se obtengan al menor coste posible.

Por esta razón es preciso definir algunas características de los áridos que permiten alcanzar estos fines. Aquí se exponen, a continuación, algunas de estas características indicando unas limitaciones, tomadas de diversas normas y que son de obligado cumplimiento en los campos de aplicación de dichas normas. Los hormigones que constituyen el cuerpo de una presa no están sujetos, en general, a su cumplimiento. En definitiva será el proyectista el que, en el Pliego de Condiciones de cada obra definirá las limitaciones que deban ser exigidas en función de las necesidades estructurales y de las condiciones de los materiales que pueden emplearse.

Con carácter general podemos decir que todas las limitaciones impuestas a los áridos podrían ser desbordadas si los hormigones realizados con dichos áridos consiguieran las características de peso específico, impermeabilidad, resistencia y durabilidad necesarias para la presa concreta de que se trate.

En cualquier caso y, con independencia del método de formulación utilizado para la determinación de la composición de un hormigón, es conveniente distinguir, a estos efectos, en los áridos, entre fracción fina o arena y fracción gruesa o grava entendiendo por arena el árido o fracción del mismo que pasa por un tamiz de malla de 4 mm de luz (tamiz 4 UNE-EN 933-2:96) y por grava o árido grueso el que queda retenido por dicho tamiz. Tanto una como otra deberán cumplir unas condiciones físico-químicas, unas condiciones granulométricas y unas condiciones físico-mecánicas. [R.5].

5.4.1. Características del árido fino

5.4.1.1. Condiciones físico-químicas

- a) Terrones de arcilla. La cantidad máxima en % del peso total de la muestra debe ser del 1% (ensayo según UNE 7133:58).
- b) La cantidad de material retenido por el tamiz 0,063 UNE-EN 933-2:96 y que flota en un líquido de peso específico 2, debe ser inferior al 0,5% del peso total de la muestra (ensayo según UNE 7244:71).
- c) La cantidad de compuestos de azufre expresados en SO_3^- y referidos al árido seco debe ser inferior al 1% del peso total de la muestra (ensayo según UNE-EN 1744-1:99).

- d) No debería utilizarse un árido fino que presente una proporción de materia orgánica tal que, ensayado según la norma UNE-EN 1744-1:99, produzca un color más oscuro que la solución patrón.
- e) El árido, y por tanto, la arena no debe ser proclive a la reacción con los álcalis. Para tratar de determinar la potencial reactividad hay numerosos ensayos, ninguno de ellos definitivo. [R.2]. En primer lugar, se recomienda hacer examen petrográfico que proporcionará información sobre el tipo de reactividad que puede presentarse.

Los ensayos recomendados para determinar la capacidad de reacción álcali-silice o álcali-silicato son los descritos en las normas UNE 146507:99 EX Parte 1 y UNE 146508:99 EX.

Para determinar la reactividad álcali-carbonato puede realizarse el ensayo UNE 146507:99 EX Parte 2.

En cualquier caso, si el examen petrográfico detecta la posibilidad de reactividad potencial en los áridos, será conveniente recurrir a especialistas en la materia.

- f) La cantidad de sulfatos solubles en ácidos expresados en SO_3^- y referidos al árido seco, determinados según el método de ensayo indicado en UNE-EN 1744-1:99 será inferior al 0,8% del peso total de la muestra.

5.4.1.2. Condiciones granulométricas

- a) A la cantidad de finos que pasen por el tamiz 0,063 UNE-EN 933-2:96 en % del peso total de la muestra se le suele fijar un límite del 6%.

En arenas procedentes del machaqueo de rocas calizas este límite suele elevarse a:

- 15% para obras en ambientes poco agresivos
- 10% para obras en ambientes agresivos o que hayan de soportar ciclos de hielo-deshielo

- b) Equivalente de arena. No son recomendables aquellos áridos finos cuyo equivalente de arena (EAV) determinado a vista (UNE 83131:90) sea inferior a 75 u 80 según la agresividad del ambiente y la naturaleza del árido. [R.5].
- c) Curva granulométrica. Se recomienda que la curva granulométrica de la arena quede comprendida entre los límites siguientes: [R.4]

	% en peso que pasa por cada tamiz						
Abertura de malla (mm)	5,00	2,50	1,25	0,60	0,30	0,15	0,08
Límite superior	100	95	85	62	30	15	5
Límite inferior	95	75	55	30	12	4	0

No obstante, pueden emplearse husos granulométricos más amplios como el que se recomienda en la Instrucción de Hormigón Estructural [R.5].

5.4.1.3. Condiciones físico-mecánicas

- Friabilidad de la arena. Se suele fijar un límite superior a 40 determinándola con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE-EN 1097-1:97 (ensayo micro-Deval).
- Absorción del agua. No debe ser mayor del 5%. Se determina con arreglo al método de ensayo indicado en las UNE 83133:90 y 83134:90.
- Resistencia a la helada. Cuando sean de temer heladas deberá comprobarse que las arenas no presentan una pérdida de peso superior al 15 por 100 al ser sometidas a cinco ciclos de tratamiento con soluciones de sulfato magnésico, de acuerdo con el método de ensayo UNE- EN 1367-2:99. Si los áridos no pasan satisfactoriamente estas pruebas conviene hacer pruebas de hormigón.

5.4.2. Características del árido grueso

5.4.2.1. Condiciones físico-químicas

- Terrones de arcilla. No deberán exceder del 0,25% del peso total de la muestra haciendo la determinación con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE 7133:58.
- Partículas blandas. Su cantidad no debe pasar del 5% del peso total de la muestra cuando se ensaya según el método indicado en la UNE 7134:58.
- La cantidad de material retenido por el tamiz 0,063 UNE-EN 933-2:96 y que flota en un líquido de peso específico 2 no debería ser superior al 1% del peso total de la muestra (ensayo según UNE 7244:71).
- Compuestos de azufre. Su cantidad, expresada en SO_3^- y referidos al árido seco, será inferior al 1% del peso total de la muestra (método de ensayo UNE-EN 1744-1:99).

- e) Reactividad potencial con los álcalis del cemento. Es de aplicación lo expresado en el punto 5.4.1.1., apartado e), aunque los problemas más graves los suelen dar los áridos finos.
- f) La cantidad de sulfatos solubles en ácidos expresados en $\text{SO}_3^{=}$ y referidos al árido seco, será inferior al 0,8% del peso total de la muestra (UNE-EN 1744-1:99).

5.4.2.2. Condiciones granulométricas

- a) Tamaño máximo del árido. Se denomina tamaño máximo del árido la mínima abertura de tamiz. UNE-EN 933-2:96 por la que pase más del 90% en peso cuando además pase el total por el tamiz de abertura doble.
- b) Para garantizar la buena dosificación granulométrica de los áridos, se deberán dosificar los áridos gruesos en varias clases.

Cada una de estas clases debe cumplir lo especificado en la norma UNE 146120:97 en la que se define la clase d-D y sus condiciones de clasificación. (Anejo V).

- c) Contenido de finos. Los que pasen por el tamiz 0,063, UNE-EN 933-2:96, no deberían exceder del 1% del peso total de la muestra pudiendo admitirse hasta un 2% si se trata de árido procedente del machaqueo de rocas calizas. El volumen total de finos (incluidos los de la grava) sólo se podrá definir realmente haciendo hormigones de prueba.
- d) Forma. El coeficiente de forma del árido grueso no debe ser inferior a 0,20 utilizando el método de ensayo indicado en la norma UNE 7238:71.
- e) El índice de lajas determinado mediante el ensayo indicado en la norma UNE-EN 933-3:97 debe ser inferior a 35.

5.4.2.3. Condiciones físico-mecánicas

- a) Resistencia al desgaste. Un límite de 40 en el ensayo de Los Ángeles (Norma UNE-EN 1097-2:99) es un valor razonable.
- b) Absorción de agua. No debe ser mayor del 5% cuando se determina con arreglo a los métodos de ensayo UNE 83133:90 y 83134:90.
- c) Resistencia a la helada. Cuando se teman heladas deberá comprobarse que el árido grueso no presenta una pérdida de peso superior al 18 por 100 al ser sometido a cinco ciclos de tratamiento con soluciones de sulfato magnésico, de acuerdo con el método de ensayo UNE-EN 1367-2:99. Como se ha dicho antes, si los áridos no pasan satisfactoriamente estas pruebas se recomienda hacer pruebas de hormigón para conocer el comportamiento real.

- d) La densidad aparente de cada grano del árido grueso para el hormigón no debería ser menor de $2,5 \text{ gr/cm}^3$. Los de menor densidad requerirían un análisis técnico y económico específico.
- e) El árido grueso para hormigón colocado por encima de la zona sujeta a las fluctuaciones del nivel del agua no debe indicar en la prueba del sulfato magnésico, después de cinco ciclos alternados de saturación y secado, una pérdida para la fracción ensayada superior al 15 por 100 del peso inicial. El árido grueso que no soporte esta prueba satisfactoriamente y muestre una pérdida superior al 15 por 100 se debe ensayar en hormigón.
- f) Las adherencias que recubren a veces los áridos (especialmente los procedentes de depósitos naturales) son, en principio, perniciosas porque crean una zona más débil en torno a los granos afectados. Es recomendable hacer con estos áridos hormigones de prueba y analizar cómo y con qué carga rompen las probetas.

5.4.3. Observaciones a tener en cuenta en la etapa de construcción

Durante la fase de construcción el reconocimiento de los áridos producidos debe conseguir dos fines:

- a) Comprobar que los áridos cumplen las condiciones y requerimientos de calidad exigidos.
- b) Determinar en qué medida las instalaciones están respondiendo a las premisas establecidas y poner en marcha las medidas correctoras necesarias.

Para el primero de los fines se harán los ensayos sistemáticos que se establezcan en función de la problemática concreta del material elegido.

Para el segundo de los fines interesa, sobre todo, la determinación de la curva granulométrica de cada uno de los tamaños pero tomando las muestras a la vez que se hace un control de producción de cada tamaño. Así se podrán conocer, no solo la eficacia de cribado en ese momento, sino también la influencia del estado de desgaste de los elementos de trituración en la composición del árido, concluyendo si es necesario o no llevar a cabo algún cambio en dichos elementos. También se podrá estudiar la importancia de la automolienda.

Por otra parte se debe controlar la eficacia del sistema de lavado no solo con la determinación del porcentaje de finos a que nos hemos referido sino también con el análisis, por sedimentación, de los lodos que se tiran para saber si se están desaprovechando los finos útiles.

Es también importante hacer observaciones frecuentes, siquiera visuales, del préstamo o la cantera por si pudiera apreciarse algún cambio de estructura, disposición o estado del material en el yacimiento y tomar, en consecuencia, las medidas necesarias.

Los métodos de ensayo se relacionan en el Anejo II.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS CITADAS EN EL TEXTO

CAPÍTULO 1 - Introducción

- R.1 Gómez Laa, G., Alonso Franco, M. y Romero J. L. "Reflections on some incidents in spanish dams". Q. 49, R. 47, Congreso de Nueva Delhi, ICOLD 1979.
- R.2 Alonso, M. "Incidentes y accidentes en presas". Curso de seguridad de presas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1994.
- R.3 Alonso, M. "Casos patológicos de las presas españolas". Simposio sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza 1993.
- R.4 Yagüe, J. y Berga, L. "Dam failures and incidents in Spain. Lessons learned". Contribución al Congreso de Florencia, ICOLD 1997.
- R.5 Larocque, G. Closing the session. Q. 66. Congreso de Viena, ICOLD 1991.
- R.6 ICOLD "Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Dams". Bull. 79. 1991.
- R.7 ICOLD "Ageing of Dams and Apurtenant Works". Bull. 93. 1994.
- R.8 Penman, A. D. "Materials and construction methods for embankment dams and cofferdams". General Report Q. 55. Congreso de Río de Janeiro, ICOLD 1982.
- R.9 Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas. "Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses". 1996.
- R.10 Fell, R., Mc Gregor, P. y Stapledon, D., "Geotechnical engineering of embankment dams". Balkema, 1992.

CAPÍTULO 2 - Estudios Geológicos y Geotécnicos

- R.1 Instituto Tecnológico Geominero (1981). "Inventario de los sondeos verticales realizados en España". 1981.
- R.2 ISRM "Basic Geotechnical Description of Rock Masses" pp. 92-93. 1980.
- R.3 IAEG. Commission of Engineering Geological Maps. "Clasification of rocks and soils of Engineering Geological Maps. Part. I: Rock and Soils Materials". Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., nº 19, pp. 366-367. 1979.
- R.4 Norma Española "Representación de las rocas sedimentarias, en cortes geológicos y columnas de detalle. Símbolos gráficos". UNE 22-601-74". 1974.

- R.5 Ewert, F. K., "Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites". Berlin. Springer-Verlag. p. 163. 1985.
- R.6 ISRM. "Rock characterization Testing and Monitoring ISRM suggested methods" (Editor Brown, E. T.) Pergamon Press. 1981.
- R.7 Barton, N. "The shear strenght of rocks and rock joints". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 13, N9, pag. 255-279. 1976.
- R.8 Houlsby, A. C. "Construction and Design of Cement Grouting. A Guide to Grouting in Rock Foundations" John Wiley & Sons. p. 228. 1990.
- R.9 Bieniawsky, Z.T. "Classification of Rock masses for engineering: The RMR system and future trends". Comprehensive Rock Engineering. Pergamon Press. 1993.

CAPÍTULO 3 - Estudios de sismicidad

- R.1 Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. "Norma de Construcción Sismorresistemte. (Parte general y edificación). NCS-94". 1994.
- R.2 Instituto Geográfico Nacional. Presidencia del Gobierno. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. "Norma Sismorresistente P.D.S.". 1974.
- R.3 Ministerio de Obras Públicas "Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas". 1967.
- R.4 Eurocode 8 "Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures". Part 1.1. General rules -Seismic Actions and General Requirements for Structures. 1996.
- R.5 Pérez Saíz, A., Roca Adrover, A. y Sánchez Belchi, G. "Análisis de los primeros acelerogramas obtenidos en España en la presa de Béznar (Granada)". Revista de Obras Públicas. Abril-mayo. pp. 523.530. 1988.
- R.6 U. S. Nuclear Regulation Commission. Appendix A "Seismic and Geological Sitting Criteria for Nuclear Power Plants". Tittle 10. Cap. 1. Code of Federal Regulations-Energy. Part 100. Reactor Site Criteria. 1978.
- R.7 Curtis, G. H. "A Guide to Dating Methods for the Determination of the Last Time of Movements of Faults". U. S. Nuclear Regulatory Commission. Nureg/Cr-2.382. 1981.

CAPÍTULO 4 - Prospección de materiales para presas de materiales sueltos

- R.1 Bureau of Reclamation, "Manual de tierras". Editorial Técnica Bellisco. Madrid. 1980.
- R.2 Jimenez Salas, J. A., Justo Alpañes, J. L. "Geotecnia y cimientos. I Propiedades de los suelos y de las rocas". 1975.
- R.3 Cooke, J. B. "Progress in rockfill dams", J. Geotechnical Engineering, ASCE 11010. 1984.
- R.4 ICOLD. "Rock materials for rockfill dams". Bulletin 92. 1993. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- R.5 ICOLD. "Embankment dams upstream slope protection". Bulletin 91. 1993. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- R.6 De Cea J. C. y Olalla, C. "Resistencia al corte de escolleras". Monografía M18 - CEDEX. 1991.
- R.7 U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. "Design small dams". 1987 (3ª Edición).
- R.8 Penman, A. D. "Materials and construction methods for embankment dams and cofferdams". Q55. General Report. ICOLD. Congreso Río de Janeiro. 1982.
- R.9 Jimenez Salas, J. A. "Núcleos, espaldones y escolleras: estudio de préstamos y características de los materiales". Simposio sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza, 1993.
- R.10 Alonso, M. y Yagüe, J. "Earth materials for cores and homogeneous earthfill dams. Singularities". Q.73, R.25. Congreso de ICOLD de Florencia, 1997.
- R.11 García de la Oliva, J. L., Martínez, J. M. y Santos, A. "Estudio del empleo de materiales margosos en el núcleo de impermeabilización de presas". Comunicación 1.05. Simposio sobre Geotecnia de presas de Materiales Suelos. Zaragoza, 1993.
- R.12 Gómez Laa, G., Alonso, M. y Romero, J. L. "Utilización de materiales Plio-Cuaternarios en las presas de materiales sueltos". Revista de Obras Públicas. Madrid, 1976.
- R.13 Sherard, J. "Trends and debatable aspects in embankment dam engineering". Water Power and Dam Construction". Diciembre 1984.
- R.14 Sherard, J. y Dunnigan, L. "Filters and Leakage Control in embankment dams". Proceedings Symposium on Seepage and Leakage from dams and impoundments, ASCE, 1985.

- R.15 Sherard, J. "Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils" Q.49 - R.2. Congreso de ICOLD. New Delhi, 1979.
- R.16 Sherard, J., Dunnigan, L., y Decker, R. "Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils" Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, Jan. 1976.
- R.17 Sherard, J., Dunnigan, L. y Talbot, J. "Basic properties of sand and gravel filters" Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE June 1984.
- R.18 Sherard, J., Dunnigan, L. y Talbot, J. "Filters for silts and clays" Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE June 1984.
- R.19 Sherard, J. y Dunnigan, L. "Filters and Leakage Control in Embankment dams" Proceedings Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE 1985.
- R.20 ICOLD. "Dispersive Soils in embankment dams. Revisión general". Bull. 77. 1990.
- R.21 Cook, J. B. y Sherard, J. "Concrete face rockfill dam: II. Design", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Oct. 1987.
- R.22 Dapena, E. "Comportamiento tenso - deformacional de zahorras naturales como material para espaldones de presas". Simposio sobre Geotecnia de presas de materiales sueltos. Zaragoza, 1993.
- R.23 ICOLD. "Conventional methods in Dam Construction". Bull. 76. 1990. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- R.24 Fell, R., Mc Gregor, P. y Stapledon, D. "Geotechnical Engineering of Embankment Dams". Balkema, 1992.
- R.25 ICOLD. "Granular filters and drains. Synthesis and recommendations". Bull. 95. 1994.

CAPÍTULO 5 - Prospección de materiales naturales para hormigones

- R.1 ACI 207. "Mass Concrete for Dams and other massive structures". Detroit. 1980.
- R.2 ICOLD. "Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Dams". Bull. 79. 1991. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- R.3 International Association of Engineering Geology. "International Symposium on aggregates". Niza, 1984.

- R.4 Ministerio de Obras Públicas. "Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas". 1967.
- R.5 Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. "Instrucción de Hormigón Estructural". 1999.
- R.6 Bureau of Reclamation. "Manual de Hormigón". Denver, 1990.
- R.7 E.T.S. de I. de Minas. "Manual de Áridos". Madrid, 1992.
- R.8 ACI 221.R-61. "Selection and use of aggregates for Concrete". Detroit, 1984.

OTRAS REFERENCIAS DE INTERÉS**TEMAS DESARROLLADOS EN LOS CONGRESOS DE ICOLD RELACIONADOS CON ESTA GUÍA**

Estocolmo, 1933

Q.2a Research methods so as to ascertain whether a given material is suitable for being used in the construction of an earth dam.

Q.2b Study of physical laws governing infiltration of water through the dam and the subjacent soil.

Washington, 1936

Q.6 Geotechnical studies of foundations materials.

París, 1955

Q.18 Settlement of dams due to compressibility of the dams materials or of the foundations soil, including earthquake problems.

Nueva York, 1958

Q.22 Compaction methods and moisture content for materials used in the construction of earth care and supporting fill for earth and rockfill dams.

Roma, 1961

Q.24 The selection, processing and specification of aggregates for concrete for large dams.

Edimburgo, 1964

Q.28 Physical and mechanical properties of rock in situ, means of determining these properties and improving them, with special reference to the design and construction of large dams.

Estambul, 1967

Q.32 The safety of dams from the point of view of the foundations and the safety of reservoir banks.

Montreal, 1970

Q.37 Recent developments in the design and construction of dams and reservoirs on deep alluvial, karstic, or other unfavourable formations.

Madrid, 1973

Q.42 Impervious elements and slope protection on earth and rockfill dams.

Méjico, 1976

Q.45 Leakage investigation and drainage of dams and their foundations.

Nueva Delhi, 1979

Q.49 Deterioration or failures of dams.

Río de Janeiro, 1982

Q.53 Influence of geology and geotechnics on the design of dams.

Q.55 Materials and construction methods for embankment dams and cofferdams.

Lausana, 1985

Q.58 Foundation treatment for control of seepage.

Viena, 1991

Q.66 Dams on difficult foundations.

Q.67 New developments for fill dams and fill cofferdams.

Florencia, 1997

Q.73 Special problems associated with earthfill dams.

Q.74 Performance of reservoirs.

BOLETINES ICOLD QUE ABORDAN ASPECTOS CONTENIDOS EN ESTA GUÍA

- ICOLD. "Seismicity and dam design". Bull. 46. 1983.
- ICOLD. "Filling materials for watertight cut off walls". Bull. 51. 1985.
- ICOLD. "Earthquake analysis for dams". Bull. 52. 1986.
- ICOLD. "Moraine as embankment and foundation material - State of the art". Bull. 69. 1989.
- ICOLD. "Rockfill dams with concrete facing - State of the art". Bull. 70. 1989. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- ICOLD. "Selecting seismic parameters for large dams - Guidelines". Bull. 72. 1989.
- ICOLD. "Conventional methods in construction - Review". Bull. 76. 1990. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- ICOLD. "Dispersive soils in embankment dams - Review". Bull. 77. 1990.
- ICOLD. "Alkali-aggregate reaction in concrete dams - Review and recommendations". Bull. 79. 1991. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- ICOLD. "Rock foundations for dams". Bull. 88. 1993. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- ICOLD. "Reinforced rockfill and reinforced fill for dams - State of the art". Bull. 89. 1993. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- ICOLD. "Embankment dams. Upstream slope protection - Review and recommendations". Bull. 91. 1993. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- ICOLD. "Rock materials for rockfill dams - Review and recommendations". Bull. 92. 1993. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.

- ICOLD. "Ageing of dams and appurtenant works". Bull. 93. 1994. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- ICOLD. "Embankment dams - Granular filters and drains". Bull. 95. 1994.
- ICOLD. "Dam Failures - Statistical Analysis". Bull. 99. 1995. Existe traducción española del Comité Nacional Español de Grandes Presas.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Alonso, E. "Toma de Muestras en Sondeos de reconocimiento Geotécnico en España". Revista de Obras Públicas n^{os}. 507 y 508. Febrero-marzo y mayo. 1980.
- Alvarez, A., López Martos, J. y De Santiago, A. "La Presa de Beninar, Ejemplo de Interrelación de la Estanqueidad de la Presa y del Embalse". Revista de Obras Públicas. Marzo. pp. 285-360. 1976.
- Araoz, A. "Cimentación de Presas en Terrenos Terciarios con Disolución de Evaporitas y Erosión Interna en la Cuenca del Ebro". Revista de Obras Públicas. Enero-febrero. pp. 265-290. 1992.
- Bravo, G. "Teoría y Práctica de la Filtración y el Drenaje". Comité Nacional Español de Grandes Presas. 1995.
- Bravo, G. "La Presa de Canales". MOPT. 1991.
- Bureau of Reclamation. "Proyecto de Presas Pequeñas" (trad. esp.) Ed. Dossat, Madrid, 1970. Hay otra edición mejicana: "Diseño de Presas Pequeñas". Cía. Editorial Continental, Méjico, 1966.
- Bureau of Reclamation. "Gravity Dams".
- Bureau of Reclamation. "Arch Dams".
- Bureau of Reclamation. "Manual de Tierras". Editorial Técnica Bellisco. 1980.
- CEDEX. Curso de "Presas de Materiales Suelos". 1985.
- CEDEX. Curso de "Presas de Materiales Suelos". 1990.
- CEDEX. Curso de "Técnicas Modernas de Reconocimiento de Campo". 1993.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas. "Grandes presas: Experiencias Españolas en su Proyecto y Construcción". Pub. MOP. Madrid, 1976.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas. "Selección de Presas Españolas". Pub. MOPTMA. Madrid, 1993.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas. "IV Jornadas Españolas de Presas. Cimentación de las Presas". Murcia, 1993.

- Comité Nacional Español de Grandes Presas. "V Jornadas Españolas de Presas. Erosión Interna en las Presas de Materiales Suelos y Filtración en Presas y Embalses". Málaga, 1999.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas. Premio José Torán 1999. "Presas Resistentes al Sobrevertido". 1999.
- Cooke, J. B. and Sherard, J. L. "Concrete Face Rockfill Dams. Design, Construction and Performance". American Society of Civil Engineers. 1985.
- Embankment-Dam Engineering. Casagrande volume: John Wiley and Sons, New York. 1973.
- Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D. "Geotechnical Engineering of Embankment Dams". Balkema, 1992.
- Foundations for Dams. American Society of Civil Engineers. 1974.
- Gary, M., Mc Afee, R. and Wolf, C. L. (Editores). "Glosary of Geology". Washington. American Geological Institute. 1974.
- Golzé, A. R. (Editor) "Handbook of Dam Engineering". Van Nostrand Reinhold. 1977.
- Goodman, R. "Introduction to Rock Mechanics". John Wiley and Sons, 1980.
- Hunt, R. E. "Geotechnical Engineering Investigation Manual". Mc Graw-Hill. 1984.
- Jansen, R. B. "Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation". Van Nostrand Reinhold.
- Jiménez Salas, J. A. y Justo Alpañes, J. L. "Geotecnia y Cimientos". Madrid. Editorial Rueda. 1971.
- Jiménez Salas, J. A., Justo Alpañes, J. L. y Serrano González, A. A. "Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas". Madrid. Editorial Rueda. 1976.
- Legget, F. y Karrow, P. F. "Geología Aplicada a la Ingeniería Civil". Mc Graw-Hill. 1986.
- Lombardi, G. "La permabilité et l'injectabilité des massifs rocheuse fissurés". Revue Franç. Géotech., nº 51. pp. 5-29. 1990.
- López Arroyo, A. y Pérez Saiz, A. "Sismicidad Inducida por Embalses, Métodos de Estudio, Observación y Sistemas de Vigilancia. (Primera parte)". Revista de Obras Públicas. Septiembre. pp.619-626. 1975.

- López Arroyo, A. y Pérez Saiz, A. "Sismicidad Inducida por Embalses, Métodos de Estudio, Observación y Sistemas de Vigilancia. (Segunda parte)". Revista de Obras Públicas. Octubre. pp. 717-732. 1975.
- López Marinas, J. M. "Geología Aplicada a la Ingeniería Civil". Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas de Madrid. 1993.
- Lugeon, M. "Barrages et Geologie". Lausanne. Librairie de l'Université. 1933.
- Marsal, R. J. y Resendiz D. "Presas de Tierra y Enrocamiento". Editorial Limusa. 1975.
- Penman, A. D. M.: "Materials for Embankment Dams". Water Power, enero 1983.
- Pernía, J. M., Fresno, F., Mena, J. M., Lucena, A. y Lechosa, R. "Registro de Datos en Sondeos de Reconocimiento". Instituto Geológico y Minero de España. 1986.
- Revista de Obras Públicas. "XV Congreso Internacional de Grandes Presas". Mayo-junio 1985.
- Revista de Obras Públicas. "XVI Congreso Internacional de Grandes Presas". Abril-mayo 1988.
- Revista de Obras Públicas. "XVII Congreso Internacional de Grandes Presas". Junio 1991.
- Revista de Obras Públicas. "XIX Congreso de la Comisión Internacional de Grandes Presas". Diciembre 1997.
- Sanz Saracho, J. M. y Sola, P. R. "Los Nuevos Métodos Sísmicos y las Diagramas de Sondeos Mecánicos en el Proyecto y Construcción de Presas". Revista de Obras Públicas. Mayo-junio, pp. 397-412. 1985.
- Sherard, J. L., Woodward, R. J., Gizienski, S. F. and Clevenger, W. A. "Earth and Earth-Rock Dams". John Wiley and Sons, 1963.
- Sherard, J. L. and Dunningan, L. P. "Filters and Leakage Control in Embankment Dams". Proc. Symp. on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments. American Society of Civil Engineers. Mayo, 1985.
- Sherard, J. L. and Cooke, J. B. "Concrete - Face Rockfill Dams: I - Assessment, Journal of Geotechnical Engineering 113 10. Octubre, 1987.
- Sherard, J. L. and Cooke, J. B. "Concrete - Face Rockfill Dams: II - Assessment, Journal of Geotechnical Engineering 113 10. Octubre, 1987.

- Sherard, J. L. "Embankment Dams". American Society of Civil Engineers. 1992.
- Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones. "Simposio sobre Terraplenes, Pedraplenes y otros Rellenos". Madrid, 1986.
- Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones. "Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos". Zaragoza, 1993.
- Therond, R. "Recherche sur l'etancheité des lacs de barrage en pays karstique". París. Eyrolles. 1973.
- Wahlstrom, E. E. "Dams, Dams Foundations and Reservoir Sites". Elsevier, 1974.
- Walters, R. C. S. "Dam Geology". Butterworths London. 1962.
- Weaver, K. "Dam Foundation Grouting". American Society of Civil Engineers. 1991.
- Wilson, S. D. and Marsal, R. J. "Current Trends in Design and Construction of Embankment Dams". American Society of Civil Engineers. 1979.
- Zaruba, Q. y Mencl, V. "Engineering Geology". Developments in Geotechnical Engineering. Vol. 10. Elsevier. 1976.

CONTENIDO

ANEJO I MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DEL TERRENO

ANEJO II ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEJO III CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO ROCOSO

ANEJO IV PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN

**ANEJO V INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN DE LAS
CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS Y DE LOS SISTEMAS DE
FABRICACIÓN Y MANEJO**

ANEJO VI GLOSARIO GEOLÓGICO

ANEJOS

ANEJO I

MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DEL TERRENO

ÍNDICE	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	157
2. CLASIFICACIÓN DE ROCAS Y SIMBOLOGÍA A UTILIZAR EN PLANOS Y PERFILES	157
3. ZANJAS, CALICATAS Y POCILLOS	161
4. GALERÍAS	163
5. SONDEOS	165
6. DIAGRAFÍAS	171
7. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD	174
7.1. En sondeos	174
7.2. Otros ensayos	179
8. GEOFÍSICA	179
8.1. Sísmica	179
8.2. Eléctrica resistiva	180
8.3. Cross-hole y down-hole	182
8.4. Otras técnicas	183
9. TOMA DE MUESTRAS	185
10. ENSAYOS DE RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD	187
10.1. En sondeos	187
10.2. En superficie o en galerías	188
10.2.1. Ensayos de deformabilidad	188
10.2.2. Ensayos de capacidad portante	192
10.2.3. Ensayos de resistencia al corte	193
11. TERRAPLENES EXPERIMENTALES	193
11.1. Ensayos de compactabilidad	193
11.2. Ensayos de resistencia y deformabilidad	195
11.3. Ensayos de fisurabilidad	195
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199

RELACIÓN DE FIGURAS

Pág.

Fig. I. 1	Levantamiento geológico de una zanja	164
Fig. I. 2	Ejemplos de levantamiento geológico de galerías	166
Fig. I. 3	Columna estratigráfica de un sondeo	170
Fig. I. 4	Ejemplo de registro de parámetros de un sondeo	172
Fig. I. 5	Ejemplo de diagrfias diferidas	173
Fig. I. 6	Medida con clinómetro de la desviación de un sondeo	173
Fig. I. 7	Esquema de un ensayo Lefranc	174
Fig. I. 8	Esquema de un ensayo Lugeon	177
Fig. I. 9	Ejemplo de un perfil sísmico y su presentación	181
Fig. I.10	Ejemplo de un perfil eléctrico resistivo	183
Fig. I.11	Esquema del procedimiento de ejecución de un ensayo de cross-hole	184
Fig. I.12	Esquema del procedimiento de ensayo de down-hole	184
Fig. I.13	Disposición y esquema de ensayo de ondas superficiales	186
Fig. I.14	Esquema de ensayo dilatómico	188
Fig. I.15	Esquema de un ensayo de deformabilidad con gato plano	189
Fig. I.16	Esquema de un ensayo de deformabilidad en galería con placa rígida	190
Fig. I.17	Esquema de un ensayo de deformabilidad en superficie con placa rígida	190
Fig. I.18	Ensayos de deformabilidad con gatos radiales	192
Fig. I.19	Ensayo de deformabilidad en cámara de presión	193
Fig. I.20	Esquema de ensayo de corte en galería	194
Fig. I.21	Ensayo de "empuje pasivo"	196
Fig. I.22	Ensayo de fisurabilidad	197

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla I.1	Clasificación de la IAEG	158
Tabla I.2	Simbología de algunos materiales a utilizar	160
Tabla I.3	Colores a utilizar en los planos geológicos	161
Tabla I.4	Símbolos geológicos	162
Tabla I.5	Diámetros de sondeos usados en Europa	167
Tabla I.6	Diagrafias	171
Tabla I.7	Velocidad de propagación de ondas elásticas de compresión	180
Tabla I.8	Resistividad en ohmios metros	182
Tabla I.9	Variación de la resistividad de arenas con el porcentaje de agua	182

1. INTRODUCCIÓN

Las posibilidades de efectuar ensayos en el terreno son múltiples y muy variadas. En este Anejo se pretende ofrecer una visión panorámica de las distintas alternativas que hoy en día ofrece la técnica, para que en cada caso concreto los técnicos responsables decidan sobre su oportunidad en función de las peculiaridades de la obra.

Se ha prestado especial atención, por un lado a aquellos tipos de ensayos de los cuales existen experiencias en España, y por otro lado a aquellos ensayos que son más propios de la tecnología de presas.

En general los ensayos de campo son ensayos complejos y por lo tanto costosos, sobre todo en algunos casos. Pero, a su vez, la información que pueden suministrar es muy valiosa, e insustituible.

Excede del alcance de este Anejo la definición detallada de los procedimientos de investigación y de interpretación de los resultados. En algunas ocasiones existe normativa que define el ensayo.

2. CLASIFICACIÓN DE ROCAS Y SIMBOLOGÍA A UTILIZAR EN PLANOS Y PERFILES

Entre las clasificaciones a utilizar se señala la recomendada por la ISRM (1980) [R.1] que fue publicada en el Boletín de la IAEG (1979) [R.2] que se expone en la Tabla I.1. Divide las rocas en cinco grandes grupos: sedimentarias detríticas, piroclásticas, químicas orgánicas, metamórficas e ígneas, que a su vez distribuye en seis apartados atendiendo al tamaño del grano o los minerales. Aporta también datos sobre la composición y la estructura que presentan.

Estas rocas deben ser representadas en los planos y perfiles por lo que hay que adoptar una simbología apropiada. Puede utilizarse la que figura en la Norma UNE 22-601-74 [R.3] para rocas sedimentarias y recomendada especialmente para cortes geológicos y columnas estratigráficas. Posiblemente sea demasiado detallada por lo que en la Tabla I.2 se da una abreviada, donde se incluyen diferentes tipos de rocas, de mayor uso en España.

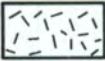
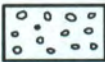
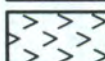
Cuando se usan colores, especialmente en planos de planta y con carácter geocronológico, lo adecuado es utilizar los colores del Mapa Geológico de España o tonos de los mismos si es preciso. En la Tabla I.3 se señalan estos colores.

