



24
25

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CLASIFICACIONES Y EXPLORACION EN
MACIZOS ROCOSOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
PEDRO BERNAL CARRILLO

MEXICO, D. F.

1989

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

INTRODUCCION.....1

CAPITULO 1

CLASIFICACIONES GEOMECANICAS DE LAS ROCAS.....3

- A) Rocas Igneas.....3
- B) Rocas Sedimentarias.....5
- C) Rocas Metamórficas.....6

CAPITULO 2

INTRODUCCION GEOTECNICA EXISTENTE.....8

- A) Mapas Geológicos.....8
- B) Mapas Geotécnicos.....13
- C) Carta Geológica.....16
- D) Fotografía Aérea.....16
- E) Fotogrametría.....21
- F) Percepción Remota.....22
- G) Fuentes de Información Geológica.....23

CAPITULO 3

RECORRIDOS GEOLOGICOS SUPERFICIALES.....24

- A) Exploración Superficial.....24
- D) Datos Geológicos Requeridos.....25
- C) Metodología Realizada "in situ".....27

CAPITULO 4

GEOFISICA.....28

- A) Métodos Sísmicos de Refracción.....30
- B) Métodos Eléctricos.....33
 - a) Arreglo Schlumberger.....34
 - b) Arreglo Wenner.....34
- C) Método Magnetométrico.....38
- D) Método Gravimétrico.....39
- E) Método Termométrico.....39

CAPITULO 5

CLASIFICACIONES GEOMECANICAS..... 41

I.- Pruebas de Laboratorio..... 41

| | |
|---|----|
| A) Ensayos de Compresión Simple y Triaxial..... | 41 |
| I) Compresión Simple..... | 41 |
| II) Compresión Triaxial..... | 42 |
| a) Pruebas Triaxiales no Drenadas con Medición de Presión de Poro..... | 43 |
| b) Pruebas Triaxiales Drenadas..... | 44 |
| B) Ensayos de Tensión..... | 45 |
| a) Tensión Axial..... | 45 |
| b) Prueba Brasileña..... | 47 |
| c) Prueba de Flexión..... | 48 |
| C) Ensayos de Corte..... | 49 |
| a) Pruebas de Corte Simple o Directo..... | 49 |
| D) Propiedades Indice..... | 51 |
| a) Porosidad..... | 51 |
| b) Peso Volumétrico..... | 52 |
| c) Absorción de Agua..... | 53 |
| d) Permeabilidad..... | 54 |

II.- Ensayos de Campo..... 55

| | |
|--|----|
| A) Deformabilidad..... | 55 |
| I.- Túnel Bajo Presión Hidrostática..... | 55 |
| II.- Pruebas de Placa..... | 56 |
| III.- Gato Plano..... | 57 |
| IV.- Dilatómetro Portugués..... | 58 |
| V.- Dilatómetro Goodman..... | 59 |
| VI.- Presiurómetro..... | 60 |
| B) Esfuerzos Internos..... | 60 |
| I.- Roseta de Deformación..... | 60 |
| II.- Gato Plano..... | 62 |
| III.- Gatos Curvos..... | 63 |
| C) Resistencia al Esfuerzo Cortante..... | 64 |
| D) Permeabilidad de las Masas Rocosas..... | 65 |

III.- Métodos de Clasificación Mecánica..... 65

| | |
|---|----|
| A) Clasificación de Terzaghi..... | 66 |
| B) Clasificación de Deere..... | 68 |
| C) Clasificación de Barton, Lien y Lunde..... | 69 |
| D) Clasificación de Bieniawski..... | 74 |

CAPITULO 6

ESFUERZOS IN SITU, GEOLOGIA ESTRUCTURAL-TECTONICA..79

| | |
|---|----|
| A) Estructura Geológica..... | 79 |
| B) Buzamiento..... | 79 |
| C) Pliegues..... | 81 |
| D) Fallas..... | 83 |
| E) Diaclasas..... | 83 |
| F) Discordancias..... | 84 |
| G) Deformación..... | 85 |
| H) Magnitud y Dirección de los Esfuerzos Tectónicos..... | 85 |

CONCLUSIONES.....87

BIBLIOGRAFIA.....88

INTRODUCCION

El comportamiento de una roca puede ser más complicado que el de los suelos y en muchos de los casos se hace uso de técnicas completamente diferentes de la mecánica de suelos, para determinar las propiedades, características y el comportamiento de las rocas.

La roca está definida como el conjunto de granos y minerales que presentan fisuración, fallas, porosidad, alteración física-mecánica, etc., dentro de una masa denominada rocosa (macizo rocoso).

Este trabajo pretende establecer una secuencia ordenada y planeada de actividades, fuentes de información y métodos de investigación y ensayos existentes como referencia a seguir para realizar un estudio básico para provor y/o resolver cualquier problema referente a la Mecánica de Rocas.

A continuación se dará una visión panorámica de los capítulos que integran este trabajo explicando en pocas palabras el contenido de cada uno de ellos.

En el primer capítulo se clasifica a las rocas en términos de su origen mineral, la cual lleva a los grupos geológicos ya bien conocidos: rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En cada uno de estos grupos se describen sus características, subdivisión y principales minerales que se encuentran en los diferentes tipos de roca.

Se describen en el segundo capítulo los registros o documentos de información existentes a los cuales se puede recurrir para facilitar la información referente a la litología, estratigrafía, geometría, propiedades físicas y mecánicas de las rocas y suelos existentes en una zona determinada.

El capítulo tercero se refiere a la información que debe de obtenerse y a la forma en que se deben de llevar a cabo los recorridos geológicos superficiales. También se hace la mención de las notas que se deben de ir tomando en los recorridos y las limitaciones que se tienen en ellos. Los datos más requeridos para este estudio son entre otros: la Litología, Geomorfología, Estructura Geológica, Geohidrología y propiedades mecánicas del suelo.

Se consideran en el capítulo cuarto los métodos geofísicos existentes, describiendo en ellos a grandes rasgos el equipo que se utiliza y la función que realiza cada una de las partes que forman en conjunto al equipo. También se especifica en cada

método la información que se obtiene de ellos como son: la litología, dureza, resistencia, geología, densidad, etc., además se hace mención de sus principales aplicaciones.

En el capítulo quinto se lleva a cabo una clasificación geomecánica de los macizos rocosos de acuerdo a los métodos de clasificación mecánica existente, como son las clasificaciones de Terzaghi, Deere, Barton, Lien y Lunde. Antes de realizar esta clasificación mecánica se describen las pruebas de laboratorio y de campo para determinar las propiedades, parámetros y características que posee un macizo rocoso en una zona determinada. Estos ensayos ayudaran a completar y a ampliar la información requerida para la clasificación mecánica.

Se especifica en el capítulo sexto las diferentes variedades de deformaciones o fraguramiento que se pueden presentar en un macizo rocoso por efecto de los esfuerzos de compresión y algunos casos de tensión que sufre la corteza terrestre, por ejemplo: fallas, pliegues, diaclasas, buzamientos, esfuerzos tectónicos, discordancias, entre otros.

Para terminar se exponen las conclusiones de esta investigación.

CAPITULO 1

CLASIFICACION GEOLOGICA DE LAS ROCAS

Para clasificar las rocas se cuenta con varios procedimientos pero el más importante es el que se refiere a su origen; de acuerdo a él, las rocas pueden ser:

- A) Igneas
- B) Sedimentarias
- C) Metamórficas

A) ROCAS IGNEAS

Las rocas ígneas son aquellas que han sido formadas por la solidificación de un magma sobre o a una cierta profundidad debajo de la superficie terrestre.

Estas rocas debido a su forma de enfriamiento pueden ser intrusivas; las cuales se solidifican en el interior de la corteza terrestre; y extrusivas, las cuales fluyeron a la superficie durante las convulsiones de la corteza terrestre o después de ella, esparciéndose en forma de lavas.

Las rocas ígneas se clasifican de acuerdo con la profundidad a la que se forman, según su color y con la presencia o ausencia de cuarzo.

Las rocas ígneas pueden estar constituidas por granos de un solo mineral entrelazados o por una mezcla de varios o todos los nueve silicatos minerales: olivino, augita, hornblenda, biotita, anortita, albita, ortoclasa, moscovita y cuarzo.

Es conveniente mencionar, que las rocas ígneas, tanto intrusivas como extrusivas, tienen texturas diferentes, las cuales por lo general indican las condiciones bajo las cuales se enfriaron.

Las texturas entrelazadas gruesas (llamadas faneríticas, granitoide ó granítica), resultan de un lento enfriamiento, ayudadas notablemente por enormes cantidades de agua y otras sustancias volátiles. Las texturas finas (afaníticas o felsíticas, si los granos no se distinguen), resultan de un enfriamiento rápido, el cual, en realidad, puede tener lugar con tanta velocidad que únicamente se forma vidrio. Las texturas mezcladas (las llamadas porfiríticas), por lo general explican la representación de dos etapas de solidificación, consistente de grandes cristales que se llaman fenocristales, embobidos en una pasta de cristales afaníticos más finos, los que se solidificaron alrededor de los fenocristales.

Las rocas ígneas de color claro tienen un peso volumétrico menor que el de las rocas de color oscuro.

Las Tablas A y B (Ref. 2) resumen las características, componentes y clasificación de las rocas ígneas.

TABLA A

| PRINCIPALES ELEMENTOS QUE FORMAN LAS ROCAS | | PRINCIPALES MINERALES QUE FORMAN LAS ROCAS | | R O C A S | | | |
|--|--|---|--|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| | | | | VITREAS O FELSÍTICAS (Extrusivas) | DÍQUES LAMINARIS INTRUSIVAS LACOLITOS | GRANODIÓRITAS (Intrusivas) | |
| Oxígeno O | | Sílica (Cuarzo) | | RIOLITA | Pórfido riolítico | Pórfido granítico | GRANITO |
| Silicio Si | | Si O ₂ | | TRAQUITA | Pórfido traquítico | Pórfido sienítico | SIENITA |
| Aluminio Al | | Ortoclasa K Al Si ₃ O ₈ | | DACITA | Pórfido dacítico | Pórfido de androsorit | GRANODIÓRITA |
| Potasio K | | Plagioclasa | | ANDESITA | Pórfido andesítico | Pórfido diorítico | DIORITA |
| Sodio Na | | Ca Al ₂ Si ₂ O ₈ | | BASALTO | Pórfido basáltico | Pórfido gabro | GABRO |
| Calcio Ca | | Na Al Si ₃ O ₈ | | AUGITITA | Pórfido de augitita | Pórfido de piroxenita | PIROXENITA PERIDOTITA |
| Hierro Fe | | Silicatos Ferromagnesianos | | LIMBURGITA | | | |
| Magnesio Mg | | Micas | | | | | |
| | | Hornblenda | | | | | |
| | | Piroxena | | | | | |
| | | Olivino | | | | | |

TABLA B

| ROCAS VOLCANICAS | | | |
|-----------------------|---------------------------|--------------------------|---------|
| ORIGEN | NATURALEZA | R O C A | |
| ERUCCIONES TRANQUILAS | VITREA | OSBIDIANA | |
| | | PERLITA | |
| | | PIEDRA POMEZ RETINITA | |
| ERUCCIONES EXPLOSIVAS | PIROCLASTICA (FRAGMENTOS) | PIEDRA POMEZ | |
| | | BLOQUES | |
| | | BOMBAS | |
| | | SUELTAS | |
| | | CONSOLIDADAS | |
| | | GRAVAS | BRECHAS |
| | | LAPILLI | BRECHAS |
| ARENAS | ARENISCAS | | |
| CENIZAS | TODAS | | |
| POLVOS | TODAS | | |

ACUMERADO

B) ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias son rocas que han sido formadas por la solidificación o litificación de sedimentos, por lo cual, se hallan frecuentemente dispuestas en capas o estratificadas.

Las características de las rocas sedimentarias dependen de una serie de factores que intervienen previamente a su formación, durante la litificación y posteriormente al quedar la roca expuesta a alteraciones por procesos diversos.

Los factores que determinan la clase de roca y sus condiciones particulares, son principalmente: la fuente o fuentes de los sedimentos, el agente erosivo y transportador, los medios ambientes de transporte y de depósito y la manera en que la roca se litifica. Posteriormente, sus propiedades son modificadas por los esfuerzos a que queda sometida, que la fracturan y la deforman y por la influencia de fenómenos tales como el metamorfismo y el intemperismo. Estos fenómenos pueden afectar tan profundamente las características de la roca que ésta se deforma completamente, dando lugar a una roca metamórfica o a un suelo.

El material que constituye las rocas sedimentarias se origina de dos maneras. Primero, los depósitos pueden ser acumulaciones de minerales y rocas derivadas bien de la erosión de rocas existentes o de los productos intemperizados de estas rocas. En segundo término, los depósitos pueden ser producidos por procesos químicos; estos depósitos se sedimentan generalmente por la precipitación de material disuelto en agua. Este fenómeno puede efectuarse bien directamente a través de procesos inorgánicos o indirectamente mediante la intervención de plantas o animales.

En las rocas sedimentarias, los tres minerales más comunes son la arcilla, el cuarzo y la calcita, ya sea bien o en combinaciones, responden por casi todo el por ciento de las rocas sedimentarias (el 75% de la superficie terrestre está cubierta por rocas sedimentarias); pero otros materiales se presentan en cantidades suficientemente grandes para formar estratos definidos, por ejemplo, feldespatos y micas.

Existen dos tipos principales de textura en las rocas sedimentarias: la clástica, donde las rocas han sido formadas de depósitos de mineral y de fragmentos rocosos; y la no-clástica en la que los granos están entrelazados. Estas últimas rocas tienen casi la misma apariencia que las ígneas de textura cristalina.

Por otra parte, el proceso de depósito de un sedimento también afecta la textura de la roca sedimentaria que se desarrolla a partir de él.

De acuerdo con su génesis, a las rocas sedimentarias se les clasifica en tres grupos: mecánico, químico y orgánico.

a) Sedimentos de origen mecánico.

Comprende los sedimentos constituidos por partículas individuales separadas por medios mecánicos. Son primordialmente detríticos y representan agregados sueltos que son transportados y finalmente acaban por depositarse; dan lugar posteriormente a la formación de una roca por procesos de compactación o cementación.

b) Sedimentos de origen químico.

Son precipitados en los cuales los cristales individuales son unidos por enlaces químicos. Constituyen una parte importante dentro de las rocas sedimentarias.

c) Sedimentos de origen orgánicos.

Son formados por la acumulación de las partes duras de organismos que al unirse por cementación forman una roca. Son las menos abundantes.

Los conceptos expuestos anteriormente se resumen en la siguiente Tabla C (Ref. 2).

C) ROCAS METAMÓRFICAS.

El metamorfismo puede definirse, en forma general, como cualquier cambio físico o químico en una roca. Sin embargo, el término se restringe a cambios profundos que involucran una nueva cristalización o nueva textura en las rocas.

Las rocas metamórficas han sufrido modificaciones en el estado sólido como consecuencia de intensos cambios en la temperatura, presión y ambiente químico, todos producidos por las mismas fuerzas que pliegan, afallan, inyectan magma y elevan o degradan a las rocas mismas.

La siguiente Tabla D (Ref. 2) proporciona una clasificación simplificada de las rocas metamórficas.