TABLA 1.1 (Continuación)
Clasificación de la IAEG

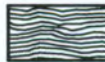
GRUPO GENETICO			METAMORFICO		IGNEO				
Estructura común			FOLIADA	MASIVA					
Composición			Cuarzo, feldspatos, micas, minerales oscuros aciculares		Los minerales claros son cuarzo, feldespato y mica		Minerales oscuros y claros	Minerales oscuros	
	60 mm.	Grano muy grueso	GNEIS (Orto-para) capas alterantes de minerales granulares y hojosos	MARMOL	Roca ácida	Roca intermedia	Roca básica	Ultrabásica	
		PEGMATITA				PIROXENITA Y PERIDOTITA SERPENTINITA			
		2 mm.			Grano grueso		GRANITO	DIORITA	GABRO
					Grano medio		MIGMATITA	GRANULITA	MICROGRANITO
	0,06 mm.		ESQUISTOS	CUARCITA			CORNUBIANITA		
	0,02 mm.	FILITA	ANFIBOLITA						
		Grano fino	PIZARRA	RIOLITA	ANDESITA				
	Grano muy fino	MILONITA							
						OBSIDIANA Y FLUORITA		TAQUILITA	
			VITREO AMORFO			VIDRIOS VOLCANICOS			

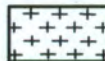
TABLA I.2
Simbología de algunos materiales a utilizar en planos y cortes

ROCAS SEDIMENTARIAS

Tierra vegetal _____	
Coluvial, Derrubios, Coberturas _____	
Aluvial, Acarreos _____	
Gravas _____	
Arenas _____	
Limos, Limolitas _____	
Arcillas, Argilitas _____	
Conglomerados _____	
Areniscas _____	
Margas _____	
Calizas _____	
Calizas margosas _____	
Calizas areniscosas _____	
Dolomías _____	
Yesos _____	

ROCAS METAMORFICAS

Pizarras _____	
Esquistos _____	
Gneises _____	

ROCAS PLUTONICAS _____ 

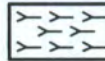
ROCAS VOLCANICAS _____ 

TABLA I.3
Colores a utilizar en los planos geológicos

Precámbrico y Azoicos	Rosa
Cámbrico	Verde oscuro
Silúrico y Odovícico	Grisos oscuros
Devónico	Salmón
Carbonífero	Morado
Pérmico y Permotrias	Marrón claro
Trías	Violeta
Jurásico y Liásico	Azules oscuros
Cretácico	Verde claro
Terciario	Amarillo y naranja
Cuaternario	Gris claro

En ocasiones, el empleo de tramas o colores puede restar claridad al plano, por ejemplo enmascarando la topografía de base, por lo que se pueden sustituir por letras repartidas por las zonas de los distintos afloramientos. Conviene que estas letras sean alusivas a los nombres de los períodos geológicos.

En la Tabla I.4 se muestran los símbolos geológicos empleados en el Mapa Geológico Nacional.

3. ZANJAS, CALICATAS Y POCILLOS

La investigación más sencilla y rápida de ejecución es la apertura de zanjas, calicatas y pocillos.

En rocas duras, con estas labores se eliminan las coberturas y en ocasiones la roca alterada, dejando al descubierto la roca sana. En suelos y rocas blandas la penetración es mucho mayor llegando en ocasiones al sustrato deseado o hasta donde es capaz de alcanzar la maquinaria empleada.

Lo normal es hacerlas con retroexcavadora salvo en aquellos puntos en que el acceso no es posible y hay que emplear pico y pala. Cuando se utilice maquinaria es recomendable proceder a un refino con pico y pala para eliminar el "pulimento" o enmascaramiento de las paredes laterales, lo que impide una buena visión y obtener la información en las mejores condiciones. En la Figura I.1 se muestra un ejemplo del levantamiento de una zanja.

TABLA I.4
Símbolos Geológicos

	Contacto normal o concordante		Fractura en general
	Contacto discordante		Falla supuesta
	Contacto mecánico		Falla normal con indicación de hundimiento
	Contacto de situación dudosa		Falla con componentes horizontales
	Rumbo y buzamiento de las capas		Falla inversa
	Buzamiento invertido		Cabalgamiento
	Capas horizontales		Pliegues simétricos
	Capas verticales		Pliegues asimétricos
	Repliegues (capas repiegadas u onduladas)		Pliegues volcados
	Rumbo y buzamiento de pizarrosidad, esquistosidad		Anticlinal con dirección de buzamiento del eje
	Pizarrosidad, esquistosidad vertical		Cúpula, domo
	Rumbo y buzamiento de diaclasas		Anticlinorio
	Diaclasas verticales		Sinclinal con dirección de buzamiento del eje
			Sinclinorio
			Cubeta
			Fósiles
			Minas en activo
			Minas inactivas

Siempre que se pueda, antes de comenzar la toma de datos debe limpiarse la zanja para poder observar con facilidad todos los detalles. La situación de la calicata debe fijarse con apoyo topográfico restituyendo los puntos extremos e incluso puntos intermedios que sirvan para definir algún detalle importante (una falla, un estrato poco competente, etc). De los distintos materiales que aparecen y siempre que interese, pueden tomarse muestras, cuya situación debe quedar reflejada en el croquis o esquema de la zanja.

Los datos obtenidos en las distintas calicatas ayudan a definir la estratificación del emplazamiento y tener una idea de la potencia de coberturas y zonas alteradas. Deben situarse en el plano geológico con el apoyo de los datos topográficos tomados.

En caso de requerir medios de sostenimiento para evitar su derrumbe, éstos deben colocarse de forma que no impidan la visión total del terreno y en especial de las zonas de más interés.

La apertura de calicatas está indicada para obtener datos, por ejemplo de la estratigrafía, alteración o espesor del aluvión en una ladera.

En algunos casos para la investigación de un punto concreto se recurre a la excavación de un pocillo. Su mayor empleo suele ser en las zonas de aluvial a fin de determinar el espesor del acarreo, su naturaleza y continuidad, tanto para el estudio de la cerrada como para la evaluación de materiales.

4. GALERÍAS

El tamaño debe ser el adecuado para poder realizar con comodidad los ensayos que se hayan decidido en ella. Una sección de 1.5 de ancho x 2 m de alto puede ser el mínimo necesario, aunque en la mayor parte de las ocasiones las dimensiones vienen impuestas por la ejecución y los trabajos a hacer en ella. En el caso de que la galería necesite elementos de sostenimiento éstos deben ser de tal índole que permitan la visión, aunque sea parcial, de los hastiales, ya que las zonas reforzadas suelen ser las de mayor interés.

La excavación debe efectuarse de manera que se dañe la roca lo menos posible, empleando preferiblemente medios mecánicos, si es posible, o poco explosivo, pegas adecuadas, etc.

Una vez se haya finalizado la excavación de la galería, toda ella debe ser lavada si el polvo producido por la perforación impide una clara visión de las distintas zonas.

En el caso de ser posible, debe iluminarse la galería para permitir una buena visión de la misma. La revisión con luces de escasa potencia resta calidad al reconocimiento y hace que el tiempo empleado para él sea mayor.

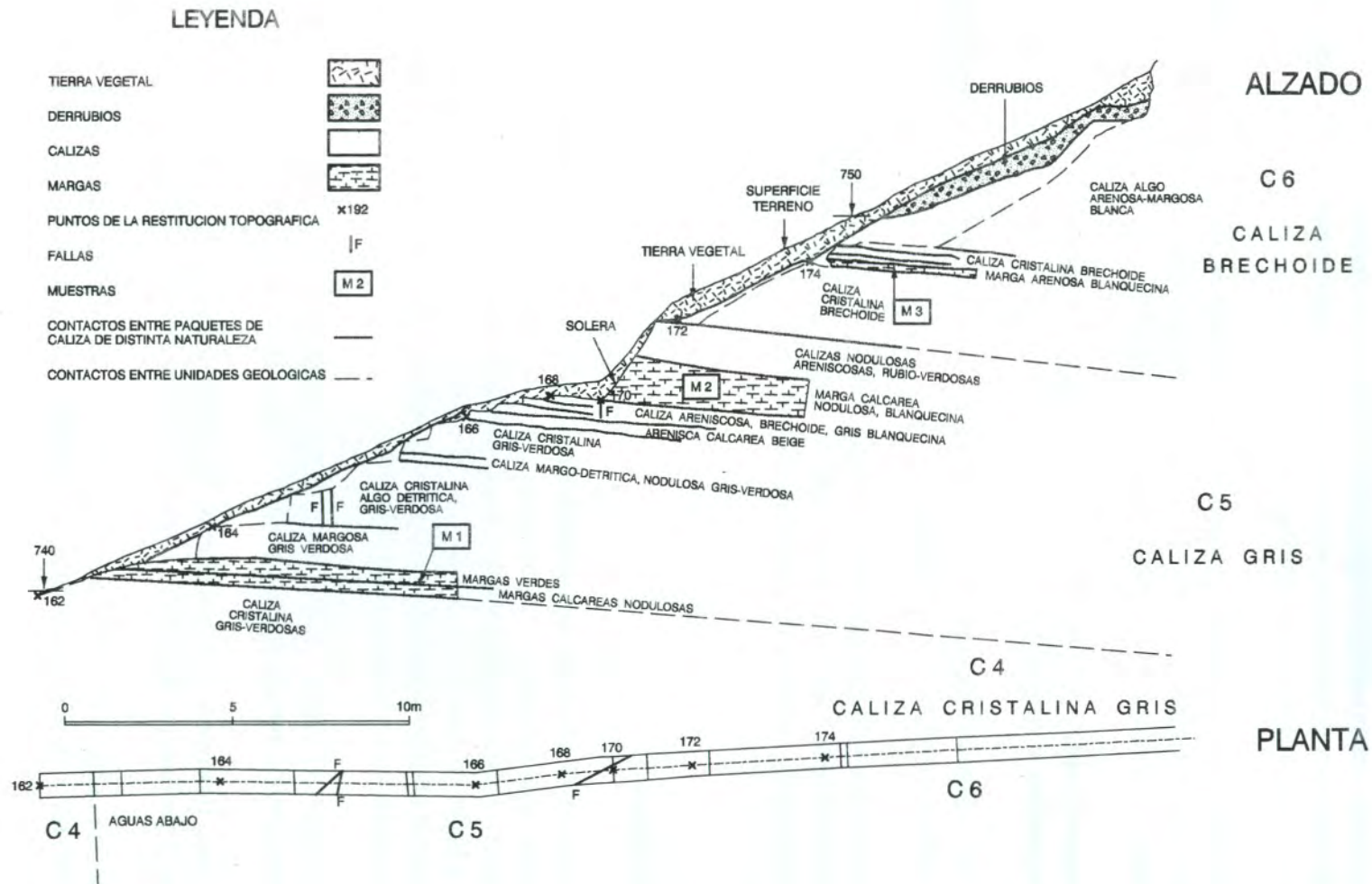


Fig. I.1
Levantamiento geológico de una zanja

La toma de datos requerirá en muchos casos el apoyo de topografía para situar con exactitud estratos, discontinuidades, zonas singulares, etc. Debe ser exhaustiva pudiendo posteriormente, al presentar los datos, eliminar aquellos que se crean de menor interés. En la Figura I.2 se exponen dos ejemplos de levantamiento geológico.

En el caso **a** se trata de un medio rocoso homogéneo en el que interesa resaltar la fracturación. La presentación muestra el desarrollo de la galería "abierta", habiéndose dibujado la intersección de las discontinuidades con la solera (parte central del desarrollo), hastiales y bóveda. En la Tabla inferior se muestra la representación de las roturas de cada tramo en proyección estereográfica de acuerdo con los intereses primordiales de la investigación. Aunque en la línea superior se da información del medio rocoso las referencias son mayoritarias sobre las fracturas.

En el caso **b** el énfasis se ha puesto en la estratificación señalándose la intersección de las distintas capas con los hastiales de la galería, aunque también se han dibujado fracturas importantes. Cada estrato ha sido identificado con un número. Se ha obviado el cuadro de datos que es similar al utilizado en **a** aunque con información algo diferente.

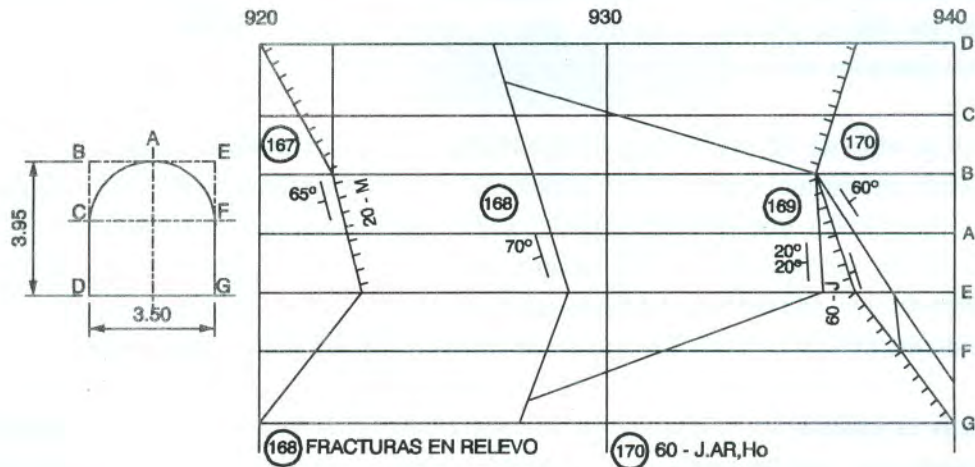
Es exigible que la presentación de resultados, las denominaciones litológicas y de discontinuidades así como las simbologías empleadas sean las acordadas desde el principio de los estudios. Los cambios, aunque puedan ser justificados pueden dar lugar a equívocos al quedar integrados en el conjunto de las exploraciones.

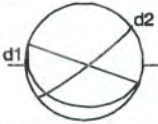
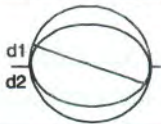
5. SONDEOS

Hay dos procedimientos esenciales de realizar los sondeos de investigación para presas: a percusión y a rotación. En el primero el elemento cortante se introduce en el terreno golpeándolo mientras en el segundo por una acción combinada de presión y rotación. La percusión está indicada para terrenos blandos o sueltos de carácter granular, acarreos fluviales o coluvial, en donde una herramienta girando podría alterar en exceso el medio o quedar atascada. La rotación es recomendable para rocas de dureza media y alta.

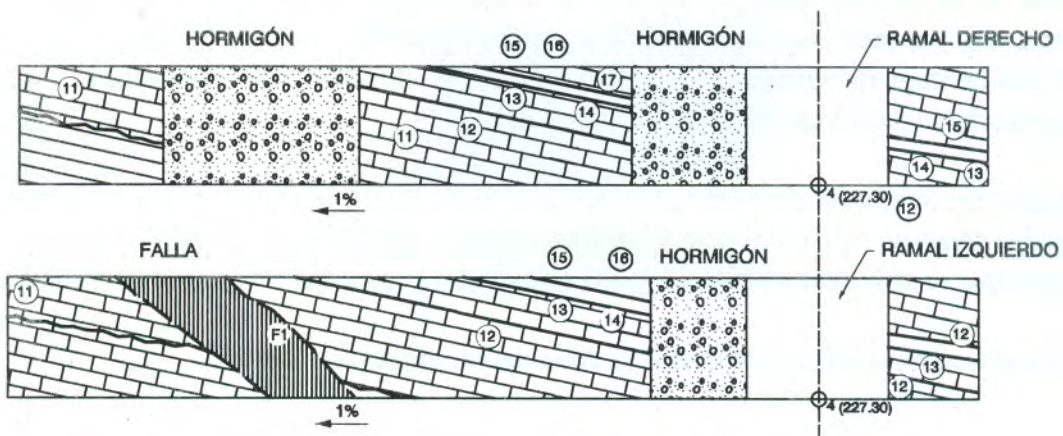
Los diámetros habituales de perforación son 101, 86 y 76 mm aunque en perforaciones de gran longitud o donde es preciso entubar se puede comenzar con diámetros mayores disminuyéndolos a medida que se profundiza. En la Tabla I.5 se indican las medidas europeas de los taladros.

Cuando se realizan sondeos inclinados se debe aclarar el ángulo y sentido.



TIPO ROCA / METEO. / RQD	G		S		90 -100%		G		S		90 -100%	
FAMILIA DE DIACLASAS												
	d1	d2	d	d	d1	d2	d	d				
DIREC.BUZAM/BUZAMIENTO	270/20	220/85			258/20	78/20						
ESPACIAMIENTO	2	1			2.5	2.5						
HASTIAL(izq/dcha)	-				-	-						
ESPESOR(mm)	0-5	0-5										
RELLENO	-	-										
RUGOSIDAD												
OBSERVACIONES												

a)



b)

Fig. I.2
Ejemplos de levantamiento geológico de galerías

TABLA I.5
Diámetros de sondeos usados en Europa

ϕ Taladro (mm)	ϕ Testigo (mm)	
	Corona pared gruesa	Corona pared delgada
146	120	
131	105	
116	90	
101	75	
86	58	72
76	48	62
66	38	52
56	34	42
46	24	32

Los datos de la perforación y del testigo que suelen registrarse son los siguientes [R.4]:

- **Cota de la boca:** Suele ser proporcionada por la empresa que encarga el trabajo.
- **Coordenadas de la boca:** Igualmente es un dato que se le da a la empresa encargada de las perforaciones.
- **Fecha del comienzo:** Este dato como los tres que le siguen deben ser dados por el sondista.
- **Fecha de terminación**
- **Tipo de maquinaria de perforación**
- **Tipo de corona o elemento de corte**
- **Espesor de cada tramo diferenciado:** Debe ser un dato que dé el técnico responsable que revise el testigo. Nunca debe ser proporcionado por el sondista.
- **Profundidad de cada tramo:** Es un dato fácil de obtener a partir del anterior.
- **Diámetro de la perforación:** A igual de lo dicho para otros datos debe ser proporcionado por el sondista o el vigilante de la perforación.

Descripción del testigo

Debe ser hecha por un especialista no debiendo ser considerados solamente los datos apuntados por el sondista. En caso de que una densa fracturación u otras causas impida la recuperación del testigo se deberán emplear otros métodos más adecuados. Los datos más comunes a registrar son:

- **Características del terreno:** Clase de roca, color, grado de alteración, textura, estructura, foliación, ángulo de la estratificación con el eje del sondeo. En casos especiales cuando se quiera conocer la situación espacial de una capa o accidente tectónico será preciso recurrir a métodos especiales de testificación.

- **Fracturación:** tipo de fractura, ángulo que forma con el eje, aspecto de la superficie, tipo de la apertura, anchura, relleno y tipo.
- **Tamaño del testigo obtenido:** Debe darse la proporción del testigo recuperado ya que suministra una idea sobre la calidad del terreno, su fracturación y la bondad de la ejecución. El porcentaje de los trozos del testigo superiores a 10 cm con respecto a la longitud total también permite una clasificación rápida y fácil del medio rocoso. Es conocida como RQD.
- **Presencia de fósiles:** Ayuda a situar cronológicamente los terrenos atravesados.
- **Surgencias de agua:** Es un dato difícil de precisar y depende del cuidado que ponga el sondista. Sin embargo siempre debe requerirse.
- **Pérdida del agua de refrigeración:** Es fácil de obtener si la cantidad de pérdida es grande por lo llamativa que resulta. Es de gran importancia ya que indica la presencia de huecos en el terreno.
- **Avance:** Es un dato de responsabilidad del sondista y puede ser de gran ayuda en tramos dudosos, con escasa recuperación de testigo, ya que da idea de la calidad de la roca. En algunos casos, como se hablará mas adelante, la sonda va provista de los dispositivos necesarios para registrar una serie de parámetros ligados al avance.
- **Ensayos de penetración:** Pueden ser decididos al planear la campaña de reconocimientos o durante ella en función de los resultados que se vayan obteniendo. La penetración puede realizarse con diferentes útiles: Tomamuestras, tubería, aparato standard, etc. Convendrá hacer un análisis detallado de los resultados obtenidos a la vista de los terrenos atravesados.
- **Muestras:** Es una operación a fijar por el geólogo o ingeniero geólogo juntamente con el proyectista, a la vista de los resultados. Del primero es también la responsabilidad de la elección de la muestra a enviar al laboratorio, la descripción detallada de la misma y la comprobación de su exacta designación. Esta última operación, muchas veces delegada en el sondista o encargado, puede ser vital ya que un error en la clasificación puede hacer inservibles los ensayos o alterar las interpretaciones geológicas. Es primordial el haber fijado, al comenzar la investigación, la nomenclatura a emplear para la designación de las muestras. Debe ser sencilla y a la vez clara evitando puedan ser confundidas con otras de campañas anteriores o posteriores.
- **Niveles freáticos:** En muchas ocasiones se precisa conocer la situación del agua en el terreno para lo cual se realizarán medidas del nivel a que se encuentra dentro del sondeo. Lógicamente el agua de refrigeración, que se añade al taladro, altera en ciertos casos el nivel freático por lo que será necesario hacer medidas al comenzar los trabajos en cada jornada y al finalizarla. Estas medidas se deberán mantener durante varios días una vez

finalizada la perforación del sondeo. Conviene insistir a la empresa que efectúe los trabajos para que estas medidas se lleven a cabo, ya que hay una tendencia a no hacerlas cuando los taladros están muy alejados entre sí, tienen difícil acceso o ha pasado el tiempo desde que se terminaron los sondeos.

- **Observaciones:** Deben reflejarse también todas las incidencias ocurridas a lo largo de la perforación: rotura de batería, imposibilidad de obtener la muestra programada, penetración menor que las señaladas en las normas, caídas del varillaje, etc. Estos datos deben quedar reflejados en el parte del sondista y ser tenidos en cuenta por el geólogo o ingeniero-geólogo al revisar el trabajo.

Todos estos datos además de otros de los que se hablará mas adelante deben quedar reflejados en los partes del sondeo y en las columnas estadigráficas de cada uno de ellos. Es conveniente que un especialista ligado al equipo que realiza los estudios haga la descripción y toma de datos del testigo. El lenguaje a emplear para esta descripción debe ser lo más sencillo y asequible ya que la información será consultada por técnicos que no tienen que estar impuestos en temas de geología y geotecnia. Deben mantenerse la simbología y definiciones pétreas que se hayan acordado en etapas previas. En la Figura I.3 se muestra un estadillo con los datos de un sondeo.

Como complemento de la descripción escrita debe existir una fotografía en color de cada caja de testigos que clarifica la utilización posterior de los datos registrados, cuando ha pasado un cierto tiempo o son revisados por personas que no han hecho la investigación. Aunque el color de los testigos no es un factor importante puede ser vital en ocasiones ya que permite la correlación, por ello las fotos señaladas deben incluir una escala de colores, que permita definir el tono exacto del material, así como una escala de medidas.

El gran interés que tienen los testigos obtenidos en una perforación obliga a su cuidadosa conservación. El sondista los colocará en cajas de madera por tramos de 1 m. de largo, pudiendo ubicar en cada caja de seis a ocho metros dependiendo del diámetro. Cajas con más filas suelen ser inmanejables debido a su peso. Las cajas deben ser de madera, con tapas provistas de unos cierres que eviten la pérdida de los testigos. Deben rechazarse las cajas de cartón que son poco resistentes, se estropean con la humedad y carecen de cierre.

Se suele separar cada tramo recuperado o cambios significativos de la litología, con una tablita u otro elemento adecuado en el que se marca la profundidad a que se produce tal hecho. Caso de que se haya tomado una muestra o se haya encontrado un hueco su posición debe hacerse patente en la caja.

En la tapa, interior y exteriormente, así como en un lateral, debe figurar el nombre del sondeo, el número de la caja y el tramo guardado, de manera que sea fácil de reconocer la caja en almacén.

Si se hace una nueva campaña de sondeos debe definirse si interesa diferenciar ésta de la anterior a la hora de denominar los sondeos. La denominación debe ser adecuada a los efectos propuestos. Algo similar sucede cuando un emplazamiento se analiza en fases separadas por un lapso de tiempo grande y se quiere hacer patente la diferencia entre ellas.

Fig. I.3
Columna estratigráfica de un sondeo

Fig. 1.3

6. DIAGRAFÍAS

Las diagrafas son registros continuos que se hacen en el sondeo completando la información que aporta el testigo, las muestras ensayadas y determinadas pruebas.

Se pueden dividir en dos grupos: Las diagrafas que se hacen **durante la ejecución** y miden alguna característica de la maquinaria o del terreno en función de aquella y las **diferidas** que se efectúan una vez realizada la perforación y miden por lo general alguna característica del terreno.

Las primeras pueden dividirse a su vez en dos grupos [R.5]: dependientes de parámetros de la maquinaria y controlados por el operador y las ligadas a las condiciones del terreno.

En la Tabla I.6 se exponen las diferentes diagrafas y en las Figuras I.4, I.5, y I.6, ejemplos de ellas. Las realizadas durante la ejecución, las radiactivas, sísmicas y las referentes a la desviación del taladro suelen ser las más habituales en investigación de emplazamientos de presas.

Estas diagrafas tienen una función complementaria de los datos obtenidos. Por sí mismas, aisladas, carecen de valor o éste es muy limitado.

TABLA I.6
Diagrafas

DURANTE LA EJECUCIÓN	
Dependientes de las condiciones de la máquina	Empuje sobre el útil Velocidad de rotación Caudal fluidos de perforación
Dependiente de las condiciones del terreno	Velocidad de avance Par motor Presión del fluido Energía reflejada
DIFERIDAS	
Radioactivas	Gamma-gamma Gamma natural Neutrones
Eléctricas	Potencial espontáneo Resistividad
Sónicas	
Desviación del taladro	
Calibre	
Temperatura	Temperatura del fluido de perforación a lo largo del taladro Diferencia de temperatura del fluido entre dos puntos
Visión del taladro con cámara de T.V.	

NUMERO DE OBRAPRESA

SONDEO.....R-8

HORA/Fecha COMIENZO.....09: 49:28 03-12-90

HORA/Fecha FINAL.....11: 14:33 13-12-90

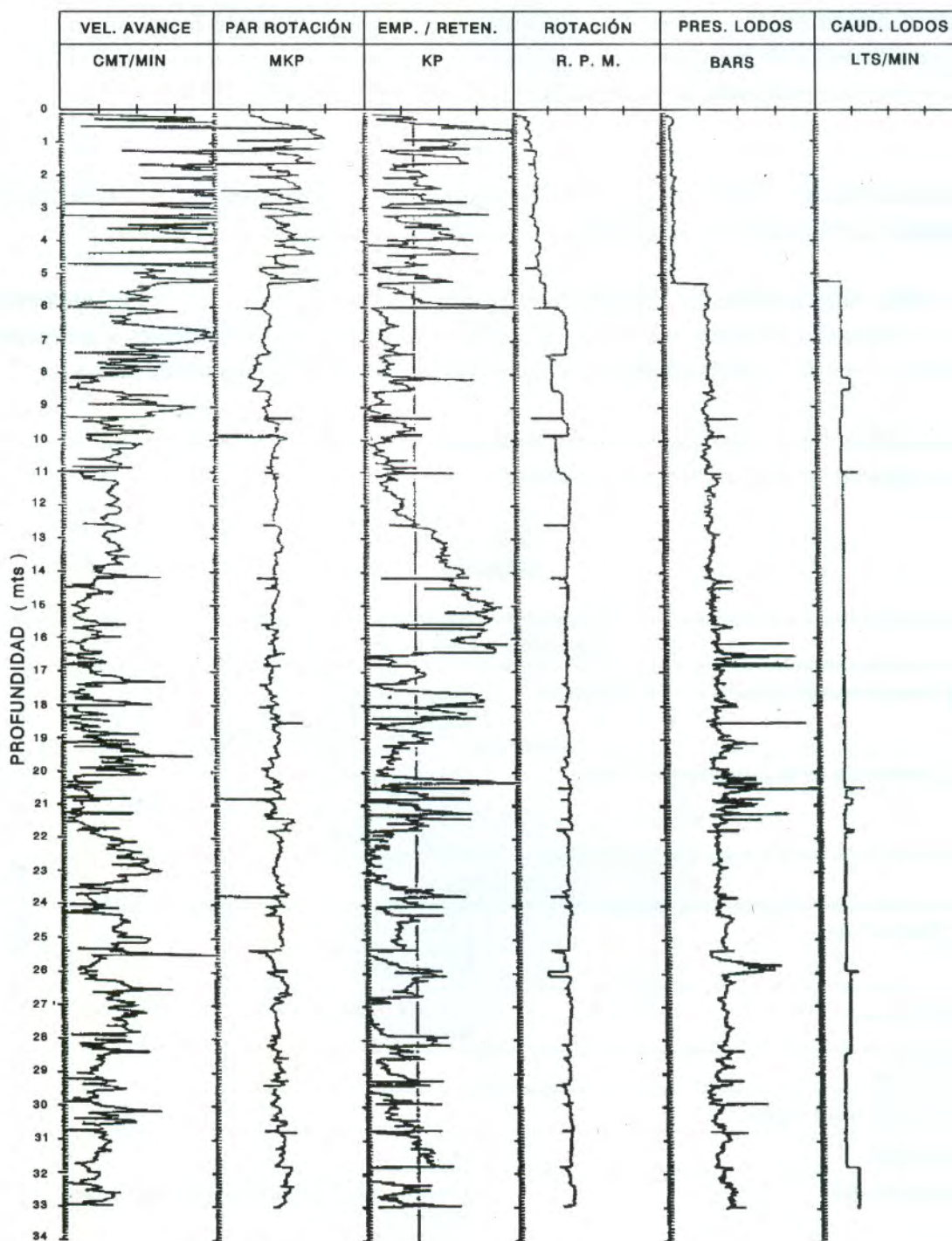


Fig. I.4

Ejemplo de registro de parámetros de un sondeo

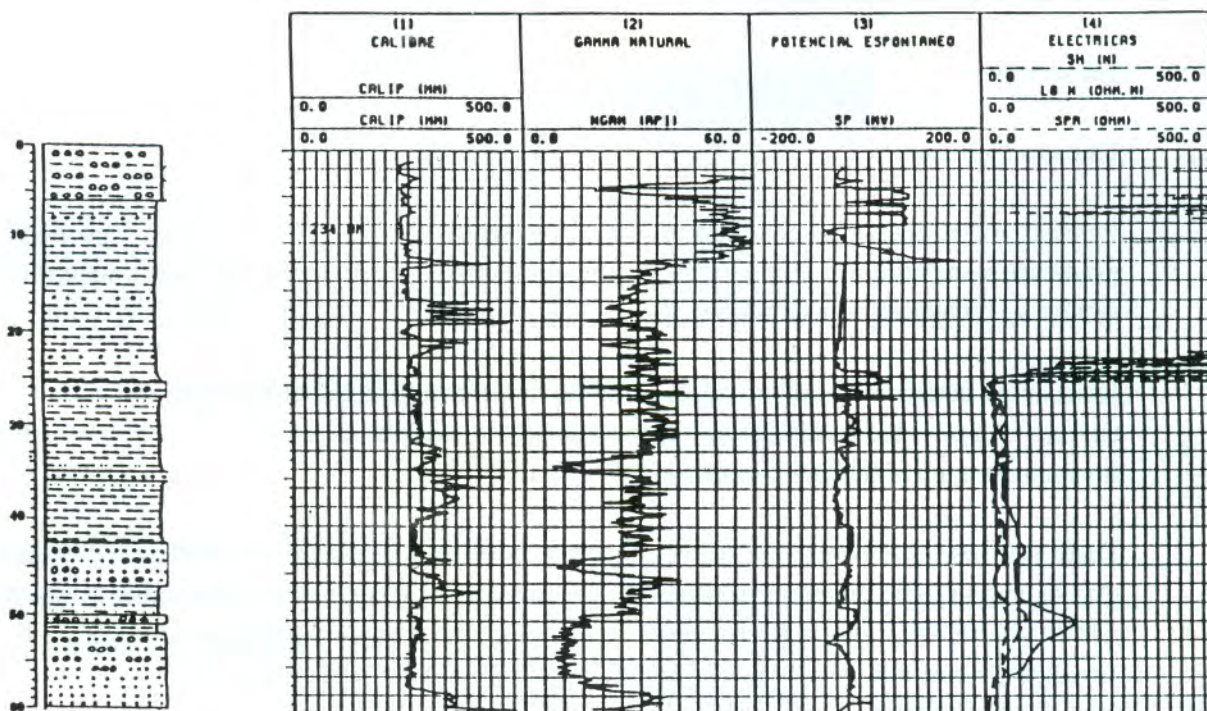


Fig. I.5
Ejemplo de diagramas diferidos

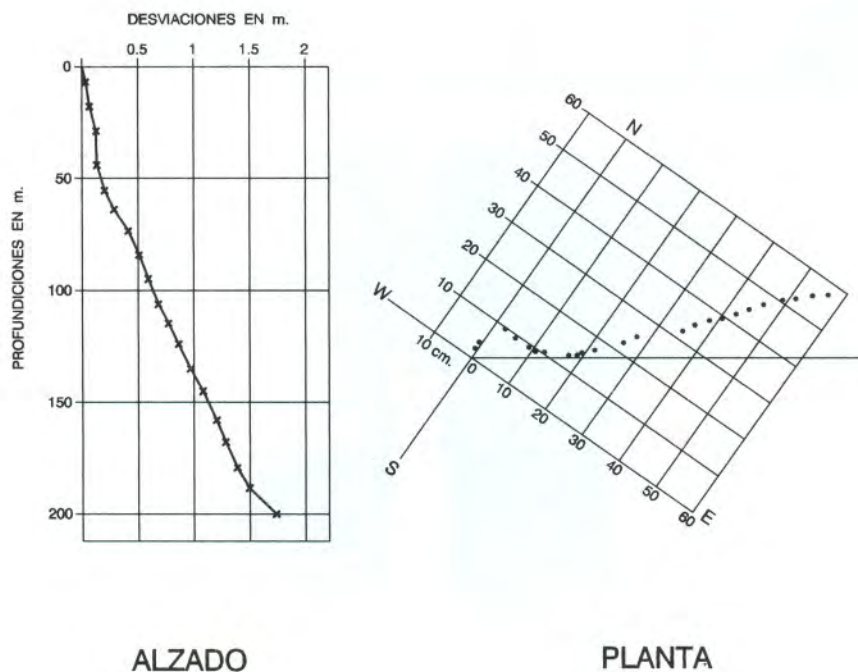


Fig. I.6
Medida con clinómetro de la desviación de un sondeo

7. ENSAYO DE PERMEABILIDAD

7.1. En sondeos

a) Ensayo Lefranc

El ensayo Lefranc se utiliza para medir la permeabilidad de suelos y rocas, bajo débil gradiente y en régimen permanente. También se puede efectuar en régimen transitorio, siendo su interpretación diferente.

En esencia consiste en hacer una cavidad en el terreno y medir el agua que se filtra del terreno a la cavidad o de ésta al terreno cuando se inyecta. El ensayo se hará por tanto inyectando agua al terreno o extrayéndola.

Dado que los terrenos en que se suele hacer este ensayo son poco coherentes la cavidad que se ensaya debe mantenerse con la propia inyección de agua, con grava introducida en ella mediante una tubería perforada o mediante geotextiles de permeabilidad apropiada. En algunos casos la cavidad se mantiene sin necesidad de sostenerla. El dispositivo del ensayo se esquematiza en la Figura I.7.

El ensayo consiste en medir el caudal inyectado o bien la subida o bajada del nivel de agua que se produce en el taladro a lo largo del tiempo. Dependiendo del método, el caudal debe poder regularse con precisión del 3%, las medidas 1-2 mm y el tiempo con un segundo. Las medidas iniciales no son representativas y no deben considerarse. Serán más continuas al principio del ensayo y se van distanciando a lo largo de él dándose por finalizado cuando se alcanza la estabilidad del nivel.