TABLA C

| ROCAS SEDIMENTARIAS | | | |
|---------------------|----------------------|---|---|
| ORIGEN | AGENTE TRANSPORTADOR | SEDIMENTO SUELTO | SEDIMENTO CONSOLIDADO |
| MECANICO | AGUA | GRAVA (Aristas Redondeadas) GRAVA (Aristas Agudas) ARENA LIMO ARCILLA | CONGLOMERADO BRECHA ARENISCA LIMOLITA ARGILITA } LUTITA |
| | VIENTO | MEÑADOS LOESS | ARENISCA |
| | HIELO | GRAVAS ANGULOSAS ARENA LIMO ARCILLA | TILITA |
| ORIGEN | NATURALEZA | SEDIMENTO | CONSOLIDADO |
| QUIMICO | CALCÁREA | CALIZA DOLOMITA ARAGONITA TRAVERTINO MARGA | |
| | CALCAREA ARCILLOSA | | |
| | SILICOSA | PEDERNAL GISEMITA | |
| | SALINA | EVAPORITAS: | SAL GEMA YESO BORAX TEQUESQUITE CRISTALILLO |
| ORGANICO | CALCÁREA | CALIZA CORAL COQUINA CRETA | |
| | SILICOSA | DIATOMITA (tríce) | |
| | CARBONOSA | TURBA LIGNITO HULLA ANTRACITA | |

TABLA D

| Textura | Estructura | |
|--------------------------------|-------------------|--|
| | Polida | Massiva |
| Cristalina gruesa | gneiss | conglomerita gneis granítico |
| Cristalina media | esquistos | Sericita mica talco clorita hornblenda, etc. |
| Cristalina fina a microscópica | filita pizarra | hornfels antracita |

CAPITULO 2

INFORMACION GEOTECNICA EXISTENTE

Un estudio geológico, no importa lo breve que sea, es muy útil para el planeamiento e interpretación de una investigación completa del suelo. El propósito principal de los estudios geológicos es determinar la naturaleza de los depósitos subyacentes en el lugar de la investigación. Con este estudio se pueden determinar los tipos de suelos y roca que probablemente se encontrarán y seleccionar los mejores métodos para las exploraciones del subsuelo, antes de comenzar las perforaciones, la toma de muestras o los ensayos en la obra. La historia geológica puede revelar alteraciones que se han producido, como fallas, inundaciones o erosión y que han cambiado el carácter original del suelo o de la roca. También puede indicar la posibilidad de defectos en la roca, como grietas, fisuras, diques, capas intrusivas, simas y cavernas.

A) MAPAS GEOLÓGICOS

En los mapas geológicos se registra la información acerca de las clases de roca de la zona. Los mapas geológicos son por lo común, mapas topográficos a los cuales se les ha sobrepuesto color, mediante reimpresión, para señalar los diferentes tipos de roca. La escala que se usa normalmente es de 1:50 000.

Hay dos tipos básicos de mapas geológicos: los superficiales y los profundos. Los primeros se ejecutan a partir de los datos recogidos en la superficie del terreno, y los segundos de los registros de pozos y sondeos.

Los mapas superficiales se suelen dividir en: mapas de suelos y mapas de subsuelos. Los mapas de suelos representan el carácter y distribución de los distintos terrenos en la superficie, tales como los afloramientos y tierras. En dichos mapas éstas se clasifican de acuerdo con su origen, tal como edóico, lacustre, aluvial, etc. Los mapas geológicos del subsuelo representan la superficie de la tierra, como aparecería si se eliminara todo el revestimiento.

En los mapas geológicos se determinarán dos factores importantes: la estructura geológica y la topografía de la zona. El mapa es una proyección de un conjunto de superficies curvas y planas que cortan la masa tridimensional de las rocas. Por medio de un estudio de clases de roca y afloramientos deben de conducir a la reconstrucción de la historia geológica de la zona.

El grado de detalle de un mapa geológico especial depende del destino que se le vaya a dar. Normalmente, debe verse en él la información siguiente:

a) La litología o estratigrafía de la zona, es decir, los tipos de roca, cómo se presentan, tamaño de grano, color y constituyentes minerales (LAMINA I, Ref. 22).















b) La estructura de la roca, comprendiendo la estratificación, laminación, rumbo y buzamiento de las capas, epizarramiento, fracturas, diaclasas, etc., (LAMINA II, Ref. 22).

















c) La profundidad y características del revestimiento y roca meteorizada o intemperizada (LAMINA III, Ref. 22).

d) Los detalles de Geología Estructural, tales como fallas, rumbos y buzamientos de las formaciones, ejes anticlinales y sinclinales, etc., se representan por símbolos. También se indican los contactos entre las distintas formaciones (LAMINA III, Ref. 22).

A cada mapa acompaña una leyenda o explicación de los símbolos utilizados al componerlo y en ella se incluyen los símbolos estratigráficos. Los símbolos utilizados para cada una de las distintas formaciones que aparecen en un mapa dado se anotan en la explicación en orden descendente, con las más recientes encabezando la lista y la más antigua en la parte inferior. Para indicar tramos específicos, se utilizan letras pequeñas.

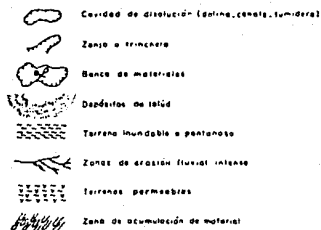
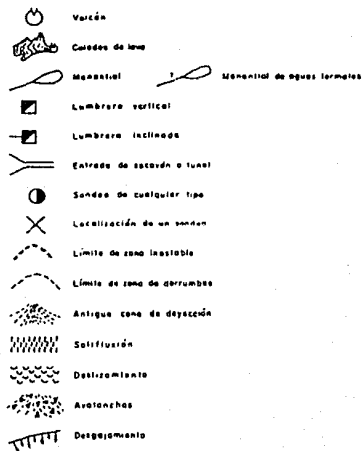
La geología de la zona se puede ilustrar mediante el dibujo de un corte, para mostrar las formaciones de las rocas en una perspectiva vertical. El corte geológico representa los estratos tal como aparecerían en un plano vertical que cortar al terreno. Al preparar un corte, el geólogo aprovecha también la información obtenida de los sondeos, registros geofísicos, minas, trincheras y cortes en las carreteras, investigaciones geotécnicas y otros tipos de excavaciones en el lugar.

| | |
|---|--|
|  | Contacto, mostrando el echado. Di. arriba donde es inferior |
|  | Contacto recíproco recíproco |
|  | Contacto de gradación |
|  | Contacto estufa |
|  | Flecha normal, mostrando el echado. Línea discontinua donde se interseca |
|  | Flecha recíproca, mostrando el echado. Línea discontinua donde se interseca |
|  | Flecha recíproca |
|  | Flecha normal, mostrando el echado. Línea discontinua donde se interseca |
|  | Flecha normal de deslizamiento, mostrando el echado. Línea discontinua donde se interseca. Las flechas en el lado elevado, la flecha en el lado de 45° |
|  | Zona de corrimiento con expresión del echado general |
|  | Eje de simetría. Muestra el rumbo del plano axial y su buzamiento. Línea discontinua donde se está localizada con precisión |
|  | Eje de simetría recíproca, indicando la dirección del echado de sus flancos |
|  | Eje de simetría, con línea interrumpida donde se está localizada con precisión |
|  | Eje de simetría recíproca, indicando la dirección del echado de sus flancos |

| | |
|---|--|
|  | Dama |
|  | Depresión |
|  | Rumbo y echado de capas |
|  | Rumbo de capas verticales |
|  | Rumbo y echado de capas recumbentes |
|  | Rumbo de capas horizontales |
|  | Rumbo y echado de juntas |
|  | Rumbo de juntas verticales |
|  | Rumbo de juntas horizontales |
|  | Rumbo y echado de planos de fractura o sifonación y tajamiento |
|  | Rumbo de planos verticales de fractura o sifonación y tajamiento |
|  | Rumbo de planos horizontales de fractura o sifonación y tajamiento |
|  | Rumbo y echado de formación de gneis o de esquisto |
|  | Rumbo de formación vertical de gneis o de esquisto |
|  | Rumbo de formación horizontal de gneis o de esquisto |
|  | Diques con expresión del echado |

Simbología geotécnica 1a. Parte

LAMINA II



SÍMBOLOS ESTRATIGRAFICOS

| | |
|------------------|-------------|
| Q | Cuaternario |
| T | Terciario |
| T _{pl} | Plioceno |
| T _m | Mioceno |
| T _e | Oligoceno |
| T _o | Eoceno |
| T _{pal} | Paloceno |
| M | Mesozoico |
| K | Cretácico |
| J | Jurásico |
| T | Triásico |
| Pz | Palozoico |
| Pz | Precámbrico |

Simbología geotécnica 2a. Parte

LAMINA III

B) MAPAS GEOTECNICOS.

Los mapas geotécnicos son planos que contienen datos geológicos e información de utilidad práctica para un proyecto de ingeniería determinado. Esta información proviene de observaciones detalladas de campo y mediciones tanto de campo como de laboratorio.

Las unidades que constituirán estos mapas estarán definidas con base en propiedades ingenieriles de los materiales, al comportamiento de los mismos, o a otras características determinadas por la finalidad específica del mapa.

Existirán, en este aspecto, tantos mapas geotécnicos como tipos de obras que requieran un estudio detallado de las propiedades y comportamiento de los materiales.

Los mapas geotécnicos registran las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y suelos existentes en una zona. Este tipo de mapas muestran el fracturamiento, intemperismo, el clivaje y otras estructuras lineales para zonas rocosas sometidas a esfuerzos grandes y deformación altas, como los esquistos.

Debido a las numerosas propiedades geotécnicas que se miden durante un levantamiento, hay el peligro de incluir demasiadas en un solo mapa, por lo que el usuario se confunde con tanta información, por ello, se requiere que se haga una clasificación de mapas geotécnicos.

La siguiente lista de propiedades de rocas y suelos se puede incluir en los mapas:

- Grado y profundidad del intemperismo.
- Profundidad a la cual se encuentra el macizo rocoso.
- Riesgos geológicos, por ejemplo, la probabilidad de deslizamientos o terremotos.
- Inestabilidad de pendientes, deslizamientos en desarrollo, abundamiento, susceptibilidad a los desprendimientos.
- Zonas de alto esfuerzo tectónico, causado por movimientos.
- Discontinuidades.
- Resistencia, deformabilidad, porosidad, permeabilidad.

- Distribución del tamaño de partícula.
- Límites de plasticidad.
- Descripciones litológicas de las rocas, depósitos superficiales de origen glacial y de otros tipos, incluyendo a veces espesores de los depósitos.

Mapas geomorfológicos: topografía y origen, edad y unidades individuales geomórficas con mayor detalle que en los mapas topográficos publicados.

- Factores geodinámicos: rapidez de erosión y sedimentación, sismicidad, cambio en el volumen de los suelos (factores de abundamiento), movimiento de dunas de arena y otros procesos como deslizamientos.

- Relleno: particularmente en zonas urbanas donde se están haciendo nuevas construcciones. Crecimiento vertical y lateral de ciudades a lo largo de su vida. Cavidades naturales del terreno, canteras fuera de uso y bancos de préstamo de materiales para construcción, como arenas, gravas, arcillas, tezontle, tobas limo-arenosas (tepetate), etc, que se rellenan con desechos y de material de demolición. Las zonas de relleno reciente se prefieren para nuevos asentamientos humanos y requieren diseños especiales, por ejemplo, losa de cimentación hasta para una casa habitación.

- Mapas de documentación: registro de las fuentes de información geotécnica de la zona, distribución de pozos de sondeo y tipo, fechas, tiros de mina, registro de extracción de minerales. (Ref. 2B).

- Mapas de isopacas: líneas de unión de puntos de igual espesor de depósito o de tipo de roca.

- Categorías de pendientes: ángulos de pendientes, de 0° a 5°, mayores de 5° y menores de 10°, etc. Las pendientes inversas también se deberían de registrar. La unidad de peso volumétrico y contenido de humedad natural se puede registrar en los mapas de pendientes debido a su estrecha relación.

- Hundimientos de minas: para zonas donde ha habido minas de arcas, carbón o de metales durante largos periodos. Las antiguas zonas mineras están llenas de tajos, pozos de muestreo, rellenos de nuevo o no, tajos de campana, galerías superficiales, etc. También puede haber tiraderos de desechos, algunos pueden cubrir antiguos tiros y no hay clase alguna que indique su presencia en la superficie.

- Trazado estereográfico (red estereográfica) del buzamiento de plenos de diaclasas, fallas y otros elementos que forman planos en las zonas rocosas. Los polos de los planos se dibujan igual que el ángulo de buzamiento y el azimut.

- Zonificación geológica de ingeniería: los mapas de estabilidad son un ejemplo. Se hacen en escalas pequeñas para un tipo particular de ingeniería, por ejemplo carreteras, túneles, presas, nuevas ciudades, para ayudar a escoger el sitio o ruta, de tal manera que las zonas donde se esperan problemas de rocas se pueden evitar en lo posible.

Esta lista no está completa, pero muestra un amplio rango de posibilidades de propiedades de rocas y suelos que pueden ser mapeados.

En la Tabla A (Ref. 22) se pretende establecer una clasificación de mapas geotécnicos, regionales y locales, para que sean utilizadas de manera conveniente durante el desarrollo de cualquier proyecto.

TABLA A
CLASIFICACION DE MAPAS GEOTECNICOS

| Tipo de mapa | Información contenida | Escala usual | Preparados por: | Método de elaboración | Aprovechamiento Ingenieril |
|---------------------------------------|--|-----------------------|---|---|--|
| A. MAPAS GEOTECNICOS REGIONALES | Datos de geología general, enriquecidos con información de interés ingenieril e interpretaciones | 1:10000 o menores | Instituciones gubernamentales ó centros de investigación | Fotografías aéreas, observaciones de campo, mapas topográficos previos e información geológica existente | Planeación y reconocimiento preliminar. Información general sobre la región y de los materiales existentes en ella |
| B. MAPAS GEOTECNICOS LOCALES | | | | | |
| a) Etapa de reconocimiento preliminar | Clasificación y descripción de suelos y rocas, geomorfología, hidrografía, geodinámico externo, sismicidad y vulcanismo, discontinuidades y localización de materiales | 1:500 o 1:10000 | Ingenieros geólogos, especialistas en minas, geología estructural, geomorfología o geotécnica | Fuente interpretación, recorridos de campo, uso de brújula, cinta y clinómetro | Planeación y reconocimientos detallados |
| b) Etapa de investigación del sitio | Datos sobre propiedades específicas de los materiales, levantamiento de unidades de diferente comportamiento ingenieril | 1:100 o 1:5000 | Ingenieros geólogos de mecánica de suelos o rocas y geotécnicos | Los anteriores, más los datos obtenidos de los pruebas mecánicas de laboratorio efectuadas en los materiales obtenidos de sondajes, PCA, sacos y muestras superficiales | Detalles sobre sitios propuestos y problemas que se pudieran presentar |
| c) Etapa de construcción de una obra | Datos sobre aspectos importantes durante la construcción | 1:100 o 1:2000 | Ingenieros geólogos de mecánica de suelos o rocas y geotécnicos | | Detalles observados durante la obra y reconocimiento de problemas no previstos |

C) CARTA GEOLOGICA

Las cartas geológicas muestran los rangos generales de la estructura geológica de una zona determinada, no sólo a través de los diferentes tipos de rocas que afloran en la superficie, sino también del tiempo geológico en el que fueron formadas, es decir, de su posición relativa dentro de la columna estratigráfica. Estrictamente aparecen delimitadas unidades cronoestratigráficas generales que se presentan contrastadas por diferentes colores y acompañadas por los rasgos estructurales regionales que las afectan. Las pantallas que se utilizan en la carta geológica 1:1 000 000 marcan diferencias en la composición de las rocas volcánicas.

Asimismo, aparecen localizadas las principales minas, zonas geotérmicas y aparatos volcánicos que completan la información geológica general.

Se deberá de realizar una inspección preliminar en el campo para normar criterios estratigráficos, litológicos, estructurales y económicos, de carácter general, para realizar la interpretación.

A las rocas se les agrupa por medio de la litología considerando ciertas características. Las rocas ígneas se agrupan de acuerdo a los parámetros de contenido mineral y su ocurrencia, en tanto que la división de las rocas sedimentarias se basa en su origen y en el tamaño de sus componentes, mientras que en las rocas metamórficas, la agrupación se hace según sus afinidades en la trama y textura.