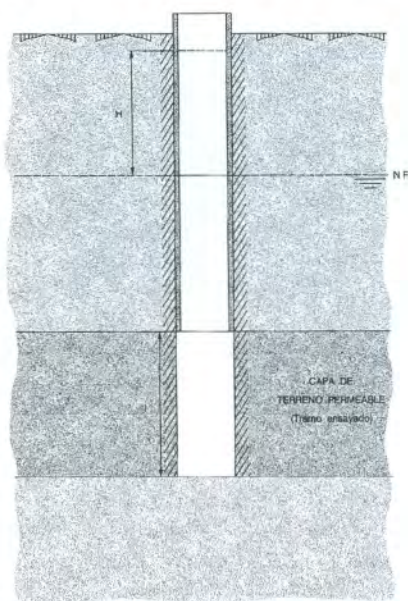


Fig. I.7
Esquema de un ensayo Lefranc

Deben tomarse topográficamente las coordenadas de la boca de los taladros ligándolas a las generales de la obra y a las cotas a las que se efectúe el ensayo. Las medidas del nivel de agua se harán con referencia a la boca. El valor de la permeabilidad viene dado por

$$K = \frac{Q}{C \cdot H \cdot t}$$

en donde:

K = permeabilidad en m/s

Q = volumen en m³

H = carga en m (diferencia de nivel)

t = tiempo en segundos

C = factor expresado en m cuyo valor es

C = 5,7 r Cuando el ensayo se realiza en el fondo plano del taladro, siendo r el radio

C = 4 π r Cuando la cavidad se supone esférica

$$C = 2\pi d \frac{\sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1}}{\ln \left(\frac{l}{d} + \sqrt{\frac{l^2}{d^2} - 1} \right)}$$

Cuando la cavidad es cilíndrica y su longitud l no es muy grande con respecto a d, diámetro de la cavidad

$$C = \frac{2\pi l}{\ln \left(\frac{l}{0,68 d} \right)}$$

Cuando la cavidad es cilíndrica y la longitud l bastante mayor que d

Debe exigirse que los datos sean lo más completos posibles y que en los partes de trabajo figure:

- Fecha de ejecución.
- Denominación del taladro y número del ensayo.

- Definición de las características del taladro y entubación.
- Distancia entre la boca del taladro y los extremos del tramo ensayado.
- Terreno/s en que se realiza el ensayo.
- Método utilizado en el ensayo y croquis del mismo.
- Elementos que efectúan la entubación al hacer el ensayo.
- Cotas de la boca.
- Cota del nivel estático al comienzo y al final del ensayo.
- Medidas de caudal.

b) Ensayo Lugeon

El ensayo Lugeon puede realizarse a medida que se perfora o una vez finalizada la perforación. Generalmente el primer modo es mejor y solo necesita el empleo de un obturador pero es un procedimiento lento y más costoso que puede alargar en exceso la investigación. En caso de llevarlo a cabo una vez concluida la perforación, se suelen efectuar de forma ascendente comenzando por el tramo más bajo. En la Figura I.8 se muestra el dispositivo del ensayo.

Los obturadores pueden cerrarse mecánica o hidráulicamente. En la actualidad éstos últimos son los mas utilizados. Su longitud debe ser de unos 50 cm, pero en macizos muy fracturados es recomendable ampliar esa longitud hasta 1 m. para evitar posibles contorneos del agua. Deben ser de tal clase que no sean desplazados por la presión del ensayo. Se colocarán con exactitud en el tramo definido, pudiendo exigirse precisiones de ± 0.1 m.

La bomba utilizada debe ser capaz de proporcionar el caudal necesario para el tipo de macizo a ensayar. Así, en medios de alta permeabilidad, como por ejemplo los calcáreos, el caudal máximo de la bomba puede ser indicativo de la permeabilidad medida. Cuando los primeros ensayos denoten esta situación debe cambiarse la bomba.

Los equipos deben comprobarse in situ antes de comenzar los trabajos, viendo si el caudal y presión de la bomba es el señalado y si es adecuado al medio a investigar. Igualmente pueden comprobarse la estanqueidad de los elementos de unión entre tuberías. Esta verificación debe hacerse también cuando se ha producido algún incidente, que haya obligado a suspender el ensayo y a retirar el aparellaje del taladro.

Antes de comenzar el ensayo debe limpiarse el taladro. Durante el período de perforación las aguas que arrastran el detritus tienden a colmatar las paredes del taladro y rellenar las fracturas, impidiendo en algún caso la penetración del agua en el terreno. Una vez situado el obturador o los obturadores se debe medir la profundidad a que se encuentra el nivel freático.

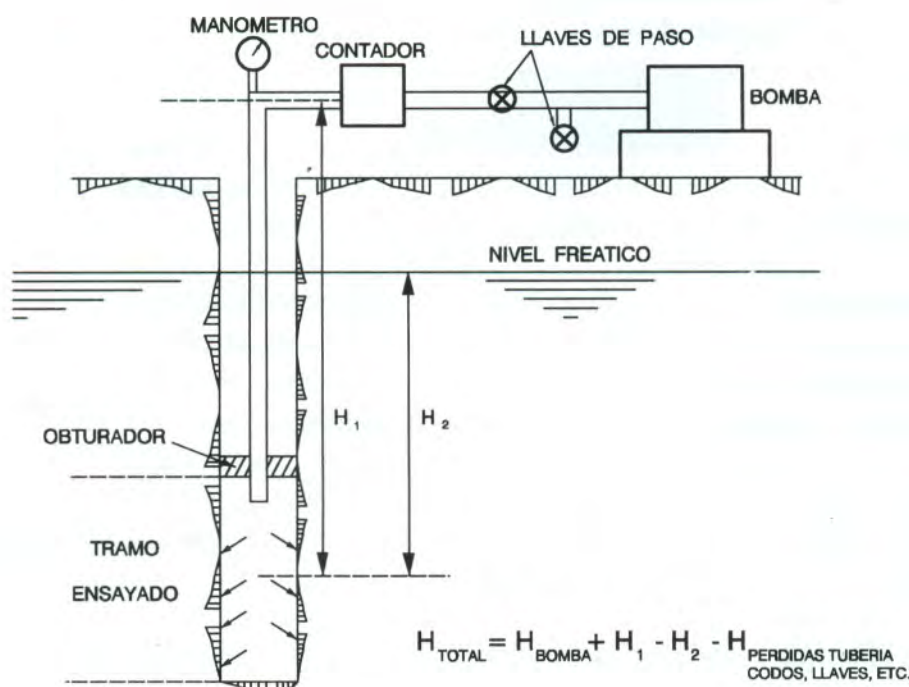


Fig. I.8
Esquema de un ensayo Lugeon

Se recomienda que el tramo de ensayo sea de 5 m de longitud, salvo que en algún punto se haya detectado una filtración importante o hueco por lo que interese centrarse en esa zona concreta ensayando un tramo de menor longitud.

El ensayo se comienza poniendo la bomba en marcha pero expulsando el agua al exterior. Se cierra la válvula que permite esta operación y se comienza a inyectar agua hasta alcanzar la presión deseada.

En el ensayo Lugeon la presión máxima a alcanzar es de 10 atm (1 MPa), normalmente en cinco escalones de presión que pueden ser 0, 1, 2, 5 y 10. Cada escalón se mantiene 10 minutos y se mide el volumen de agua absorbido por el terreno.

Alcanzada la presión máxima se comienza el proceso descendente actuando de forma similar. Puede anularse alguno de los escalones dejándolos en 4 ó 3.

Es fácil que se produzca el contorneo de algunos de los obturadores, en especial en zonas muy fracturadas. En estos casos convendrá detener el ensayo y proceder a situar de nuevo los elementos de estanqueidad cambiándolos ligeramente. Caso de que esto no pueda hacerse se debe intentar medir el caudal perdido si éste aflora a superficie.

Puede ocurrir que al terminar el ensayo el nivel de agua ascienda algo, ya que las fracturas inyectadas puedan devolver al taladro el agua que contienen. Si esto ocurre deberá anotarse para la interpretación cualitativa del ensayo.

La posición de los taladros debe ser definida por topografía y tomar la cota de un punto, p.e. el borde la entubación, desde donde se efectúen las medidas. Estas coordenadas deben estar ligadas a las generales que utilice el proyecto.

Debe tenerse en cuenta que la presión del ensayo no suele ser la que señala el manómetro, pues hay que considerar la columna de agua hasta el centro del tramo de ensayo, punto donde se considera la presión, el nivel freático si existiese y las pérdidas de manguitos de unión, válvulas y dilatación de las tuberías si son flexibles. Estas pérdidas, difíciles de determinar, se calculan con ábacos y son función del tipo de manguitos, diámetros interiores de las tuberías, etc. y muchas veces se prescinde de ellas. Por este motivo debe exigirse un cuidadoso montaje del sistema de inyección y la comprobación, como ya se ha indicado, de los equipos.

En el pliego de condiciones debe exigirse que en la hoja de trabajo figuren al menos los datos siguientes:

- Nombre de la obra o tajo.
- Fecha de ejecución.
- Número de sondeo y ensayo.
- Inclinación del taladro.
- Situación del tramo ensayado.
- Diámetro del tramo ensayado.
- Cota del nivel freático.
- Cota del manómetro.
- Características de los obturadores, conducciones y manguitos de unión: diámetro interior, longitud, número, presión de hinchamiento, etc.
- Naturaleza del terreno.
- Croquis del montaje de ensayo.
- Observaciones especiales

Los resultados pueden darse en unidades Lugeon. Una unidad Lugeon es la permeabilidad de un terreno que filtrase un caudal de un litro por metro durante 10 minutos a una presión de 10 atm.

Es equivalente a una permeabilidad de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s - $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Para presiones inferiores a 10 atm. la determinación de las unidades Lugeon correspondientes extrapolando en base a correlaciones lineales resulta cuestionable, debiéndose comprobar los resultados obtenidos con otros ensayos, si existen.

Sin embargo, es mejor presentar diagramas de caudal-presión que permiten analizar el proceso del ensayo y dar idea si se ha producido fracturación de la roca, apertura o taponamiento de las

fracturas, etc. En España existe una amplísima experiencia en el uso e interpretación de este tipo de ensayo por lo que para una mayor información se puede acudir a los Congresos Nacionales e Internacionales relativos a la tecnología de presas. [R.6].

En rocas fracturadas o en aquellas en las que pueda producirse rotura conviene no alcanzar las 10 atm. Cuando no superan las 5 atm. estos ensayos se suelen denominar ensayos de permeabilidad de baja presión (LPT).

c) Trazadores

Para cuantificar caudales de infiltración y permeabilidades, también se pueden utilizar trazadores (isotópicos o no) convencionales para lo cual se necesitan varios sondeos, (dos o más), y controlar la evolución de la concentración de estos trazadores artificiales, [R.7].

7.2. Otros ensayos

Para tener una idea aproximada de la permeabilidad de las formaciones superficiales se puede acudir a rellenar con agua las calicatas realizadas con otros propósitos de investigación, interpretar la evolución del nivel del agua con el tiempo, y así deducir órdenes de magnitud de la permeabilidad.

También se puede efectuar una pequeña excavación que tenga forma de pirámide invertida y analizar, al igual que en el caso anterior, el descendimiento del nivel del agua en el tiempo.

Resultan adecuados en medios semipermeables.

8. GEOFÍSICA

Como complemento del levantamiento geológico y de las investigaciones con zanjas, sondeos, galerías, etc., pueden hacerse prospecciones geofísicas.

8.1. Sísmica

La prospección sísmica de refracción es la más habitual. Se basa en medir la velocidad de transmisión de las ondas elásticas, que al ser función de material atravesado, permite diferenciar unos materiales de otros. En la Tabla I.7 se dan valores típicos de la velocidad de ondas de compresión para distintos tipos de materiales.

En la sísmica de refracción, la onda elástica medida es la refractada en una superficie, que puede ser un plano de estratificación o una discontinuidad. La onda puede generarse mediante una explosión o por un golpe de maza, dependiendo de la profundidad que se quiera alcanzar y del

tipo de terreno por el que se transmitirá la onda. Se recoge en un captor (geófono) que convierte el movimiento en un impulso eléctrico. Este impulso es llevado a un sismógrafo que lo filtra, amplifica y registra. Se mide el tiempo en que la onda, (de compresión o de corte), tarda en llegar al geófono lo que permite conocer la velocidad, al conocer la distancia entre el origen de la onda y el captor.

TABLA I.7
Velocidad de propagación de ondas elásticas de compresión

ROCA	VELOCIDAD (m/s)
Capa meteorizada	300 - 900
Aluviones	350 - 1.500
Arcillas	1.000 - 2.000
Margas	1.800 - 3.200
Areniscas	1.400 - 4.500
Conglomerados	2.500 - 5.000
Calizas	4.000 - 6.000
Dolomías	5.000 - 6.000
Sal	4.500 - 6.500
Yeso	3.000 - 4.000
Anhidrita	3.000 - 6.000
Gneis	3.100 - 5.400
Cuarcitas	5.100 - 6.100
Granitos	4.000 - 6.000
Gabros	6.700 - 7.300
Dunitas	7.900 - 8.400
Diabasas	5.800 - 7.100

Tomado de [R.8]

En la Figura I.9 se muestra un ejemplo de las dromocrónicas obtenidas en un perfil y su presentación.

8.2. Eléctrica resistiva

El método eléctrico resistivo se basa en medir la resistividad, resistencia eléctrica específica, de un material. Consiste en crear un campo eléctrico con dos electrodos clavados en el suelo y medir el potencial de ese campo mediante otros dos. La profundidad que se puede alcanzar es función de la separación de los electrodos y la intensidad. En la Tabla I.8, se dan valores de resistividades en rocas diversas. La presencia de agua influye de forma muy notable en la resistividad como pone de relieve la Tabla I.9.

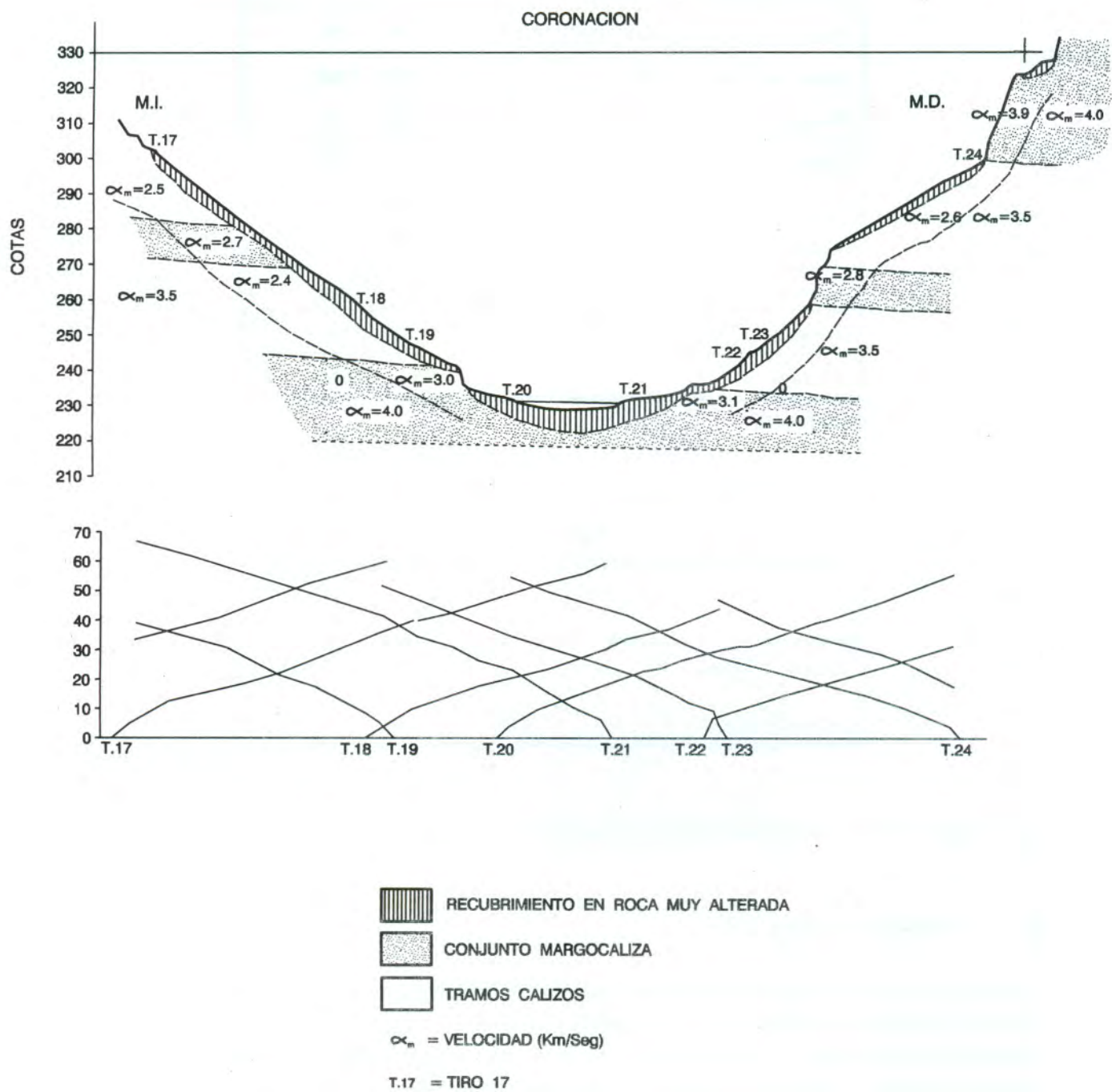


Fig. I.9
Ejemplo de un perfil sísmico y su presentación

TABLA I.8
Resistividades en ohmios metros (Ω m)

Aguas superficiales con cloruros	0,03 - 0,10
Aguas manantiales (rocas sedimentarias)	1 - 10
Aguas manantiales (rocas intrusivas)	30 - 50
Aguas superficiales sin cloruros	0,01 - 3.000
Margas	0,1 - 50
Calizas	50 - 3.000
Pizarras	50 - 300
Arcillas	10 - 100
Areniscas	50 - 5.000
Aluviones	50 - 500
Granito	300 - 10.000

Tomado de R.9

TABLA I.9
Variación de la resistividad de arenas con el porcentaje de agua

% H ₂ O	0,86	1,5	3,3	4,7	9,5
(Ω m)	830	380	170	100	95

En la Figura I.10 se muestra un ejemplo de un registro de eléctrica resistiva y su representación.

8.3. Cross-hole y down-hole

En ambos casos se obtienen perfiles de velocidad de propagación de las ondas (S), generando ondas volumétricas del tipo SV en su interior ("cross-hole") o generando ondas tipo SH en su superficie ("down-hole"). El "cross-hole" requiere más de un sondeo, en ocasiones se exigen tres, pero obtiene valores muy precisos para cada profundidad. El "down-hole" promedia los parámetros del terreno.

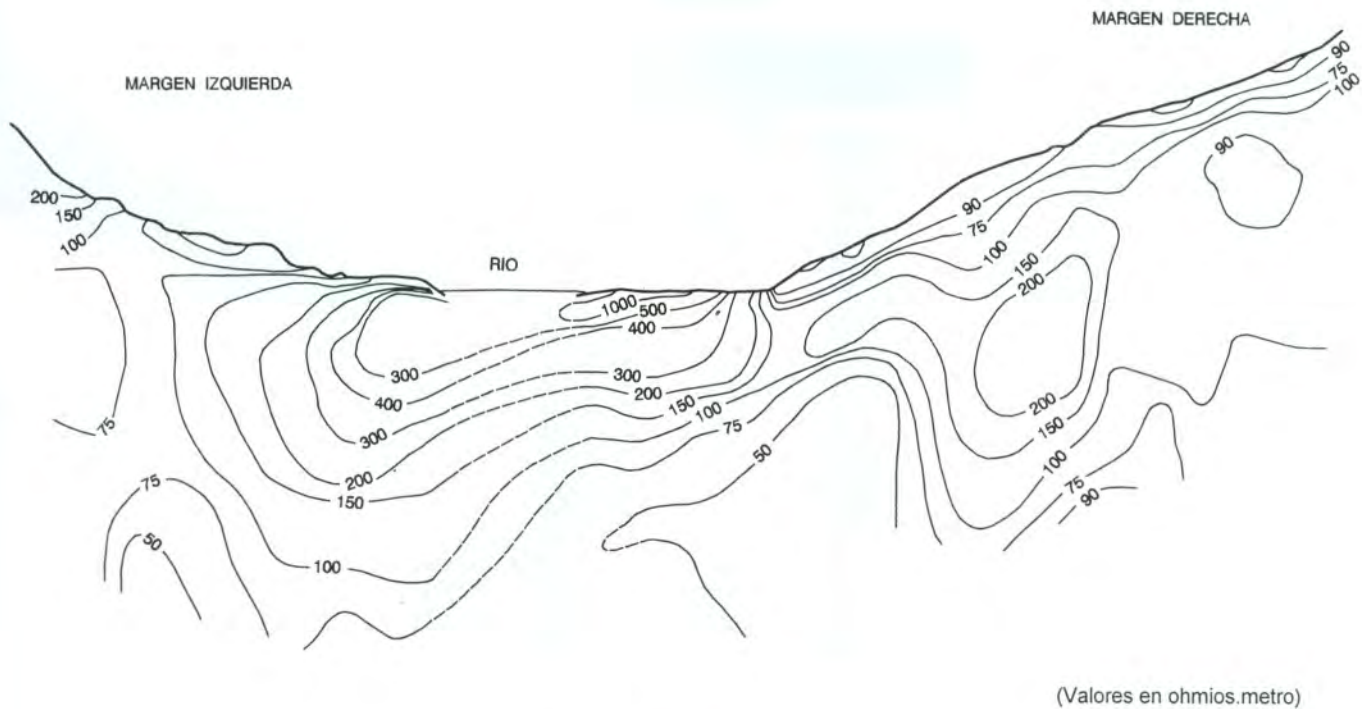


Fig. I.10
Ejemplo de un perfil eléctrico resistivo

En el "cross-hole" el diámetro de los taladros debe oscilar entre 130 mm y 76 mm., y separación entre 3 y 6 m. En la Figura I.11 se muestra un esquema del procedimiento de realizar el ensayo. En la Figura I.12 se ha esquematizado el procedimiento de "down-hole". La onda puede generarse con un impacto mecánico, dependiendo de la profundidad que se quiera investigar.

La profundidad que se puede alcanzar con este ensayo depende de la potencia de los aparatos empleados pero no llega a rebasarse los 100 m.

La necesidad de conocer con exactitud la distancia a que se encuentra el geófono del origen de la onda hace que la medida de la desviación del sondeo sea obligatoria en este tipo de ensayo. Conociendo las velocidades de cada material ensayado se puede deducir el módulo de deformación tangencial dinámico, el módulo de elasticidad dinámico y el coeficiente de Poisson, para un nivel de deformación muy bajo.

8.4. Otras técnicas

Adicionalmente, entre la amplitud de posibilidades que existen, se pueden utilizar las siguientes técnicas:

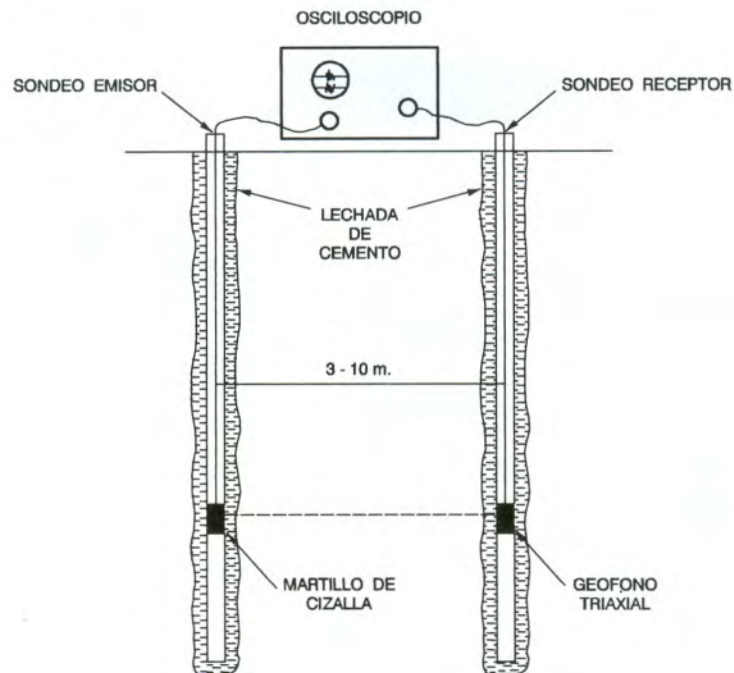


Fig. I.11
Esquema del procedimiento de ejecución de un ensayo de cross-hole

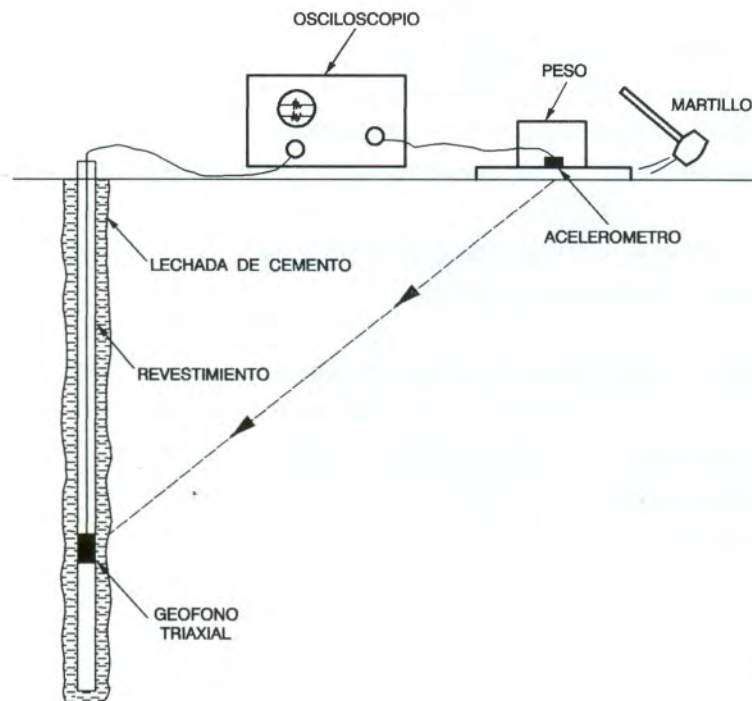


Fig. I.12
Esquema del procedimiento de ensayo de down-hole

- a) El análisis espectral de ondas superficiales que permite conocer un perfil de velocidades V_s hasta profundidades del orden de 15 a 20 m, tanto en medios naturales como en terraplenes. Se generan ondas mediante impacto, o mediante vibradores, que son registradas en el dominio del tiempo. De su transformación al dominio de frecuencias se obtiene la curva de dispersión, que es la variación de la velocidad de propagación en función de la longitud de onda. En la Figura I.13 se muestra una disposición habitual de los mecanismos de impacto y escucha y su aplicación en el caso de presas de materiales sueltos [R.10].
- b) El georadar, que se utiliza para detectar anomalías en el terreno en donde la profundidad de investigación depende de que no exista nivel freático somero y de las características del aparato, en particular de su antena receptora. [R.11].
- c) Las técnicas geofísicas de inducción eléctrica a electromagnética para el reconocimiento de los contenidos de humedad en medios homogéneos [R.12].

Si bien sus aplicaciones son escasas y todavía se pueden considerar como métodos de investigación en proceso de depuración, dados los logros conseguidos, su futuro es prometedor.

9. TOMA DE MUESTRAS

La cantidad de la muestra a tomar así como el procedimiento a seguir dependerá del tipo de ensayo. En algunos casos hay normativa específica o criterios de buena práctica que deben ser utilizados, [R.13]. En las Tablas del Anejo III se dan algunas indicaciones respecto a cantidades necesitadas de material. El número de muestras a extraer será función del problema a analizar, de la extensión de la zona estudiada, del tipo de ensayo, y de la importancia de la estructura. Las muestras pueden tomarse en afloramientos, zanjas, calicatas, pozos, sondeos y galerías. El método de toma será función tanto del tipo de ensayo como del lugar en que se tomen.

En **afloramientos, zanjas, calicatas, pozos y galerías** la toma puede ser hecha mediante un golpe del martillo de geólogo, obteniendo una esquirla de mayor o menor tamaño, o mediante una sonda manual, que permite conseguir un pequeño testigo o mediante explosivo para obtener una cantidad grande.

En suelos o rocas blandas las muestras a tomar pueden ser alteradas o inalteradas. En el primer caso se obtendrá una porción variable dependiendo del tipo y número de ensayos. Las muestras inalteradas se pueden conseguir tallándolas, o mediante un tomamuestras que se hincan en el punto donde se quieren obtener. El tomamuestras lleva incorporado una funda interior en la que se aloja la muestra.

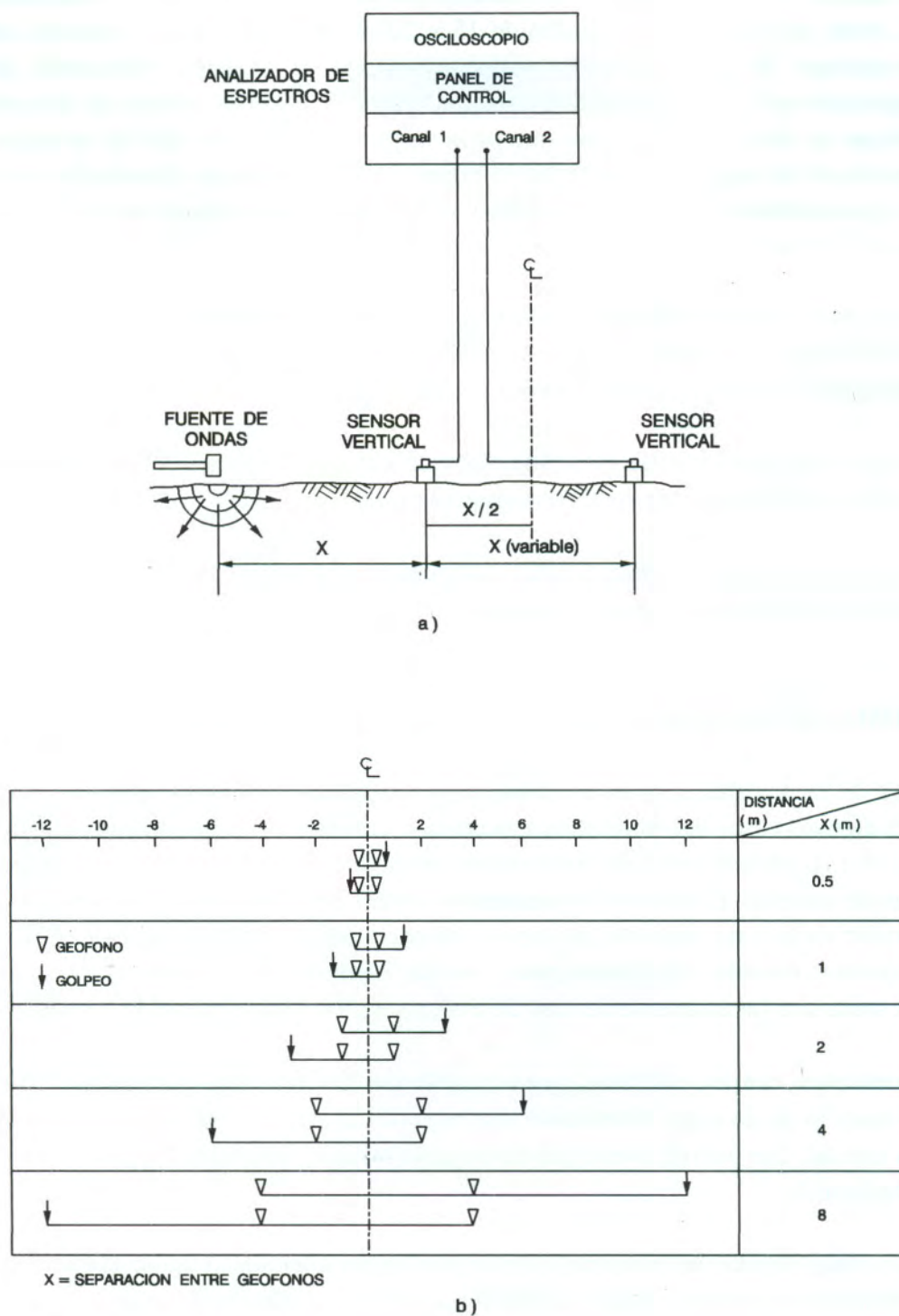


Fig. I.13
Disposición y esquema del ensayo de ondas superficiales

- a) Disposición del ensayo de ondas superficiales
b) Esquema

La hincada del tomamuestras debe hacerse de forma continua y sin rotaciones, con una velocidad comprendida entre 15 y 30 cm/s. La longitud útil de tomamuestras debe estar comprendida entre 0.4 y 1 m. Un requisito a exigir está en el espesor de las paredes del tomamuestras que no debe sobrepasar unos límites para ser considerado como de pared delgada.

En **sondeos** en rocas duras el fragmento de testigo obtenido puede servir como muestra. La longitud a proteger especialmente dependerá del tipo y número de ensayos que se vayan a realizar.

En suelos o rocas muy alteradas el testigo debe obtenerse con tubo portatestigo doble para evitar la destrucción de la muestra.

Cualquiera que sea el método de toma la muestra deberán ser convenientemente embaladas e identificadas. En la etiqueta se hará constar:

- El nombre del trabajo
- El número de la muestra
- El lugar en que fue tomada (zanja, calicata, etc), su denominación y punto de origen exacto.
- Fecha de la toma
- Tipo de tomamuestras empleado así como el número de golpes para hincarlo.
- Descripción visual de la muestra.
- Situación cronoestratigráfica si se sabe.

Las muestras alteradas de rocas y de suelos se pueden colocar en bolsas de plástico precintadas. Las de suelos inalteradas en tubos de zinc o plástico, con tapaderas en sus extremos, que se cubren de parafina posteriormente para evitar la pérdida de humedad y alteración.

Si es importante la toma y embalaje de las muestras no lo es menos su almacenamiento y transporte. Si el envío al laboratorio no se hace de inmediato y deben almacenarse durante cierto tiempo, se procederá a hacerlo en lugares protegidos y no sometidos a temperaturas extremas.

El transporte, para lo cual existe normativa americana, deberá efectuarse en cajas resistentes convenientemente acondicionadas para evitar que las muestras sufran golpes entre sí o con las paredes de la caja. En la caja, exteriormente, con pintura inalterable a la humedad debe figurar el nombre de la obra, el número de muestras, el número de sondeos o puntos de donde proceden, el nombre y dirección del laboratorio y la persona que recibirá el envío.

10. ENSAYOS DE RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD

10.1. En sondeos

El presiómetro, o dilatómetro, autoperforador o no, ofrece la posibilidad de conocer las características del terreno en sus condiciones naturales.

Es un ensayo que se efectúa en un taladro a la profundidad deseada. Se utiliza, dependiendo del equipo, para rocas muy blandas (suelos), rocas duras con muy alto grado de alteración o rocas sanas. Se realiza mediante una célula de más de 50 cm de longitud y unos 74 mm de diámetro provista de una membrana que se dilata mediante un líquido, (agua o aceite), con lo que puede aplicarse presión a las paredes del taladro. Esta presión no suele superar los 15 MPa. Se han desarrollado diferentes tipos de células. En la Figura I.14 se muestra un esquema de funcionamiento. El presiómetro autoperforador sólo se puede utilizar en medios naturales blandos.