D) FOTOGRAFIA AEREA

Se refiere a la fotografía tomada desde el aire con una cámara dirigida verticalmente hacia abajo en el momento de la exposición. La inmensa mayoría de las fotografías aéreas utilizadas con el fin de trazar mapas son del tipo vertical. Los principios para la preparación de mapas a partir de fotografías son básicamente los mismos para fotografías terrestres y aéreas.

Cada fotografía debe tener registrada en ella los siguientes datos: número de vuelo, número del parte si lo hubiera, altura de vuelo del avión, distancia focal de los lentes de la cámara, fecha de la fotografía y lugar representado. Los resultados de un reconocimiento aéreo, a causa de la inestabilidad de la cámara fotográfica y la posible falta de exactitud en la

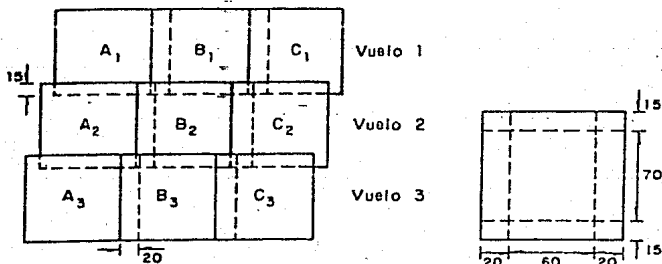
determinación de la altitud de vuelo son, en general, menos exactos que los de un buen levantamiento topográfico sobre el terreno, pero tiene la ventaja de cubrir muy grandes áreas en poco tiempo.

La propiedad que tienen las fotografías aéreas es de suministrar una perspectiva completa, tridimensional y permanente del suelo, en cualquier escala solicitada por el usuario. La escala de una fotografía depende de la relación de altura de vuelo a la distancia focal de la cámara fotográfica. Cuando más alto sea el vuelo, menor será la escala, pero será mayor el terreno cubierto por el reconocimiento. Si se utiliza una cámara fotográfica de distancia focal larga, se obtienen fotografías de mayor escala.

La utilización de un estereoscopio para examinar las fotografías aéreas permite ver una parte del terreno en perspectiva. Como consecuencia, se puede ver claramente los accidentes geográficos. Sin embargo, el relieve se ve exagerado, lo que se debe tener en cuenta al valorar los resultados de dicho estudio. Las fotografías aéreas se colocan en una mesa y se observan a través de un estereoscopio de bolsillo de un aparato estereoscópico especialmente construido. Para poderse utilizar con un estereoscopio, las fotografías deben traslaparse; se recomienda que se monten en un 60% (Fig. A., Ref. 21). Las fotografías deben de colocarse siempre de manera que las sombras que aparecen en ellas caigan hacia el observador.

FIGURA A.

MONTAJE FOTOGRAFICO



Acotaciones, en %

El fotogeólogo primero tiene que interpretar los datos fotográficos, que consisten solamente en las variaciones de tonos y relieve del modelo estereoscópico, representadas por formas de relieve, construcciones humanas, alineaciones estructurales, vegetación, contacto de los afloramientos rocosos, textura de las rocas, etc. Estos constituyen los datos geológicos. La segunda etapa de trabajo consiste en interpretar estos datos geológicos en términos de estructuras geológicas y litológicas, ya que ambas fases han tenido lugar simultáneamente; el hecho de que existan dos fases es por lo general omitido.

Rasgos a estudiar en una fotografía desde el punto de vista geotécnico:

- 1) Forma del terreno.
- 2) Pauta de la red hidrográfica.
- 3) Forma y pendiente de los barrancos.
- 4) Cobertura vegetal.
- 5) Cultivo o tierras utilizadas por el hombre.

La forma del terreno permite frecuentemente la identificación del tipo de suelo y su origen. Por ejemplo la superficie del terreno formado por loess es una repetición de colinas idénticas o parecidas, con una serie de lomas paralelas, mientras que las dunas forman una superficie característica en forma de olas. Los sedimentos se reconocen en las fotografías por su apariencia estratificada. En general, esta estratificación está representada por variaciones en el relieve y tonalidad, pero puede observarse por variación en uno de ellos solamente. Una superficie horizontal del terreno sólo indica el terreno de que está formada.

La pendiente o echado de las laderas, sobretodo en la proximidad de las corrientes de agua donde el declive tiende a ser más fuerte y a estar erosionado por la acumulación de agua escorrentía, puede indicar el carácter del suelo.

Los terrenos detríticos, como gravas y arenas tienden a formar suaves pendientes, debido a que adopta el ángulo de reposo del material, el cual no puede ser nunca mayor a 45°; en el caso de las arcillas se pueden tener pendientes con ángulo de reposo de 90°, pero al sufrir el material una pérdida de contenido de humedad el ángulo de reposo va disminuyendo, esto implica que se forme una pendiente suave o nula de acuerdo a la velocidad con que disminuya la cohesión.

Por el tono en la fotografía se puede determinar el contenido de agua del suelo. Los colores muy oscuros en un terreno relativamente llano pueden indicar que el agua está cerca de la superficie y la vegetación, por lo tanto, es bastante frondosa.

Por el contrario, las zonas muy claras o incluso blancas en la fotografía y la escasez de vegetación pueden indicar que cabe esperar un grado de humedad bajo y aguas freáticas muy profundas.

El tipo de vegetación, así como su densidad, indican también si el suelo contiene humedad. Algunos tipos de planta, como los sauces; conocidas como plantas indicadoras, se sabe que solamente crecen donde el contenido de humedad es alto, y por el contrario, hay otros tipos, como la salvia y el mezquite, que crecen donde el contenido de humedad es bajo.

La forma o disposición de la red hidrográfica es característica de un suelo, de una roca o de un complejo de varios terrenos dados, y un cambio del suelo o de la roca tipo de lugar a un cambio en la forma de la red.

Disposiciones básicas de la red hidrográfica:

a) La red hidrográfica dendrítica (forma de árbol) se desarrolla en rocas horizontales homogéneas y manifiesta una uniformidad en todas direcciones. La red puede estar considerable o ligeramente desarrollada, según el tipo de roca sobre la que se ha formado. Figura A.

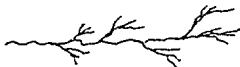


FIGURA A

b) La disposición de espaldera (forma de viña) se desarrolla generalmente en rocas plegadas, o buzando, con una serie de fallas paralelas. Los tributarios primarios de la corriente de agua principal son largos y rectos, y frecuentemente paralelos entre sí y a la corriente principal. Los tributarios secundarios son cortos y tiesos, y generalmente cortan a los tributarios principales en ángulo recto. Figura B.



FIGURA B

c) La red hidrográfica radial consiste en una serie de corrientes que fluyen radialmente al centro (por ejemplo, un cono volcánico) o hacia él (por ejemplo, una cubeta). Figura C.



FIGURA C

d) En la red paralela las corrientes son casi paralelas entre sí. Estas redes pueden desarrollarse en terrenos bastante sueltos, más o menos, homogéneos, como los rellenos de valles. Figura D.



FIGURA D

e) En una disposición anular las corrientes principales son radiales y los tributarias son anulares, corriendo alrededor de un domo, por ejemplo. Figura E.

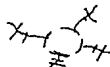


FIGURA E

f) Las corrientes que siguen las fallas y grietas en rocas fracturadas producen una red rectangular. Figura F.



FIGURA F

Los datos que se pueden obtener a partir de una fotografía aérea, para determinar el tipo de roca son:

- 1) El tono de la roca en relación al de las rocas contiguas.
- 2) La resistencia de la roca a la erosión en relación a las rocas contiguas.
- 3) El contacto de separación del total de la roca.
- 4) La expresión topográfica de la roca en total.
- 5) La configuración de las litoclasas.
- 6) La configuración de las fallas.
- 7) El patrón de drenaje.
- 8) La cubierta vegetal.
- 9) La estratificación o vestigios de las alineaciones de estratificación.
- 10) Las alineaciones de foliación.
- 11) El entorno geológico de la zona.

Los factores que afectan a la apariencia fotográfica de una roca son:

- a) El clima.
- b) La vegetación que la cubre.
- c) El suelo.
- d) La valoración absoluta de la erosión.
- e) El valor absoluto de la erosión en relación a la roca madre circundante.
- f) El color y reflectividad.
- g) La composición.
- h) Características físicas.
- i) Intensidad de la meteorización (intemperismo).
- j) La textura.
- k) La estructura.
- l) Los factores inherentes del tipo de fotografía y las condiciones bajo las cuales se tomó la fotografía.

La fotogeología nunca se puede separar de la geología de campo, porque, en principio, toda la interpretación fotogeológica depende fundamentalmente de los criterios elaborados por comparación del modelo estereoscópico con la observación del terreno de la zona correspondiente; y en segundo lugar; porque el fin último de casi todas las interpretaciones fotogeológicas es la confección de algún tipo de mapa geológico, en el que se combinan los datos obtenidos a partir de ambas investigaciones, la de campo y la interpretación de fotogeológica.

E) FOTOGRAMETRIA.

La fotogrametría se define como el arte, la ciencia y la tecnología orientada a obtener información relevante de diversos objetivos físicos de la corteza terrestre y de su medio ambiente, a través de procesos de medición e interpretación de imágenes fotográficas.

Esencialmente, fotogrametría significa medición por medio de fotografías. Para lograr información confiable sobre las características geométricas de un objetivo, se sustituye la medición directa por medición en fotografía, o en modelos fotogramétricos tridimensionales, formados por pares de fotografías.

La fotogrametría empezó a usarse para la elaboración de planos a diferentes escalas. Los métodos fotogramétricos dependen esencialmente de los principios geodésicos.

Frecuentemente la fotogrametría se divide en dos especialidades de acuerdo con el tipo de fotografía utilizada:

a) Fotogrametría terrestre.- La fotografía es usada en una posición tal que el eje de la cámara fotográfica resulta horizontal y paralelo al terreno o corteza terrestre.

b) Fotogrametría aérea.- Fotografías obtenidas desde vehículos aéreos o espaciales. El eje óptico de la cámara fotográfica resulta sensiblemente perpendicular al terreno o corteza terrestre.

El trabajo de fotogrametría, a grandes razgos, se lleva a cabo en el orden siguiente:

- a) Levantamientos aerofotográficos, vuelos altos y bajos.
- b) Laboratorio fotográfico: revelado, copias de contacto y diapositivas.
- c) Apoyo terrestre: posición y nivelación.
- d) Estereotriangulación numérica.
- e) Procesamiento electrónico: apoyo, triangulación y fotointerpretación.
- f) Restitución: compilación, planimetría y curvas de nivel.
- g) Edición: grabado, preparación de originales e impresión.

De acuerdo a la técnica que se emplee para tratar y resolver los problemas fotogramétricos, la fotogrametría se clasifica en: gráfica, analógica y analítica. La fotogrametría gráfica es la menos precisa y es donde se emplean dibujos y gráficas para encontrar las soluciones a los problemas. La fotogrametría analógica es la de uso más generalizado y resuelve los problemas fotogramétricos mediante los múltiples analógicos (técnicas y métodos de análisis) que existen en el mercado. En la fotogrametría analítica todos los problemas se resuelven numéricamente.

F) PERCEPCION REMOTA

Los métodos de percepción remota tienen como objetivo obtener información sobre la geometría y propiedades físicas de los materiales sin entrar en contacto directo con ellos. A parte de la fotografía, que por costumbre todavía se trata por separado, los diversos métodos de percepción remota incluyen la medición de la gravedad, el magnetismo, las pulsaciones de reflejo de la energía electromagnética y la radiación del calor.

Las técnicas de percepción remota se pueden aplicar tanto desde un punto fijo como desde un avión en movimiento. El tamaño de los objetos investigados puede variar considerablemente.

En las técnicas activas de percepción remota, la energía es emitida por una fuente especial de energía y se registra la energía reflejada; el resultado de esta interacción con el objeto proporciona información típica sobre él. Las técnicas pasivas de percepción remota perciben la energía originalmente emitidas por otras fuentes, tales como la luz solar, temblores, disturbios en el campo magnético, etc.,.

La percepción remota puede hacerse desde aviones o naves espaciales, incluyendo satélites automáticos, empleando diversos sensores. Los datos obtenidos por los sensores pueden ser procesados e interpretados automáticamente, hasta cierta extensión, y así un gran volumen de información, puede manejarse con rapidez.

B) FUENTES DE INFORMACION GEOLOGICA.

Las fuentes de información que enseguida se mencionan, cuentan con informes o publicaciones de contenido temático muy variado, algunos son de carácter confidencial, pero la mayor parte están al alcance de empresas o instituciones, particularmente si éstas son oficiales:

- Dirección de Estudios del Territorio Nacional.
- Comisión Federal de Electricidad.
- Consejo de Recursos Minerales.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Petróleos Mexicanos.
- Instituto de Ingeniería (UNAM).
- Instituto de Geología (UNAM).
- Instituto de Geofísica (UNAM).
- Instituto de Geología y Metalurgia de S.L.F.
- Instituto Mexicano del Petróleo.
- Instituto Nacional de Energía Nuclear.
- Instituto Politécnico Nacional.
- Sociedad Geológica Mexicana.
- Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos.
- Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros.
- Geological Society of America.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas.
- Sociedad Latino-Americana de Geotécnica.
- West Texas Geological Society.
- New Mexico Geological Society.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA).

CAPITULO 3.

RECORRIDOS GEOLOGICOS SUPERFICIALES.

A) EXPLORACION SUPERFICIAL

La exploración superficial será casi siempre el primer método a utilizarse, no sólo porque es el más inmediato y económico, sino porque puede decirse que es indispensable realizarlo en una primera etapa para definir el panorama geológico general de la región que se verá afectada por la obra. Es esta etapa donde se deberán determinar los principales tipos de masas rocosas, las estructuras geológicas principales, la ubicación de fallas, diques, contactos litológicos y demás aspectos que permiten señalar de manera general las deformaciones geológicas.

La exploración superficial se enfoca a la determinación de las características y propiedades mecánicas de las masas rocosas. Las masas rocosas son medios discontinuos y que su comportamiento mecánico obedece fundamentalmente a la naturaleza de las discontinuidades que presentan. Las propiedades mecánicas de las masas rocosas habrán de determinarse mediante ensayos de campo y que todas las otras formas de exploración y análisis son solamente recursos para estimar, y en el mejor de los casos tomarlas como base para correlacionar las propiedades mecánicas que han de determinarse con ensayos de campo.

Se realizará un recorrido preliminar, el cual consiste en una inspección geológica de campo que permitirá determinar si el o los sitios a investigar reúnen las condiciones necesarias. El primer paso es una recopilación de la información disponible sobre la Geología, la Topografía y el comportamiento de las estructuras construidas en la zona.

Para ello se recurre a buscar informes en mapas geológicos y topográficos previos, así como a datos estratigráficos, edafológicos, climatológicos, etc., la obtención de fotografías aéreas y de satélite pueden ser de gran ayuda para la planeación de los siguientes estudios. Cuando se ha obtenido y estudiado esa información se realiza un examen directo sobre el terreno o reconocimiento de campo, con la ayuda de fotografías aéreas y planos, para localizar los sitios de interés geológico que habrá de visitar.

Después del reconocimiento preliminar se programan los levantamientos geológicos con el objeto de obtener la Geología regional y local del área en estudio, buscando detectar los problemas geológicos que deberán de resolverse por medio de estudios más detallados.

B) DATOS GEOLOGICOS REQUERIDOS

En forma general se enlistarán en seguida los datos geológicos requeridos durante esta etapa:

- Litología: naturaleza, características texturales, y propiedades de las rocas, secuencia estratigráfica, espesor, distribución y origen de las diferentes unidades.
- Geomorfología: evolución de las formas y su relación con otros fenómenos y accidentes, erosión, movimiento en la masa del terreno, vulcanismo, focos sísmicos, topografía.
- Suelos: origen, clasificación SUCS, espesor y sus propiedades ingenieriles (resistencia al corte, compresibilidad, permeabilidad, etc.).
- Estructuras Geológicas: pliegues, fallas, juntas, fracturas, foliación, estratificación, discordancia, así como también rumbo y echado de los planos que los representan.
- Geohidrología: niveles piezométricos de los acuíferos, manantiales y pozos artesianos.

En esta fase se utiliza un plano geológico o topográfico, fotos aéreas, brújula y un longímetro; si se requiere más detalle se utiliza una plancheta. Con la brújula es posible medir rumbos y echados, ángulos horizontales, pendientes de laderas; su uso es esencial para el levantamiento de planos geológicos.

El método más común se apoya en la fotografías aéreas, de ser posible previamente interpretadas o planos topográficos, en donde se planean los caminamientos, registrando sobre ellos cuidadosamente los rasgos geológicos. El caminamiento debe de ser casi perpendicular al rumbo de las capas o estructuras a casi 90 grados para poder atravesar toda la secuencia. Se van tomando el rumbo y echado de las formaciones atravesadas, haciendo una descripción de campo de la roca y si se considera conveniente se toman muestras para hacer los estudios en el laboratorio. Todo esto se marca en los planos o fotos mediante símbolos apropiados, tratando de limitar las diferentes litologías.

Los levantamientos con brújula se utilizan en zonas pequeñas o cuando no se requiere mucha precisión. Las escalas generalmente varían entre 1:25,000 y 1:50,000, relaciones que son las más útiles para el mapeo geológico de semidetalle y para la escalas comunes de los fotos y planos.

Se utiliza la plancheta cuando se necesita una mapa geológico y topográfico preciso de gran escala, que pueden ser de gran utilidad en problemas como desplazamientos de fallas, continuidad de estratos o de fallas estratigráficas. Es conveniente utilizar fotos aéreas en el levantamiento con plancheta, transfiriendo detalles con fotos a los mapas de plancheta. La escala varía entre 1:500 a 1:10,000 según los detalles a mapear.

Se ve limitada la exploración superficial por el grado de exposición que presenten los fenómenos geológicos de la zona de interés, el grado de intemperismo a que hayan estado sujetos, la accesibilidad a la zona que requiere ser explorada y el número, ubicación, extensión y accesibilidad de aquellos sitios en que esté expuesta la masa rocosa con todos los detalles que se requiere observar para definir las características geométrico-mecánicas de las discontinuidades y, en el mejor de los casos, llevar a cabo las pruebas de campo.

Para efectos de exploración de las discontinuidades de una masa rocosa se deberán determinar las siguientes características y propiedades:

- a) Orientación.- Ubicación relativa de los sistemas de juntas, y la magnitud y dirección de los echados.
- b) Espaciamiento.- Espaciamiento de una familia de discontinuidades.
- c) Persistencia.- Medición de la extensión de dos dimensiones.
- d) Rugosidad.- La rugosidad de las paredes que separan una discontinuidad.
- e) Resistencia a la discontinuidad.
- f) Abertura.- Separación existente entre las paredes de la junta.
- g) Relleno.- Material de relleno en la junta.
- h) Filtraciones.- Cantidad de agua que escurre por cada una de las discontinuidades.
- i) Número de sistemas de juntas.- Identificación de los diferentes sistemas de discontinuidades presentes en la masa rocosa.

- j) Tamaño de bloque.- Dimensiones medias de los bloques que se forman entre los sistemas de juntas.

C) METODOLOGIA REALIZADA "IN SITU"

Son diversas las investigaciones y las metodologías que se realizan "in situ" durante la exploración superficial en Mecánica de Rocas, sin embargo, entre las más importantes se puede citar:

- 1) La cartografía de las estructuras geológicas realizada por medios directos ya sea en los afloramientos, excavaciones a cielo abierto, socavones, etc., o métodos indirectos (fotografías aéreas o de satélite, etc.).
- 2) Representación gráfica y estadística de los datos geológicos, sobre todo estructurales.
- 3) Geofísica (microsismicidad).
- 4) Determinación de la calidad de roca (RDD).
- 5) Prueba de permeabilidad.
- 6) Pruebas con gatos mecánicos.
- 7) Medición de esfuerzos residuales, etc.

El objetivo primordial de una exploración geológica en la Geotecnia, es la determinación de las condiciones estructurales, estratigráficas, sedimentológicas, intemperismo y la recolección de muestras para su posterior estudio en los laboratorios.

CAPITULO 4

GEOFISICA

Las investigaciones en sitio por medio de métodos geofísicos y otros métodos tienen por objetivo obtener el máximo conocimiento posible sobre los macizos rocosos, superficiales o profundos, existentes en los lugares de proyecto. Los objetivos específicos incluyen la identificación de suelos y tipos de rocas; tectónica, grado de compactación, dureza, intemperismo, zonas de compresión y permeabilidad.

Los métodos geofísicos permiten programar mejor la investigación-localizar estratégicamente así como reducir la aplicación de otros métodos exploratorios (perforaciones, pozos a cielo abierto, lumbreras y galerías) y además confirmar los resultados de pruebas "in situ" con respecto a las características físicas del macizo rocoso. Por otra parte, estos métodos pueden proporcionar datos que permitan definir perfiles de roca sana, el nivel freático, grado de compresión de una masa de roca, profundidad del aluvión, profundidad del intemperismo, etc.

Hay que distinguir entre la exploración geofísica para proyectos de ingeniería, y la exploración geofísica para el petróleo. La geofísica aplicada a la ingeniería investiga las características específicas de los materiales del subsuelo, que llegan normalmente a profundidades máximas de algunos cientos de metros; mientras que la exploración de petróleo se dirige a profundidades de kilómetros. Para investigar el espesor de los estratos, sus propiedades, acuñamientos, la localización y las características de las fallas, fracturas, zonas de cizallamiento y otros aspectos de interés para la ingeniería, se requieren técnicas de medición específicas. Para analizar los detalles de interés para la ingeniería hacen falta instrumentos de gran precisión.

Los métodos geofísicos dentro de la Ingeniería Civil tienen un amplio uso, pues suministran información de las posibles estructuras geológicas del subsuelo.

Los métodos geofísicos más aplicables en la Ingeniería Civil son los siguientes:

- A) Sísmico
- B) Eléctrico
- C) Magnetométrico
- D) Gravimétrico
- E) Termométrico

Todas estas técnicas están basadas en las variaciones (anomalías) de las propiedades de los materiales del subsuelo, que evidencian la existencia de cuerpos o estructuras a profundidad. Es muy importante que estos métodos se complementen con la información geológica de las perforaciones o de otras exploraciones directas, para hacer interpretaciones más correctas y verídicas.

Los métodos geofísicos permiten hacer relaciones, que se basan en correlaciones empíricas entre varias cantidades, por ejemplo, la absorción de ondas elásticas y la conducta reológica de rocas sólidas y sueltas, la densidad, velocidad de propagación de ondas elásticas, resistividad eléctrica, conductividad del calor, permeabilidad, porosidad, estado de esfuerzos, saturación de agua, cementación, tamaño del grano, anisotropía, etc. Para aclarar estas relaciones se necesitan programas de investigación que permitan correlacionar más estrechamente los parámetros de ingeniería y geología sobre las estructuras de rocas con los resultados de las mediciones físicas y las características que de ellos se deriven. Como se ve, estos métodos son, sobre todo, procedimientos de exploración.

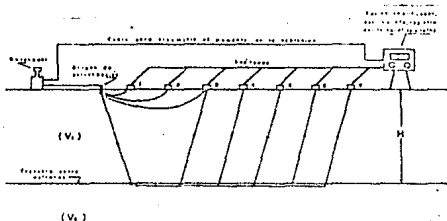
La elección de métodos debe de hacerse de una manera particular para cada caso y deberá de elegirse aquel que sea capaz de localizar con máxima seguridad y precisión el objetivo buscado; para elegirlos deben de tomarse en cuenta los siguientes factores:

- El tamaño, profundidad y forma que se espera del objetivo y el medio circundante.
- El poder resolutivo, el costo y rapidez de aplicación del método a elegir.
- La sensibilidad que presente respecto a accidentes topográficos y otras causas de perturbación.

Los métodos radioactivos investigan la densidad y el contenido de agua de las rocas y del suelo "in situ". Los métodos magnéticos y gravimétricos, que no dan resultados sino a gran escala, se emplean muy pocas veces (Ref. 26). Se utiliza solamente la investigación sísmica y la eléctrica, utilizándolas a veces simultáneamente, pues ambos no siempre coinciden en sus valoraciones.

A) METODO SISMICO DE REFRACCION

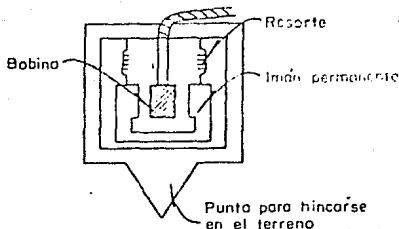
Este método consiste en medir el tiempo que transcurre para que las ondas sísmicas viajen desde el punto en que se originan por medio de una explosión artificial hasta los geófonos colocados a diferentes distancias (FIG A, Ref. 12); las ondas atraviesan los materiales a explorar y son registrados en una gráfica por los oscilógrafos. La generación de la onda puede lograrse con un martillo pesado que golpea una placa asentada en la superficie que simultáneamente dispara un microinterruptor que conectado al registrador señala el inicio de la prueba. El martillo se utiliza para estudios de poca profundidad (10m). Para estudios de mayor profundidad la onda se genera con la explosión de una pequeña carga de dinamita con detonador instantáneo colocada en una perforación somera (menor de un metro); la detonación también es registrada simultáneamente mediante un microinterruptor.



METODO SISMICO POR REFRACCION
FIGURA A

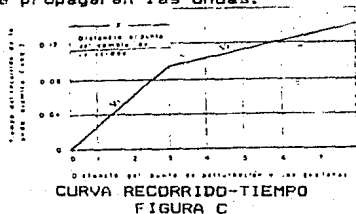
Los geófonos son dispositivos electromagnéticos que captan las oscilaciones del suelo y las transforman en señales eléctricas. Los geófonos comúnmente empleados registran sólo la componente vertical del movimiento (ondas longitudinales) y tienen sensibilidad entre 5 y 100 cps (ciclos por segundo); son de construcción robusta y tienen una punta en el eje vertical para hincarse en el suelo (FIG B, Ref. 21).

El aparato registrador es un oscilógrafo, cuyos elementos sensibles son pequeños galvanómetros que vibran al recibir la señal de los geófonos. Los galvanómetros llevan adheridos pequeños espejos, en los que inciden rayos de una fuente luminosa fija y los reflejan a un papel fotosensible para registrar el arribo de las ondas; tiene una escala de tiempo y un canal para captar el inicio de la prueba. Existen oscilógrafos que registran el arribo de las ondas en cinta magnética, pantalla luminosa o digitalmente.



GEÓFONO TIPO ELECTROMAGNÉTICO
FIGURA B

El procedimiento de la prueba consiste en hincar los geófonos en el suelo a lo largo de una línea; en uno de cuyos extremos se genera la onda. Los geófonos se colocan equidistantes entre sí, o bien más cercanos en el extremo donde se genera la onda, pero no a más de 20 m. En el caso de que se quiera investigar a grandes profundidades puede haber más puntos de exploración sobre la misma línea pero alejados de los geófonos extremos. Se cuenta en esa forma con los datos necesarios para determinar el achado de los estratos constitutivos del subsuelo. Con el tiempo de registro y conociendo la ubicación de cada receptor, se dibuja en el eje de las abscisas las distancias y en el eje de las ordenadas los tiempos de propagación; este diagrama se conoce como dromocrónico. Se obtiene de esta manera una gráfica Tiempo-Distancia (FIG C, Ref. 12), por medio de la cual es posible obtener las velocidades de propagación de las ondas sísmicas de las diferentes capas de materiales y la profundidad a la que ocurren estos cambios. Por medio de estas velocidades es posible darse una idea del tipo de litología de los materiales, su dureza o su densidad, ya que entre más denso sea un material, con mayor velocidad se propagarán las ondas.



Las velocidades de propagación de las ondas longitudinales permiten por comparación, inferir los posibles tipos de materiales en cada estrato. En la siguiente Tabla (Ref. 12) se muestran las diferentes velocidades de las ondas longitudinales en distintos tipos de roca y suelo.

TABLA

| MATERIAL | VELOCIDAD (ms ⁻¹) |
|---------------------------|-------------------------------|
| Suelo superficial | 170-500 |
| Arcilla | 1000-2800 |
| Arcilla arenosa | 975-1160 |
| Arcilla arenosa cementada | 1160-1280 |
| Limo | 760 |
| Aluvión | 550-1000 |
| Aluvión (terciario) | 800-1500 |
| Aluvión profundo | 1100-2360 |
| Depósito glaciar | 490-1700 |
| Dunas | 500 |
| Loess | 475-400 |
| Arena seca | 300 |
| Arenisca | 2400-4000 |
| Lutita | 1800-3800 |
| Marga | 3000-4700 |
| Caliza | 3000-5700 |
| Granito | 3000-5000 |
| Basalto | 4000-6000 |
| Dolerita | 4000-7000 |
| Gabro | 4000-7000 |
| Mármol | 3500-6000 |
| Cuarcita | 5000-6500 |

Entre los principales usos de este método están los siguientes:

- 1) Determinar el espesor de una o varias capas de roca debajo de la superficie.
- 2) Determinar la profundidad del basamento.
- 3) Auxiliar en la determinación de la estratigrafía y la estructura existente.

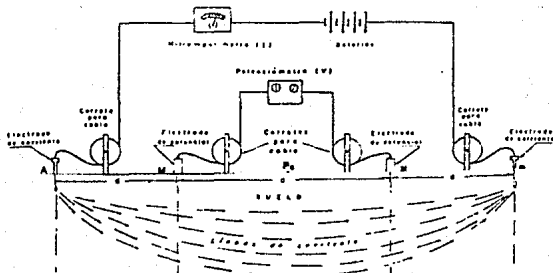
Se requieren ciertas condiciones para hacer interpretaciones más seguras:

- En general deben de ser rocas estratificadas y sus echados deben de variar de 0° a 35° cuando mucho.
- Entre más homogéneas sean las formaciones y mayor contraste de velocidades exista entre cada una de ellas será mejor la interpretación.
- Es importante que las velocidades se vayan incrementando con la profundidad, pues se puede caer en el caso de que no se detecten ciertas capas.

La profundidad a la que este método da información útil es limitada, lo mismo para fines de exploración que estructurales. Por consiguiente, la investigación del terreno por este método para cavidades subterráneas es en general poco práctico. Este tipo de ensaye puede ser útil en los proyectos de emplazamiento de presas, y de minas a cielo abierto.

B) METODOS ELECTRICOS

Existen varios métodos eléctricos de exploración que se basan en el estudio de la distribución de la corriente eléctrica en el subsuelo. Para fines de Ingeniería Civil, el Método de Resistividad es uno de los más utilizados (FIG D, Ref. 12). Consiste en la determinación de las resistividades aparentes de cada estrato, generando un campo eléctrico mediante el uso de un dispositivo cuadrupolar que mide tanto la intensidad (I) creadora del campo como la caída de potencial (V) en dos puntos del campo, para visualizar en forma independiente o global la imagen de la estructura geológica del subsuelo. La resistividad de un material se define como la resistencia de ohmios entre las caras de un cubo unitario de material. La unidad utilizada es el ohmio-metro (Ωm).