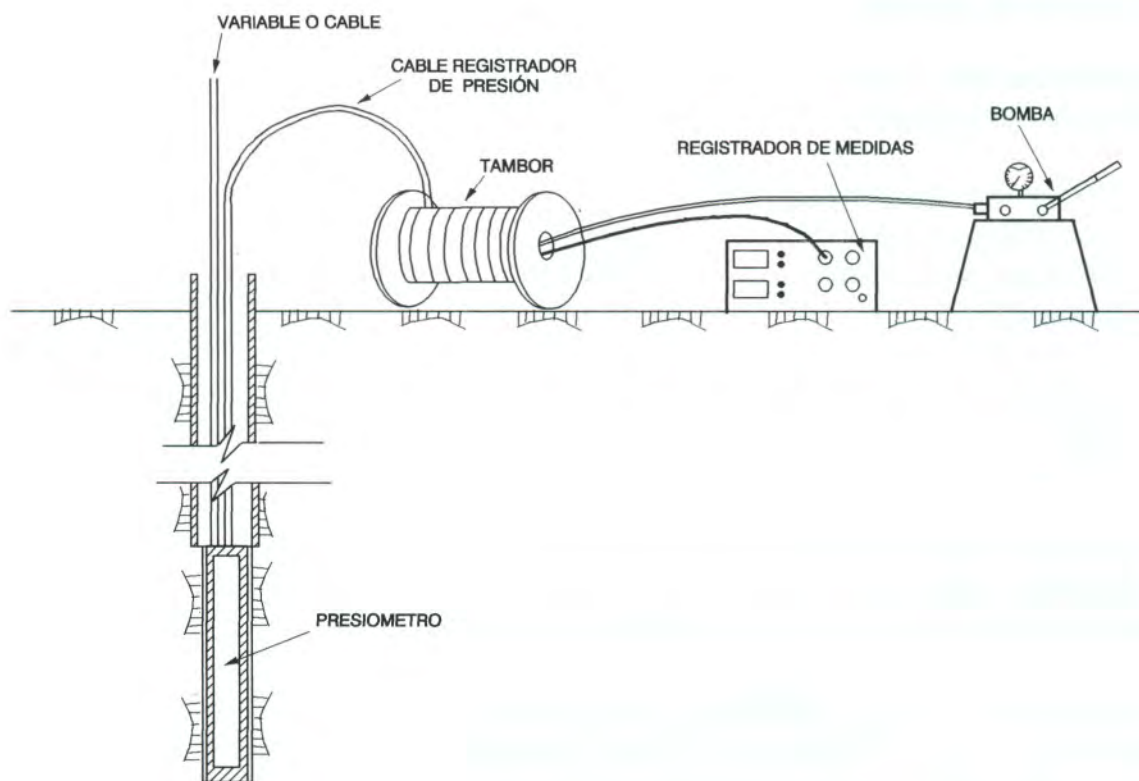


Fig. I.14
Esquema de ensayo dilatométrico

10.2. En superficie o en galerías

10.2.1. Ensayos de deformabilidad

a) Con gato de placa flexible

Se utilizan para medir la deformabilidad de la roca sana o alterada. Se hace en el interior de galerías, algún tramo de las cuales debe acondicionarse para tal fin, o en calicatas.

Proporcionan módulos de deformabilidad, elásticos o no, de los materiales ensayados. El ensayo se efectúa por ciclos de carga y descarga de 24 horas hasta alcanzar la presión máxima deseada. Después de dejar transcurrir 24 horas sin carga se vuelve a hacer otro ciclo a mayor presión. El número de ciclos hasta alcanzar la presión del ensayo, el número de incrementos en cada ciclo y la presión máxima debe ser definida en función de las necesidades de cada caso. La presión máxima suele ser 1.2-1.5 veces de la que transmite la estructura [R.14]. En la Figura I.15 se muestra una forma de realizar el ensayo.

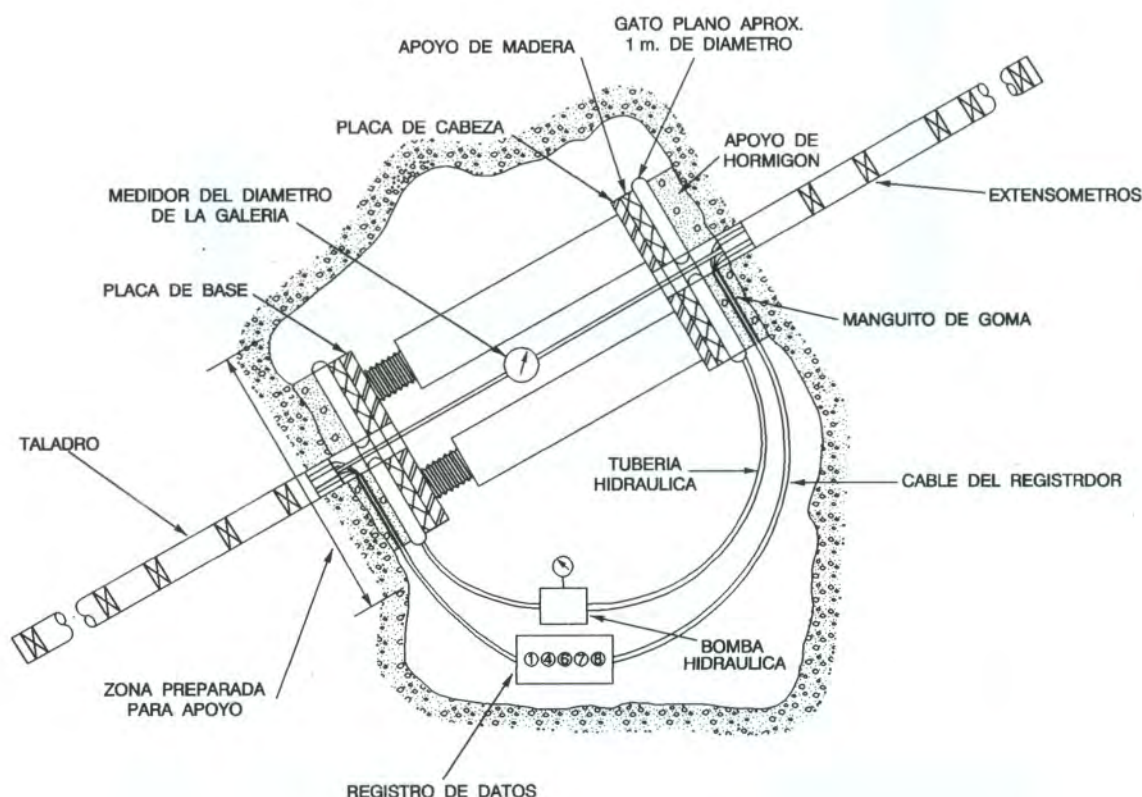


Fig. I.15
Esquema de un ensayo de deformabilidad con gato plano

b) Con placa rígida

El ensayo es similar al anterior y se realiza también en galerías, o en calicatas. El gato se aplica sobre la roca a través de hormigón u otro tipo de apoyo que permite la transmisión de la carga. En las Figuras I.16 y I.17 se muestran unos esquemas de los procedimientos de ejecución en galería y superficie. Los resultados obtenidos son similares a los del ensayo con placa flexible así como la forma de exponerlos, pero difiere ligeramente su interpretación.

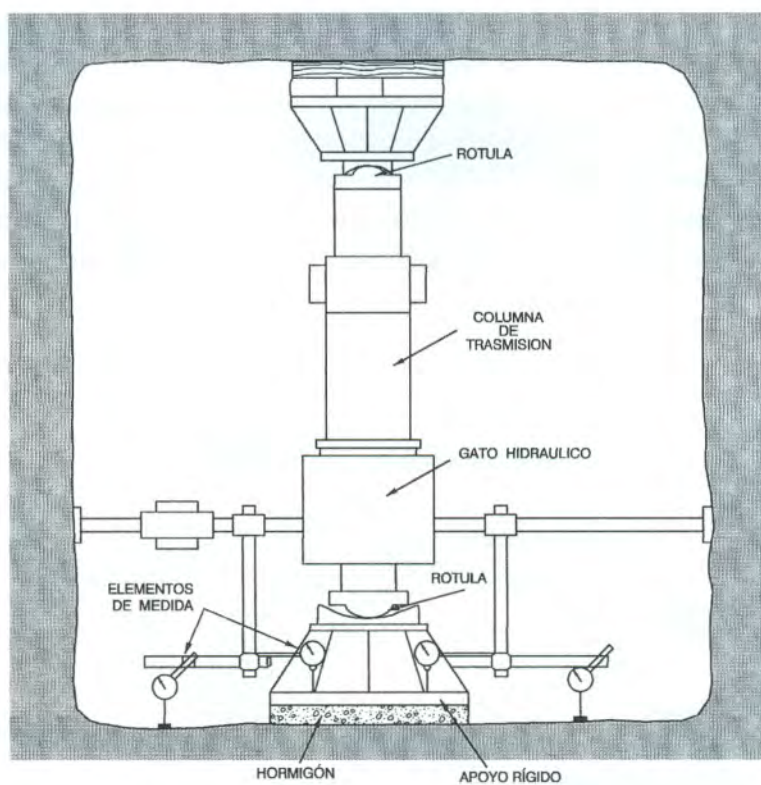


Fig. I.16

Esquema de un ensayo de deformabilidad en galería con placa rígida

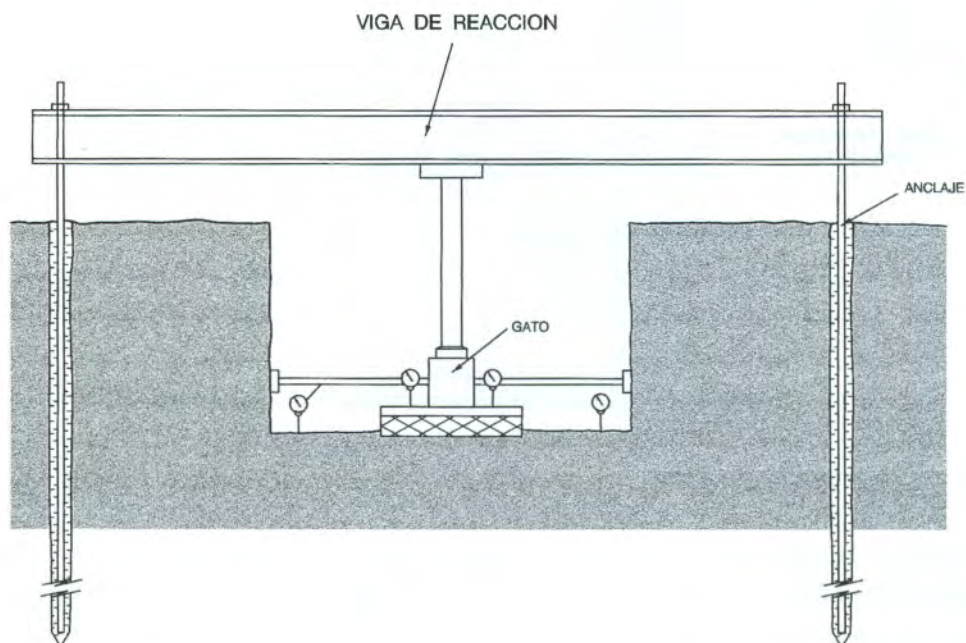


Fig. I.17

Esquema de un ensayo de deformabilidad en superficie con placa rígida

c) Con gatos radiales

El ensayo se efectúa en una galería de unos 2,5 m de diámetro en donde se prepara un tramo de esa longitud cubriéndolo con hormigón proyectado en el que se apoyan los gatos, colocando sobre ellos un forro de madera que sirve de apoyo a anillos de acero. Los extensómetros de medida se ubican en taladros situados radialmente que alcanzan la profundidad hasta la que se hace el ensayo. Se suelen hacer varios ciclos de carga y descarga aplicando la carga máxima convenida a la cual se llega por escalones intermedios. Figura I.18.

d) En cámara de presión

Es un sistema similar al de gatos radiales pero la carga se produce con agua a presión.

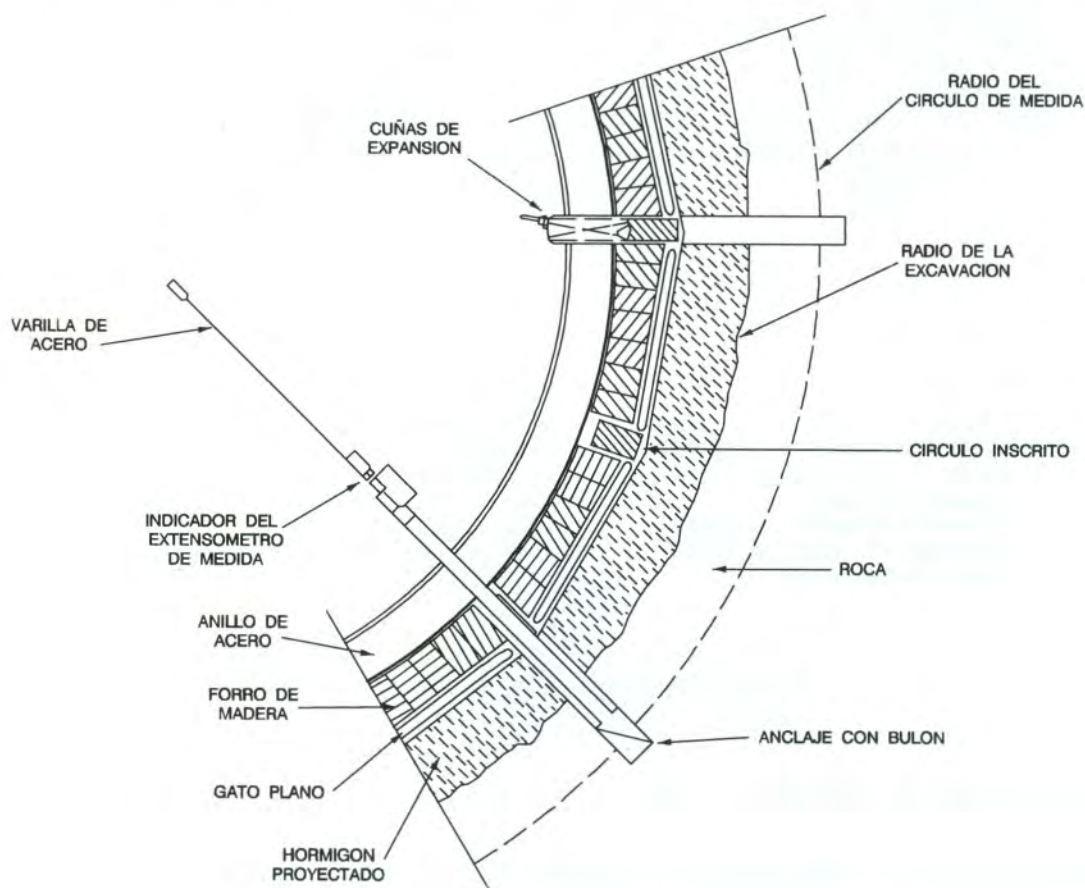


Fig. I.18
Ensayos de deformabilidad con gatos radiales

Esto obliga a convertir en estanca la zona de ensayo. En la Figura I.19 se muestra un esquema del procedimiento. Los resultados son similares a los del ensayo anterior.

10.2.2. Ensayo de capacidad portante

Normalmente se conoce como ensayo de placa de carga. Permite determinar la capacidad portante de una parte del macizo, de un determinado nivel rocoso, de una zona de relleno, etc. y también su deformabilidad. Puede realizarse en superficie o en calicatas. En caso de que exista sobre el sustrato roca alterada o coberturas puede hacerse una pequeña excavación hasta alcanzarlo. Hace falta un elemento que sirva de reacción a la carga aplicada. Este puede ser un vehículo cargado, una plataforma cargada o una viga anclada.

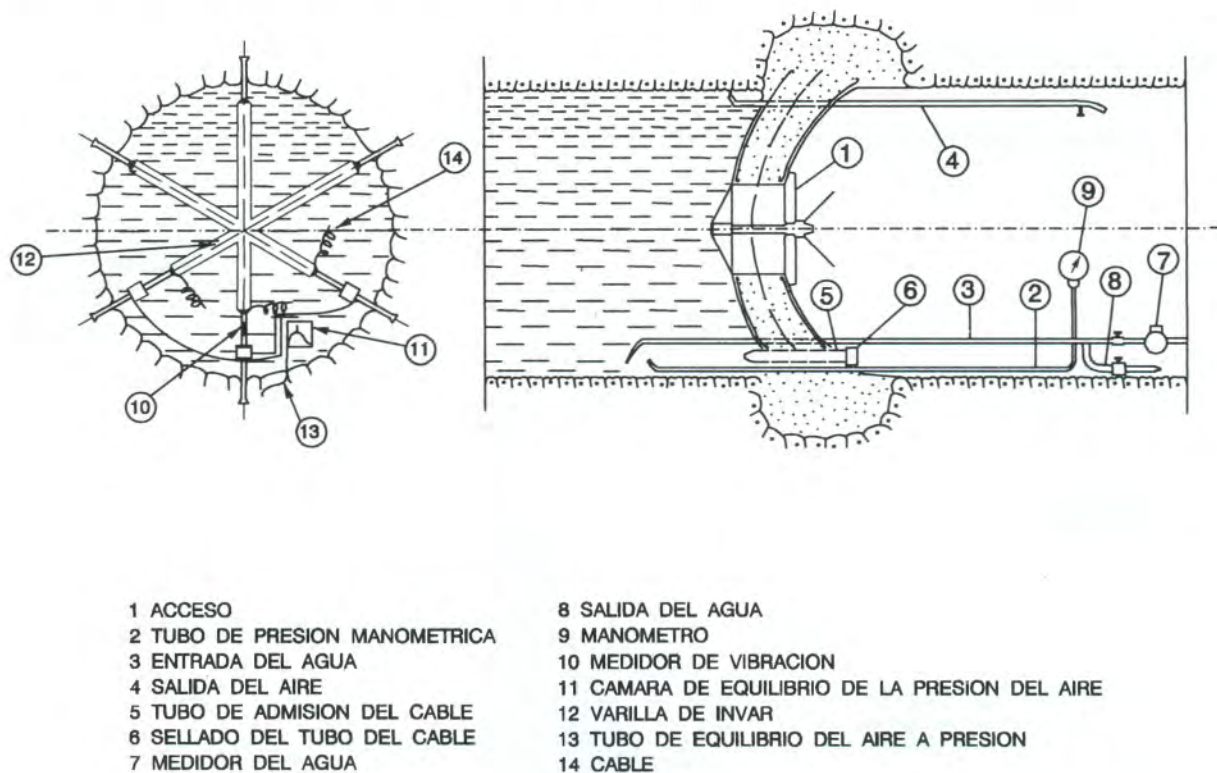


Fig. I.19

Ensayo de deformabilidad en cámara de presión

10.2.3. Ensayos de resistencia al corte

Este ensayo permite determinar la resistencia al corte pico y residual, en particular de las discontinuidades que puedan existir. El ensayo se realiza tallando un bloque en la roca, preferiblemente dentro de una galería, de tal forma que el plano de corte coincida con la discontinuidad del macizo de la que deben conocerse sus características. A este bloque se le aplican fuerzas verticales y laterales tal como muestra la Figura I.20. El número de ensayos recomendables para cada discontinuidad es de al menos cinco. Los resultados permiten dibujar los gráficos de consolidación, tensión-desplazamiento y resistencia al corte-tensión normal, que proporcionan la cohesión y el ángulo de rozamiento del material ensayado.

11. TERRAPLENES EXPERIMENTALES

11.1. Ensayos de compactabilidad

La ejecución de un terraplén de ensayo suele ser un requisito imprescindible en obras de una determinada importancia. Su ejecución se debe proyectar y especificar con detalle en función de los materiales que se deseen investigar y de la maquinaria que pueda ser disponible. Los aspectos constructivos deben realizarse como si del propio cuerpo de presa se tratase, por lo que se debe ejecutar con acuerdo a los criterios definidos en otras Guías.

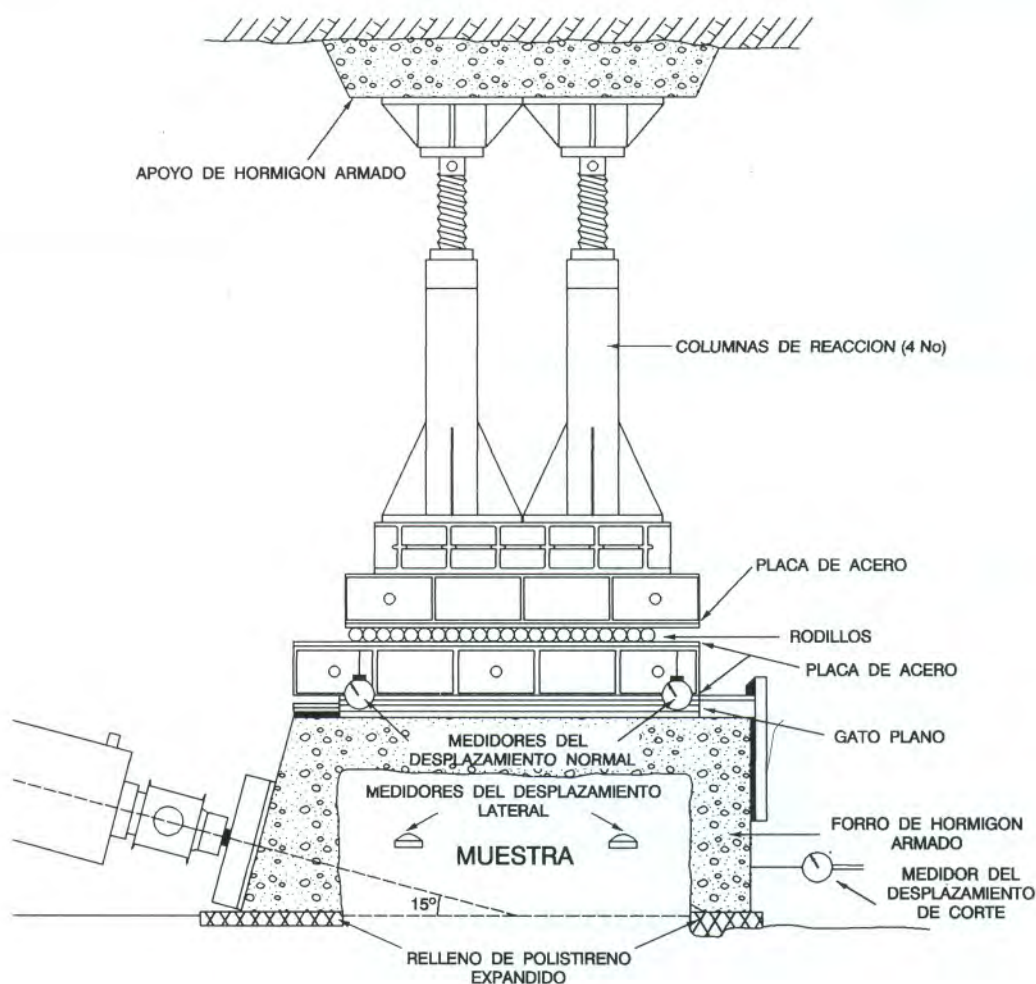


Fig. I.20
Esquema de ensayo de corte en galería

Se trata de ejecutar un terraplén con los espesores más razonables, en donde controlar topográficamente y mediante ensayos la respuesta de los materiales que constituirán el cuerpo de presa a la compactación, con la propia maquinaria que se pretende seleccionar para ser utilizada en la obra. Para poder alcanzar los objetivos deseados, el terraplén debe tener unas dimensiones

mínimas, (p.e. 50 m x 12 m), de manera que se puedan ensayar diferentes "tongadas" y "bandas" homogéneas.

Para ello, en función del número de pasadas, velocidad del equipo, incidencia del agua, etc. se controlan asientos y en determinados momentos densidades e incluso granulometrías. El procedimiento de adición de agua también es una variable a controlar. De una buena planificación y control de un terraplén de ensayo se puede obtener información muy condicionante de la futura buena marcha de la obra.

El cimiento sobre el que se desea apoyar el terraplén de ensayo debe estar preparado con anterioridad. En general bastará con un escarificado y limpieza, pero se debe analizar previamente la idoneidad del lugar previsto para construir el terraplén de manera que su ejecución e interpretación se pueda efectuar sin condicionantes en este sentido.

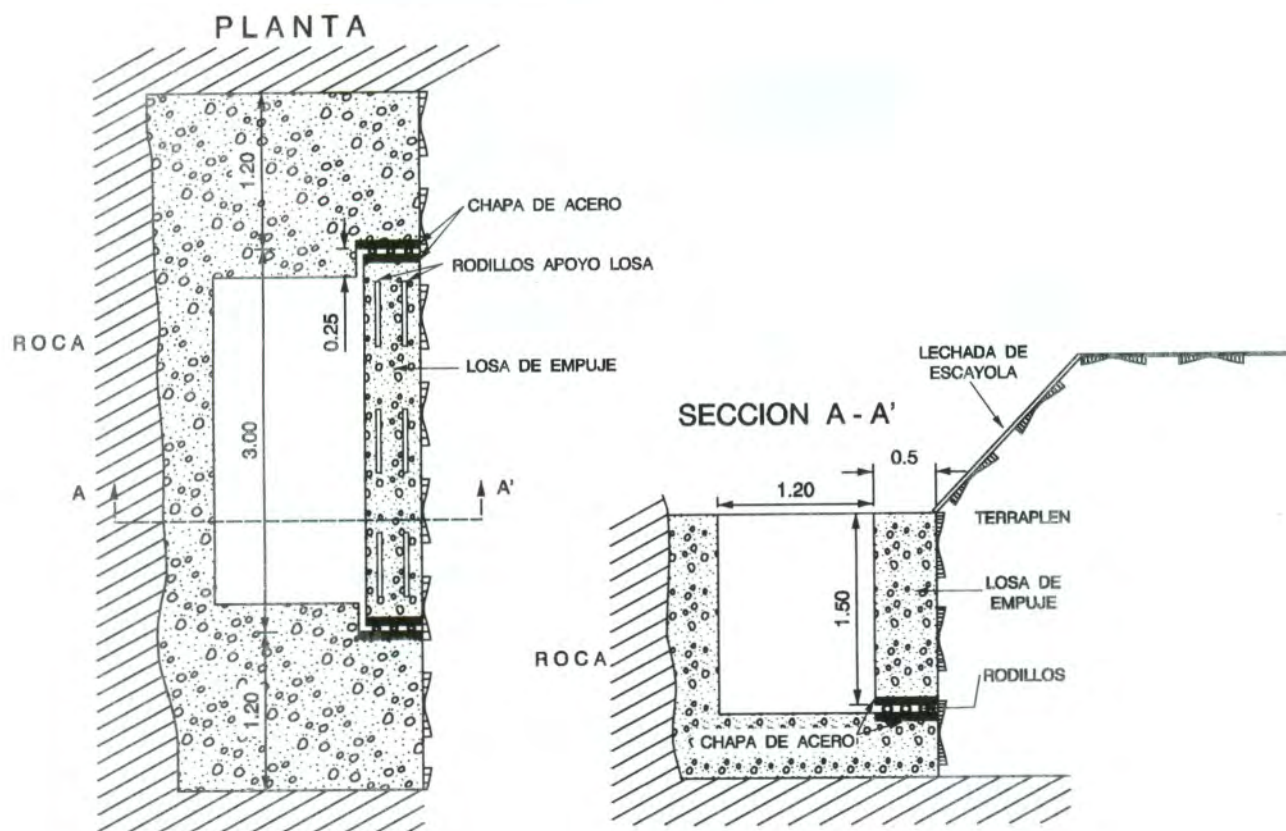
Durante la ejecución del terraplén se deberán efectuar adicionalmente ensayos in situ (p.e. densidad, humedad, placa de carga, etc.) así como se pueden tomar muestras para su control y ensayo en laboratorio.

11.2. Ensayos de resistencia y deformabilidad

- a) Al igual que para el estudio del cimiento, se pueden efectuar ensayos de placa de carga en los materiales compactados que constituyen el terraplén, si bien su interés está más acotado. Si fuese necesario, en el dominio de la tecnología de carreteras existe normativa específica para su ejecución, como procedimiento de control de la calidad de un terraplén, e interpretación.
- b) Los ensayos de empuje pasivo consisten en la construcción de un terraplén de ensayo que posteriormente es llevado a rotura con la ayuda de gatos hidráulicos, que actúan horizontalmente (Figura I.21). Sobre la coronación del terraplén se extiende una lechada de escayola con objeto de conocer la morfología de la superficie de rotura. El empuje se efectúa horizontalmente sobre una losa vertical adosada al talud, [R.15].
- c) También se pueden efectuar ensayos de corte directo, in situ, sobre el propio material colocado en las condiciones de obra [R.16].

11.3. Ensayos de fisurabilidad

Consisten en ejecutar un terraplén de reducidas dimensiones con el material que constituirá el núcleo de una presa, el cual lleva incluidos, enterrados, un conjunto de tuberías inflables a presión. Al ser hinchadas se provoca la deformación del terraplén, induciendo tracciones en las cotas más altas del mismo (Figura I.22). Del análisis de los efectos producidos en función de la deformabilidad provocada, se puede deducir el comportamiento de los materiales del núcleo a sollicitaciones de tracción, [R.17].



ESQUEMA DE ROTURA

ZONA CUBIERTA DE LECHADA DE ESCAYOLA

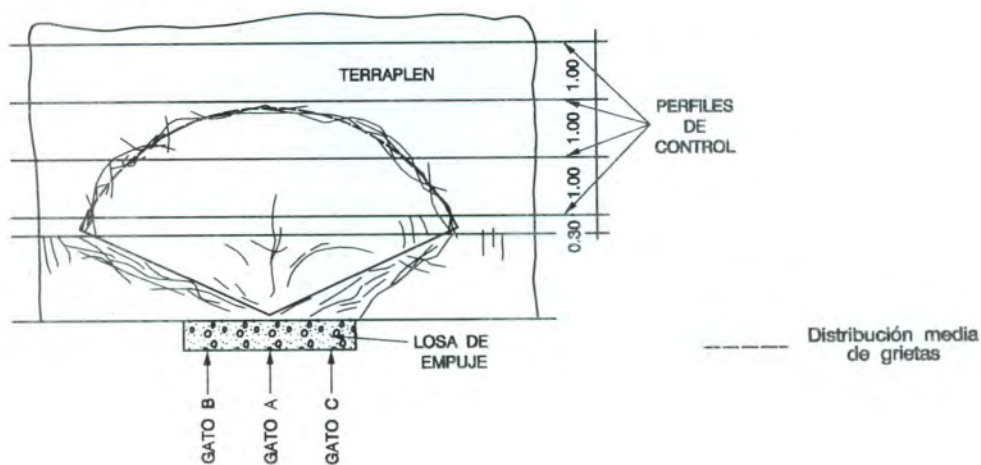
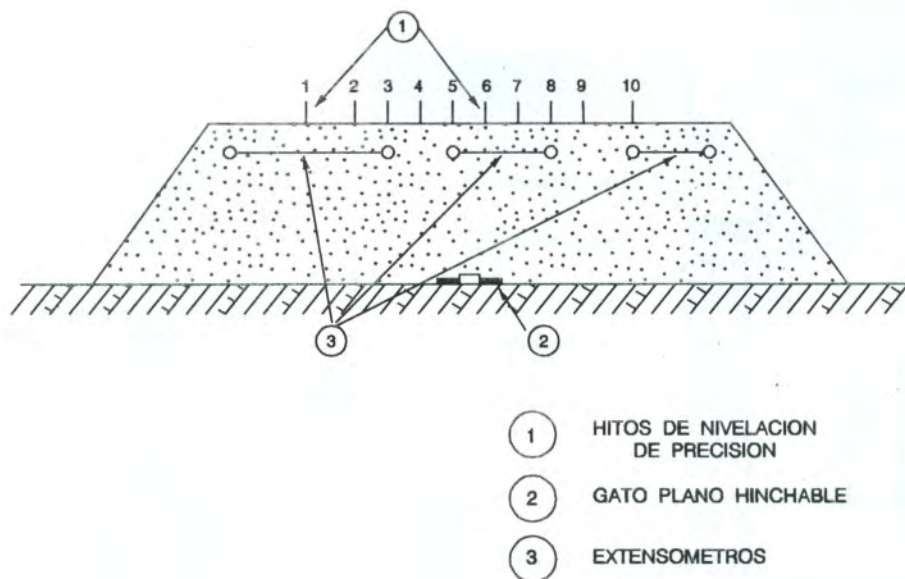


Fig. I.21
Ensayo de "empuje pasivo"

SECCION DEL TERRAPLEN A ENSAYAR



PLANTA DEL TERRAPLEN

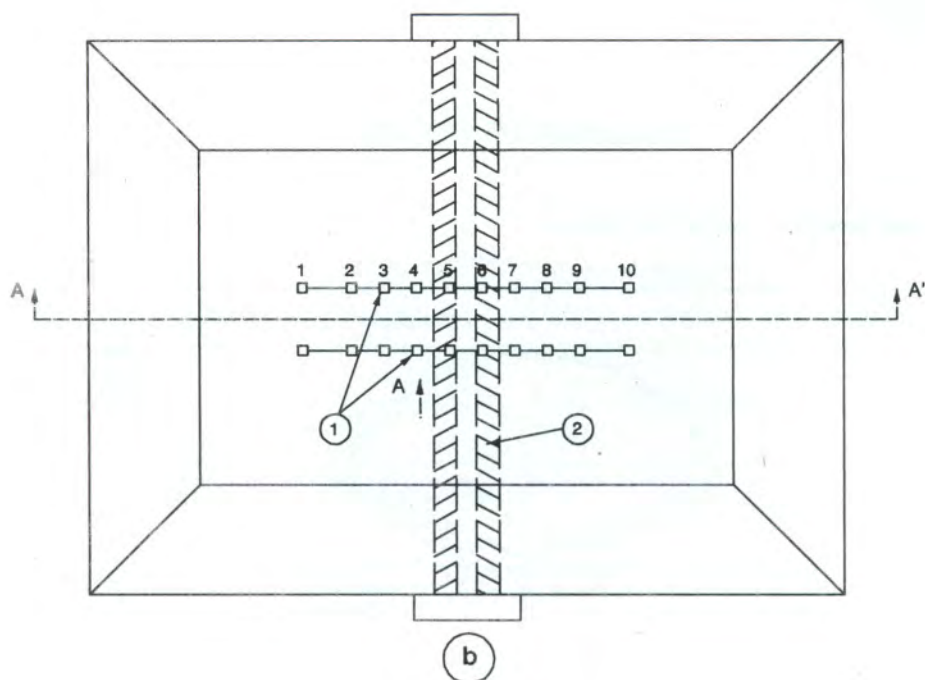


Fig. I.22

Ensayo de fisurabilidad

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- R.1 ISRM. "Recommendations of site Investigations Techniques" p.40. 1975.
- R.2 IAEG. Comission of Engineering Geological Mapping. "Classification of Rocks and oils for Engineering Geological Maps, Part I: Rock and Soils Materials". Bull. Int. Association of Engineering Geology, nº 19, pp. 336-367. 1979.
- R.3 RX2 Norma UNE 22-601-74. "Representación de las rocas sedimentarias, en cortes geológicos y columnas de detalle". 1974.
- R.4 LÓPEZ MARINAS, J. M. "Geología aplicada a la ingeniería civil". Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas. pp. 7.26-7.28. 1993.
- R.5 SANZ SARACHO, J. M., SOLA CASADO, P. R. "Los nuevos métodos sísmicos y las diagrañas de sondeos mecánicos en el proyecto y construcción de presas". Rev. de Obras Públicas. Mayo-Junio pp. 397-412. 1985.
- R.6 GÓMEZ LAA, G. and FOYO MARCOS, A. "An analysis of in situ permeability tests in some Spanish dams". XIII ICOLD, New Delhi. India. 1979.
- R.7 PLATA, A. "Medida de flujos subterráneos con trazadores artificiales". Curso de Hidrología Isotópica. CEDEX. Madrid. España. 1997.
- R.8 CANTOS FIGUEROLA, J. "Tratado de Geofísica Aplicada". Madrid. Litoprint. 1974.
- R.9 GARCÍA YAGÜE, A. "Geofísica aplicada a las obras públicas". Bolt. Servicio Geológico de Obras Públicas. nº 11, pp. 35-55. 1962.
- R.10 OLALLA, C. y CUELLAR, V. "New Testing Techniques and Equipments for Static and Dynamic Characterization of Dam Materials". XIX Congreso Internacional de Grandes Presas. Q.73, R.23. Florencia. Italia. 1997.
- R.11 LORENZO, E. "Prospección Geofísica de Alta Resolución mediante Georadar. Aplicación a Obras Civiles". Monografía CEDEX M-53. Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones. Madrid. España. 1996.
- R.12 RUIZ, J. M., OLALLA, C. and CUADRA, A. "Use of Electrical and Electromagnetic Techniques for Controlling the Water Contents in Earth Dam Cores". Int. Symp. on New Trends and Guidelines on Dam Safety. ICOLD. Barcelona. 1998.