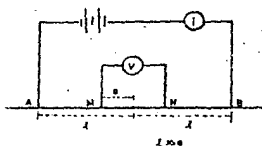
METODO ELECTRICO DE RESISTIVIDADES
FIGURA D

Este método es el más eficaz cuando las formaciones geológicas sobre las que se efectúa están estratificadas, tengan una razonable homogeneidad lateral en lo que respecta a resistividad y presenten un contraste marcado en esta propiedad, la inclinación no debe de sobrepasar los 30° y por último el relieve no debe de ser muy acentuado, pues dificulta su aplicación, ya que en general no pueden efectuarse correcciones por relieve. El método se basa en que los materiales del subsuelo presentan contrastes en su resistividad, según su contenido de agua y su densidad.

Se utilizan principalmente dos arreglos electródicos que son:

- a) Sondeo eléctrico vertical con arreglo Schlumberger (Ref.26).

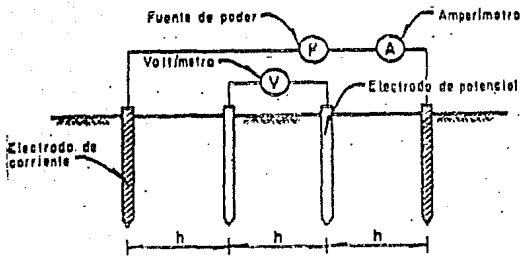
Consiste en hacer una serie de mediciones con un arreglo electródico tetrapolar (FIG E, Ref. 12), para obtener la resistividad a distintas profundidades en un punto dado de la superficie. Los electrodos de potencial (M,N) se fijan en una posición y se toman varias lecturas moviendo los electrodos de corriente (A,B); cuando las lecturas ya son lejanas, llegando como máximo a una separación $AB=1/3 MN$, se moverán entonces los electrodos de potencial a una nueva posición fija y se continúa la secuencia. La profundidad teórica de exploración (l) será igual a la distancia que existe entre el punto de atribución y el electrodo de corriente.



ARREGLO SCHLUMBERGER
FIGURA E

- b) Sondeo eléctrico vertical y rastreo eléctrico, con arreglo de Wenner.

El equipo consiste en una fuente de poder, un voltímetro, un amperímetro, cuatro electrodos y cables conductores. El esquema del conjunto se muestra en la FIG F (Ref. 21). Los equipos comerciales integran a la fuente de poder, con el voltímetro y el amperímetro en una unidad compacta. Los electrodos son varillas usualmente de bronce de 2 cm de diámetro y 50 cm de longitud con un extremo en punta para hincarse en el terreno y los cables de conexión son de cobre con forro de neopreno.



ARREGLO WENNER
FIGURA F

El modo de operar consiste en crear un campo eléctrico en el terreno con dos electrodos denominados de corriente que se hincan y se conectan con el cable a la fuente de poder y al amperímetro. En ocasiones, la cantidad de corriente inducida al terreno es muy pequeña y provoca que la diferencia de potencial (V) no se pueda leer en el voltímetro por falta de sensibilidad. Esa falta de corriente en el terreno es causada por la resistencia de contacto de los electrodos de corriente; la cual se puede disminuir mejorando la región en donde se van a hincar los electrodos, con agua salobre y en el caso de que aún la resistencia sea alta, se hincan en lugar de un electrodo en cada extremo del dispositivo, dos o más conectados en paralelo; entre estos electrodos de corriente se hincan dos de potencial conectados al voltímetro. Con el amperímetro se mide la diferencia de potencial entre los electrodos centrales.

Las distancias entre electrodos pueden variar dando lugar a diferentes arreglos. En el de Wenner, los electrodos quedan en una línea con separación equidistante h ; la determinación hecha es representativa del material a la profundidad h . El sondeo eléctrico se realiza manteniendo el centro del arreglo fijo e incrementando la separación h . En el rastreo eléctrico únicamente se cambia de lugar el arreglo sobre una retícula trazada en la superficie.

Ambas técnicas deben de iniciarse determinando la resistividad del estrato más superficial, colocando los electrodos con una separación menor que el espesor del primer estrato.

La interpretación de los datos del método de resistividad consta de dos aspectos: uno cualitativo y otro cuantitativo.

- I) La interpretación cualitativa de los datos se lleva a cabo utilizando los valores de resistividad aparentes a partir de los cuales se construyen diagramas de resistividad e isorresistividad aparentes permitiendo conocer las variaciones aparentes bajo cada centro de estudio (Ref. 26).
- II) La interpretación cuantitativa puede ser efectuada comparando las resistividades aparentes obtenidas con resistividades definidas por un corte eléctrico conocido. Esto da resultados y espesores reales del corte geoelectrico.

En general, los valores de resistividad obtenidos pueden correlacionarse con algunos tipos de materiales, como se muestra en la siguiente Tabla (Ref. 12).

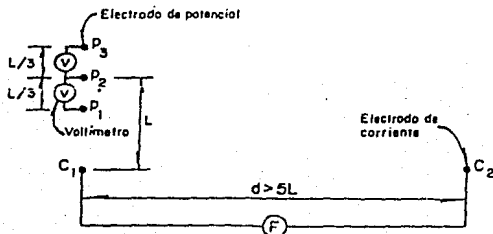
TABLA

| TIPO DE MATERIAL | VALOR DE RESISTIVIDAD (Ohm-m) |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Agua dulce | 10 - 30 |
| Agua de mar | 0.2 |
| Arena y gravas secas | 1000 - 10 000 |
| Arenas y gravas con agua dulce | 50 - 500 |
| Arenas y gravas con agua salada | 0.5 - 5 |
| Arcillas | 2 - 20 |
| Margas | 20 - 100 |
| Calizas | 300 - 10 000 |
| Areniscas arcillosas | 50 - 300 |
| Areniscas cuarcíticas | 300 - 10 000 |
| Tobas volcánicas | 20 - 100 |
| Lavas | 300 - 10 000 |
| Esquistos grafitosos | 0.5 - 5 |
| Esquistos arcillosos o alterados | 100 - 300 |
| Esquistos sanos | 300 - 3 000 |
| Gneiss-granito alterado | 100 - 1 000 |
| Gneiss-granito sano | 1000 - 10 000 |

Las principales aplicaciones de este método son las siguientes:

- 1) Determinación del espesor y profundidad de materiales o zonas permeables o impermeables.
- 2) Localización de niveles de agua, existencia y profundidad del agua subterránea.
- 3) Salinidad de las aguas.
- 4) Localización de posibles zonas cársticas.
- 5) Delimitación de la zona litoral de inversión marina.
- 6) Localización de zonas de aguas contaminadas.
- 7) Estudio de la secuencia de capas subterráneas y una estimación de la profundidad y espesor de esas capas.
- 8) Localización y ubicación de materiales de construcción.
- 9) Localización de fallas.

El Método de las Caídas de Potencial es otro método eléctrico y está basado en la medición no de diferencias de potencial, que generalmente son pequeñas, sino de coeficientes de caída de potencial susceptibles de variaciones importantes. Consiste en determinar la relación de caídas de potencial entre 3 electrodos hincados a distancias iguales; colocados perpendicularmente a otros 2 electrodos de corriente que generan un campo eléctrico en el terreno y que permite en ciertos casos obtener mayor detalle que con el método de resistividad (caso de cuerpos verticales de espesor reducido como diques, fallas, etc.); además su aplicación es más simple dado que no requiere mediciones de la intensidad de la corriente. El equipo requerido para esta técnica consiste en: 5 electrodos, 2 voltímetros, cables conductores y una fuente de poder de mayor capacidad que la usada en el método de resistividad, colocados como en el esquema de la FIG 6 (Ref. 21).



METODO DE LAS CAIDAS DE POTENCIAL
FIGURA 6

Los 3 electrodos se hincan en linea recta a una separación de $L/3$, los de corriente se colocan en otra linea perpendicular a la primera, distantes cuando menos $5L$; la distancia del electrodo de potencial del centro a la linea de los electrodos de corriente debe de ser L , que corresponde a la profundidad de la medición obtenida con esa geometria. Se deben de hacer otras mediciones a diferentes L para definir la estratigrafia. La medición de caídas de potencial se hacen con los voltímetros que unen los 3 electrodos de potencial. La caída de potencial entre 2 electrodos P_1, P_2 es V_{12} y entre P_2, P_3 es V_{23} , la relación entre estas 2 caídas (RCP), correspondiente a cada distancia L , es $RCP = V_{12}/V_{23}$, esta relación se mantiene constante e igual a 2, siempre que el material ensayado sea el mismo; cuando este es diferente de 2 se está detectando otro material a la profundidad L correspondiente.

Las ventajas que que ofrece este método es dar más detalle que el método de resistividad en formaciones verticales de poco espesor (diques, filones, etc..).

Para la prospección sobre las características de roca y suelos, los métodos eléctricos resultan de gran valor, porque la conductividad iónica está relacionada con el volumen de los poros y con la disposición y el volumen de los poros reemplazados por el agua, lo que significa que si un terreno es compacto, presentará una resistencia elevada al paso de la corriente eléctrica; en caso contrario, si es poroso, tendrá baja resistencia, la cual disminuye más si los poros contienen agua y más aún si es agua salada.

C) METODO MAGNETOMETRICO

Este método consiste en determinar el valor del campo magnético terrestre en diferentes puntos, correlacionándolo con las formaciones geológicas que ejerzan influencia local. La mayoría de las anomalías magnéticas son producidas por los minerales ferromagnesianos como la magnetita e ilmenita, que están presentes en algunas rocas ígneas y metamórficas.

Este método rinde buenos resultados en exploraciones a gran escala, para determinar alineamientos regionales, anomalías dominantes y correlaciones generales con la geología, por lo tanto, es poco usado para fines de Ingeniería Civil (Ref. 26).

D) METODO GRAVIMETRICO

Este método tiene por objeto la determinación de los contrastes de densidades del subsuelo y se puede aplicar sobre todo, para detectar la presencia de cavidades naturales, debidas a la disolución de rocas yesíferas o calcáreas, o de cavidades artificiales como minas de arena, pozos, galerías, canalizaciones, etc., pues en ambos casos se detectan cambios de densidades dentro de la zona estudiada.

Los valores de dicha aceleración ligeramente más altos que el normal de la zona en estudio, indicaran la presencia de masas compactas de rocas; lo contrario será la indicación de la presencia de masas ligeras, cavernas y oquedades. Se puede detectar también la presencia de fallas, grietas y fisuras importantes o rellenos de materiales recientes en cavidades antiguas, así como la profundidad del basamento.

La dificultad de este método es que estas variaciones son tan pequeñas que se requieren aparatos y métodos muy sensibles, y es difícil interpretar las anomalías a profundidad. Sólo el método gravimétrico puede permitir el descubrimiento de cavidades. Son muy raros los casos en los que se emplea tal procedimiento (Ref. 26).

E) METODO TERMOMETRICO

Este método está basado en la determinación de la temperatura del suelo y del subsuelo. Se emplea la noción de gradiente vertical y de grado geotérmico. El gradiente vertical en el interior de un terreno es el cociente de la diferencia de temperaturas por la diferencia de profundidad; es en resumen, la diferencia de temperatura por unidad de profundidad. El grado geotérmico es la cantidad de metros (o centímetros), que se debe de aumentar a la profundidad para que la temperatura suba un grado centígrado.

Se distinguen dos categorías de estudio: la primera interesa los primeros metros de la superficie y la segunda investiga las capas profundas. En ambos casos se miden las temperaturas con termómetros o con pares termoelectrónicos según el caso. La medición de las temperaturas superficiales sirven, por ejemplo, para la detección de fracturas, avenidas de aguas, variación del nivel freático superficial, etc.. La medición profunda sirve para la clasificación de los diferentes niveles de una perforación.

Las mediciones geofísicas afectan un volumen de terreno generalmente importante. Los mejores resultados se obtienen cuando existe un contraste en los valores de los parámetros estudiados. Permiten dar una imagen de las estructuras geológicas o de valorar parámetros físicos como coeficiente de Poisson o módulo elástico. Además, por medio de ellas, se obtienen directamente datos sobre heterogeneidades o anisotropías del conjunto geológico.

La geofísica aporta una valiosa ayuda en los problemas de:

- Vías terrestre, aeropuertos (túneles, cortes, bancos de materiales, abastecimientos de agua, etc.,).
- Cimentaciones de presas, galerías a presión, centrales hidroeléctricas (estructura, decompresión, zonas débiles, efecto del explosivo sobre la roca, etc.,).
- Estructuras en obras civiles (calidad de pilotes, cimentación de edificios, etc.,).
- Aguas subterráneas (rellenos, fracturación, etc.,).

La rápida aplicación de ciertos métodos geofísicos, debida principalmente a lo fácil que resulta transportar el equipo de campo, permite realizar programas de investigaciones cortos y comprensivos del sitio y tomar decisiones tempranas sobre la necesidad de hacer investigaciones más detalladas y de utilizar otros métodos. Muy a menudo, los métodos que se utilizan en la investigación general para los estudios de factibilidad tratan de resolver por anticipado ciertos problemas como son las alternativas para la localización de las presas o los diferentes y posibles alineamientos de un túnel. Las características prácticas de las investigaciones pueden cambiar rápidamente de acuerdo con los resultados obtenidos.

CAPITULO 5

CLASIFICACIONES GEOMECHANICAS

Antes de proceder a describir las clasificaciones mecánicas de Terzaghi, Deere, Barton, Lien y Lunde, se dará una breve descripción de las pruebas utilizadas en laboratorio y en campo, las cuales serán de utilidad para obtener ciertos parámetros y propiedades características de las rocas al realizar dichos ensayos, y con ello proceder a las clasificaciones mecánicas de los macizos rocosos.

I.- PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio a las cuales se recurrirá son:

- A) ENSAYES DE COMPRESION SIMPLE Y TRIAXIALES
- B) ENSAYES DE TENSION
- C) ENSAYES DE CORTE
- D) PROPIEDADES INDICE

A) ENSAYES DE COMPRESION SIMPLE Y TRIAXIALES

Estos ensayos permiten determinar la resistencia y deformabilidad de un macizo rocoso siempre y cuando la fisuración del espécimen sea representativa de la del macizo. Los resultados de estos ensayos se emplean en el diseño del revestimiento de túneles bajo presión y de cimentaciones de estructuras pesadas.

La resistencia a la compresión simple y triaxial interviene, junto con otros parámetros, en los sistemas de clasificación ingenieril de las masas rocosas.

I.- COMPRESION SIMPLE

Es el ensayo de laboratorio que consiste en aplicar a los especímenes de roca cargas axiales sin confinamiento. Los especímenes son generalmente cilindros de 2.5 a 7.5 cm de diámetro y altura igual de dos diámetros. La resistencia del espécimen es el valor del esfuerzo bajo el cual el material falla. El intervalo de variación de la resistencia a la compresión simple en rocas es usualmente de 5 a 400 MPa ($1 \text{MPa} = 1000 \text{KPa} = 10 \text{bares} = 101.97 \text{Ton/m}^2$). Dentro de este gran intervalo han surgido varias propuestas de subdivisión que no son enteramente satisfactorias, pero que pueden resumirse en la Tabla A (Ref. 23).

**CLASIFICACION DE LAS ROCAS DE ACUERDO
CON SU RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE
TABLA A**

| Resistencia, en MPa | Condición | Descripción |
|------------------------|----------------------|--|
| 5 a 20 | Muy débil | Sedimentarias alteradas y débilmente compactadas |
| 20 a 40 | Débil | Sedimentarias y esquistos débilmente cementados |
| 40 a 80 | Resistencia media | Sedimentarias competentes; y rocas ígneas cuarzosas de densidad un poco baja |
| 80 a 160 | Resistencia alta | Igneas competentes, metamórficas; y algunas areniscas de grano fino |
| 160 a 320 | Resistencia muy alta | Cuarzitas; rocas ígneas densas de grano fino |

En problemas de deformación bajo carga constante se requiere adaptar al marco de carga un sistema de control de resortes, hidroneumático, electroneumático, o electrónico para mantener la carga constante durante la deformación del espécimen.

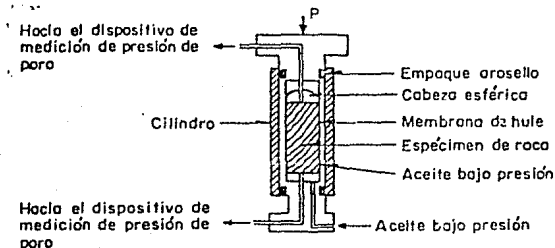
Las pruebas de compresión simple se ejecutan aplicando cargas axiales sin confinamiento a los especímenes de roca. Para cada incremento de carga se mide la deformación longitudinal del espécimen.

II.- COMPRESION TRIAXIAL

Los ensayos de compresión triaxial simulan los esfuerzos que soporta la muestra de la roca en la naturaleza. El confinamiento que tienen las rocas en la naturaleza puede definirse como un estado de esfuerzos que es factible representar con los esfuerzos normales denominados principales (σ_1 , σ_2 , σ_3), que actúan en

direcciones ortogonales. En la cámara triaxial, por simplicidad los esfuerzos principales laterales permanecen iguales durante la prueba ($\sigma_2 = \sigma_3$).

La FIG A muestra un corte longitudinal a través de una cámara triaxial con dispositivo para medir la presión, denominada también presión de poro.



CAMARA TRIAXIAL DISEÑADA PARA
MEDIR LA PRESION DE PORO
FIGURA A

a) Pruebas triaxiales no drenadas con medición de presión de poro.

La FIG A (Ref. 23) muestra un corte esquemático de una cámara de compresión triaxial diseñada para medir presión de poro. Consiste en una base, cabeza, mangueras, deformómetro, manómetros y accesorios. La base y la cabeza tiene varios orificios a través de los cuales la presión de poro penetra en el espécimen. La presión confinante se mantiene constante manualmente por medio de un tornillo-pistón que compensa los cambios de volumen que resultan de la deformación del espécimen. También puede controlarse automáticamente con un regulador de presión. Lleva conectado un tubo pequeño de plástico enrollado al espécimen, que sirve de dren durante el llenado de la cámara del fluido confinante (agua o aceite). La deformación axial durante la prueba se mide con una celda eléctrica. En cada medición de desplazamiento del espécimen se resta el efecto de la deformación elástica del aparato.

Al comienzo de los ensayos se satura el sistema de medición de poro y el espécimen queda protegido con una membrana de hule. Se aplica una pequeña carga axial, y la presión confinante se incrementa gradualmente hasta su nivel de trabajo; entonces la

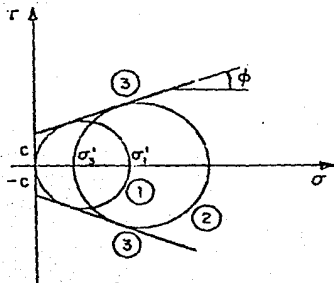
presión de poro se mide en ambos extremos. El sistema de contra presión se cierra y el espécimen se carga progresivamente con una velocidad de aplicación de carga que debe quedar entre 5 y 10 kg/cm².

Durante las pruebas, la presión de poro debe de permanecer menor que la presión confinante, de tal manera que el incremento de presión durante la carga deje siempre la presión de confinante efectiva, σ'_3 , con valor positivo. Una disminución de presión de poro, es señal de expansión del espécimen y ocurre frecuentemente durante una etapa avanzada de deformación.

b) Pruebas triaxiales drenadas.

En estas pruebas la instalación del sistema de contrapresión se mantiene abierto, de tal manera que, durante la aplicación de la carga axial, cualquier incremento de presión se disipa por los extremos.

Para analizar los resultados de los ensayos de compresión deben de trazarse sus círculos de falla de Mohr, dichos círculos son tangentes al eje de las ordenadas cuando son pruebas de compresión simple, y para las pruebas de compresión triaxial los círculos se localizan a una distancia de este eje igual al esfuerzo confinante efectivo (FIG B, Ref. 23). En ensayos drenados los esfuerzos normales aplicados, σ_1 y σ_3 , son los efectivos, y en ensayos no drenados los esfuerzos efectivos, σ'_1 y σ'_3 , son los normales aplicados, σ_1 y σ_3 , menos la presión de poro (u).



- ① Círculo de falla de una prueba de compresión simple
- ② Círculo de falla de una prueba de compresión triaxial
- ③ Envoltente de falla
- c Cohesión
- ϕ Ángulo de fricción interno

CÍRCULOS DE MOHR Y ENVOLVENTES DE FALLA DE UNA PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE Y UNA TRIAXIAL
FIGURA B

Se dibuja la envolvente de los círculos de falla y la resistencia al corte, tomando en cuenta la ley de Coulomb:

$$R_c = c + \sigma \tan \theta \text{ -----(1)}$$

donde

R_c .- resistencia al corte

θ .- ángulo de fricción interna

c .- cohesión o resistencia al corte cuando $\sigma' = 0$

σ' .- esfuerzo normal efectivo actuante sobre el plano de corte $\sigma' = \sigma - u$, donde σ esfuerzo normal externo y u presión de poro

Las envolventes de falla de las rocas son por lo general, curvas. Los parámetros c y θ de Coulomb definen la posición de intervalos limitados que pueden considerarse rectos. La posición de estos se selecciona de acuerdo con el nivel de esfuerzos del problema de interés.

B) ENSAYES DE TENSION

La resistencia a la tensión obtenida a partir de ensayos de laboratorio, es un parámetro útil para el diseño de excavaciones subterráneas y cimentaciones. Este parámetro debe de emplearse con un factor de seguridad. Los ensayos de tensión en especímenes de roca se han inspirado en las pruebas desarrolladas para probar cilindros de concreto.

Estas técnicas consisten en someter a la muestra de roca a tensión axial, compresión diametral (prueba brasileña) o flexión.

a) Tensión Axial

Existen dos técnicas para realizar esta prueba. Una consiste en transmitir la carga de tensión axial al espécimen con casquetes metálicos cementados a sus extremos (FIG C, Ref. 23). En la otra técnica, la carga de tensión se aplica a los especímenes con mordazas ajustadas a sus extremos que son de mayor sección transversal que la zona central del espécimen donde se produce la falla.

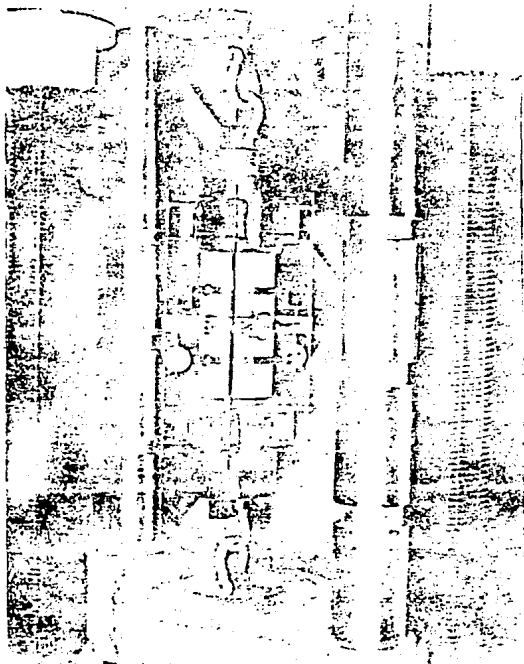
Otro método, poco usual, de obtener la resistencia a la tensión es empleando una máquina centrífuga en la que se introduce el espécimen de roca de 36cm de diámetro y 180cm de longitud en un recipiente cilíndrico de acero. Al iniciar la rotación, el espécimen desliza apoyándose sobre una de sus bases en el interior del recipiente, creándose en el espécimen un estado de esfuerzos de tensión (FIG D, Ref. 23) no uniforme que alcanza su valor máximo en su parte media. Conociendo la velocidad angular (ω) y la densidad de la roca ρ ,

el esfuerzo a una distancia x de uno de los extremos de la probeta es:

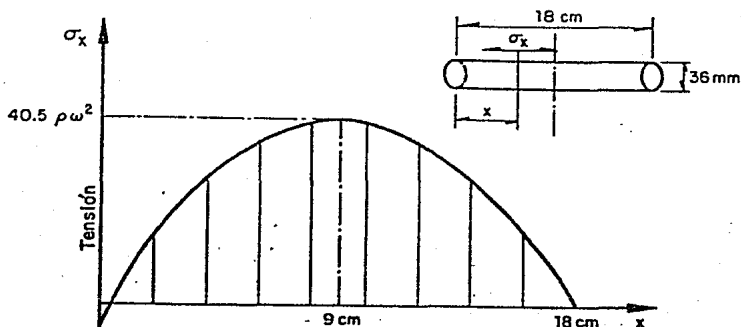
$$\sigma_x = 1/2 \rho \omega^2 x (Lx - x^2)$$

donde

- L.- longitud del espécimen
 ρ .- cociente del peso específico entre la aceleración de la gravedad



DISPOSITIVO DE TENSION AXIAL
 FIGURA C



DISTRIBUCION DE ESFUERZOS LONGITUDINALES EN LA PROBETA
FIGURA D

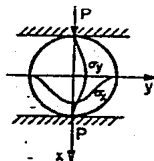
b) Prueba Brasileña

Consiste en someter a compresión diametral a un espécimen cilíndrico produciéndose así esfuerzos de tensión, σ_y , y de la compresión, σ_x , como se indica en la FIG E (Ref. 23), cuyos valores máximos son:

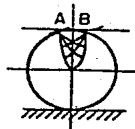
$$\sigma_x = \frac{\Delta P}{\pi D l} \quad \text{de compresión (verticalmente)}$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi D l} = -\sigma_x / 3 \quad \text{de tensión (horizontalmente)}$$

A pesar de que el esfuerzo de tensión inducido es menor que el de compresión, el espécimen falla a lo largo del eje vertical debido a su menor resistencia a la tensión.



a) Diagramas de esfuerzos de compresión, σ_x y de tensión, σ_y



b) Zona de ruptura debido a fricción en el área cargada.

PRUEBA BRASILEÑA
FIGURA E

c) Prueba de Flexión

Consiste en someter a un espécimen de roca simplemente apoyada en sus dos extremos a una carga en el punto medio del claro. Cuando los esfuerzos son más altos que la resistencia a la tensión de la roca, el espécimen falla (FIG F, Ref. 23).

Cuando una carga, P , se aplica al centro de una viga simplemente apoyada de longitud $2l$, produciendo una flecha " y " perpendicular al eje de la viga, el módulo de elasticidad promedio a la flexión es: $E_{prom} = P l^3 / 6 I y$.

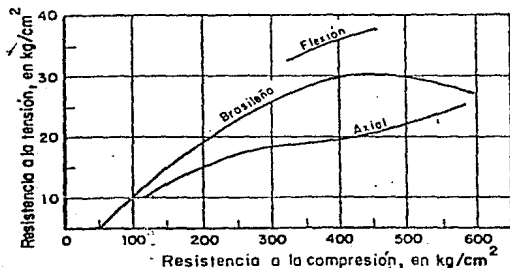
La resistencia de tensión a la flexión es: $F = P l y_0 / 2 I$, donde

- I.- momento de inercia de la sección transversal de la viga. (Para una sección transversal circular de radio R , $I = \pi R^4 / 4$, y para una sección transversal rectangular, $h \times b$, $I = b h^3 / 12$).
- y_0 .- distancia del eje neutro de la viga al punto extremo de la sección transversal en el lado de tensión.



PRUEBA DE FLEXION
FIGURA F

La gráfica de la FIG 6 (Ref. 23) muestra una comparación entre los resultados de pruebas de compresión con los de tres tipos de pruebas de tensión axial, flexión y brasileña.



COMPARACION DE LAS RESISTENCIAS A LA TENSION
OBTENIDAS POR DIFERENTES METODOS
FIGURA 6

C) ENSAYES DE CORTE

Los ensayos de corte de laboratorio pueden emplearse para determinar la resistencia al corte del material intacto y de las juntas rocosas. La resistencia al corte es una propiedad tanto de la roca intacta como de las juntas o planos de debilidad de los macizos. Existen diferentes tipos de instalaciones de laboratorio para obtener la resistencia al corte de especímenes de roca.

Las pruebas de corte simple o directo se efectúan aplicando al espécimen una carga normal constante, N , y una carga tangencial, T , que se incrementa desde cero hasta el valor máximo. Durante los ensayos se miden los desplazamientos vertical y horizontal de la parte superior del espécimen con respecto, a la inferior. En la FIG H (Ref. 23) se presentan las gráficas esfuerzo-deformación resultantes. La curva I representa la relación del esfuerzo con la deformación horizontal, y la curva II con la deformación vertical del espécimen durante la prueba.

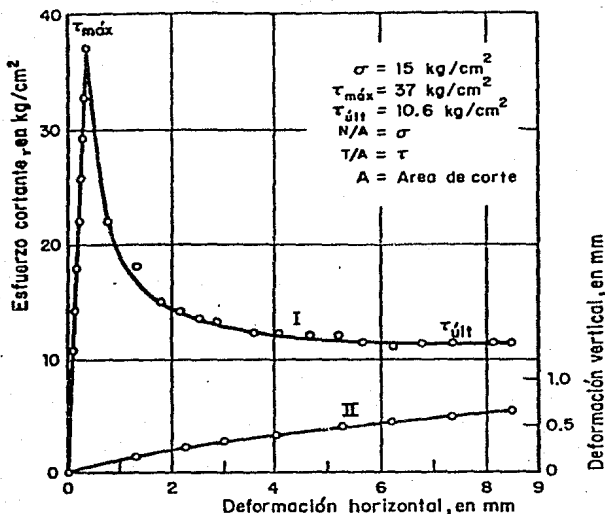


DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACION PARA ENSAYO DE CORTE SIMPLE
FIGURA H

Al aumentar la carga tangencial, T , manteniendo constante la carga normal, N , se incrementan los esfuerzos cortantes, τ , hasta llegar a un máximo, $\tau_{\text{máx}}$, en el cual se fractura el espécimen y aparece una grieta horizontal. La parte superior del espécimen posee mayor libertad para desplazarse y las deformaciones horizontales se incrementan más rápidamente. El esfuerzo tangencial decrece hasta un valor constante, $\tau_{\text{útil}}$, que representa las fuerzas de fricción entre las partes del espécimen. Los desplazamientos horizontales aumentan enormemente, los verticales alcanzan un valor constante.

El esfuerzo $\tau_{\text{máx}}$, corresponde a la resistencia de la roca al corte; el esfuerzo $\tau_{\text{útil}}$ representa las fuerzas de fricción dentro del espécimen y permite determinar el ángulo de fricción.

Al efectuar los ensayos de los diferentes especímenes de una misma roca, variando de la carga normal para cada prueba, se construye el diagrama esfuerzo cortante-esfuerzo normal (plano de Mohr).

D) PROPIEDADES INDICE

La determinación de las propiedades índice de un macizo rocoso permite correlacionar y/o completar la información obtenida mediante otras técnicas de campo o de laboratorio que son más lentas y costosas. Las pruebas de porosidad, peso específico y absorción de agua son de ejecución rápida y sus resultados son directamente correlacionables con las propiedades mecánicas. Las pruebas de permeabilidad al agua y al aire son las más adecuadas para determinar la alterabilidad de la masa rocosa.

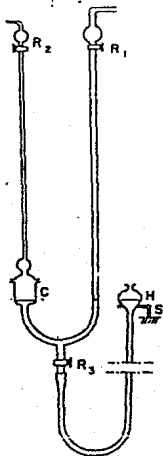
a) Porosidad

Se llama porosidad de una roca al cociente que resulta de dividir su volumen de vacíos, V_v , entre su volumen total, V_m . Se expresa como el porcentaje: $n(\%) = V_v/V_m \times 100$, y varía desde 0.1 por ciento en rocas de porosidad reducida hasta 20 por ciento en rocas muy porosas. En las primeras, la porosidad está constituida por fisuras alargadas de espesor muy pequeño producidas por esfuerzos de origen térmico y/o tectónico. En las muy porosas existen oquedades menos alargadas y equidimensionales, que son conductos de disolución en rocas sedimentarias o burbujas de gas atrapadas durante el enfriamiento de las rocas ígneas. La porosidad es correlacionable con el peso volumétrico, deformabilidad, resistencia, y velocidad de las ondas sísmicas en rocas pertenecientes a la misma formación litológica.