- R.13 ALONSO, E. "Toma de muestras en sondeos de reconocimiento geotécnico en España (I) 1980. Rev. de Obras Públicas, nº 3178. Febrero-Marzo, págs. 225-262. (II) Rev. de Obras Públicas 1980, nº 3180, Mayo. págs. 385-341. 1980.
- R.14 ISRM. "Rock Characterization Testing and Monitoring". E.T. Brown (Editor). Pergamon Press. pp. 154-160. 1981.
- R.15 URIEL, S. "Informe sobre la estabilidad de la Presa de Canales". Dirección General de Obras Hidráulicas MOPU. Laboratorio de Geotecnia. CEDEX. 1987.
- R.16 SURENDRA, P. J. and GUPTA, R. C. "In Situ Shear Test for Rockfill". Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE. Vol. September pp. 1031-1050. 1974.
- R.17 BRAVO, G., URIEL, S. and PEREZ, J. R. "In situ Tests for Control of Cracking of the Clay Core of Canales Dam (Spain)". XIV ICOLD, R55-Q55. Río de Janeiro. Brasil. 1982.

ANEJO II

ENSAYOS DE LABORATORIO

ÍNDICE	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	203
2. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS	203
2.1. Mineralogía y composición	203
2.2. Granulometría	204
2.3. Plasticidad	204
2.4. Densidad y humedad	204
2.5. Ensayos de compactabilidad	205
2.6. Permeabilidad y comportamiento frente al agua	206
2.7. Dispersabilidad	207
2.8. Resistencia al corte	208
2.9. Deformabilidad	209
2.10. Ensayos dinámicos	209
2.11. Otros ensayos	210
3. CARACTERIZACIÓN DE ROCAS	210
3.1. Introducción	210
3.2. Identificación y características elementales	210
3.3. Resistencia	213
3.4. Alterabilidad física	215
3.5. Alterabilidad química	216
3.6. Otros ensayos	217
4. RELACIÓN DE NORMATIVA ESPAÑOLA UNE DE ENSAYOS DE LABORATORIO CON LOS ÁRIDOS PARA HORMIGONES	217
5. TABLAS DE NORMATIVAS APLICABLES A LOS ENSAYOS DE SUELOS Y ROCAS	219
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	237

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este Anejo es efectuar una descripción de las diferentes posibilidades que existen para ensayar en laboratorio los materiales constitutivos de una presa y de su cimiento. Se describen equipos que están disponibles en España, en empresas privadas, en instituciones oficiales como el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Mº Fomento) o en las Universidades.

No pretende ser exhaustivo pero se han descrito los más habituales. No obstante, para cada situación especial podrían definirse otros tipos de ensayos que informen apropiadamente del comportamiento del material frente al problema en estudio.

Se ha efectuado una distinción, atendiendo a las técnicas de ensayo, entre suelos y rocas. En cada caso se realiza una identificación de los ensayos posibles, si bien la frontera entre un tipo de material y otro no siempre está clara.

Se ha prestado una mayor atención a aquellos ensayos que definen propiedades más específicas de los materiales que van a constituir cuerpos de presas o su cimiento, así como a las singularidades de cada ensayo más interesante para este tipo de obras. A título orientativo se citan ensayos de permeabilidad en geotextiles.

Se han elaborado unas tablas, incluidas en el apartado 5 de este Anejo, en donde para cada ensayo se especifican algunos datos y algunas de las distintas normativas vigentes en los países de nuestro entorno. Sirven de referencia y contraste en la ejecución de los distintos procedimientos. Cuando no existe normativa, debe ser el peticionario el que defina las condiciones del ensayo en función del objetivo que pretenda cubrir.

Dependiendo del tipo de ensayo y del objeto del estudio, las muestras pueden, (o deben) ser, inalteradas o remoldeadas. En el segundo caso, es necesario especificar la densidad y humedad con las que se desea efectuar el ensayo. Para el estudio del cimiento, en ocasiones, (resistencia, deformabilidad, ...) se necesitarán muestras inalteradas.

2. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

Las muestras que se ensayan no tienen por qué ser necesariamente inalteradas, salvo para la determinación de la densidad y la humedad. Sí deben ser representativas del material a estudiar.

2.1. Mineralogía y composición

Los distintos minerales que constituyen un suelo se pueden identificar cualitativa y en algunos casos cuantitativamente por medio de las técnicas de difracción de rayos X, del análisis térmico diferencial, o de la inspección visual en el microscopio electrónico.

Los ensayos químicos más usuales tienen como objeto conocer los porcentajes de carbonatos, sulfatos y materia orgánica presentes en la muestra del suelo.

Los resultados relativos al porcentaje de carbonatos pueden presentarse en términos de CO_3Ca o CO_2 por lo que este detalle debe reflejarse claramente.

2.2. Granulometría

Con los ensayos granulométricos se pretende identificar la distribución de tamaños de las partículas que constituyen un suelo. Básicamente hay dos métodos, dependiendo del tamaño de las mismas: análisis mediante tamizado previa agitación mecánica y análisis por sedimentación utilizando un hidrómetro o una pipeta. La distinción, (en la que no coinciden las distintas Normativas), se efectúa a partir del tamaño considerado como separador de los finos (80μ en la Normativa NLT (104.91/2) y en la actual (1995) redacción de la Norma Europea, 75μ en la ASTM (D 422-90) y 63μ la normativa inglesa (BS 1377 Part 2, 9.2.2.1).

Si se considera necesario se deben eliminar partículas orgánicas o agregados de carbonatos, con anterioridad a la realización de los ensayos, que pueden falsear los resultados obtenidos.

También se dispone de técnicas para identificar con precisión el contenido de las partículas finas mediante el análisis de difracción de rayos laser. Posibilita conocer con precisión la distribución de partículas finas desde 2 mm hasta unos 2μ .

Para el caso de partículas gruesas, las formas de las partículas se suelen calificar, utilizando una lupa o un microscopio, atendiendo al criterio de R.1, que tipifican dos aspectos: "formas" y "redondeamiento". Este último término se refiere al de su superficie. En general este tipo de calificaciones no están normalizadas, si bien la NLT 354/74 y BS 812-67 proporcionan un índice de lajas y agujas de los áridos para hormigones, que puede servir de referencia.

2.3. Plasticidad

Estos ensayos identifican la plasticidad de la fracción fina de los suelos. Existe normativa para valorar el límite plástico, el límite líquido y el límite de retracción.

Como alternativa a la cuchara de Casagrande, para valorar el límite líquido en suelos de baja plasticidad, existe también el procedimiento de caída de cono, que se encuentra especificado en sus tamaños y pesos. En esos casos este ensayo puede ser más consistente.

2.4. Densidad y humedad

El ensayo más habitual es el de densidad "seca". Indica la relación de masa "seca" por unidad de volumen. No obstante dado que los estados del suelo son varios, en la medida en que las tres

fases (sólida, líquida y gaseosa) se encuentren mezcladas en diferentes proporciones, los tipos de densidades de referencia pueden ser varios (natural, saturada, etc).

El ensayo de densidad permite estimar el grado de compactación del suelo y es un parámetro fundamental en el comportamiento geotécnico de los materiales.

El contenido de humedad es el peso del agua dividido por el peso del suelo. Como el ensayo se efectúa introduciendo el material en una estufa, se debe tener en cuenta la posibilidad de que alguno de sus componentes se pueda volatizar. Por ejemplo, si se espera la presencia de yeso se suele secar a una temperatura máxima en la estufa de 60°C.

El peso específico de las partículas sólidas es el cociente entre el peso de las partes dividido por su volumen. Sirve de referencia para calcular índices de hueco y porosidades. Si los valores obtenidos son anómalos, superiores a 2,8 o inferiores a 2,5 se debe investigar la causa de esta singularidad.

Hay dos procedimientos para obtener la densidad máxima en suelos granulares. Uno en base a compactar al material con una energía tal que, sin modificar su granulometría, se alcance el mínimo índice de huecos posibles. Otro procedimiento consiste en vibrar la muestra del suelo granular hasta conseguir la densidad máxima posible. Para ello se suelen especificar la frecuencia de vibración, su amplitud y el tiempo de actuación de la misma. Si se utiliza el procedimiento de apisonado es conveniente conocer la granulometría que se produce después del ensayo. El segundo procedimiento no está normalizado en España si bien existe norma ASTM. Se considera que es más adecuado, más limpio, no modifica la granulometría del material y se pueden alcanzar valores ligeramente más elevados.

La densidad mínima de suelos granulares pretende conseguir la estructura del esqueleto sólido del suelo más "abierto" posible. Para ello se deposita el material suavemente en un molde cuyo volumen es conocido sin ninguna compactación.

Este ensayo está normalizado hasta un determinado tamaño, (las norma UNE permiten hasta 5 mm), por lo que para tamaños más gruesos se deben extrapolar los criterios.

2.5. Ensayos de compactabilidad

Los más habituales son el Proctor Normal y el Proctor Modificado.

En el primer caso la energía de compactación por unidad de volumen de suelo compactado es de 5,7 Kp cm/cm³; en el segundo es de 24,6 Kp cm/m³.

Se obtiene la relación entre la densidad y la humedad del suelo para una energía de compactación determinada definida por el peso de la maza, la altura de caída y el número de golpes por cada unidad de suelo.

Está generalmente aceptado que la energía de compactación que se alcanza en obra con la maquinaria pesada moderna está más próxima a la energía del proctor modificado que a la energía del proctor normal. Si la muestra tiene gruesos es más conveniente efectuar el Proctor Modificado.

Existen otros ensayos de compactación, en los que se desea reproducir mejor las condiciones de "amasado" propios de obra, frente al "impacto" que producen los ensayos tipo Proctor, para lo cual se puede utilizar el ensayo Harvard [R.2].

El ensayo MCV es adecuado para suelos muy heterogéneos, pues simplifica las operaciones de control y permite contrastar los resultados con la humedad de compactación.

2.6. Permeabilidad y comportamiento frente al agua

Para su determinación, en función de los órdenes de magnitud de la permeabilidad esperada, se pueden utilizar el permeámetro, la célula triaxial o el edómetro. En los primeros casos para un gradiente determinado se calcula el coeficiente de permeabilidad en base a las teorías lineales de Darcy. Por ello se debe garantizar un régimen de flujo sin turbulencias. En el edómetro se mide indirectamente. Se suele utilizar en el caso de materiales muy impermeables.

No existe normativa específica para reproducir en laboratorio el fenómeno del colapso, entendiendo como tal a los asientos que se producen en los suelos, normalmente granulares, por efecto de la humectación. Se suele ensayar en el equipo edométrico pero también se pueden hacer ensayos para cuantificar este fenómeno en los equipos triaxiales. Se suele iniciar el ensayo con el material semisaturado, en las condiciones de densidad y de humedad de interés y en un momento determinado dentro del proceso de carga, se efectúa la saturación y se miden las deformaciones que se producen al ser inundada la muestra de agua. En el método del doble edómetro se comparan los resultados obtenidos con el material saturado, respecto del mismo material ensayado "semisaturado". Para conocer este fenómeno, se deben especificar las condiciones en las que se desea realizar el ensayo.

Los ensayos más habituales para estudiar el aumento de volumen de los suelos plásticos son el hinchamiento libre y la presión crítica de hinchamiento. En el primer caso a la pastilla de suelo se la deja hinchar sin presión alguna o con una presión muy reducida, determinándose el porcentaje de hinchamiento que sufre. En el segundo caso, por contra, se somete a la pastilla de suelo a una presión tal que no se la permita deformabilidad alguna. Para una determinada tensión o trayectoria de tensiones, también se puede conocer la deformabilidad del suelo al ser inundado.

El hinchamiento también se puede determinar en el ensayo CBR, pero este procedimiento se considera más propio de tecnología de carreteras que de obras hidráulicas.

Todos los ensayos de determinación del potencial de succión en función de la humedad de la muestra son también ensayos indicativos del comportamiento de los suelos arcillosos en estado de semisaturación.

También es posible conocer la permeabilidad en medios no saturados. Incluso puede ser de interés, en particular, determinar el coeficiente de difusión.

El ensayo de falta de cohesión, o ensayo Vaughan, [R.3], consiste en formar una muestra en un cubo, en las condiciones de compactación próximas a las de obra, y depositarla en una bandeja, de escasa profundidad, que se inunda posteriormente. Si la muestra se desmorona hasta su ángulo de reposo el suelo no es cohesivo. El resultado es ilustrativo. También se pueden utilizar los resultados de los ensayos del triaxial o de corte directo para confirmar la inexistencia de cohesión.

De la misma manera almacenando las muestras, con una ligera humedad, se puede estudiar, de manera aproximada, la influencia del tiempo en la producción de contactos entre granos, debidos por ejemplo a la cementación de sus enlaces.

También se pueden realizar ensayos específicos de materiales para filtros basándose en reproducir a escala reducida, el fenómeno real de filtración del agua a través del material impermeable colocado en contacto con el propio material de filtro. Para las presiones de la obra y con el agua del embalse se puede pronosticar la eficacia del diseño. Los detalles y su interpretación se pueden encontrar en [R.4].

2.7. Dispersabilidad

La dispersabilidad se puede producir, en principio, en cualquier tipo de suelos arcillosos por lo que se deben ensayar frente a este fenómeno los materiales finos. Algunos de estos ensayos es conveniente que se efectúen con agua de características químicas similares a las que van a tener en el embalse.

El ensayo más definitivo es el de "tubificación", también conocido como ensayo de la aguja [R.5 y R.6].

No obstante, es conveniente efectuar adicionalmente algunos de los otros tipos de ensayos que existen, entre los que cabe mencionar:

- a) el "doble densímetro", en donde se contrastan los tamaños de la muestra con y sin agitación mecánica o química,
- b) los ensayos que buscan conocer la presencia de sodio intercambiable, junto a otros datos de tipo químico, o
- c) el ensayo de la "bolita" ("crumb-test") que estudia el efecto del agua en una muestra de suelo de forma cúbica.

De la cuidadosa ejecución de estos ensayos, así como de su correcta interpretación se puede disponer de una acertada idea acerca de la potencialidad dispersiva del suelo arcilloso [R.7].

Incluso puede ser conveniente que la delimitación de la potencialidad dispersiva del material se haga por contraste con los ensayos conjuntos "núcleo-filtro", o con los diferentes indicios deducibles de cada tipo de ensayo, valorando cada uno según la confianza en él depositada [R.4].

2.8. Resistencia al corte

Todos estos ensayos se pueden hacer con las muestras de material en estado de saturación o simplemente con la humedad natural. Si al solicitar el ensayo al laboratorio no se especifica nada se supone que se realizan con el material saturado. En particular para el estudio del cuerpo de presas se ensayan muestras "remoldeadas" y para el estudio del cimientto muestras "inalteradas".

Cuando se ensayan materiales que contienen gruesos, el problema que surge es el de extrapolar los resultados obtenidos al material de obra. Normalmente su granulometría no se corresponde exactamente con el material introducido en las muestras, por lo que es conveniente utilizar equipos de las mayores dimensiones posibles.

En España hay células triaxiales que permiten ensayar probetas que varían en su diámetro desde 1,5" (3,81 cm) hasta 9" (22,86 cm). Este último equipo está disponible en el Laboratorio de Geotecnia (CEDEX) del Ministerio de Fomento. Hay también triaxiales que permiten especificar la trayectoria de tensiones que se desee.

En todos estos ensayos se pueden medir también los parámetros deformacionales que se corresponderán con las condiciones del ensayo por lo que estos ensayos también se deben entender y definir para conocer este comportamiento.

Los ensayos triaxiales que se efectúan de manera más sistemática son del tipo CU, es decir, ensayos con consolidación previa, rotura sin drenaje y medida de la evolución de las presiones intersticiales. Permiten deducir los parámetros resistentes en totales y en efectivas.

Los ensayos con consolidación previa y rotura con drenaje, tipo CD, permiten estimar la resistencia a largo plazo y deducir los parámetros correspondientes.

Los triaxiales normalmente conocidos como rápidos, tipo UU, se realizan en suelos cohesivos y de sus resultados se deducen los parámetros a corto plazo. No se consolida previamente la muestra y se rompe sin permitir que drenen las presiones intersticiales que se generen.

El ensayo de compresión simple, (uniaxial), es el ensayo de resistencia más sencillo y económico. Si bien en este ensayo se utiliza otro aparato más simple que las células triaxiales, que no permiten la saturación de la muestra.

Los equipos de ensayo de "corte directo" utilizan muestras que varían desde 6 x 6 cm, ó 5 cm de diámetro, hasta el ensayo de corte de grandes dimensiones del Laboratorio de Geotecnia de

1 x 1 x 1 m³, pasando por 10 x 10, (ó 8 cm de diámetro), y 30 x 30 cm, respectivamente. Los ensayos que se pueden realizar son, de manera similar a los triaxiales, con consolidación previa o sin ella, si bien no se suelen medir presiones intersticiales.

El ensayo de corte simple también puede completar la información respecto a la resistencia al corte de los materiales.

También hay otros ensayos, similares a los de campo, que se pueden hacer en el laboratorio, (molinete, penetrómetro bolsillo, etc) y sirven para tener un índice de su resistencia a corto plazo.

2.9. Deformabilidad

A partir de la información que suministran los ensayos de resistencia se puede conocer el comportamiento deformacional del material.

Específicamente diseñados con este objetivo están los ensayos edométricos, que sirven para medir los procesos de consolidación, en una dimensión, de los suelos cohesivos.

2.10. Ensayos dinámicos

Permiten conocer las reacciones del suelo a solicitaciones sísmicas. Es necesario especificar las condiciones de estos ensayos, (amplitudes, frecuencias, etc), pues no hay normativas. Se describen a continuación equipos disponibles actualmente en España.

En el ensayo de columna resonante se determinan las características de deformación y el coeficiente de amortiguamiento del suelo ensayado, de acuerdo con el modelo lineal equivalente, para distintos niveles de deformación, todos ellos muy reducidos, del orden de 10^{-5} , en donde el comportamiento del suelo es todavía elástico.

También se pueden determinar en probeta, en las condiciones fijadas, las velocidades de transmisión de las ondas de compresión y de corte. Aunque en teoría son ensayos sencillos, en la práctica son difíciles de interpretar.

El ensayo triaxial cíclico añade, para un estado tensional determinado de la probeta, solicitaciones de tipo dinámico. Normalmente las solicitaciones son de tipo sinusoidal. La frecuencia de estas solicitaciones no suele afectar al resultado que se obtiene. En algunas ocasiones, si el equipo que se dispone lo permite, se puede someter a la probeta con las solicitaciones de carácter aleatorio esperables o registradas con un determinado terremoto.

Con estos equipos se pueden obtener no sólo los módulos de elasticidad y amortiguamiento típicos, sino también las deformaciones permanentes que se vayan produciendo en función del

número de ciclos y de la amplitud máxima de cada ciclo. Esta información permite conocer el comportamiento en la fatiga del material. También permiten conocer la pérdida total de resistencia (licuación).

El ensayo de corte simple cíclico somete a la probeta a una deformación tangencial constante en toda su altura. Para una determinada presión de confinamiento se le superpone una tensión tangencial de carácter cíclico, normalmente de tipo sinusoidal. Con este tipo de equipos se pueden hacer ensayos en seco, a volumen constante, (isocóricos), que posibilitan el estudio de los fenómenos de licuación.

Con todos estos ensayos se puede cubrir un amplio rango de niveles de deformación.

2.11. Otros ensayos

Existe una amplia gama de posibilidades para conocer parámetros físicos o mecánicos, no estrictamente geotécnicos pero representativos del comportamiento de un suelo, cuya definición y descripción de sus utilidades excede del alcance de este Apéndice. Algunos de ellos (pH, resistividad, friabilidad, aplastamiento, etc), se indican en la Tabla que acompaña a este texto.

3. CARACTERIZACIÓN DE ROCAS

3.1. Introducción

Se describen los ensayos de laboratorio que se pueden utilizar para determinar el comportamiento de los fragmentos individuales de la roca, frente a las acciones a que se van a ver sometidos, y cuales de todos ellos se deben llevar a cabo para determinar la calidad y aptitud de un material para ser empleado como árido para hormigones o como escollera, o que se encuentre en el cemento.

Las muestras que se reciban en el laboratorio pueden tener indistintamente un doble origen; del sondeo o pueden ser extraídas de un bloque. En el primer caso, se deben tener en cuenta la orientación de las mismas para aquellos fenómenos que puedan estar condicionados por la dirección de sus discontinuidades.

3.2. Identificación y características elementales

Para la determinación de los tamaños de partículas granulares son aplicables los criterios definidos para suelos. Se suelen realizar en obra dadas las grandes cantidades de material que pueden verse implicadas. La forma de las partículas se puede conocer utilizando la metodología

propia de la tecnología del hormigón en donde se suelen identificar unos índices de lajosidad y de agujas.

- a) **La petrografía** de la roca persigue la obtención de sus propiedades intrínsecas. Numerosas organizaciones mundiales, ASTM (American Society for Testing and Materials), BS (British Standard), ISRM (International Society of Rock Mechanics), etc, han establecido recomendaciones concretas para efectuar un adecuado examen petrográfico de las rocas.

Para su determinación con carácter orientativo pueden emplearse, de una manera progresiva, las siguientes técnicas:

- 1.- Reconocimiento y descripción de visu de los testigos o fragmentos de roca con lo cual es posible obtener una primera idea de su estructura y su distribución.
 - 2.- Análisis mediante lupa binocular.
 - 3.- Observación mediante microscopio petrográfico que, permite reconocer los distintos minerales que componen la roca a partir de sus propiedades ópticas.
 - 4.- Análisis mediante microscopio electrónico de barrido o de transmisión.
- b) Con cualquiera de las técnicas anteriores es posible, además, determinar **la textura** que presenta la roca y el tamaño de grano predominante en la misma.
- c) Utilización de técnicas de difracción de rayos X, con las cuales se analiza de forma muy adecuada **la composición** de la roca y la proporción de **minerales** de naturaleza arcillosa.
- d) Además, y como complemento, es preciso conocer **el grado de meteorización** que puede presentar la roca, siendo frecuente emplear, para su determinación, las recomendaciones establecidas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas [R.8].
- e) La **composición química**, permite la determinación de elementos e incluso posibilita aproximarse a su composición mineralógica, en porcentajes. La presencia en la roca de determinados componentes químicos puede dar lugar a una elevada alteración de la misma. En este sentido, puede ser de utilidad determinar, por ejemplo:
- Si en la roca existen arcillas del grupo de las esmectitas, o
 - el contenido de Sulfatos y Sulfuros totales, o
 - la presencia de Sales Solubles y Sales Hidratables,

- f) La **dureza superficial**, para lo cual se suele utilizar la conocida escala de Mohs que varía de 1 a 10.
- g) La **densidad aparente**, es el cociente entre la masa y el volumen (aparente) impermeable del fragmento o la probeta. Esta definición, por lo tanto, lleva implícita que ciertos materiales son, en principio, impermeables en su totalidad, salvo una pequeña corteza superficial a la que es más fácilmente accesible el agua. La **densidad real** es el cociente entre la masa del fragmento y el volumen de sólido (V_s) más el volumen de huecos inaccesible (V_{hi}). La **densidad absoluta**, o peso específico de las partículas sólidas es el cociente entre la masa y el volumen ocupado por los sólidos.
- h) La obtención de la **humedad** se obtiene secando el material en estufa hasta peso constante.
- i) La **porosidad** es la relación entre el volumen de huecos (normalmente suma de huecos y fisuras) y el volumen total de la muestra de roca. Los huecos como tal suelen considerarse que son aproximadamente de forma esférica o redondeada, mientras que las fisuras suelen ser sensiblemente planas. Las porosidades pueden medirse, entre otros procedimientos, de las siguientes formas:
- A partir de la densidades seca y saturada;
 - a partir del agua absorbida tras saturar la roca con agua a presión;
 - mediante inyección de gas helio a presión y
 - saturando la roca con mercurio introducido a presión, (porosimetría de mercurio).

Normalmente la porosidad de las rocas se obtiene en laboratorio a partir del volumen total de la muestra (por inmersión en mercurio, por ejemplo) y del volumen de huecos, determinándose este último como diferencia entre el peso saturado y seco de la muestra ensayada. Es aplicable a los poros superficiales de la muestra.

- j) Para conocer la "**absorción de agua**" se sumergen las muestras en un recipiente en las condiciones establecidas en cada uno de los distintos tipos de ensayo que existen normalizados. El resultado de este tipo de ensayo se emplea muy a menudo para determinar la alterabilidad potencial de las rocas. La absorción puede ser por inmersión libre o forzada (bajo presión), por hidroscopticidad (a presión y humedad atmosférica) y por capilaridad (sin inmersión de la muestra).
- k) La **velocidad de propagación** de impulsos sirve para tener un índice de la calidad de la roca. Con sus resultados es posible determinar indirectamente el grado de fisuración existente en un testigo. Para ello, se da una pulsación en un extremo del testigo con un cristal piezoeléctrico y se recibe el impulso en el otro extremo con un segundo cristal. El tiempo transcurrido entre emisión y recepción permite conocer la velocidad de transmisión de las ondas que en función del tipo de onda generada se puede corresponder

con la de compresión o la de corte. Se pueden deducir módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson, para niveles de deformación muy bajos.

- l) Al igual que ocurría con la porosidad, la **permeabilidad** total es la suma de la que tiene lugar a través de la roca matriz y la que se produce entre huecos y fisuras. Puede ser fuertemente dependiente del estado tensional. Requiere un estudio específico con ensayos especialmente definidos. Se puede determinar en laboratorio normalmente en el equipo triaxial. En rocas sanas se utilizan gradientes elevados e incluso, en ocasiones, gases.

3.3. Resistencia

Existen varias posibilidades que responden a distintos tipos (conceptos) de "resistencias".

- a) El ensayos de **resistencia a compresión simple**. Aunque aparezca como un ensayo sencillo, en realidad es un ensayo relativamente complejo, ya que exige una meticulosa preparación de las probetas, una cuidada ejecución del ensayo y una correcta interpretación de los resultados obtenidos.

El tamaño de la probeta, la velocidad del ensayo, la "calidad" de las superficies de contado con la carga y el contenido de agua del testigo o fragmento de roca a ensayar y la propia rigidez del equipo tienen influencia en el resultado obtenido.

Durante la realización del ensayo suele ser norma habitual medir la deformabilidad vertical de la probeta, (mediante bandas extensométricas), obteniéndose unas curvas tensión-deformación que permiten tener una primera idea del comportamiento de la roca matriz: elástico, elasto-plástico, etc.

- b) El **ensayo de carga puntual** es también conocido como ensayo Franklin o PLT (Point Load Test). Aunque normalmente se emplea sobre testigos de roca, es posible efectuarlo sobre fragmentos irregulares. La dispersión de los resultados puede ser elevada.

Se obtiene un índice I_s normalizado, ($I_s = P/D^2$; siendo P la carga de rotura y D la distancia entre las puntas cónicas) correspondiente a un distancia D de 50 mm, pero tanto si la distancia no es esta, como si la forma es irregular, se puede corregir el resultado para tener en cuenta esta influencia.

Este ensayo, por su facilidad de realización permite llevarlo a cabo en el campo y puede ser utilizado con profusión para obtener un amplio espectro de la calidad de la roca. Sin embargo, y a pesar de lo anterior, se debe emplear con precaución en rocas blandas ($I_s < 0.1$ MPa) y con rocas claramente anisotrópicas, como las pizarras y ciertos tipos de esquistos. En este último caso debe tenerse en cuenta la orientación bajo la que se aplica la carga.

Con los resultados de este ensayo se puede deducir el valor de la resistencia a la compresión simple de la roca matriz, q_a , por medio de una correlación que tiene la siguiente forma: $q_a = KI_s$. Con carácter general, para el valor de referencia de D de 50 mm, el coeficiente suele estar comprendido, según numerosos estudios, entre 5 y 25. Todavía no existe una explicación de estos valores, pero a grandes rasgos se puede afirmar que cuanto más resistente es la roca mayor es el índice K .

Similar en cierta medida al ensayo anterior, Marsal y Resendiz [R.9] desarrollaron un ensayo para analizar la solidez de los fragmentos de roca empleados como escolleras. Estos autores junto con los resultados de la absorción de agua, la granulometría y el ensayo de desgaste de Los Ángeles, establecen una clasificación de las escolleras.

- c) El ensayo **Brasileño** permite obtener una valoración indirecta de la resistencia a la tracción. Somete a una probeta cilíndrica a un esfuerzo de compresión a lo largo de dos generatrices opuestas.
- d) El ensayo a **flexotracción** somete a una probeta prismática a flexotracción apoyada en sus dos extremos y cargada, normalmente en dos puntos distintos.

Estos ensayos fueron pensados para hormigones.

- e) Una medida indirecta se puede obtener mediante el **esclerómetro**. Este ensayo, fue desarrollado inicialmente para tener a priori una idea del valor de la resistencia a la compresión simple de probetas de hormigón. Se obtiene un equivalente a la dureza superficial de la roca mediante el martillo Schmidt de rebote (también conocido normalmente como esclerómetro) de muy sencilla ejecución.
Se puede efectuar tanto en campo como en laboratorio. La orientación bajo la cual se efectúa el golpeo mediante el martillo influye en los resultados, por lo que se debe tener en cuenta esta circunstancia a la hora de analizarlos. La dispersión de los mismos suele ser elevada. Por lo que además de efectuar series de golpeos, se eliminan los valores extremos, para deducir un valor representativo.

Se puede disponer de un elevado número de valores y por tanto un buen espectro de la calidad de la roca, aunque siempre es preciso recordar que se trata de un ensayo de tipo superficial. Para deducir con garantía un valor de la Resistencia a Compresión Simple es necesario un tarado previo del equipo.

- f) Los ensayos de **compresión triaxial** en muestras de roca son más propios de estudios especiales pero también se efectúan en análisis de cimentaciones que puedan considerarse problemáticos. Requieren equipos especiales y definir el proceso de rotura.
- g) Los ensayos de **tracción directa** permiten conocer y extrapolar el comportamiento de la matriz rocosa (intacta) en zonas próximas al origen de tensiones.

- h) Otro índice para obtener la calidad de una roca, y por extrapolación un índice de su resistencia, consiste en determinar los **cambios granulométricos** acontecidos con los fragmentos de roca para las sollicitaciones que van a sufrir en obra, antes y después de ensayar al corte la escollera.

3.4. Alterabilidad física

En laboratorio, se pretende reproducir los procesos de alteración que inducen en la roca los agentes externos de la zona en donde la roca va a quedar depositada, acelerándolos.

La respuesta de la roca está condicionada fundamentalmente por su porosidad y su capacidad de absorción.

La gran mayoría de los ensayos de laboratorio concernientes a la alterabilidad de la roca carecen de normativa específica para su realización en laboratorio, por lo que para su ejecución se deben especificar algunos detalles. Para su elección se deben tener en cuenta factores tales como el clima del lugar de la obra, la representatividad de los agentes agresivos del ensayo respecto a su posibilidad en la vida de la obra, experiencia y conocimientos del ensayo, etc. El resultado de estos ensayos se suele expresar como pérdida de peso seco durante la realización del ensayo, para un determinado número de ciclos, a especificar por el usuario. En muchos de estos ensayos, en España no se dispone de una experiencia amplia en cuanto a los valores a asignar o exigir. A continuación se describen someramente algunas de las posibilidades de ensayo.

- a) El ensayo de desgaste **Los Ángeles** determina la resistencia a la fragmentación por choque, con bolas de acero, de los fragmentos rocosos que se emplean en la realización del mismo. En realidad es un índice de fragilidad o de resistencia al impacto. Se utiliza como índice de resistencia a la abrasión, en los áridos en tecnología de carreteras. Los resultados varían mucho con la granulometría utiliza.
- b) Los ensayos **Deval** y **Micro Deval** son similares al de desgaste de Los Ángeles. La diferencia entre un tipo y otro de ensayo es función de la granulometría que se ensaya. En estos ensayos, la degradación de los materiales se produce por el choque entre los propios fragmentos de roca introducidos en el tambor. El ensayo puede efectuarse tanto en seco como con la muestra saturada.
- c) Los ensayos de "**Humedad-Sequedad**" tratan de cuantificar el debilitamiento originado en la red cristalina de los minerales de la roca por la humectación y desecación artificial del agua, tras un determinado número de ciclos, normalmente 25.
- d) Al igual que el ensayo anterior los ensayos de "**calentamiento-enfriamiento**" consisten en someter a la roca a un choque térmico similar al que puede tener lugar en la naturaleza. Se trata de prever las acciones originadas por las expansiones y contracciones.

- e) El ensayo "**Hielo-Deshielo**" trata de reproducir mediante ciclos el efecto que tienen las heladas en las rocas saturadas. Al provocar un importante cambio de volumen en el agua, origina fracturaciones importantes en los fragmentos de roca que se ensaya.

Consiste en sumergir unos fragmentos de ciertas dimensiones en una solución de sulfato sódico o magnésico durante un tiempo predeterminado y posteriormente secarlos en estufa a 100°. Normalmente se especifica efectuar un mínimo de cinco ciclos.

- f) Los resultados de los ensayos de **ataque con Sulfatos** (Magnésico o Sódico) dependen de la naturaleza del medio de cristalización y del tamaño y forma de los fragmentos elegidos para la realización del mismo, por lo que dado que la normativa está fundamentalmente elaborada para áridos para hormigones, se pueden especificar otros tamaños a ensayar más representativos del material en obra.
- g) El ensayo de **Inmersión** persigue determinar cual es el comportamiento de los fragmentos de las rocas frente a la acción del agua. Existen diferentes procedimientos para cuantificar el incremento de fisuración producido por el debilitamiento de las rocas al aumentar su grado de saturación. Uno de ellos, en rocas margosas por ejemplo, consiste en analizar la rapidez (el tiempo) con la que tiene lugar el desmoronamiento, si es que se produce, de un fragmento de roca, una vez que se ha introducido en agua destilada. Otro procedimiento, consiste en determinar la Resistencia a Compresión Simple de los fragmentos secos y saturados. Sus resultados pueden ser indicativos de su comportamiento a largo plazo.
- h) El ensayo de **Humedad-Sequedad-Desmoronamiento** (Sehudes) es muy similar al de "humedad-sequedad", pero en el que además se tiene en cuenta el desmoronamiento sufrido por la muestra en el interior de un tambor giratorio a medida que transcurre el ensayo. Es el ensayo que más se utiliza en materiales pizarrosos y argilíticos.

3.5. Alterabilidad química

En la práctica también existen alteraciones consideradas estrictamente como de tipo químico, que tienen su origen, fundamentalmente, en la circulación de aguas a través de las distintas fisuras existentes en el macizo rocoso. En laboratorio se podrían reproducir algunos de estos procesos químicos como pueden ser:

- a) La **hidratación**, (alteración) debido al aumento de volumen experimentado por determinados minerales al incorporar moléculas de agua a su composición. El caso más claro es el de la anhidrita (SO_4Ca) que en presencia de agua se transforma en yeso.
- b) La **hidrólisis**, esto es, (disolución de ciertos minerales). Puede ser el caso de las rocas yesíferas, en las que el agua tiende a disolver el yeso, y de otras rocas sedimentarias, en las que suele ser frecuente encontrar sales solubles.