Para determinar la porosidad de un macizo rocoso, se hace uso del Porosímetro; este dispositivo (FIG 1, Ref. 23) está constituido por un tubo de vidrio en forma de "u". La rama derecha de este tubo, de 70cm de largo, termina en una llave, R1; la izquierda, de 10cm de altura, tiene un depósito cilíndrico "c" con dimensiones que permiten utilizarlo como portamuestras. El portamuestra, "c", debe de quedar cerrado herméticamente, lo que se puede lograr mediante un sistema de contacto de superficies ásperas entre el portamuestras propiamente dicho y su tapa hemisférica. Esta tapa va conectada a un tubo de sección transversal conocida de 50cm de longitud y con una llave, R2, en su extremo superior. En el punto más bajo del tubo de vidrio se tiene una tercera rama provista de una llave, R3, y un receptáculo móvil lleno de mercurio, H.

El método de Walsh para obtener la porosidad se recomienda cuando la roca está fisurada, su porosidad es reducida (menos de 1%) y no tiene oquedades equidimensionales. EL método se basa en

el hecho de que, al someter a una muestra de roca a presión hidrostática, se inicia un cierre progresivo de fisuras hasta alcanzar el punto A (FIG J, Ref. 23). Al incrementar la presión, la roca no fisurada muestra el comportamiento elástico lineal representado por la recta AB. Prolongando la recta AB se intercepta el eje de las abscisas en un punto que representa la porosidad de fisuración no de la roca.



POROSIMETRO DE FARRAN Y THENOZ
FIGURA I

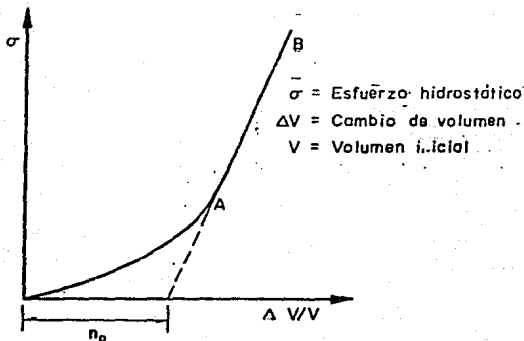
b) Peso volumétrico

El peso volumétrico (γ), PV, de una muestra de roca con la humedad natural es el cociente del peso de la muestra, P_m , entre el volumen de la muestra, V_m . El peso volumétrico seco, PV_{seco} , es el cociente del peso de la muestra seca, P_s , entre el volumen de la muestra, V_m .

El procedimiento para obtener en laboratorio los pesos volumétricos natural y seco de una muestra de roca es el siguiente:

- Se pesa la muestra con su humedad natural (P_m)
- Se seca al horno durante 24hrs a 105°C , se enfría en un recipiente hermético y se pesa (P_s)
- Mediante una balanza se obtiene el volumen de la muestra (V_m).

El peso volumétrico natural, P_V , es: $P_V = P_m / V_m$ y
 El peso volumétrico seco, $P_{V\text{seco}}$, es: $P_{V\text{seco}} = P_s / V_m$.



VARIACION DEL VOLUMEN DE LA MUESTRA EN FUNCION
 DE LA PRESION HIDROSTATICA APLICADA
 FIGURA J

c) Absorción de Agua

A medida que el intemperismo avanza en las rocas, su volumen de vacíos crece, tanto por la expansión de la roca como por la disolución parcial de sus componentes. Por esta razón, para definir el grado de alteración se ha propuesto el parámetro "I", dado por la ecuación: $i (\%) = P_1 - P_2 / P_1 * 100$, donde P_1 peso de la muestra en el horno a 105°C . P_2 peso de la muestra saturada, sumergiéndola en agua después de secarla.

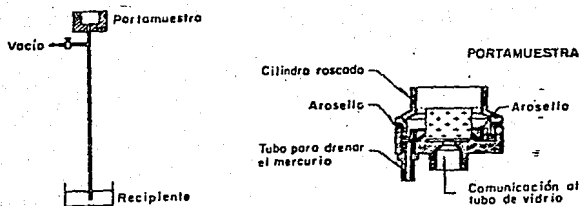
Mediante el parámetro "j", definido como el cociente del incremento del grado de alteración dado por el cambio de absorción de agua ΔI en un intervalo de tiempo, dividido por el mismo intervalo de tiempo Δt , puede conocerse la alterabilidad de las rocas.

d) Permeabilidad

En laboratorio se mide la permeabilidad al aire de la roca y la variación del tiempo de la permeabilidad al agua. El valor del coeficiente de permeabilidad al aire es un índice del estado de alteración de la roca, y la variación de la permeabilidad es indicativa de la alterabilidad de la roca. La permeabilidad al agua puede disminuir por el sello de los huecos o figuras o aumentar por el arrastre de sales. En ambos casos existe una reacción química entre el agua y los minerales constitutivos de la roca.

La prueba de permeabilidad de la roca al aire se realiza mediante el aparato de la FIG K (Ref. 23), como se indica a continuación:

- Se coloca el espécimen en la portamuestra, se sella lateralmente y se tapa.
- Se abre la válvula de vacío, elevándose el mercurio
- Se cierra la comunicación al vacío.
- Se destapa el porta muestras, se mide la variación de la columna de mercurio en un tiempo determinado.



APARATO PARA MEDIR LA PERMEABILIDAD AL AIRE
FIGURA K

La prueba de permeabilidad al agua consiste en hacer pasar agua a través de la muestra con carga constante. El agua debe de ser la misma con la que el suelo estará en contacto en el campo. Si la permeabilidad varía con el tiempo o la composición química del agua filtrada a través de la muestra se modifica, la alterabilidad de la roca es alta.

II.- ENSAYES DE CAMPO

Para poder conocer las propiedades, parámetros y características de las rocas se procedera a hacer uso de las siguientes pruebas:

- A) DEFORMABILIDAD
- B) ESFUERZOS INTERNOS
- C) RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE
- D) PERMEABILIDAD DE LAS MASA ROCOSAS

A) DEFORMABILIDAD

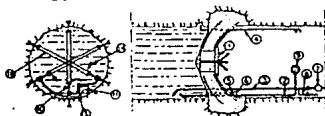
I.- Túnel Bajo Presión Hidrostática.

Para realizar la prueba se aísla un tramo de túnel o galería (FIG A, Ref. 16) y se le inyecta agua hasta alcanzar una presión una y media veces mayor que la máxima de operación del túnel. Al levantar la presión, y durante varios ciclos de carga y descarga, se efectúan mediciones de los desplazamientos radiales de las paredes del tramo. Antes de efectuar la medición, se deben de igualar las temperaturas del agua y de la roca. La medición de los desplazamientos se realizan en el tramo bajo presión. La medición de los desplazamientos de puntos interiores de la masa de roca permite calcular el módulo de deformación de la roca que se encuentra fuera de la zona de compresión, cercana a las paredes del túnel. Se mide no sólo en los puntos de la pared de la galería, sino también en algunos del interior de la masa rocosa.

Tanto la carga como la descarga se aplica en incrementos. Cada incremento de carga se mantiene hasta que la velocidad de deformación sea nula. A fin de evitar filtraciones a través de las fisuras de la roca, el tramo de prueba debe de revestirse con una cubierta impermeable y flexible.

El ensayo de presión en galería tiene la ventaja de solicitar una parte mayor del macizo rocoso, produciendo un estado de tensiones mejor definido teóricamente. Una característica

importante del ensayo de presión en galería es que introduce tensiones anulares en la roca, las cuales pueden vencer cualquier compresión residual dando lugar a la abertura de grietas radiales. Esto puede reducir mucho la rigidez del macizo rocoso observado. Las aplicaciones de este tipo de ensayos se han limitado en gran parte al estudio de condiciones bajo presión.



- | | |
|----------------------|---|
| 1 Agujero de hombre | 8 Salida de agua |
| 2 Tubo del manómetro | 9 Manómetro |
| 3 Entrada de agua | 10 Medidor de cuerda vibrante |
| 4 Salida de aire | 11 Cámara equilibradora de la presión de aire |
| 5 Tubería de cables. | 12 Varillas de lavar |
| 6 Registro estanco | 13 Tubo equilibrador de presiones |
| 7 Medidor de caudal | 14 Cable |

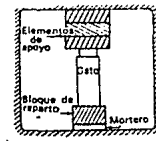
PRUEBA DE PRESION HIDRAULICA EN GALERIA
FIGURA A

II.- Prueba de Placa

La prueba consiste en aplicar una carga a una superficie plana de la roca y medir la deformación superficial resultante. Al variar el tamaño de la placa de carga, cambian también los valores del módulo de deformabilidad así determinados; cuanto mayor es el diámetro de la placa de carga mayor es la profundidad de la roca afectada por la prueba. La placa se denomina flexible cuando la carga se transmite a la roca por medio de gatos Freysinnet, y se llama rígida cuando la carga se transmite a través de una placa rígida que únicamente admite deformaciones muy pequeñas.

Se deberá de asegurar una distribución uniforme de presiones sobre la superficie cargada, principalmente utilizando un gato Freysinnet como elemento de reparto u otra forma de colchones metálicos rellenos de aceite, o colocando láminas de caucho entre el bloque de reparto y la superficie rocosa. Sin embargo, la carga se aplica generalmente a través de un bloque metálico o de hormigón armado. Esto resulta totalmente satisfactorio siempre que se pretendan medir desplazamientos medios. Se suele colocar una capa de mortero entre el elemento de reparto y la superficie de la roca para conseguir un contacto inicial uniforme (FIG B, Ref. 16).

En túneles y socavones, la prueba debe de realizarse simultáneamente en las dos paredes laterales o en el techo y en el piso. La carga máxima aplicada deberá de ser del orden de 1.5 veces la que será impuesta a la masa rocosa. La carga máxima se alcanzará en el último de una serie de 3 a 5 ciclos de carga y descarga.



ENSAYE DE CARGA EN UN TUNEL
FIGURA B

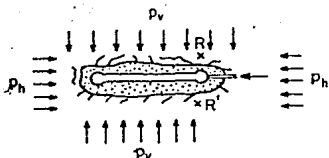
III.- Gato Plano

Llamado también gato Freysinnet, es un recipiente plano lleno de aceite, de paredes metálicas delgadas, empleado para transmitir una presión conocida o para medir la presión que actúa normalmente a sus caras. Se utiliza tanto en la determinación del módulo de Young como del estado de esfuerzos internos.

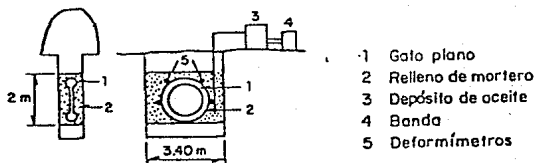
El procedimiento consiste en formar en la pared rocosa una ranura mediante una línea de barrenos secantes. En la ranura se introduce una presión (p), perpendicular al gato. La prueba se repite en las dos direcciones paralelas a la pared de ensaye para poder detectar el comportamiento anisotrópico del macizo. En la FIG C (Ref. 23) se muestra un corte vertical indicando el punto de referencia para medir el módulo de Young (E) de la roca. La determinación del módulo de elasticidad (E) se efectúa a partir del desplazamiento (u), que sufre un punto de referencia (R) en la dirección paralela al esfuerzo principal (pv). Suponiendo que el gato está en posición horizontal, el desplazamiento (u) queda dado por:

$$u = A * p/E + B * ph/E - C * pv/E$$

donde A, B y C son relaciones de la relación de Poisson, de la geometría de la ranura del gato plano y de la localización de R. La medición se efectúa colocando dos puntos de referencia, R y R' simétricamente opuestas a R. Se comienza determinando, ph e pv mediante dos ensayos formando entre sí un ángulo de 90°, y con un desplazamiento u=0.



a) Localización de los puntos de referencia

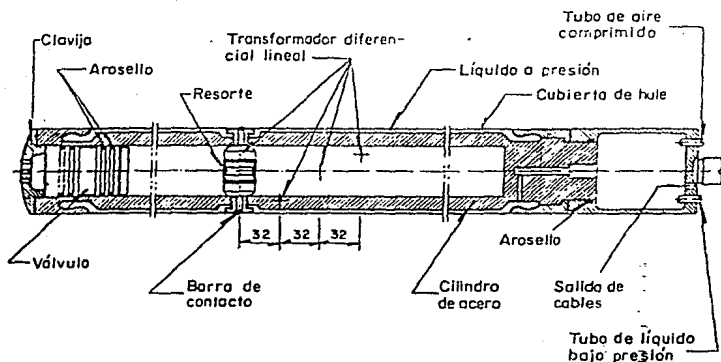


b) Croquis del montaje general

PRUEBA DE GATO PLANO FIGURA C

IV.- Dilatómetro Portugués

Es una sonda cilíndrica que permite aplicar una presión uniforme a las paredes de una perforación y medir las deformaciones producidas. El dilatómetro (FIG D, Ref. 23) está constituido por un cuerpo metálico cilíndrico envuelto en una camisa de hule. En el cuerpo de este aparato están montados transductores, además existen unas cabezas metálicas pequeñas que se mantienen en contacto permanente con la pared de la deformación en puntos diametralmente opuestos. De la cabeza del dilatómetro sale un cable eléctrico que une los transductores con el dispositivo de medición, una manguera de hule reforzada para el paso de agua a presión y otra para el aire comprimido. Se introduce el dilatómetro en la perforación aplicándole aire a 3 kg/cm² de presión, con lo que las cabezas de los transductores se retraen. Se instala a la profundidad de ensaye mediante una serie de barras roscadas. Entonces se cierra el aire comprimido para que las cabezas de los traductores hagan contacto con la roca. Entre la camisa de hule y el cuerpo del dilatómetro se establece con agua, la presión que se desea transmitir a la pared de la perforación. Las deformaciones del diámetro de la perforación, en la sección en estudio, son evaluadas a partir de las señales producidas en los traductores.



DILATOMETRO PORTUGUES
FIGURA D

V.- Dilatómetro Goodman

El ensayo consiste en introducir el dilatómetro en la perforación hasta la profundidad de ensayo, aplicar la carga activando el sistema de bombeo y finalmente descargar y extraer la sonda.

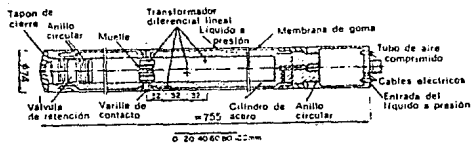
El dilatómetro es un aparato cilíndrico empleado en el interior de perforaciones para aplicar cargas en una dirección diametral mediante dos placas de acero. La interpretación cuantitativa de las mediciones hechas con este instrumento es más complicada que con otros dilatómetros debido a que la carga no es continua sobre toda la circunferencia de la perforación. Las placas de acero son mucho más rígidas que la roca y penetran en la roca con muy poca flexión. Por tanto, la condición de frontera que debe de satisfacerse es más bien la de desplazamiento constante y no la de presión constante. Las placas de acero son activadas mediante doce pistones hidráulicos para ejercer presión en la pared de una perforación. Esta presión sólo se aplica en una sola dirección (FIG E, Ref. 23).

VI.- Presiurómetro

Una cuestión fundamental al proyectar un presiurómetro es el diámetro del sondeo a emplear: cuanto mayor sea el diámetro, mayor es el volumen de roca afectado por el ensaye y, por tanto, más significativos son los resultados obtenidos.