- c) El **intercambio iónico** (alteración de algunos minerales singulares silicatados transformándose en arcillas).
- d) Los procesos de **oxidación-reducción**. (Por ejemplo el caso singular que tiene lugar en los sulfuros (piritas), que se oxidan transformándose en sulfatos desprendiendo ácido sulfúrico en una reacción muy lenta.

Todos estos procesos son temas singulares y costosos de conocer. No son fáciles de estudiar si bien dada la dificultad de analizarlos en laboratorio se aconseja, en su caso, efectuar los estudios in situ.

3.6. Otros ensayos

Existe una amplia gama de posibilidades particulares, individualizadas para cada caso, que pretenden reproducir los efectos que se van a dar en obra. Dentro de este grupo de ensayos se podrían incluir, entre otros, los siguientes: Carga correspondiente al 10% de finos (que consiste en aplicar sobre una granulometría gruesa una carga que consiga una fragmentación del material en la que el porcentaje de finos oscile entre el 7.5% y el 12.5% del peso inicial), dilatación térmica, conductividad eléctrica, pH, índice de impacto (que consiste en aplicar a una granulometría gruesa un número de golpes mediante la caída de un pistón con objeto de determinar el porcentaje de finos que se produce), etc.

En la práctica estos ensayos son menos útiles, su interpretación es difícil, y por lo tanto se realizan con menor frecuencia que los que en los apartados anteriores se han tratado, por lo que no se ha considerado conveniente su descripción detallada en este texto.

4. RELACIÓN DE NORMATIVA ESPAÑOLA UNE DE ENSAYOS DE LABORATORIO CON LOS ÁRIDOS PARA HORMIGONES

- UNE-EN 933-2:96: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo.
- UNE-EN 933-3:97: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
- UNE-EN 1097-2:99: Ensayo de resistencia al desgaste.
- UNE-EN 1744-1:99: Ensayos de las características químicas de los áridos. Determinación de materia orgánica y compuestos de azufre.
- UNE 7133:58: Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones.

- UNE 7134:58: Determinación de partículas blandas en áridos gruesos para hormigones.
- UNE-EN 1367-2:99: Estabilidad de áridos frente a disoluciones de sulfato magnésico.
- UNE 146507:99 EX: Normas para la determinación de la reacción álcali-árido.
UNE 146508:99 EX
- UNE 146120:97: Áridos para hormigones. Especificaciones.
- UNE 7238: 71: Determinación de coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones.
- UNE 7244: 71: Determinación de partículas de bajo peso específico que puede contener el árido utilizado en hormigones.
- UNE-EN 1097-1:97: Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas.
- UNE 83116:90: Áridos para hormigones. Determinación del coeficiente "Los Ángeles".
- UNE 83120:88: Áridos para hormigones. Determinación cuantitativa de los compuestos de azufre.
- UNE 83130:90: Áridos para hormigones. Ensayo de azul de metileno.
- UNE 83131:90: Áridos para hormigones. Determinación del equivalente de arena.
- UNE 83133:90: Áridos para hormigones. Determinación de las densidades. Coeficiente de absorción y contenido de agua en el árido fino.
- UNE 83134:90: Áridos para hormigones. Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso.

Las normas UNE están permanentemente en proceso de actualización por lo que aquí se incluyen las vigentes en el momento de la publicación de la Guía, relativas a los áridos para hormigones, a las que se ha hecho referencia en el texto.

5. TABLAS DE NORMATIVAS APLICABLES A LOS ENSAYOS DE SUELOS Y ROCAS

Se incluyen a continuación un conjunto de tablas que indican las normativas existentes, cuando es el caso, que se aplican a los distintos ensayos de suelos y rocas y se completan con algunos datos de interés para la ejecución de los ensayos. Existe correspondencia entre los apartados de este Capítulo, en los que se describen propiedades que caracterizan los suelos y las rocas, y las tablas correspondientes de los ensayos. Por ejemplo, la Tabla que tiene por título "Ensayos de suelo. Mineralogía y composición" incluye los ensayos con los que se pueden definir la mineralogía y composición del suelo descritas en el apartado 2.1 de este Anejo.

ENSAYOS DE SUELOS.
PREPARACION Y CLASIFICACION

PREPARACION Y CLASIFICACION	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Preparación de muestras	Preparación de muestra para los ensayos de suelos NLT-101/72	Preparación de muestras para ensayos de suelos UNE 103-100-95	Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Contants D 421-85 (1993)	Part 1. General requirements and sample preparations 7. Preparation of disturbed samples for testing 8. Preparation of undisturbed samples for testing	
Clasificación de suelos			Classification of Soils for Engineering Purposes D 2487-93 Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure) D 2488-93	Part 1. General requirements and sample preparation 3. Classification of soils 3.1. Grouping of soils 3.2. Description of soils 3.3. Classification system	

ENSAYOS DE SUELOS
MINERALOGIA Y COMPOSICION

2.1. MINERALOGIA Y COMPOSICION	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol.4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Rayos-X			X-Ray Radiography of Soil Samples D 4452-85(95)		100 g
Carbonatos	Contenido de carbonatos en los suelos NLT-116/91	Determinación del contenido de carbonatos en los suelos UNE 103-200-93	Calcium Carbonate Content of Soils D 4373-84 (90)	Part 3. Chemical and electro-chemical tests 6. Determination of the carbonat content	Suelo fino 50 g Suelo medio 200 g Suelo grueso 1,5 kg
Sales solubles	Contenido en sales solubles de los suelos NLT-114/96		Pore Water Extraction and Determination of the Soluble Salt Content of Soils by Re- fractometer D 4542-95	Part 3. Chemical and electro-chemical tests 8. Determination o total dissolved solids	Suelo fino 50 g Suelo medio 200 g Suelo grueso 1,5 kg
Sulfatos	Reconocimiento de sulfatos solubles en los suelos NLT-119/72 Contenido de sulfatos solubles en los suelos NLT-120/72	Determinación cualitativa del contenido de sulfatos solubles en un suelo UNE 103-202-95 Determinación cuantitativa del contenido de sulfatos solubles de un suelo UNE 103-201-96		Part 3. Chemical and electro-chemical tests 5. Determination of the sulphates content of soil and ground water	Suelo fino 150 g Suelo medio 600 g Suelo grueso 3,5 kg
Materia orgánica	Contenido de materia orgánica en los suelos con agua oxigenada NLT-117/72 Contenido de materia orgánica en suelos por el método del permanganato potásico NLT-118/91	Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico UNE 103-204-93	Total Nitrogen in Peat Materials D 2973-71 (90) Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils D 2974-87 (95)	Part 3. Chemical and electro-chemical tests 3. Determination of the organic matter content 4. Determination of the mass loss on igni- tion	Suelo fino 150 g Suelo medio 600 g Suelo grueso 3,5 kg
Cloruros				Part 3. Chemical and electro-chemical tests 7. Determination of the chloride content	Suelo fino 750 g Suelo medio 1,5 Kg Suelo grueso 3,5 kg

ENSAYOS DE SUELOS
GRANULOMETRIA

2.2. GRANULOMETRIA	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Granulometría (tamizado)	Granulometría de suelos por tamizado NLT-104/91	Análisis granulométrico de suelos por tamizado UNE-103-101-95	Particle-Size Analysis of Soils D 422-63 (1990)	Part 2. Classification tests 9. Determination of particle size distribution 9.2. Wet sieving method 9.3. Dry sieving method	Suelo fino 150 g Suelo medio 2,0 Kg Suelo grueso 17 kg
Granulometría (sedimentación)		Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro UNE-103-102-95	Amount of Material in Soils finer than the No. 200 (75-µm) Sieve D 1140-92	9.4. Sedimentation by the pipette method 9.5. Sedimentation by the hydrometer method	Suelo fino 150 g Suelo medio 2,0 Kg Suelo grueso 17 kg
Índice de lajas y agujas (áridos)	Índice de lajas y agujas de los áridos para carreteras NLT-354-91	Determinación de coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones UNE 7-238-71			15 Kg
Equivalente de arena	Equivalente de arena NLT 113/87				1 Kg

ENSAYOS DE SUELOS
MINERALOGIA Y COMPOSICION

2.1. MINERALOGIA Y COMPOSICION	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol.4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Rayos-X			X-Ray Radiography of Soil Samples D 4452-85(95)		100 g
Carbonatos	Contenido de carbonatos en los suelos NLT-116/91	Determinación del contenido de carbonatos en los suelos UNE 103-200-93	Calcium Carbonate Content of Soils D 4373-84 (90)	Part 3. Chemical and electro-chemical tests 6. Determination of the carbonat content	Suelo fino 50 g Suelo medio 200 g Suelo grueso 1,5 kg
Sales solubles	Contenido en sales solubles de los suelos NLT-114/96		Pore Water Extraction and Determination of the Soluble Salt Content of Soils by Re- fractometer D 4542-95	Part 3. Chemical and electro-chemical tests 8. Determination o total dissolved solids	Suelo fino 50 g Suelo medio 200 g Suelo grueso 1,5 kg
Sulfatos	Reconocimiento de sulfatos solubles en los suelos NLT-119/72 Contenido de sulfatos solubles en los suelos NLT-120/72	Determinación cualitativa del contenido de sulfatos solubles en un suelo UNE 103-202-95 Determinación cuantitativa del contenido de sulfatos solubles de un suelo UNE 103-201-96		Part 3. Chemical and electro-chemical tests 5. Determination of the sulphates content of soil and ground water	Suelo fino 150 g Suelo medio 600 g Suelo grueso 3,5 kg
Materia orgánica	Contenido de materia orgánica en los suelos con agua oxigenada NLT-117/72 Contenido de materia orgánica en suelos por el método del permanganato potásico NLT-118/91	Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico UNE 103-204-93	Total Nitrogen in Peat Materials D 2973-71 (90) Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils D 2974-87 (95)	Part 3. Chemical and electro-chemical tests 3. Determination of the organic matter content 4. Determination of the mass loss on igni- tion	Suelo fino 150 g Suelo medio 600 g Suelo grueso 3,5 kg
Cloruros				Part 3. Chemical and electro-chemical tests 7. Determination of the chloride content	Suelo fino 750 g Suelo medio 1,5 Kg Suelo grueso 3,5 kg

ENSAYOS DE SUELOS
PLASTICIDAD

2.3. PLASTICIDAD	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Límites de Atterberg	Límite líquido por el método de la cuchara NLT-105/91	Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande UNE 103-103-94 Determinación del límite líquido por el método del cono PNE 103-110	Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils D 4318-95	Part 2. Classification tests 4. Determination of the liquid limit 4.3. Cone penetrometer method (definitive) 4.4. One-point cone penetrometer method 4.5. Casagrande apparatus method 4.6. One-point Casagrande method	Suelo fino 500 g Suelo medio 1 Kg Suelo grueso 2 kg
Límites de Atterberg	Límite plástico NLT-106/91	Determinación del límite plástico de un suelo UNE 103-104-93 Determinación de las características de retracción de un suelo UNE-103-108-96		Part 2. Classification test 5. Plastic Limit	Suelo fino 50 g Suelo medio 100 g Suelo grueso 200 g
Límite de Retracción			Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method D 427-93 Shrinkage Factors of Soils by the Wax Me- thod D 4943-95	Part 2. Classification tests 6. Determination of Shrinkage characteris- tics 6.3. Volumetric Shrinkage (definitive met- hod) 6.4. Volumetric Shrinkage (subsidiary met- hod) 6.5. Linear Shrinkage	

ENSAYOS DE SUELOS
DENSIDAD Y HUMEDAD

2.4. DENSIDAD Y HUMEDAD	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Densidad	Densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática NLT 206/91	Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática UNE-103-301-94 Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo UNE-103-302-94	Bulk Density of Peat and Peat Products D 4531-86 (92) Particle Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles D 4718-87 (94)	Part 2. Classification tests 7. Determination of density 7.2. Linear measurement method 7.3. Immersion in water method 7.4. Water displacement method	100 g
Densidad mínima y máxima de una arena	Densidad mínima de una arena NLT-204/72 Densidad máxima de una arena por el método de apisonado NLT-205/91	Densidad mínima de una arena UNE 103-105-93 Densidad máxima de una arena por el método del apisonado UNE 103-106-93 (Erratum)	Minimum Index Density and Unit Weight of soils and Calculation of Relative Density D 4254-91 Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table D 4253-91	Part 4. Compaction-related tests 4. Determination of maximum and minimum dry densities for granular soils 4.2. Determination of maximum density of sands 4.3. Maximum density of gravelly soils 4.4. Minimum density of sands 4.5. Minimum density of gravelly soils	Suelo fino 16 Kg Suelo medio 16 Kg Suelo grueso 30 kg
Densidad máxima de áridos compactados con martillo vibrante	Densidad máxima y humedad óptima de compactación mediante martillo vibrante de materiales granulares con o sin productos de adición NLT-311/79				Suelo fino 16 Kg Suelo medio 16 Kg Suelo grueso 30 kg
MCV				Part 4. Compaction-related tests 5. Determination of the moisture content value (MCV) 5.4. Determination of the MCV of a sample of soil at its natural moisture content 5.5. Determination of the MCV/moisture content relation of a soil 5.6. Rapid assessment of whether or not a soil is stronger than a precalibrated standard	Suelo fino y 6 Kg Suelo medio Suelo grueso 12 Kg
Humedad	Humedad mediante secado en estufa NLT-102/91 Humedad de un suelo por el procedimiento del alcohol NLT-103/72	Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa UNE 103-300-93	Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock D 2216-92 Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating Method D 4959-89 (94) Determination of Water (Moisture) Content of soil by the Microwave Oven Method D 4643-93	Part 2. Classification tests 3. Determination of moisture content 3.2. Oven-drying method	Suelo fino 50 g Suelo medio 350 g Suelo grueso 4 kg
Peso específico	Determinación del peso específico de las partículas de un suelo NLT-211/91		Specific Gravity of Soils D 854-92 Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer D 5550-94	Part 2. Classification tests 8. Determination of particle density 8.2. Gas jar method 8.3. Small pycnometer method 8.4. Large pycnometer method	100 g

ENSAYOS DE SUELOS
COMPACTABILIDAD

2.5. COMPACTABILIDAD	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Proctor Normal	Apisonado Proctor NLT-107/91	Ensayo de Compactación Proctor Normal UNE 103-500-94	Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (600kN-m/m ³) D 698-91	Part 4. Compaction related tests 3. Determination of dry density/moisture content relationship 3.3. Method using 2.5 Kg rammer for soils with particles up to medium-gravel size 3.4. Method using 2,5 Kg rammer for soils with some coarse gravel-size particles	25 Kg Admiten distintos moldes dependiendo de los tamaños máximos 3 capas x 25 golpes de 24,4 N x 305 mm
Proctor Modificado	Apisonado Proctor Modificado NLT-108/91	Ensayo de compactación Proctor Modifi- cado UNE 103-501-94	Laboratory Compaction characteristics of Soil Using Modified of Effort (2,700 kN- m/m ³) D 1557-91 Rapid Determination of Percent Com- paction D 5080-93	3.5. Method using 4,5 Kg rammer for soils with particles up to medium-gravel size 3.6. Method using 4,5 Kg rammer for soils with some coarse gravel-size particles 3.7. Method using vibrating hammer	80 Kg Admiten distintos moldes dependiendo de los tamaños máximos 5 capas x 25 golpes de 44,5 N x 457 mm
Amasado Harvard					5 Kg Véase Jiménez Salas et al. (1975)

ENSAYOS DE SUELOS
PERMEABILIDAD Y COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA

2.6. PERMEABILIDAD Y COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Permeámetro de carga constante		Determinación de la permeabilidad de un suelo. Método de la carga constante PNE 103-403	Permeability of Granular Soils (Constant Head) D 2434-68 (94) Hydraulic Conductivity of Essentially Saturated Peat (Constant Head) D 4511-92	Part 5. Compressibility, permeability and durability tests 5. Determination of permeability by the constant-head method	Suelo saturado 3,5 Kg
En Triaxial				Part 6. Consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement 6. Determination of permeability in a triaxial cell	
En Célula Rowe			Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter D 5084-90	Part 6. Consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement 4. Determination of permeability in a hydraulic consolidation cell	Diámetro célula: 254 mm 15 Kg
Hinchamiento libre		Ensayo de hinchamiento libre de un suelo en edómetro UNE 103-601-96	One Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils D 4546-90	Part 5. Compressibility, permeability and durability tests 4. Determination of swelling and collapse characteristics	500 g
Presión de Hinchamiento libre		Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro UNE 103-602-96		Part 5. Compressibility, permeability and durability tests 4. Determination of swelling and collapse characteristics	500 g
Lambe		Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe UNE 103-600-96	Expansion Index of Soils D 4829-95		Uso discutible 500 g
Colapso	Ensayo de colapso en suelos NLT-254/96		Measurement of Collapse Potential of Soils D 5333-92	Part 5. Compressibility, permeability and durability tests 4. Determination of swelling and collapse characteristics	500 g
Determinación de la relación succión-humedad			Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper D 5298-94		500 g
Determinación de la succión inicial					a especificar por usuario
Determinación variación de volumen con la succión					a especificar por usuario

ENSAYOS DE SUELOS
DISPERSABILIDAD

2.7. DISPERSABILIDAD	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Dispersabilidad	Dispersabilidad por tubificación NLT-207/91	Ensayo de dispersabilidad por tubificación PNE-103-504	Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer D 4221-90 Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test D 4647-93	Part 6. Determination of dispersability 6.2. Pinhole method 6.3. Crumb method 6.4. Dispersion method	Suelo fino 300 g Suelo medio y 5 Kg Suelo grueso

ENSAYOS DE SUELOS
RESISTENCIA AL CORTE

2.8. RESISTENCIA AL CORTE	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Compresión simple	Compresión simple en muestras de suelo NLT-202/91	Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo UNE 103-400-93	Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil D 2166-91	Part 7. Shear strength tests (total stress) 7. Determination of the unconfined compressive strength	Suelo fino 600 g Suelo medio 5 Kg Suelo grueso 30 kg
Corte Directo		Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de un suelo en la caja de corte directo PNE 103-401	Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions D 3080-90	Part 7. Shear strength tests (total stress) 4. Determination of shear strength by direct shear (small shearbox apparatus)	1 Kg (caja de 6 cm x 6 cm)
Corte Directo (Gravas, Escolleras)				Part 7. Shear strength tests (total stress) 5. Determination of shear strength by direct shear (large shear box apparatus)	Gravas 150 Kg Escollera 10 T
Ensayos Triaxiales (UU) sin consolidar y sin drenaje		Determinación de los parámetros resistentes de un suelo en el equipo triaxial PNE 103-402	Unconsolidated, Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression D 2850-95	Part 7. Shear strength test (total stress) 8. Determination of the undrained shear strength in triaxial compression without measurement of pore pressure	3 probetas Suelo fino 600 Kg Suelo medio 5 Kg Suelo grueso 30 kg
Ensayo (CU) con medida de presión de poros			Consolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils D 4767-88	Part 8. Shear strength tests (effective stress) 7. Consolidated-undrained triaxial compression tests with measurement of pore pressure	3 probetas Suelo fino 600 Kg Suelo medio 5 Kg Suelo grueso 30 kg
Resistencia no drenada (Molinete laboratorio)		Ensayo de molinete de un suelo en laboratorio PNE 103-404	Laboratory Miniature Vane shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil D 4648-94	Part 7. Shear strength tests (total stress) 3. Determination of shear strength by the laboratory vane method	2 Kg

ENSAYOS DE SUELOS
DEFORMABILIDAD

2.9. DEFORMABILIDAD	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Edómetro		Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en Edómetro UNE 103-405-94	One-Dimensional Consolidation Properties of Soils D 2435-90 D 4186-89	Part 5. Compressibility, permeability and durability tests 3. Determination of the one-dimensional consolidation properties	200 g
Consolidación en célula Rowe				Part 6. Consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement	Diámetro célula: 254 mm 15 Kg

ENSAYOS DE SUELOS
ENSAYOS DINAMICOS

2.10. ENSAYOS DINAMICOS	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Ensayo columna resonante			Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method D 4015-92		Rango de aplicación $\gamma < 10^{-5}$ 500 g
Triaxial cíclico			Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus D 3999-91 Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil D 5311-92		Rango de aplicación $10^{-3} < \gamma < 10^{-3}$ 5 Kg
Corte simple cíclico					Rango de aplicaciónA especificar por usuario $10^{-3} < \gamma < 10^{-1}$
Velocidad sísmica					Igual Compresión Simple Dificultad de interpretación V_s

ENSAYOS DE ROCAS
ALTERABILIDAD FISICA

3.4. ALTERABILIDAD FISICA	NLT	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08 Vol. 409	OBSERVACIONES
LOS ANGELES	Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de los Angeles NLT-149/91	Aridos para hormigones. Determinación del coeficiente "Los Angeles" UNE 83-116-90	Resistance of Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact to the Los Angeles Machine ASTM C 535-89 ... Small-Size... ASTM C 131-81	Influencia de la granulometría en los resultados
DEVAL Y MICRO-DEVAL	Essai Deval. Granulats NF P 18-577-79 (*) Essai D'usure micro-Deval. Granulats NF P 18-572-78 (*)			(*) Normativa Francesa
EROSION Y DESMORONAMIENTO	Determinación de la durabilidad al desmoronamiento de rocas blandas ("Humedad-Sequedad") (*) NLT-251/91 Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de los ciclos de humedad-sequedad NLT-260/96 Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de desmoronamiento en agua NLT-255/96		Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks ASTM D 4644-87(92) Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions ASTM D 5313-92 Evaluation of Rock to be Used for Erosion Control ASTM D 4992-94 Preparation of Rock Slabs for Durability Testing ASTM D 5121-90	(*) Conocido en España como SeHuDes.
CALENTAMIENTO-ENFRIAMIENTO				A definir por el peticionario
HIELO-DESHIELO			Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Freezing and Thawing Conditions ASTM D 5312-92	
ATAQUE A LOS SULFATOS	Estabilidad de los áridos frente a la acción de las soluciones de sulfato sódico o magnésico NLT-158/94	Estabilidad de áridos frente a disoluciones de sulfato sódico o sulfato magnésico UNE 7-136-58	Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate ASTM C 88-90 Testing Rock Slabs to Evaluate Soundness of Rip Rap by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate ASTM D 5240-92	Influencia de la granulometría en los resultados
FRAGILIDAD		Aridos para hormigones. Determinación del índice de machacabilidad UNE 83-112-89 EX Aridos para hormigones. Determinación del índice de impacto UNE 83-114-89 EX		

ENSAYOS DE ROCAS
IDENTIFICACION Y CARACTERISTICAS ELEMENTALES

3.2. IDENTIFICACION Y CARACTERISTICAS ELEMENTALES	NLT	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08 Vol. 409	OBSERVACIONES
HUMEDAD	Aridos. Determinación de la humedad total por secado NLT-359/87	Determinación de la humedad superficial de gravas y arenas UNE 7-084-54	Total Moisture Content of Aggregate by Drying ASTM C 566-95 Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock ASTM D 2216-92 Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Method ASTM D 4643-93	
DENSIDAD PESO ESPECIFICO POROSIDAD Y ABSORCION	Densidad relativa y absorción de áridos gruesos NLT/153/92 Densidad relativa y absorción de áridos finos NLT-154/92 Densidad aparente y huecos en áridos NLT-156/94	Determinación del peso específico y de la absorción en gravas y arenas UNE 7-083-54 Aridos para hormigones. Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido de agua en el árido grueso UNE 83-134-90 Aridos para hormigones. Determinación de las densidades, coeficiente de absorción y contenido de agua en el árido fino. UNE 83-133-90 Determinación de los pesos específicos y absorción de agua en áridos finos UNE 7-140-58	Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate ASTM C-127-88 (1993) Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate ASTM C-128-88 Unit Weight and Voids in Aggregate ASTM C 29-91	
SULFATOS SOLUBLES	Reconocimiento de sulfatos solubles en los suelos NLT-119/72 Contenido de sulfatos solubles en los suelos NLT-120/72			
SALES SOLUBLES	Determinación del contenido de sales solubles de los suelos solubles de los suelos NLT-114/96		Pore Water Extraction and Determination of the Soluble Salt Content of Soils by Refractometer ASTM D 4542-95	
SULFATOS/SULFUROS Y ENSAYOS QUIMICOS		Aridos para hormigones. Determinación cuantitativa de los compuestos de azufre UNE 83-120-88 Aridos para hormigones. Determinación de la reactividad ácido/alcali (método químico) UNE 83-121-90 UNE 83-121-96 ERRATUM Aridos para hormigones. Estabilidad en medio alcalino (Método de las barras de mortero) UNE 83-122-87 Aridos para hormigones. Determinación cuantitativa de cloruros. (Método volumétrico) UNE 83-124-90 EX		
AZUL DE METILENO		Aridos para hormigones. Ensayo del azul de metileno. UNE 83-130-90		
VELOCIDAD SONICA		Ensayos de hormigón. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos UNE 83-308-86 UNE 83-308-93 ERRATUM	Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock ASTM D 2845-90	Dificultad en la interpretación de V_s
PERMEABILIDAD		Ensayos de hormigón. Determinación de la permeabilidad UNE 83-310-90 EX	Permeability of Rocks by Flowing Air ASTM D 4525-90	Necesidad equipos especiales

ENSAYOS DE ROCAS
RESISTENCIA

3.3. RESISTENCIA	NLT	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08 Vol. 409	OBSERVACIONES
A COMPRESION SIMPLE	Determinación de la resistencia a compresión simple de probetas de roca NLT-250/91	Aridos para hormigones. Determinación de la resistencia a compresión de rocas empleadas en la fabricación de áridos. UNE 83-111-87 Ensayos de hormigón. Rotura por compresión. UNE 83-304-84 Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión. UNE 83-316-96	Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens ASTM D 2938-95 Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression ASTM D 3148-93	Elevada dispersión en los resultados
A LA TRACCION			Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens ASTM D 2936-95	
TRIAXIAL			Triaxial compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure measurements D 2664-86	
CARGA PUNTUAL	Índice de resistencia a la carga puntual NLT-252/91		Point Load Strength Index of Rock D 5731-95	
BRASILEÑO	Resistencia a la tracción indirecta por el método Brasileño NLT-253/91			
ESCLEROMETRO		Ensayos de hormigón. Determinación del índice de rebote UNE 83-307-86		

ENSAYOS DE LABORATORIO
GEOTEXTILES

GEOTEXTILES	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
Permeabilidad geotextiles (filtros)			Water Permeability of Geotextiles by Permittivity D 4492-92 Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head D 4716-95 Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio D 5101-90 Determining Filtering Efficiency and Flow Rate of a Geotextile for Silt Fence Application Using Site-Specific Soil D 5141-91 Permeability of Geotextiles Under Load D 5493-93 Hydraulic Conductivity Ratio (HCR) Testing of Soil/Geotextile Systems D 5567-94		

ENSAYOS DE SUELOS
OTROS ENSAYOS

2.11. OTROS ENSAYOS	N.L.T.	UNE 1997	ASTM 1996 Vol. 4.08/4.09	B.S. 1377: 1990	OBSERVACIONES
pH			pH of Peat Materials D 2976-71(90) pH of Soils D 4972-95a	Part 3. Chemical and electro-chemical tests 9. Determination of the pH value 9.5. Electrometric method of pH determination	Suelo fino 150 g Suelo medio 600 g Suelo grueso 3,5 kg
Resistividad				Part 3. Chemical and electro-chemical tests 10. Determination of resistivity	Suelo fino 12 Kg Suelo medio 15 Kg Suelo grueso 20 kg
Potential Redox				Part 3. Chemical and electro-chemical tests 11. Determination of the redox potential	
CCV				Part 4. Compaction-related tests 6. Determination of the chalk crushing value	
CBR	Indice CBR en el laboratorio NLT-111/87	Método de ensayo para la determinación en laboratorio del indice CBR de un suelo UNE 103-502-95	CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils D 1883-94	Part 4. Compaction-related tests 7. Determination of the California Bearing Ratio (CBR)	30 Kg

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- R.1 KRUMBEIN, W. C. and SLOSS, L. L. "Stratigraphy and Sedimentation". Freeman, Cal. (ref. tomada de Brewer R. 1964). 1955.
- R.2 JIMENEZ SALAS, J. A. y JUSTO ALPAÑES, J. "Geotecnia y Cimientos I". Ed. Rueda. Madrid. 1975.
- R.3 VAUGHAN, P. R. "La fisuración y erosión interna de núcleos de arcilla de presas de tierras y el proyecto de filtros para protegerlos". Conferencia pronunciada en la Soc. Esp. Mec. de Suelos. 1 de junio. Boletín Lab. Transporte nº 117. Septiembre. 1976.
- R.4 BRAVO, G. "Filtros y Drenes". Comité Español de Grandes Presas. Abril. 1993.
- R.5 SHERARD, J. L., DUNNINGAN, L. P. and DECKER, R. S. "Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils". Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, nº GT 1, January, pp. 69-85. 1976.
- R.6 ACCIARDI, R. G. "Improvement to USBR Pinhole Test Equipment and Design and Test Result Evaluation". IV Annual USCOLD Lecture, Denver, Colorado, January. 1984.
- R.7 ICOLD. "Dispersive Soils in Embankment Dams. Review". Bulletin 77. París. France. 1990.
- R.8 ISRM. "Rock Characterization Testing and Monitoring". E. T. Brown Editor. Pergamon Press. 1981.
- R.9 MARSAL, R. J. y RESENDIZ, D. "Presas de Tierras y Enrocamiento". Ed. Limusa. Méjico. 1975.
- R.10 ASTM. "Annual Book of ASTM Standars, Volumes 04.08 and 04.09". USA. 1996.
- R.11 BS 819909. "British Standard methods for Soils for Civil Engineering purposes". Great Britain.
- R.12 NLT. "Normas NLT". Dirección General de Carreteras. MOPTMA. 1992.
- R.13 UNE. "Catálogo de Normas UNE". AENOR, España. 1997.

ANEJO III

CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO ROCOSO

ÍNDICE	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	243
2. CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA MATRIZ	243
3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FRACTURAS	244
3.1. Tipos y denominaciones	244
3.2. Parámetros identificativos	244
3.3. Representación	250
4. ESTRUCTURA DEL MEDIO ROCOSO	252
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	254
 RELACIÓN DE FIGURAS	
Fig. III.1 Definición de rumbo y buzamiento	246
Fig. III.2 Ejemplo de gráfico de densidades de fracturas	251
Fig. III.3 Ejemplo de influencia de la estructura del medio rocoso	253
 RELACIÓN DE TABLAS	
Tabla III.1 Clasificación del espaciamiento de una familia según la ISRM.	245
Tabla III.2 Índice Jv.	245
Tabla III.3 Índice de persistencia.	246
Tabla III.4 Clasificación de la apertura según la ISRM	247
Tabla III.5 Valores de la resistencia a compresión de rellenos arcillosos, según la ISRM.	249
Tabla III.6 Resistencia de la pared de una discontinuidad según la ISRM.	249
Tabla III.7 Definición de grados de alteración, según la ISRM.	250

1. INTRODUCCIÓN

Partiendo de la calificación (clasificación) dada a las diferentes unidades rocosas que se encuentren presentes, el rasgo que caracteriza el comportamiento de un medio rocoso, junto con otros aspectos mencionados en la memoria tales como alterabilidad, impermeabilidad, heterogeneidad, etc es la presencia de fracturas.

En consecuencia, la caracterización debe contemplar por un lado la roca matriz y por otro lado a los propios defectos. Estos últimos son los que presentan mayor interés y mayor complejidad.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA MATRIZ

Conocida la identificación de la roca, objetivo para el que puede ser necesario un análisis petrográfico, para la caracterización de su matriz, desde la perspectiva de la Mecánica de Rocas, es conveniente conocer las siguientes propiedades básicas:

- a) Densidad y/o peso específico.
- b) Porosidad, es decir el cociente entre el volumen de huecos y el volumen total de la muestra de roca.
- c) Humedad y/o porcentaje de saturación.
- d) La resistencia, de la roca matriz (intacta), que es uno de los parámetros más importantes, sobre todo a compresión simple.
- e) Velocidad sónica, de las ondas de compresión o de corte.

Y en menor medida,

- f) durabilidad, es decir la capacidad de mantener sus propiedades con el paso del tiempo,
- g) y la permeabilidad, que si bien, en la mayor parte de los casos, son las fracturas las que condicionan la respuesta hidráulica del macizo rocoso, en ocasiones es la propia roca la determinante.

Para la determinación de estas propiedades se deben realizar ensayos de laboratorio y/o de campo, cuya descripción y posibilidades se detallan en los Anejos II y III de esta Guía.

3. CARACTERIZACIÓN DE LAS FRACTURAS

3.1. Tipos y denominaciones

Los términos que se utilizan en España para representar a las fracturas son múltiples y, dependiendo de la fuente documental que se utilice, los conceptos que pretenden representar pueden ser varios.

Así por ejemplo, en términos coloquiales, se habla de fracturas, roturas, defectos, planos de debilidad, grietas, discontinuidades, desgarres, estrías, superficies de debilidad, juntas, diaclasas, fisuras, etc. Algunos otros conceptos sí representan con una mayor precisión el fenómeno que se quiere caracterizar. Tal puede ser el caso de las fallas, esquistosidades, lechos de estratificación, foliaciones, pizarrosidad, etc cuya definición se encuentra en los manuales de Geología y de Mecánica de Rocas y excede del contenido de este Anejo. Algunos de ellos se definen en el glosario que acompaña esta Guía. Con carácter general, para este Anejo, se les va a denominar fracturas.

3.2. Parámetros identificativos

Las características de las discontinuidades, tectónicas o de descompresión, deben tenerse en cuenta porque condicionan la respuesta del macizo rocoso. La forma más habitual de estas discontinuidades suele ser la cercana al plano, aunque hay casos en que muestran superficies sumamente complejas. En la mayoría de los casos habrá que suponer se trata de superficies planas ya que es la manera más sencilla de trabajar con ellas y en ocasiones resulta muy difícil conocer como evolucionan. Los 10 parámetros básicos se describen a continuación [R.1; R.2 y R.3]:

- a) En primer lugar es necesario conocer el **número de familias** de fracturas o singularidades que están presentes. Para cada una de estas familias se deben identificar los aspectos que se describen a continuación. Para cada familia de fracturas importante se debería presentar documentación fotográfica.
- b) La **orientación** es la situación de la discontinuidad en el espacio. Se define con la **dirección**, (rumbo), ángulo con el norte magnético de la recta intersección del plano de la discontinuidad con el horizontal, y el **buzamiento**, ángulo del plano de la discontinuidad con la horizontal (Figura III.1). Cuando se efectúa un levantamiento topográfico de la rotura estas características pueden hallarse fácilmente. En otros casos, como se comentará más adelante, se obtienen mediante la brújula de geólogo. En este último caso una sola medida no es suficiente, pues a pequeña escala el plano de la discontinuidad puede tener variaciones muy importantes que enmascaran la orientación general.

- c) El **espaciamiento** es la distancia entre dos fracturas contiguas de la misma familia, medida perpendicularmente al plano de rotura. Es dato de interés para conocer la densidad con que está presente cada familia y permite diferenciar zonas de mayor fragmentación en el macizo y analizar su incidencia sobre la obra. Se puede estudiar en superficie o deducir a partir del Índice RQD de la columna del sondeo, si bien este último dato depende de la dirección del sondeo. Las medidas de espaciamiento pueden presentarse en gráficos semilogarítmicos número de observaciones-espaciamiento, dando a éste unos valores determinados. En la tabla III.1 se da la clasificación de espaciamiento según la ISRM.

Tabla III.1
Clasificación del espaciamiento de una familia según la ISRM

ESPACIAMIENTO [R.1]	DESCRIPCIÓN
< 2 cm	extremadamente cerrado
2 - 6 cm	muy cerrado
6 - 20 cm	cerrado
20 - 60 cm	moderado
60 - 200 cm	amplio
200 - 600 cm	muy amplio
> 600 cm	extremadamente amplio

También se puede expresar como "frecuencia", es decir, por medio del número de presencias por unidad de longitud, en general, el metro.

- d) El **tamaño del bloque** y la **forma** son indicativos del comportamiento esperable. Para su estimación se suelen utilizar "el índice de bloques" (I_B) que representa la dimensión media de los bloques típicos y se obtiene dividiendo la suma de los espaciamientos de cada familia por el número de familias, o el conocido como "Índice J_v ", que representa al número de discontinuidades por metro cúbico. Atendiendo a este parámetro los bloques se califican según la Tabla III.2.

Tabla III.2
Índice J_v

CALIFICACIÓN [R.1]	ÍNDICE J_v (nº fracturas/m ³)
Masivos	< 1
Grandes	1 - 3
Medios	3 - 10
Pequeños	10 - 30
Muy pequeños	30 - 60
Roca machacada	> 60

El valor de J_v se basa en valores medios, no modales.

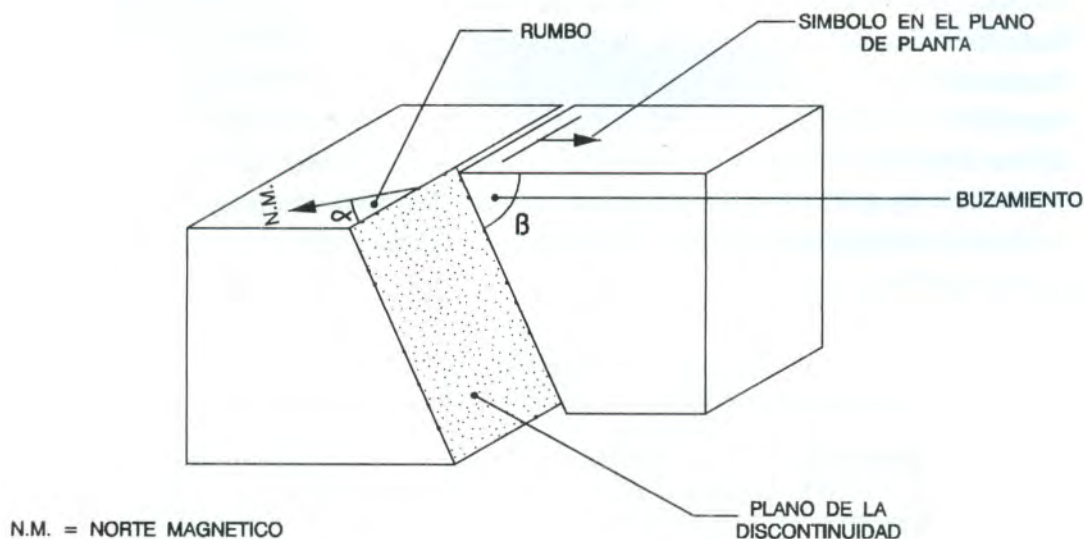


Figura III.1
Definición de rumbo y buzamiento

- e) La **continuidad**, o persistencia, de una discontinuidad tanto en superficie como en profundidad da idea de su importancia y trascendencia.

La continuidad en superficie queda en muchos casos enmascarada por la presencia de coberturas con lo cual se ignora la longitud que presenta. En ocasiones el cambio litológico de una roca a otra puede dar lugar a su desaparición. En ocasiones lo que no se hace patente en el terreno puede apreciarse en la fotografía aérea como un trazo de vegetación ligada al relleno o una distinta tonalidad motivada por su mayor humedad.

En profundidad la continuidad puede apreciarse si la discontinuidad se hace presente de arriba a abajo en la ladera, en caso contrario sólo puede ser detectada mediante un sondeo o galería. En algunos casos es difícil no porque desaparezca con la profundidad, lo cual es normal, sino porque tiende a cerrarse y puede pasar desapercibida.

La R.1 propone una escala de continuidad cuyo mayor interés es unificar el lenguaje que se utiliza en los estudios.

Lo modesto de las cifras de esta clasificación abona sobre la dificultad de medir la continuidad. En ocasiones se utilizan índices para cuantificar este fenómeno tales como el "Índice de Persistencia", que se expone en la tabla III.3, o el "Índice de Extensión". [R.3].

Tabla III.3
Índice de persistencia

CLASIFICACIÓN [R.1]	PERSISTENCIA
Muy baja continuidad	< 1 m
Baja continuidad	1-3 m
Continuidad media	3-10 m
Alta continuidad	10-20 m
Muy alta continuidad	> 20 m

- f) La **apertura** es la distancia perpendicular (media) existente entre los dos bloques que la discontinuidad ha causado. Puede ser muy variable, desde cero o escasos milímetros a metros, pudiendo estar a su vez limpia o rellena.

En ocasiones la apertura está ligada a movimientos de los bloques pero en otros casos ha sido producida por alteración y erosión de la roca. En la mayoría de los casos las aperturas suelen ser pequeñas. La apertura tiene una importancia fundamental en el caso de una presa ya que puede ser vehículo de filtraciones que habrá que corregir.

Las aperturas se pueden apreciar en afloramientos superficiales o en galerías, siendo más difícil en sondeos, salvo que exista relleno y éste sea compacto. La tendencia del testigo es a "romperse" por donde existe una discontinuidad impidiendo conocer su importancia real. Pero incluso obteniendo un buen testigo es difícil determinar la situación espacial de la discontinuidad en el sondeo y requiere técnicas especiales.

En la Tabla III.4 se da una clasificación de aperturas que, como ya se ha dicho en el caso de la continuidad, tiene su mayor interés en delimitar los términos usados y unificar el lenguaje de todos los que intervienen en la ejecución del proyecto.

Tabla III.4
Clasificación de la apertura según la ISRM

APERTURA	DESCRIPCIÓN [R.1]	
< 0.1 mm 0.1 - 0.25 mm 0.25 - 0.5 mm	Muy estrecho Estrecho Parcialmente abierto	Aspecto "cerrado"
0.5 - 2.5 mm 2.5 - 10 mm > 10 mm	Abierto Moderadamente abierto Amplio	Aspecto "resquebrajado"
1 - 10 cm 10 - 100 cm > 1 m	Muy amplio Extremadamente amplio Cavernoso	Aspecto "abierto"

- g) La **rugosidad** de una discontinuidad tiene una influencia importante, especialmente si está sometida a esfuerzos, cuando se trata de una rotura limpia. La superficie de la discontinuidad puede presentar aspectos muy variados que se pueden calificar, si se analizan a mayor escala (varios metros) en escalonado, ondulado y plano; y a menor escala (varios centímetros) como rugoso, suave y especular. Para su identificación se utilizan métodos fotogramétricos, placas de diferentes diámetros, o mediante un perfilado manual.
- h) Íntimamente ligado a la apertura de la discontinuidad está el **relleno** que puede presentar. Éste puede ser un mineral inyectado, como cuarzo, o neoformado, como calcita, materiales de alteración, ya sea por descompresión de la roca, o ya sea por transporte. Por lo general los rellenos de discontinuidades pueden ser variados y complejos y con grados de consolidación y de permeabilidad diferentes.

Algunos autores han señalado distintos tipos de discontinuidades de acuerdo al relleno. Así por ejemplo, [R.4] suponen siete.

- 1º Discontinuidades soldadas
- 2º Discontinuidades limpias
- 3º Rellenos de calcita
- 4º Recubrimientos o rellenos de ciorita, talco o grafito
- 5º Material arcilloso inactivo
- 6º Arcilla expansiva
- 7º Material alterado hasta formar material no cohesivo de tipo arenoso

[R.5] sugieren cuatro tipos:

- 1º Discontinuidades sin relleno o recubrimiento
- 2º Discontinuidades recubiertas
- 3º Discontinuidades con relleno arcilloso
- 4º Discontinuidades con relleno arenoso

La influencia del relleno es importante ya que puede ser causa de deslizamientos de bloques, asentos, filtraciones y zonas de mayor debilidad. Algunos de los aspectos que se deben identificar son: el tipo de material que lo constituye, su granulometría, plasticidad, densidad y humedad, resistencia, estado de la pared, si ha sufrido desplazamientos previos, permeabilidad, etc.

La resistencia al corte de una fractura colmatada está comprendida entre la resistencia del relleno y la discontinuidad limpia. Depende de su morfología. Al aumentar el espesor del relleno disminuye la resistencia llegando a ser la de éste cuando el espesor excede en 50%, aproximadamente, a la altura de las irregularidades de la superficie. La Tabla III.5 da algunos valores de resistencia a compresión de rellenos arcillosos y su correspondiente calificación.

Tabla III.5
Valores de la resistencia a compresión de rellenos arcillosos según la ISRM

DESCRIPCIÓN [R.1]	IDENTIFICACIÓN EN EL CAMPO	RESISTENCIA (MPa)
Arcilla muy blanda	Se penetran varias pulgadas con el puño fácilmente	0,025
Arcilla blanda	Se penetran varias pulgadas con el dedo fácilmente	0,025 - 0,05
Arcilla consolidada	Puede ser penetrada varias pulgadas con el dedo haciendo un esfuerzo moderado	0,05 - 0,10
Arcilla firme	Fácilmente hollada con el dedo pero sólo penetrada con gran esfuerzo	0,10 - 0,25
Arcilla muy firme	Fácilmente hollada con la uña	0,25 - 0,50
Arcilla dura	Hollada con dificultad con la uña	> 0,50

- i) **Estado de las paredes**, se refiere a la resistencia (teórica) que tendría el material que constituye las paredes si se pudiese ensayar, y al estado de alteración que presenten. Para su estimación normalmente se utiliza un martillo, o un esclerómetro, si bien la propia ISRM suministra también una clasificación para su valoración, que constituye la tabla III.6.

Tabla III.6
Resistencia de la pared de una discontinuidad según la ISRM

CALIFICACIÓN [R.1]	RESISTENCIA DE LA PARED (MPa)	DESCRIPCIÓN
Extremadamente blanda	0,25 - 1,0	Se identifica con la uña del dedo gordo
Muy blanda	1,0 - 5,0	El material se desmorona bajo firmes (moderados) golpes con la punta del martillo del geólogo. Se descascarilla con un cuchillo
Blanda	5,0 - 25	Puede arañarse y descascarillarse difícilmente con un cuchillo
Medianamente dura	25 - 50	No puede rayarse con el cuchillo. Una muestra sostenida en la mano, puede romperse con la parte plana del pico, dando un solo golpe fuerte
Dura	50 - 100	La muestra requiere más de un martillazo para romperla
Muy dura	100 - 250	Para fracturar la muestra con el martillo de geólogo se requieren muchos golpes
Extremadamente dura	> 250	Al golpear la muestra con el martillo de geólogo, sólo se producen esquirlas

Para identificar el grado de alteración se suele utilizar la descripción de la tabla III.7.

Tabla III.7
Definición de grados de alteración, según la ISRM

GRADO	TÉRMINO	DESCRIPCIÓN [R.1]
I	Fresca	No hay signos visibles de alteración en la roca: quizás alguna ligera decoloración en las superficies de las fracturas
II	Ligeramente Alterada	La decoloración es indicativa de la alteración de la matriz rocosa y de las superficies de las fracturas. Todo el material rocoso puede estar decolorado por alteración y puede ser externamente más blando que en condición de fresco
III	Moderadamente Alterada	Menos de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada en suelo. La roca fresca o decolorada está presente tanto en las fracturas como en la roca matriz
IV	Muy Alterada	Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada en suelo. La roca fresca o decolorada está presente tanto en las fracturas como en la roca matriz
V	Completamente Alterada	Todo el material rocoso está descompuesto y/o desintegrado en suelo. La estructura de la masa original está prácticamente intacta
VI	Suelo residual	Toda la roca está transformada en suelo. La estructura de la masa y el material de origen están destruidos. Hay cambio de volumen, pero el suelo no ha sido transportado de manera significativa

A su vez los términos "fresca", "descompuesta", "decolorada" y "desintegrada" están también definidos, al menos teóricamente, [R.1].

- j) Las **condiciones hidráulicas** se refieren a la presencia o no del agua en las fracturas. Pueden estar secas, húmedas, goteando o con flujo de agua. En este caso se debería dar información adicional.

3.3. Representación

Para obtener la tendencia media de las familias de fracturas, se utiliza la brújula de geólogo midiendo en los afloramientos, zanjas y galerías. Se necesita disponer de un número grande de medidas para obtener una información válida. Los datos más importantes son los que marcan la orientación de la discontinuidad, si bien los nueve parámetros anteriormente mencionados deben ser también registrados, con la intensidad y detalle que sea necesario. Todos estos datos deben recogerse en estadillos en los que a ser posible figure una referencia a un plano, ya sea de superficie o de una galería, en donde se haya señalado la fractura.

La mejor representación de los datos es mediante gráficos en proyección estereográfica de densidad de fracturación que permiten disponer de una visión espacial de las distintas familias en juego. Hay que advertir que en estos gráficos, para claridad de presentación, se dibujan los "polos" de las discontinuidades, entendiendo por tal la intersección de las normales a las discontinuidades con la semiesfera en la que se representan. En la Figura III.2 adjunta se muestra un ejemplo de un gráfico de densidad de fracturación. Estos gráficos deben exigirse por ser la mejor síntesis de la fracturación de un macizo, permitiendo, de forma sencilla y clara una vez conocida su interpretación, una visión de conjunto. Los gráficos tipo "rosa de los vientos" son menos completos ya que es una representación en plano con indicación numérica del buzamiento.

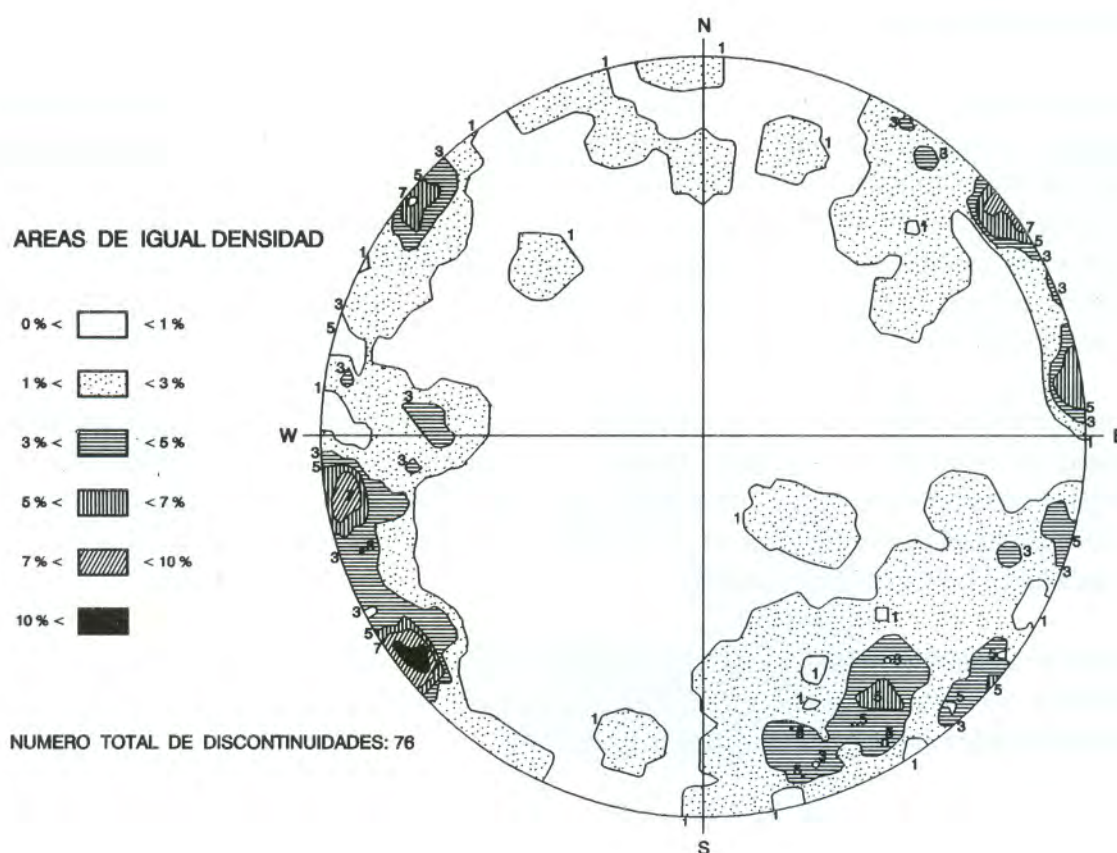


Figura III.2
Ejemplo de gráfico de densidades de fracturas

Hoy en día se utilizan también medios matemáticos e informáticos para el análisis numérico y gráfico de toda esta información.

Conviene no olvidar que los rasgos de las discontinuidades anteriormente descritos se refieren por lo general a una pequeña zona de ellas, lo cual no es problema en estudios de carácter estadístico, pero sí en estudios individuales, en los que es exigible realizar observaciones en varias zonas de la discontinuidad que permitan obtener una idea más completa de sus características.

4. ESTRUCTURA DEL MEDIO ROCOSO

La estructura geológica del medio rocoso es un aspecto que puede tener gran influencia sobre la presa que se ubique en él. Es evidente que la repercusión será distinta según se trate de un medio con matriz homogénea, por ejemplo granito o rocas de su familia, o de un conjunto estratificado (rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas), o con mayor motivo si está constituido por diferentes tipos de rocas.

No es indiferente que la presa se apoye en una zona plegada, sobre estratos horizontales, verticales o inclinados. La situación espacial de los estratos con respecto a los esfuerzos que transmite la presa no debe tampoco pasarse por alto. La resistencia o la permeabilidad pueden verse afectadas de forma notable por la presencia de la estratificación. A este respecto son ilustrativos los ejemplos que se muestra en la Figura III.3. Como puede comprobarse las zonas que deben tratarse para conseguir la permeabilidad de la cerrada varían substancialmente dependiendo de la inclinación de las capas y de la disposición relativa de los tipos de roca.

Estratos verticales, transversos al río, alternando rocas filtrantes e impermeables, son garantía de una buena estanqueidad de la cerrada. Estratos de dirección paralela al río y buzamiento fuerte dan lugar a cerradas asimétricas, con posibles deslizamientos en un estribo y nulo movimiento en el otro. Un emplazamiento en zona de pliegues puede presentar una fracturación densa y por ende permeabilidad y alteración acusada.

Todo ello pone de relieve que la estructura geológica es un aspecto a analizar con detalle por el proyectista y el constructor y que debe quedar reflejada en los planos geológico-geotécnicos y en los perfiles de ellos extraídos, con suficiente detalle.

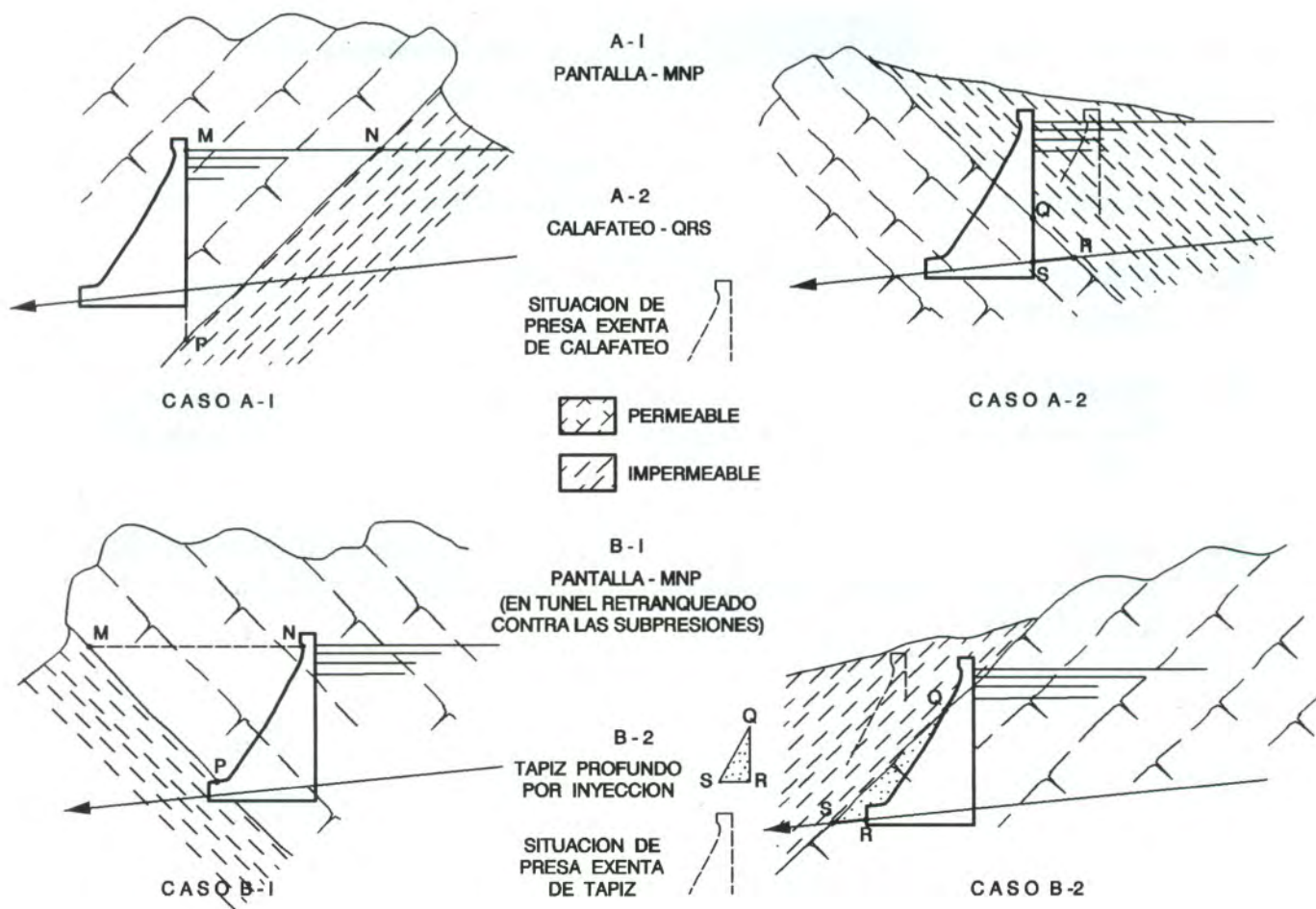


Figura III.3
Ejemplo de influencia de la estructura del medio rocoso

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- R.1 ISRM (1981). "Rock Characterization Testing and Monitoring ISRM Suggested Methods". (Editor BROWN, E. T.) Pergamon Press. p. 211.
- R.2 LÓPEZ MARINAS, J. M. "Geología aplicada a la Ingeniería Civil". Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas de Madrid, pp 2.8 a 2.14. 1993.
- R.3 SERRANO, A. "Mecánica de las Rocas I y II". Ediciones E.T.S.I. Caminos. Madrid. España. 1997.
- R.4 BREKKE, T. L., HOWARD, T. R. "Stability problems caused by seams and faults". Proc. North America Excavation & Tunnelling Conference. Chicago. Vol. 1, pp. 2541. 1972.
- R.5 LADANYI, B., ARCHAMBAULT, G. "Shear strength and deformability of filled indented joints". Int Sxmp. Geotechnics of Structurally Complex Formation. Capri. Vol. I, p. 318. 1977.

ANEJO IV

PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN

ÍNDICE

Pág.

1.	PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN DE UN BLOQUE EN ROCAS ÍGNEAS	259
2.	PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN DE UN BLOQUE EN ROCAS SEDIMENTARIAS	259
3.	PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN EN UN BLOQUE EN ROCAS METAMÓRFICAS	262

RELACIÓN DE FIGURAS

Fig. IV.1	Plano geológico de un bloque de una presa cimentada en rocas ígneas	260
Fig. IV.2	Plano geológico de un bloque de una presa cimentada en rocas sedimentarias	261
Fig. IV.3	Plano geológico de un bloque de una presa cimentada en rocas metamórficas	263

1. PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN DE UN BLOQUE EN ROCAS ÍGNEAS

En la Figura IV.1 se muestra el plano geológico de un bloque de presa situada en materiales ígneos, concretamente granitos.

Los datos geológicos representados son algunos de los señalados en el texto del Anejo IV de la Guía. Dado que se trata de una roca homogénea, los aspectos que se destacan son las fracturas de las que se han distinguido dos tipos: con trazo grueso las de mayor entidad y por tanto mayor desarrollo, como muestra el dibujo, que pueden presentar relleno de cm y, con línea fina las fracturas de menor importancia. En muchas de ellas se ha señalado el sentido del buzamiento y el valor del mismo. Cuando la rotura da lugar a un plano éste se ha representado mediante un rayado.

Gran parte de las fracturas van señaladas con un número encerrado en un círculo, referencia al listado en el que se dan todas las características de las roturas medidas, que serían difíciles de reflejar en el dibujo o lo complicarían en tal medida que harían contraproducente su representación.

Debe tenerse en cuenta que se trata de un ejemplo que da una idea de la representación de la geología del cimiento. En cada caso concreto puede optarse por una representación y exposición de los factores geológicos que se consideren más adecuados.

2. PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN DE UN BLOQUE EN ROCAS SEDIMENTARIAS

El bloque representado en la Figura IV.2 presenta lateralmente un plano de excavación de fuerte inclinación que se ha dibujado a la derecha.

Con respecto al ejemplo anterior, la complejidad de representación es mucho mayor. Prima la estratigrafía sobre la fracturación, como queda claro en la Figura.

La toma de datos se ha efectuado con apoyo topográfico, lo que ha permitido dibujar los quiebros que hacen los contactos al intersectar en la superficie irregular del cimiento. Al no existir variación en la dirección y buzamiento de los estratos sólo se ha puesto un símbolo para señalar tal circunstancia. Como puede apreciarse, este símbolo es distinto al utilizarlo para tal menester con las fracturas.

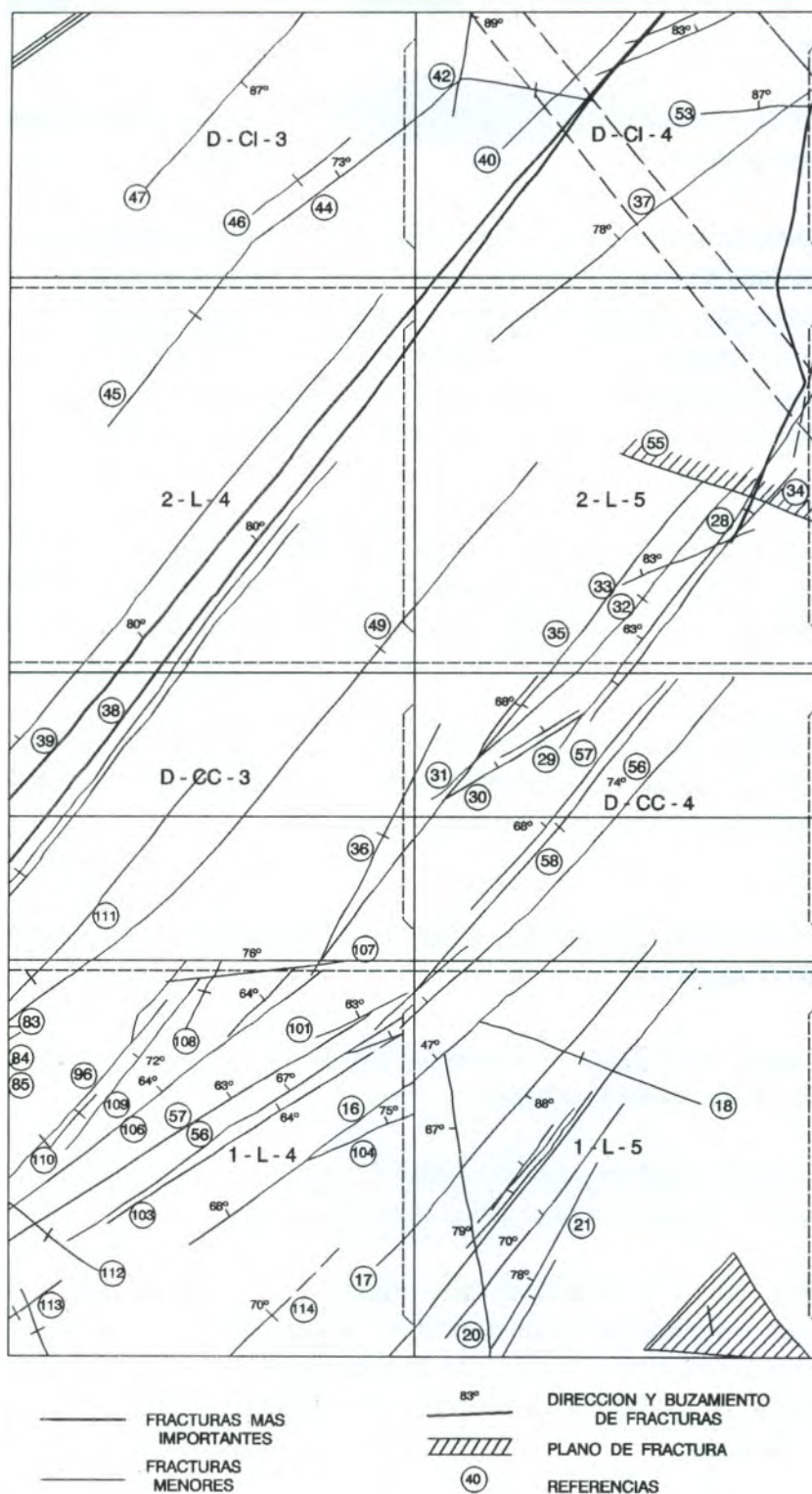
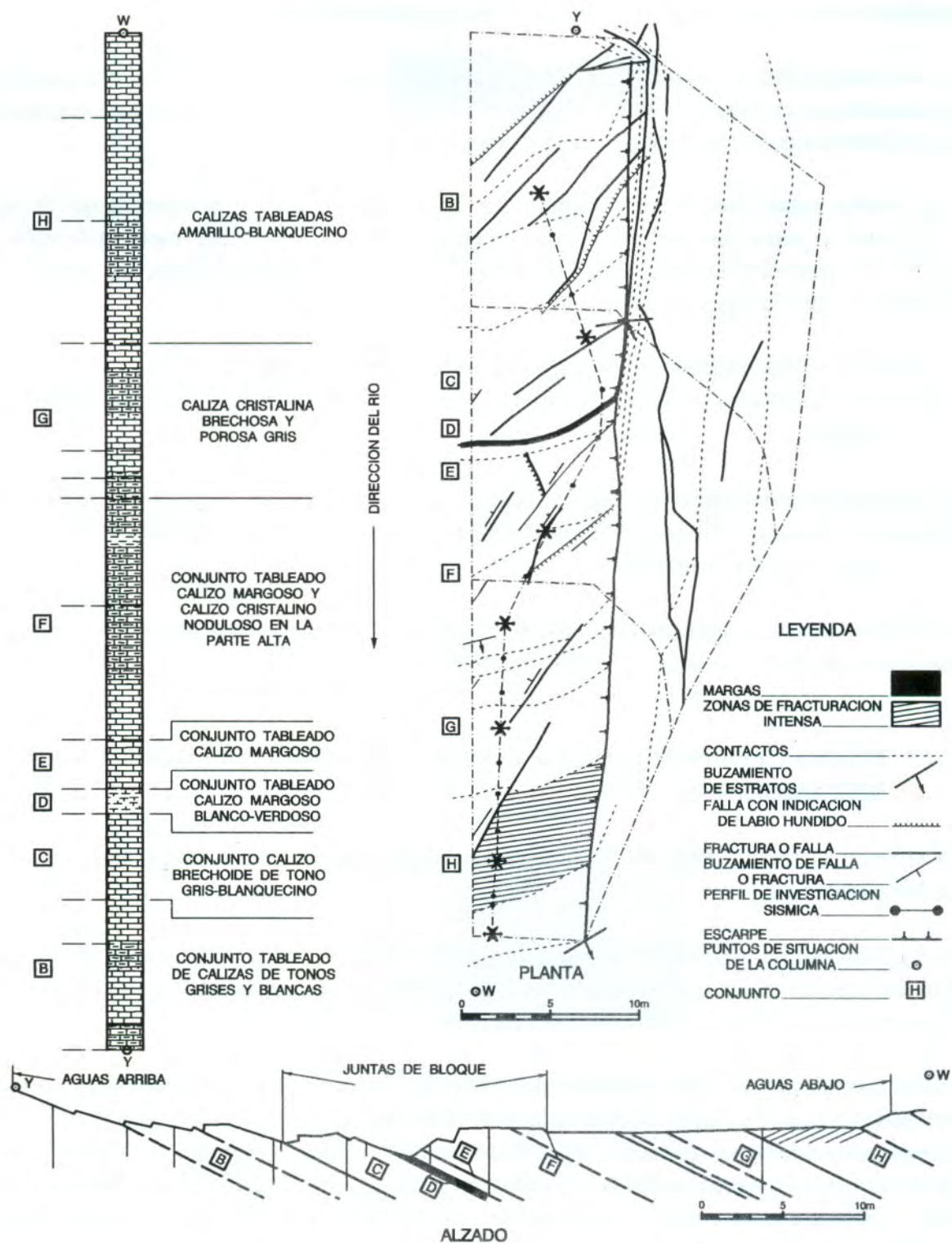


Fig. IV.1
Plano geológico de un bloque de una presa cimentada en rocas ígneas



Dada la homogeneidad de la roca en planta sólo se ha destacado un paquete margoso que constituye una excepción dentro del conjunto de materiales presentes.

En este caso se incluye una columna estratigráfica en la que se definen los distintos paquetes. Este aspecto no es esencial y puede suprimirse siempre y cuando exista una buena correlación entre el texto en que se describa la cimentación y la Figura.

Algo similar puede decirse con el alzado que se ha añadido. Éste y la columna quizás sean redundantes y pueda prescindirse de uno de ellos, pues uno solo puede hacer la función de ambos. La existencia de este corte ha evitado tener que señalar en planta los valores del buzamiento, pero lo lógico es hacerlo.

Las fracturas se han señalado por un trazo grueso indicando en la mayoría de ellas su dirección y buzamiento, aunque no el valor de éste. Los símbolos para las fallas indican el sentido del bloque hundido.

También se ha representado una zona en la que la fracturación es más densa y que se ha creído conveniente destacar. A la hora de proyectar el tratamiento de la cimentación, el conocer zonas de esta clase puede ser de gran ayuda.

Hay otra diferencia importante con respecto al ejemplo anterior: la existencia de investigación, sísmica en este caso, que también se ha reflejado en planta.

3. PLANO GEOLÓGICO DE LA CIMENTACIÓN DE UN BLOQUE EN ROCAS METAMÓRFICAS

En el tercer ejemplo, Figura IV.3, aumenta la complejidad del levantamiento por tratarse de rocas metamórficas.

Litológicamente no es complicada pues sólo están presentes dos tipos pétreos, grauwackas y pizarras, pero es muy compleja en cuanto a la fracturación. Como en los casos anteriores, en algunas roturas se señala su dirección y buzamiento.

Puede apreciarse con gran claridad dos familias prácticamente octogonales, existiendo numerosos diques de cuarzo a favor de una de ellas. Alguna da lugar a una zonita de fractura intensa representada por líneas paralelas. Hay que advertir que en otros casos la complicación puede ser mayor si se representa la esquistosidad pues aquí, al coincidir con la dirección de las capas y prácticamente con una de las familias de fracturas, se ha decidido suprimir, para no complicar aún más el dibujo. En caso de tener que hacerlo, lo mejor es adoptar trazos discontinuos orientados según la dirección con un símbolo único para marcar tal condición y el buzamiento. Conviene que sea distinto al empleado para iguales fracciones de la estratigrafía y la fracturación.



Fig. IV.3

Plano geológico de un bloque de una presa cimentada en rocas metamórficas

En los tres casos presentados no existían pliegues, aspecto que puede ser corriente en otras ocasiones. El plegamiento puede venir detectado por la intersección de las capas con el plano de cimentación. Pero, cuando eso no ocurre, convendrá representar el eje del pliegue y la dirección y buzamiento de los flancos.

Hay que insistir que al tratarse de casos reales no pueden recoger todas las variantes de estructura que pueden darse. Por ello, como se dice en el texto de la Guía, los datos a tomar serán función del tipo de presa y de las características del terreno.

ANEJO V

INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS Y DE LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN Y MANEJO

ÍNDICE

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	269
2.	PROPIEDADES DEL HORMIGÓN Y SU RELACIÓN CON LAS DE LOS ÁRIDOS	269
2.1.	Durabilidad	269
2.2.	Resistencia mecánica	270
2.3.	Estabilidad de volumen	271
2.4.	Las propiedades térmicas de un hormigón	271
2.5.	Otras propiedades	271
2.6.	Facilidad de colocación en obra	272
3.	INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN Y MANEJO DE LOS ÁRIDOS	272
3.1.	Extracción	273
3.2.	Trituración	273
3.3.	Clasificación	274
3.4.	Manipulación	275
3.5.	Limpieza	275
3.6.	Producción de finos	276
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	277

1. INTRODUCCIÓN

Buena parte de las propiedades que se piden a un hormigón están relacionadas con determinadas características de los áridos que intervienen en su composición. A su vez estas características vienen condicionadas, bien por las del material del que se obtienen dichos áridos, bien por los sistemas de fabricación y manipulación. De ahí la importancia que debe darse tanto a la elección del yacimiento, y por consiguiente a la investigación de las distintas alternativas, como a la de los sistemas de fabricación y manejo.

2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN Y SU RELACIÓN CON LAS DE LOS ÁRIDOS

El hormigón que constituye una presa debe reunir, al menos, las siguientes propiedades:

- 1 - Durabilidad
- 2 - Resistencia mecánica
- 3 - Estabilidad de volumen
- 4 - Propiedades térmicas
- 5 - Densidad especificada
- 6 - Módulo de elasticidad adecuado
- 7 - Resistencia a la abrasión
- 8 - Economía
- 9 - Facilidad de colocación en obra

Se analizará, a continuación, la relación entre cada una de estas propiedades y determinadas características de los áridos que componen el hormigón.

2.1. Durabilidad

La durabilidad de un hormigón es su capacidad de mantener sus propiedades ante el ataque de agentes externos o internos tales como: ciclos de hielo-deshielo, ciclos de humedad-sequedad, ciclos de frío-calor, erosión por circulación de agua, aire u otros elementos, reacciones químicas con elementos en contacto, fuego, ácidos, reacciones químicas de los propios componentes del hormigón.

Se exponen a continuación, los distintos aspectos que determinan la durabilidad del hormigón enfrentándolos con las características del árido, o del material que lo constituye, que incluyen en cada uno de ellos.

Propiedades del hormigón	Características de los áridos o del material que influyen en esa propiedad
a) Resistencia a los ciclos de hielo-deshielo	Porosidad Permeabilidad Resistencia a la tracción Sensibilidad al agua Estabilidad de volumen
b) Resistencia a los ciclos de humedad-sequedad	Porosidad Módulo de elasticidad Contenido de partículas friables Terrones de arcilla Sensibilidad al agua Solubilidad en agua
c) Resistencia a los ciclos calor-frío	Coeficiente de dilatación térmica Módulo de elasticidad
d) Resistencia a la erosión	Dureza
e) Reactividad	Composición mineralógica
f) Resistencia al fuego	Composición mineralógica
g) Resistencia a los ácidos	Composición mineralógica
h) Otras reacciones como hidratación de minerales anhidros, cambio de volumen, constituyentes solubles, oxidación e hidratación de compuestos de hierro, sulfuros y sulfatos	Composición mineralógica Estabilidad química

2.2. Resistencia mecánica

La resistencia mecánica, como se sabe, es la capacidad de soportar, sin rotura ni deformaciones excesivas, la acción de los esfuerzos a que está sometido un hormigón, ya sean de compresión, de tracción, de flexión, de torsión o de fatiga. En cualquiera de los casos son determinantes las siguientes características de los áridos o del material que los constituye:

- Textura superficial
- Recubrimiento
- Composición mineralógica
- Limpieza
- Graduación

- Absorción
- Módulo de elasticidad

2.3. Estabilidad de volumen

La principal manifestación de la inestabilidad de volumen de un hormigón es la retracción cualquiera que sea su origen. Además de la influencia de otros componentes, como el conglomerante o el agua, o de agentes externos, la retracción viene condicionada por las siguientes características de los áridos:

- Graduación
- Recubrimiento
- Tamaño máximo
- Textura superficial
- Porosidad
- Composición mineralógica
- Módulo de elasticidad

2.4. Las propiedades térmicas de un hormigón son:

Coefficiente de dilatación térmica, conductividad y calor específico, y están muy influidas por las siguientes características de los áridos:

- Coeficiente de dilatación térmica
- Densidad
- Composición mineralógica

2.5. Otras propiedades

Tanto la densidad como el módulo de elasticidad del hormigón están estrictamente ligados a esas mismas características del árido.

En cuanto a la resistencia a la abrasión, tanto el coeficiente de pulimento como la resistencia a la erosión están ligados a la textura superficial del árido, a su dureza, su graduación y su composición mineralógica.

Por último, en el coste del hormigón influye decisivamente el coste del árido y este último, aparte de otros factores, depende de su limpieza, el recubrimiento y la graduación o fracturación.

2.6. Facilidad de colocación en obra

Buena parte de las propiedades del hormigón endurecido vienen determinadas por el comportamiento del hormigón fresco y la facilidad con que puede ser colocado en obra.

Este comportamiento viene determinado por las proporciones de la mezcla, la trabajabilidad y el contenido de aire que, a su vez, están ligadas con las siguientes propiedades de los áridos:

- Graduación
- Recubrimiento
- Tamaño
- Absorción
- Finos arcillosos
- Textura superficial
- Huecos
- Degradación
- Forma
- Densidad
- Contenido de finos
- Materia orgánica

3. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN Y MANEJO DE LOS ÁRIDOS

Cualquiera que sea su procedencia, para conseguir el árido del hormigón, se parte de un producto natural al que se somete a una serie de procesos que tienen que acabar dando un conjunto ordenado de fragmentos de roca, duros, densos, durables, no alterados superficialmente y que no contengan arcilla, polvo, mica, materia orgánica ni otras impurezas en una cantidad tal que, conjunta o separadamente, hagan imposible conseguir las propiedades deseadas en el hormigón cuando se emplea una dosificación normal.

Indudablemente, como ya se ha dicho, algunas de las propiedades del árido son, o pueden ser en algún caso, inherentes a su naturaleza. Así ocurre con la densidad, módulo de elasticidad, resistencia a la abrasión, dureza, resistencia a compresión, solubilidad, porosidad, coeficiente de dilatación térmica, composición mineralógica y, a veces, incluso el tamaño máximo posible.

Sin embargo otras, como son: contenido de finos, el propio tamaño máximo, coeficiente de forma, existencia de partículas blandas, curva granulométrica, homogeneidad, etc, dependen o están muy influidas por los procesos de preparación.

Por esta razón se incluyen aquí algunas recomendaciones sobre este extremo.

3.1. Extracción

Si la extracción es de cantera resulta de la mayor importancia hacer un buen desbroce de la superficie y una amplia limpieza del material alterado ya que en caso contrario pueden producirse sobrantes importantes en las instalaciones o llegar a una calidad inaceptable del árido. Si la cantera es, y está, limpia puede triturarse directamente el material extraído. En caso contrario, se necesita un precibado que elimine los productos de pequeño tamaño procedentes de los detritus de cantera.

Según sea el sistema de precibado y de limpieza posterior, parte de esos productos pueden recuperarse.

El esquema de voladura debe estar diseñado en función de la maquinaria de trituración, de su tamaño de entrada y de su producción.

La cantera debe abrirse con amplitud sobrada para absorber las posibles incidencias de la obra.

Si la extracción es de un depósito natural y se ha contado usar el producto medio, una explotación selectiva puede llevar a grandes complicaciones. Es conveniente, en casos de mucha heterogeneidad, disponer una clasificación del árido en más clases de lo normal.

Si el depósito es una gravera inundable, total o parcialmente, la elección del equipo de extracción debe ir encaminada a que no se pierdan finos útiles (entre 0,08 y 2 mm) arrastrados por el agua.

3.2. Trituración

Si el árido ha de sufrir un proceso de machaqueo, bien por proceder de cantera o por convenir la trituración de sobrantes de depósitos naturales, por exceso de tamaño o cantidad, es de la mayor importancia conseguir la adecuación entre el tipo de máquinas y el tipo de piedra.

Las máquinas que rompen por compresión (mandíbulas o conos) tienden a dar áridos con mal coeficiente de forma salvo que se empleen con coeficientes de reducción bajos y tanto más cuanto menos duro sea el material.

Las máquinas de golpeo y paso forzado (martillos o cilindros) aunque dan buen coeficiente de forma, sólo pueden trabajar con materiales blandos y producen muchos finos. En cambio suelen dar una buena gradación granulométrica.

Las máquinas de impacto son algo más flexibles en cuanto a la abrasividad del material, especialmente cuando se emplean aleaciones especiales en su construcción. Su limitación viene establecida por el tamaño de admisión.

Las arenas producidas, con cualquiera de estos sistemas de trituración, adolecen de falta de finos de tamaño inferior a 1,5 mm.

3.3. Clasificación

La clasificación tiene por objeto la distribución del árido en las clases previamente establecidas. Esta distribución debe ser tal que las clases cumplan algunas condiciones tanto en lo que se refiere al contenido de tamaños no incluidos en la clase como a la composición de la propia clase.

Las normas UNE 146120:97, que sustituyen a las normas UNE 83-100-84, establecen las condiciones que deben cumplirse para la clasificación de áridos en fracciones granulométricas.

En cuanto al número de clases, este se establecerá en función del tamaño máximo. No conviene que sea superior a seis, cuatro para el árido grueso y dos para el fino.

La norma UNE 146120:97 se apoya en las normas UNE-EN 933-2 para la determinación de la granulometría del árido que cambia los tamices de las normas precedentes. No obstante, para el hormigón de presas, se considera que se pueden mantener los criterios de la antigua norma UNE 83-100:84.

Cuando el tamaño máximo sea de 40 ó 50 mm bastará clasificar en dos clases el árido grueso, si fuera de 60, 80 ó 100 mm se debe clasificar en tres y por fin si fuera de 120 ó 150 mm se deben separar cuatro clases.

La arena puede constituir una sola clase si se adapta al huso indicado en el apartado 3.1.2. c) sin riesgo de heterogeneidad.

Los equipos de clasificación deben estar dimensionados con una amplitud tal, que su eficacia de cribado responda a esos requerimientos, aun con los máximos caudales de alimentación que el resto de los equipos puedan provocar.

Para ello deberán también elegirse la frecuencia de vibración para cada criba (en el caso más frecuente de cribas vibrantes) y el tamaño y forma de las mallas en función del tipo de árido y su coeficiente de forma.

Es importante realizar pruebas, una vez en funcionamiento la instalación, con ensayos granulométricos, para ajustar estos parámetros.

3.4. Manipulación

Una defectuosa manipulación de los áridos en su camino hacia la planta de hormigón puede convertir en ineficaz una instalación bien diseñada y dimensionada, fundamentalmente por tres causas:

- La segregación, que destruye la uniformidad de los áridos.
- La contaminación, por la inclusión de materiales perjudiciales.
- El contenido variable de humedad.
- La descorrección de granulometría como consecuencia de la automolienda en las caídas o por la circulación de máquinas sobre los acopios.

La segregación se produce fundamentalmente cuando el árido sufre caídas libres, tanto más cuanto mayor altura tengan, y en mayor medida si están expuestas al viento, especialmente con árido fino. Se corrige situando chapas de freno en las caídas de cinta sobre cinta, chimeneas verticales en las caídas de cinta sobre montón, centradas sobre la boquilla de salida, o extendiendo con bulldozer en capas, sin llegar a los bordes, cuando se hacen acopios.

La contaminación se evita no manipulando los áridos ya fabricados con máquinas de movimiento de tierras (palas cargadoras, excavadoras, etc) sino con cintas transportadoras. En aquellos casos en que es conveniente hacer grandes acopios o no es viable el empleo de cintas, el suelo del acopio debe estar hormigonado o al menos cubierto con una capa de árido bajo cuyo nivel no debe nunca cargar la máquina que, por supuesto, debe tener limpios sus elementos de rodaje y carga.

El contenido variable de humedad, cuya mayor importancia corresponde al árido fino, se produce en aquellos casos en que es necesario lavar el árido; y para evitarlo es necesario drenar el material antes de su transferencia a la planta de hormigón. Para ello es preciso disponer zonas de almacenamiento de donde no se extraiga material hasta tanto no se haya conseguido el drenaje que, por supuesto, se producirá de forma más lenta cuanto más fino sea el árido. Influyen también en la celeridad del drenaje la graduación, la forma y el sistema de drenaje de manera que puede necesitarse desde 24 horas a una semana o más.

Por último la descorrección de granulometría en las caídas está influida fundamentalmente por la fragilidad y diaclasado del material. Se corrige disponiendo escalas de caída. La circulación de máquinas sobre el acopio produce rotura especialmente en materiales poco resistentes a la abrasión y lo ideal es evitar, en esos casos, dicha circulación y, si es imprescindible, emplear máquinas sobre neumáticos en lugar de máquinas sobre cadenas.

3.5. Limpieza

Cuando el árido contiene finos en cantidad superior a la aceptable, sal, arcillas u otros materiales que interfieren la unión con la pasta cementicia, es preciso eliminar o llevar a límites tolerables estos elementos perjudiciales.

Habitualmente esto se consigue por vía húmeda lavando los áridos mediante sistemas adecuados a la naturaleza del problema usándose trommeles lavadores, rampas de lavado o riego en criba. Normalmente toda el agua sucia acaba llegando a las arenas por lo que finalmente hay que hacer una decantación de éstas por un procedimiento que permita eliminar el agua y la suciedad (hélices decantadoras, norias e hidrociclones).

Cualquiera de estos sistemas se mueve entre dos extremos: que la eficacia del lavado no sea suficiente o que se eliminen finos útiles (entre 0,08 y 1 mm). Por esto es preciso realizar pruebas con la instalación, ya en marcha, para hacer los ajustes necesarios en los que, por supuesto, influyen también los caudales circulantes.

3.6. Producción de finos

Salvo en algunos áridos procedentes de depósitos naturales, las arenas son escasas de contenido de finos útiles lo que daría lugar a hormigones poco cerrados, menos densos y más permeables. Por esta razón es casi imprescindible la producción de estos finos a partir de los otros áridos. Pero este proceso conduce normalmente a una producción de finos de tamaño inferior a 0,08.

Por proceder de la roca madre y según sea la naturaleza de ésta, dichos finos pueden ser utilizados mejorando algunas características del hormigón por lo que puede ser interesante manipularlos en circuito independientemente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- R.1 ACI 221.R-61. "Selection and use of aggregates for Concrete". Detroit. 1984.
- R.2 ANSI/ACI 211.1.81. "Standard practice for Selecting proportions for normal, heavywerght and mass Concrete". 1981.
- R.3 ANSI/ACI 117.81. "Standard tolerances for Concrete construction and materials". 1981.

ANEJO VI
GLOSARIO GEOLÓGICO

GLOSARIO

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Acarreos	Véase Aluvial
Aceleración sísmica	Aceleración del movimiento del terreno producido por las ondas sísmicas generadas por un terremoto
Afloramiento	Zona de extensión variable en la superficie en la que se puede observar una roca o formación geológica
Aluvial, <i>Acarreos</i>	Conjunto de materiales más o menos sueltos depositados por un curso de agua
Anfibolita	Roca de metamorfismo regional de grado medio a alto. Su principal mineral son los anfíboles cálcicos y las plagioclasas teniendo escaso o nulo contenido de cuarzo. Color verde oscuro
Anticlinal	Pliegue en cuyo núcleo se encuentran los terrenos más antiguos
Arcilla	Fracción de los suelos cuyo tamaño equivalente es inferior a 1/256 mm. Está constituida por silicatos aluminicos hidratados. Exhibe comportamiento plástico
Arcillita	Roca sedimentaria detrítica del grupo de las lutitas constituida por arcilla aglomerada
Arcillita, <i>Argilita</i>	Roca sedimentaria detrítica del grupo de las lutitas formada por partículas de arcilla compactada
Arcosa	Arenisca con menos del 15% de matriz constituida por cuarzo (menos del 75%), feldespatos y en menor proporción fragmentos de roca. Adquiere plasticidad en presencia del agua
Arena	Fracción de los suelos de tamaño comprendido entre 2 mm y 0.06 mm
Arenisca	Roca sedimentaria detrítica de las Arenitas constituida por arenas aglomeradas por un cemento o matriz. De composición mineralógica, cemento o matriz variables
Arenitas	Clase de las rocas sedimentarias detríticas el tamaño de cuyos granos oscila entre 2 y 1/16 mm
Brecha	Véase Conglomerado
Brecha de falla	Brecha formada causada por deformaciones tectónicas, especialmente fallas
Buzamiento (de un estrato o discontinuidad). <i>Inclinación, Pendiente</i>	Ángulo que forma un estrato o discontinuidad con el plano horizontal
Calciarenita	Roca sedimentaria detrítica del grupo de las arenitas constituida esencialmente por granos de carbonato del tamaño arena depositados mecánicamente
Calcilutita	Roca sedimentaria detrítica del grupo de las lutitas constituida esencialmente por granos de carbonato del tamaño arcilla depositados mecánicamente
Calcimolita	Roca sedimentaria detrítica del grupo de las lutitas constituida por granos de carbonatos del tamaño limo depositados mecánicamente
Calcirudita	Roca sedimentaria rudita constituida por granos de carbonatos depositados mecánicamente

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Calcita	Mineral constituido por carbonato cálcico ($\text{CO}_3 \text{ Ca}$), que cristaliza en el sistema trigonal
Caliza	Roca sedimentaria carbonatada cuyo mineral principal es la calcita
Cámbrico	Período más antiguo de la era Paleozoica que puede ser determinado por presencia de fósiles. Se extendió aproximadamente entre los 570 y 500 millones de años a.J.C.
Carbonífero	Período del Paleozoico que se extiende aproximadamente desde los 345 a los 280 millones de años
Carsticidad, cars	Véase Karsticidad, Karst
Cemento	En petrología aglomerante formado por precipitación química que une los clastos de las rocas detríticas
Cenozoico	Era geológica que se extiende desde los 65 millones de años a.J.C. a la actualidad
Clasto	Fragmento de roca formado por alteración mecánica de una masa rocosa
Cobertura, <i>cobertura de ladera, cobertera</i>	Véase Derrubios y derrubios de ladera
Coluvial, <i>Coluvión, Coberturas y derrubios de ladera</i>	Conjunto de materiales más o menos consolidados que ha sufrido un corto transporte
Coluvión	Véase coluvial
Conglomerado	Roca sedimentaria detrítica rudita constituida por fragmentos de roca unidos por una matriz o cemento. Cuando los fragmentos son angulosos se denomina brecha y cuando redondeados pudinga
Conglomerado volcánico	Conglomerado constituido por materiales volcánicos
Coordenadas hipocentrales	Coordenadas del foco sísmico. Están formadas por las coordenadas epicentrales y la profundidad
Cornubianita	Roca de metamorfismo de contacto con plutones superficiales. Generalmente suelen ser de grano fino y carecer de foliación. Mineralogía variable
Cretácico	Período del Mesozoico que se extiende aproximadamente entre los 136 y 65 millones de años a.J.C.
Cuarcita	Roca sedimentaria o metamórfica cuyo constituyente principal es el cuarzo. Las sedimentarias suelen tener un porcentaje de cuarzo superior al 95%, cemento silíceo y escaso porcentaje de matriz. Reciben también el nombre de Cuarzoarenita u Ortocuarcita. Las metamórficas son similares en composición a las sedimentarias pero presentan una cierta hojiosidad, suelen conocerse como metacuarcitas
Cuarzoarenita	Véase Cuarcita
Cuaternario	Período más moderno del de la era Cenozoica que se extiende aproximadamente de los 2,5 millones de años a.J.C. a la actualidad. Se divide en dos épocas: Pleistoceno y Holoceno o Reciente
Derrubios, derrubios de ladera	Conjunto de materiales procedentes de la alteración de las rocas, más o menos consolidados que han sufrido un corto transporte y enmascaran el sustrato rocoso

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Devónico	Período del Paleozoico que se extiende aproximadamente desde los 395 a los 345 millones de años a.J.C.
Diabasa, <i>Dolerita</i>	Roca ígnea plutónica que química y mineralógicamente es igual al gabro y al basalto. Sus minerales esenciales son labradorita, piroxeno y olivino. Presenta textura ofítica
Diaclasa	Véase fractura
Diorita	Roca ígnea plutónica intermedia entre las ácidas y las básicas. Sus minerales esenciales son plagioclasas (oligoclasa y andesina) y hornblenda y los accesorios biotita, ortoclasa y cuarzo. Presenta texturas diferentes. Están ligadas a los batolitos graníticos
Dirección (de un estrato o discontinuidad). <i>Rumbo</i>	Ángulo que forma con el norte magnético la intersección del estrato o discontinuidad con el plano horizontal. Se puede medir siguiendo el sentido de las agujas del reloj, con una amplitud de 360° o con medidas de 0° a 90° indicando si se hacen hacia el Este u Oeste
Dolomía	Roca sedimentaria carbonatada cuyo mineral principal es la dolomita
Dolomita	Mineral constituido por carbonato doble de calcio y magnesio (CO ₃) ₂ Ca Mg, que cristaliza en el sistema trigonal
Epicentro	Proyección del hipocentro sobre la superficie terrestre
Época	Unidad geocronológica subdivisión del período
Era	Unidad geocronológica de gran amplitud que incluye dos o más períodos
Esquistos	Roca metamórfica regional procedente del metamorfismo de pizarras, areniscas, rocas carbonatadas, arcillas, etc. Sus minerales esenciales son: cuarzo, mica, clorita, talco. Notable foliación
Estrato	Nivel de roca o sedimento que es más o menos distinguible de forma visual o física, separado de los niveles superior (techo) e inferior (muro) por superficies denominadas superficies de estratificación
Falla	Discontinuidad del terreno producida por un movimiento relativo entre las dos partes separadas. En movimientos recientes se pueden utilizar términos más específicos
Filita	Roca de metamorfismo de contacto o regional procedente del metamorfismo de pizarras arcillosas y argilitas. Sus minerales esenciales son moscovita, clorita, cuarzo y albita. Presenta brillo y lustre sedoso, así como una marcada foliación
Foco	Véase hipocentro
Fractura, <i>Rotura, Litoclasa, Diaclasa</i>	Rotura, normalmente plana, en la cual no se ha producido movimiento a favor de ella
Gabro	Roca ígnea plutónica básica. Tiene como minerales esenciales plagioclasas (labradorita, bytownita y anortita) y hornblenda y como accesorios magnetita e ilmenita. Textura de grano grueso y bandas de minerales máficos. Es el equivalente al basalto
Gneis, <i>Esquistos cuarzo feldespáticos</i>	Roca metamórfica regional de alto grado de metamorfismo, cuyo origen son los cambios sufridos por rocas ígneas o arenas arcósicas. Sus minerales esenciales son: cuarzo, feldespato (ortoclasa y microclina o feldespato potásico) y mica. También presentan sillimanita, cianita, andalucita, cordierita, etc. Presentan una foliación no muy acusada
Gneis, <i>Esquistos cuarzo</i>	Roca metamórfica regional de alto grado. Sus minerales más comunes son:

CONCEPTO	DEFINICIÓN
<i>feldespatos</i>	cuarzo, feldespato y mica. Presenta foliación
Granulita	Roca metamórfica regional de alto grado constituida por cuarzo, feldespato, piroxeno y granates. Presenta foliación debido a la alineación de lenticulas planas de cuarzo y del piroxeno
Grauvaca	Arenisca que contiene fragmentos de roca mal dosificadas y granos de cuarzo y feldespato. Su contenido de matriz es superior al 15%
Hipocentro, Foco	Punto donde se produce el terremoto
Intensidad sísmica	Número escalado que indica los daños o efectos de un terremoto en un lugar determinado sobre las personas, estructuras y materiales terrestres. La escala utilizada en Europa y la oficial en España es la MSK, con grados de I a XII. También son muy utilizadas las de Mercalli y Mercalli modificada
Isosista	Línea que une puntos de igual intensidad sísmica
Junta	Véase fractura
Junta de estratificación	Véase plano de estratificación
Jurásico, Jura	Período del Mesozoico que se extiende aproximadamente entre los 190 y 136 millones de años a.J.C.
Kars, karsticidad	Morfología que presentan algunas rocas carbonatadas (calizas, dolomías), evaporitas (yeso, anhidrita, sales) casada por disolución
Lapilli, <i>Picón, Zahorra</i>	Piroclastos de pequeño tamaño
Levantamiento geológico	La toma en campo de datos geológicos que sirven para confeccionar un plano geológico del emplazamiento
Limo	Fracción del suelo constituida por fragmentos cuyos tamaños oscilan entre 0.06 mm y 1/256 mm. Cuando está aglomerada recibe el nombre de Limolita
Limolita	Véase limo
Limolita, <i>Aleurolita</i>	Roca sedimentaria detrítica del grupo de las lutitas formada por partículas de limo compactadas
Litoclasa	Véase fractura
Lutitas	Rocas sedimentarias detríticas formadas por fragmentos sueltos o aglomerados cuyo tamaño de grano es inferior 1/16 mm
Macizo rocoso, <i>Masa rocosa</i>	Conjunto constituido por una o varias rocas que presenta una determinada estructura, está afectado por una serie de discontinuidades y presenta un grado de alteración pudiendo contener o no agua
Magnitud de un terremoto	Cuantificación de la energía liberada por un terremoto basada en la medida instrumental de la amplitud de las ondas sísmicas. Hay diferentes escalas dependiendo del tipo de onda que se mida. La más utilizada es la escala de Richter
Marga	Roca sedimentaria constituida por la mezcla de arcilla y caliza en porcentajes que oscilan entre el 30% y el 65%
Mármol	Rocas metamórficas que proceden de un metamorfismo de contacto de alto grado o de metamorfismo regional. Presenta grano fino siendo sus minerales esenciales calcita o dolomita con textura sacaroidea
Masa rocosa	Véase Macizo rocoso

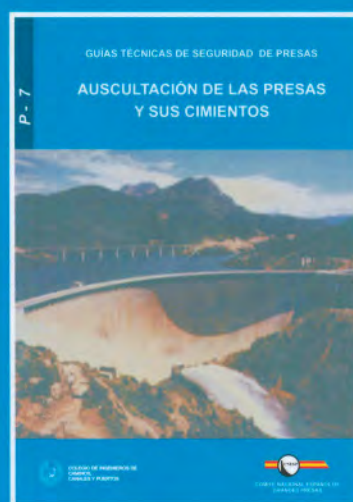
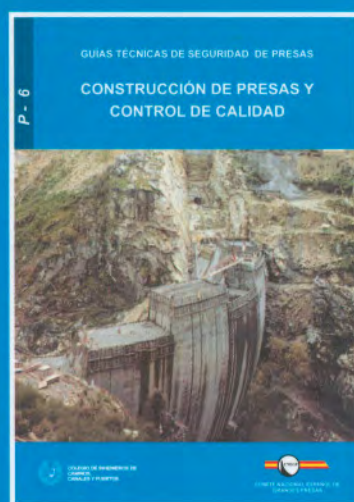
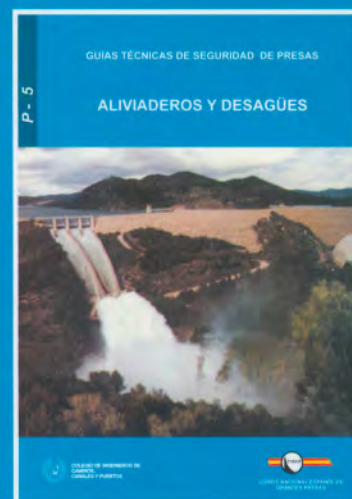
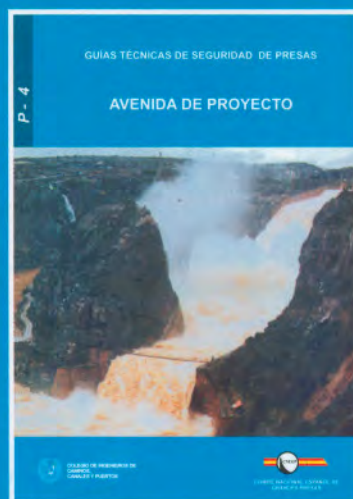
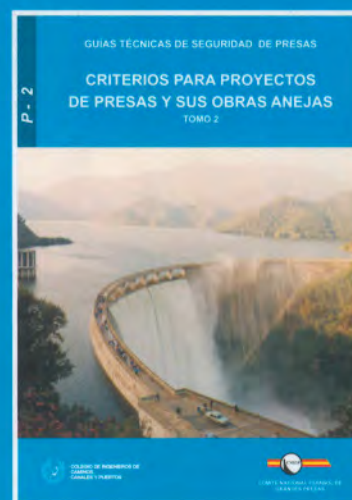
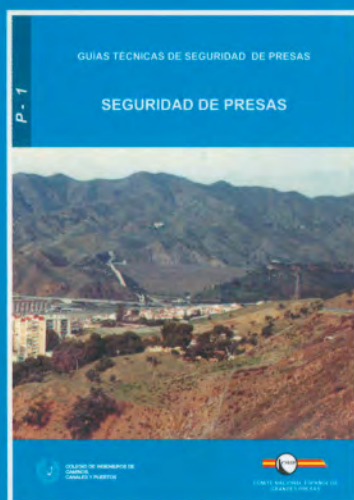
CONCEPTO	DEFINICIÓN
Matriz	Material detrítico que puede rellenar los huecos entre los clastos de las rocas detríticas
Matriz rocosa	Véase Roca
Mesozoico, Secundario	Era geológica que se extiende desde el final del Paleozoico (225 millones de años a.J.C.) a comienzo del Cenozoico (65 millones a.J.C.)
Metacuarcita	Véase cuarcita
Metamorfismo. <i>Procesos metamórficos</i>	Proceso de cambio de las asociaciones mineralógicas, texturas y/o estructuras de una roca bajo condiciones físicas y químicas que se apartan algo de las que concurren tanto en el origen inicial de la unidad como en el ambiente próximo a la superficie
Migmatita	Roca constituida por una mezcla de materiales metamórficos y graníticos cuyas estructuras son distinguibles
Milonita	Microbrecha metamórfica originada por metamorfismo dinámico (deformación mecánica) por el movimiento de dos bloques. Presenta foliación. El tamaño de sus granos puede ser variable
Ofita	Tipo de diabasa
Ordovícico	Período del Paleozoico que se extiende aproximadamente desde los 500 a los 430 millones de años a.J.C.
Paleozoico	Era geológica que se extiende desde el final del Precámbrico al comienzo del Mesozoico. Aproximadamente desde 570 a 225 a.J.C.
Pegmatita	Roca ígnea plutónica formada por la cristalización de un magma residual rico en gases. Presenta grano muy grueso y estructura filoniana. Sus minerales esenciales son los del granito: cuarzo, feldespato y mica
Peligrosidad sísmica	Probabilidad, en términos no siempre estrictamente matemáticos, de que en un intervalo de tiempo y como consecuencia de la sismicidad y del medio de propagación de ondas sísmicas, se supere en determinada zona el valor de un parámetro que nos mida el movimiento del suelo
Período	Unidad geocronológica subdivisión de la era. Se divide en épocas
Pérmico	Período del Paleozoico que se extiende aproximadamente desde los 280 a los 225 millones de años
Piroclastos	Material fundido fragmentado por la salida violenta de los gases de una erupción volcánica
Pizarra	Roca metamórfica regional de bajo grado. Sus minerales esenciales son moscovita, cuarzo, magnetita y pirita. Marcada foliación (pizarrosidad)
Plano de estratificación, <i>superficie de estratificación, junta de estratificación</i>	Límite de un estrato
Pliegue	Ondulación de una estructura plana provocada por las tensiones a que ha sido sometida
Primario	Véase Paleozoico
Profundidad focal	Profundidad a la que se produce el terremoto
Protocuarcita	Véase Cuarcita

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Pudinga	Véase Conglomerado
Réplicas	Terremotos que siguen al terremoto principal en una zona ligados genéticamente con él
Riesgo sísmico	Número esperado de fallecimientos, personas heridas, daños materiales y alteración de la actividad económica debido a la ocurrencia de terremotos
Roca, <i>Matriz rocosa</i>	Agregado de minerales que presenta los mismos caracteres de conjunto en un área de cierta extensión
Rocas clásticas	Véase rocas detríticas
Rocas detríticas. <i>Rocas clásticas</i>	Rocas sedimentarias originadas por procesos erosivos y constituidas por fragmentos de roca sueltos o aglomerados. Atendiendo al tamaño de los fragmentos (clastos) se dividen de mayor a menor en: Ruditas, Arenitas y Lutitas
Rocas extrusivas	Véase Rocas volcánicas
Rocas ígneas	Son las originadas por el enfriamiento de un material denominado magma
Rocas intrusivas	Véase Rocas plutónicas
Rocas metamórficas	Rocas originadas por procesos metamórficos sobre rocas preexistentes
Rocas plutónicas. <i>Intrusivas</i>	Es un grupo de rocas ígneas originadas por la consolidación del magma en el interior de la corteza
Rocas sedimentarias	Rocas constituidas por materiales producto de la erosión de rocas preexistentes, que han sufrido procesos de transporte, acumulación, compactación y cementación en grado diverso
Rocas volcánicas. <i>Extrusivas</i>	Rocas ígneas originadas por el enfriamiento del magma en la superficie
Ruditas	Rocas sedimentarias detríticas formadas por fragmentos sueltos o aglomerados de tamaño superior a 2 mm
Rumbo de un estrato o discontinuidad	Véase dirección de un estrato o discontinuidad
Secundario	Véase Mesozoico
Silúrico	Período del Paleozoico que se extiende desde los 430 a los 395 millones de años a.J.C.
Sinclinal	Pliegue en cuyo núcleo se encuentran los terrenos más modernos
Superficie de estratificación	Véase plano de estratificación
Tarquín	Material que las aguas embalsadas depositan en los fondos y las avenidas en las zonas inundadas
Terciario	Período más antiguo del Cenozoico que se extiende aproximadamente entre los 65 y 2.5 millones de años a.J.C. Se divide en cinco épocas que de más antiguas a más modernas son: Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno y Plioceno
Textura	Es la apariencia física general o carácter de la roca, incluyendo los aspectos geométricos y las mutuas relaciones entre las partículas o cristales componentes (GG, 1974)
Toba volcánica	Depósitos de piroclastos soldados o cementados

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Triásico, Trías	Período más antiguo del Mesozoico que se extiende aproximadamente entre los 225 y 190 millones de años a.J.C.
Vulnerabilidad sísmica	Grado de pérdida de un elemento en riesgo dado, expresado en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total), que resulta de la ocurrencia de un terremoto de una magnitud determinada
Yeso	Roca sedimentaria del grupo de las evaporitas cuyo mineral principal es el yeso (sulfato cálcico hidratado, $\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Suele presentarse interestratificado con otras rocas como margas, arcillas, areniscas, etc o en grandes masas. Tiene una disolución acusada

GUÍAS TÉCNICAS DE SEGURIDAD DE PRESAS

VOLÚMENES INCLUIDOS EN LA SERIE



COLEGIO DE INGENIEROS DE
CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE
GRANDES PRESAS