Los sondeos que requiere el presiurómetro perturban poco las tensiones "in situ" del macizo rocoso. Como la existencia de considerables compresiones en la roca, con su tendencia a cerrar las fisuras, puede producir una rigidización del macizo, los resultados del presiurómetro pueden ser más exactos bajo este aspecto.

El instrumento (FIG F, Ref. 16) consta fundamentalmente de un cilindro de acero inoxidable, introducido en una membrana de caucho (neopreno). El líquido (agua o aceite) que aplica la presión sobre las paredes del sondeo se inyecta en el espacio que queda entre la superficie exterior del cilindro y la cara interior de la membrana. Uno de los extremos está cerrado por un tapón a través del cual pasa la válvula de retención del líquido que aplica la presión. El instrumento se introduce en el sondeo por medio de un varillaje atornillado a este mismo extremo, y se determina la profundidad y orientación del mismo.



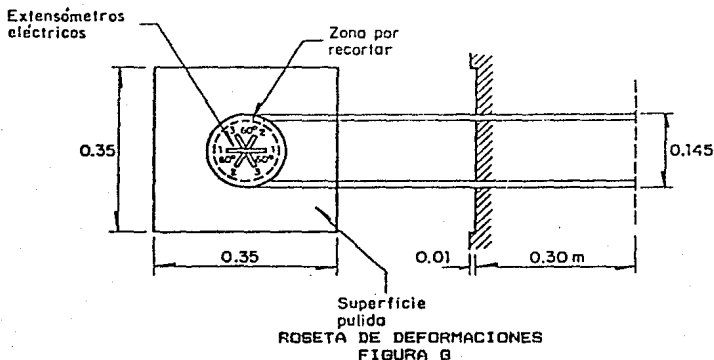
PRESIUROMETRO
FIGURA F

B) ESFUERZOS INTERNOS

I.- Roseta de Deformación

Esta prueba consiste en la medición de las deformaciones producidas al relajar esfuerzos de una porción de la masa rocosa mediante el corte con una broca muestreadora. Los esfuerzos internos se determinan a partir de las deformaciones medidas, empleando relaciones esfuerzo-deformación de la teoría de la elasticidad. Para construir una roseta se coloca en la superficie de roca de la pared de una galería tres medidores de desplazamiento con direcciones que forman ángulos de 60° entre sí. Posteriormente se recorta concéntricamente la zona de la

roseta con un barril muestreador a fin de producir un alivio de los esfuerzos actuantes en la zona instrumentada, midiendo las deformaciones producidas (FIG G, Ref. 23).

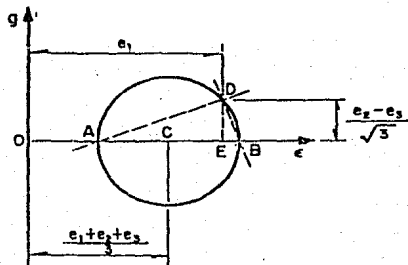


Para determinar las deformaciones principales y sus direcciones se construye el círculo de Mohr de las deformaciones (FIG H, Ref. 23), empleando las ecuaciones:

$$OC = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{3} \quad \text{---- (1)}$$

$$OE = e_1 \quad \text{---- (2)}$$

Siendo e_1 , e_2 y e_3 las extensiones medidas con los extensómetros eléctricos 1, 2 y 3 respectivamente.

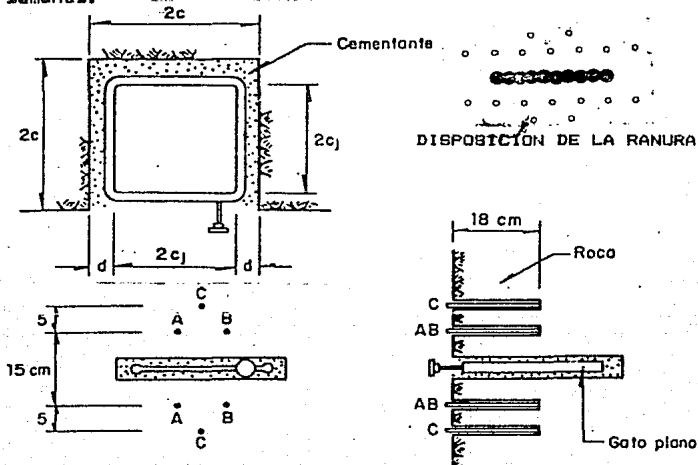


Las deformaciones principales están dadas por:

$$\epsilon_1 = 0B, \epsilon_2 = 0A$$

II.- Gato Plano

Este procedimiento consiste en medir la deformación inducida entre dos puntos de referencia, localizados en la pared de una galería, cuando se recorta una ranura entre ellos. En la FIG I (Ref. 16) se muestra una disposición típica de la ranura de inserción y los puntos de medida. La ejecución de la ranura produce una liberación local de tensiones midiéndose la deformación resultante durante un periodo de tres o cuatro días mediante un extensómetro colocado entre diversas combinaciones de puntos. A continuación se coloca el gato plano en la ranura, cementándolo con mortero, con su borde enrasado con la superficie de la roca, dejándole otros tres o cuatro días para el endurecimiento del mortero. Pasado este tiempo se aplica una presión hidráulica al gato, aumentándola por escalones, y tomando medidas entre diversas combinaciones de puntos hasta que se alcanzan los valores originales anteriores a la apertura de la ranura. A continuación se realizan dos a cuatro ciclos de carga y descarga durante un periodo de varios días determinando la presión media de equilibrio. El ensayo completo dura de dos a tres semanas.

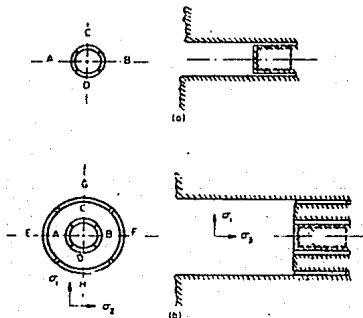


PRUEBA DE GATO PLANO
FIGURA I

Es recomendable efectuar una prueba de roseta de deformación con objeto de determinar las direcciones principales de esfuerzo, y realizar la prueba de gato plano normalmente en cada una de estas direcciones.

III.- Gatos Curvos

Este procedimiento, inspirado en el anterior, tiene la ventaja de permitir mediciones hasta 7m de profundidad. En la FIG J (Ref. 16) se ilustra el procedimiento de prueba. Los gatos curvos A y B se insertan en la ranura anular. La presión de estos gatos se aumenta hasta que la roca en los cuadrantes C y D, en el exterior de la ranura, comienza a fracturarse. Se supone que la dirección del esfuerzo principal menor, σ_3 , es la del eje de perforación, y que las fracturas aparecen en la dirección del esfuerzo principal mayor, σ_1 . La dirección de estas fracturas se observa al extraer el núcleo perforado con una broca muestreadora de mayor diámetro. La perforación de menor diámetro se extiende, y los gatos A y B se reinsertan de manera que actúen en dirección normal a σ_1 . La presión en los gatos se eleva hasta un valor P y después se alivia recortando concéntricamente con la broca de mayor diámetro. Dos pares adicionales de gatos curvos, EF y GH, se insertan en el espacio anular producido con la broca mayor y se aplica con ellos unas presiones, P1 y P2, que devuelven la presión P a los gatos en la posición A y B.



DETERMINACION DE LAS TENSIONES ABSOLUTAS
MEDIANTE GATOS CURVOS
FIGURA J

Para evitar la alteración del labrado del bloque se realiza con mucho cuidado y se deberá de efectuar una descripción detallada de la configuración de la superficie, fracturas, tipo de roca, etc, así como de la superficie de falla. Este método debe de limitarse a rocas blandas, ya que para otro tipo de rocas la carga necesaria resulta excesiva.

D) PERMEABILIDAD DE LAS MASAS ROCOSAS

La determinación de la permeabilidad de las macizos rocosos se suele hacer con el denominado ensayo Lugeon. Se coloca un obturador a 5m de fondo, inyectando agua a presión a través de un tubo que comunica con la sección de fondo. El caudal se suele medir en la boca del sondeo al cabo de cinco o diez minutos de ensayo para diferentes presiones. En general, si se representa el caudal en función del aumento o descenso de presión, se obtendrán diversos tipos de diagramas según la limpieza de los poros o diaclasas producidas por el arrastre de partículas. Es importante observar que el caudal varía con el tiempo durante ensayos a presión dada.

La permeabilidad de un macizo rocoso puede resultar muy afectada por la filtración a través de las fisuras. Esta permeabilidad secundaria puede ser de mayor importancia que la primera del material que compone la roca y puede ser anisótropa debido a diferencias de fisuración según las direcciones. Las fuerzas de filtración pueden contribuir de manera significativa al sistema de fuerzas aplicado al medio rocoso por lo que suele ser necesario conocer la permeabilidad "in situ".

Las pruebas de permeabilidad de las masas rocosas son útiles para:

- a) Prever el flujo y los problemas de estabilidad que este puede ocasionar a excavaciones bajo el nivel freático.
- b) Tomar medidas de tratamiento para garantizar un grado razonable de estanqueidad en presas y otras obras civiles.

III.-Métodos de Clasificación Mecánica

A) CLASIFICACION DE TERZAGHI

Terzaghi clasifica a los macizos rocosos en nueve categorías y asocia a cada una de ellas una carga de roca que está en función del ancho (B) y de la altura del túnel (Ht). El término carga Hp de roca indica la altura de la masa de roca que tiende a caer del techo del túnel (FIG I, Ref. 17).

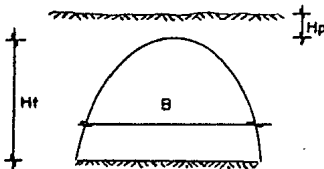


FIGURA I

- a) Roca Dura e Intacta.- No contiene ninguna discontinuidad. Si se ocasionan daños a la roca por el uso de los explosivos puede haber desprendimientos de lajas dentro de la excavación algunas horas o días después.
- b) Roca Estratificada.- Consistente en estratos de roca individuales con poca o ninguna resistencia a separarse entre ellas.
- c) Moderadamente Fracturada.- La roca contiene juntas y grietas, pero los bloques entre las juntas están localmente unidos o íntimamente interconectados de tal forma que las paredes no requieren soporte lateral.
- d) Bloques y Grietas.- El macizo está constituido por fragmentos de roca químicamente intactos los cuales están completamente separados uno de otro e imperfectamente interconectados; las paredes requieren de soporte lateral.
- e) Roca Triturada.- Es químicamente intacta y tiene el carácter de un material triturado sin cribar.
- f) Roca Alterada y que fluye hacia la Excavación.- La roca avanza lentamente hacia el túnel sin un notable cambio de volumen.
- g) Roca Expansiva.- La roca avanza hacia a dentro de la excavación principalmente por efecto de la expansión.

En la Tabla A se presentan en resumen las condiciones anteriores y la carga de roca correspondiente.

TABLA A

| Condiciones de la roca | Carga de roca | Observaciones |
|--|---------------------|---|
| 1.- Dura e Intacta. | Cero | Soporte ligero únicamente si se presenta la rotura de la roca por altos esfuerzos en la masa de roca. |
| 2.- Dura Estratificación o Esquistosa. | 0-0.5B | Soporte ligero. |
| 3.- Masiva moderadamente | 0-0.25B | La carga puede variar fracturada erráticamente de un punto a otro. |
| 4.- Bloques y Grietas (Condición Moderada) | 0.25B-0.35B (B+Ht) | No hay presión lateral. |
| 5.- Bloques y Grietas (Abundantes) | (0.35-1.10)B (B+Ht) | Nada o poca presión lateral. |
| 6.- Completamente triturada pero químicamente intacta. | 1.10(B+Ht) | Considerable presión lateral. El ablandamiento por abajo del piso del túnel debido al nivel freático requerido de soporte continuo para la parte inferior de los marcos o marcos circulares |
| 7.- Roca alterada y fluible moderadamente. | 1.10-2.10B (B+Ht) | Alta presión lateral, se recomiendan marcos circulares. |
| 8.- Roca alterada y fluible en | 2.10-4.50B (B+Ht) | Alta presión lateral, se recomiendan marcos |

| | | |
|---------------------|---|------------------------------------|
| consideración. | | circulares. |
| 9.- Roca expansiva. | Más de 8mm y sin relación con (B+Ht) | Se requieren marcos circulares. |

Ht.- Altura del túnel, en metros

B.- Ancho del túnel, en metros

B) CLASIFICACION DE DEERE

Deere clasifica a los macizos rocosos en cinco categorías de acuerdo a su Índice de Calidad (RQD). El RQD es una medida más general que la simple frecuencia de fracturas; está basada indirectamente en el grado de fracturamiento y en la cantidad de alteración de la masa rocosa. También es un índice cuantitativo basado en el procedimiento de recuperación modificada de núcleos de roca, el cual únicamente considera los tramos de roca dura y sanos mayores de 10cm de longitud obtenidos de diámetros de 54mm.

$$RQD = \frac{\text{I de longitud de testigos de perforación mayores de 10cm de longitud} \times 100}{\text{longitud del avance del fondo}}$$

El método discrimina la influencia de la orientación de las discontinuidades, el relleno contenido en ellas y su continuidad, todas ellas de bastante importancia en la mayoría de los casos relacionados a excavaciones subterráneas.

En la siguiente Tabla B se presenta la clasificación del RQD.

TABLA B

| Índice de Calidad (RQD) (%) | Calidad |
|--------------------------------|-----------|
| 0 - 25 | Muy mala |
| 25 - 50 | Mala |
| 50 - 75 | Regular |
| 75 - 90 | Buena |
| 90 - 100 | Excelente |

C) CLASIFICACION DE BARTON, LIEN Y LUNDE

El método se basa en el análisis de 200 casos registrados de túneles que revelan una correlación entre la cantidad y el tipo de soporte permanente utilizado, con una calidad de roca denominada Q, que es función de seis parámetros, cada uno de rango de importancia.

Los seis parámetros mencionados se combinan para obtener un índice de calidad de la roca de acuerdo con la expresión:

$$Q = RQD/J_n * J_r/J_a * J_w/SRF$$

- RQD.- Índice de calidad.
 J_n.- Número de discontinuidades.
 J_r.- Número de rugosidad de la discontinuidad.
 J_a.- Número de alteración de la discontinuidad.
 J_w.- Factor de reducción dada la condición de flujo de agua.
 SRF.- Factor de reducción por el estado de esfuerzos.

La obtención de cada uno de los parámetros de la expresión anterior se presentan a continuación:

1) Descripción de Calidad

| Calidad de la Roca | (RQD)% |
|--------------------|----------|
| A.- Muy malo. | 0 - 25 |
| B.- Mala. | 25 - 50 |
| C.- Regular. | 50 - 75 |
| D.- Buena. | 75 - 90 |
| E.- Excelente. | 90 - 100 |

NOTA.- Cuando RQD < 10, incluyendo el valor 0, se emplea valor 10 en el cálculo de Q.

2) Número de Familias de Discontinuidades

(J_r)

| | |
|--|-----------|
| A.- Masiva, ninguna o pocas discontinuidades. | 0.5 a 1.0 |
| B.- Una familia. | 2 |
| C.- Una familia más distribución aleatoria. | 3 |
| D.- Dos familias. | 4 |
| E.- Dos familias más distribución aleatoria. | 6 |
| F.- Tres familias. | 9 |
| G.- Tres familias más distribución aleatoria. | 12 |
| H.- Cuatro o más familias, distribución aleatoria, intensamente fracturada, fragmentos pequeños etc. | 15 |
| I.- Roca triturada, granular tipo suelo. | 20 |

NOTA.- En las intersecciones de excavaciones subterráneas úsese 34Jn y en portales 24Jn.

3) Número de Rugosidad (Jr)

- a) Cuando existe contacto roca con roca en las juntas y
 b) Cuando existe este contacto con menos de 10cm de desplazamiento de cortante.

(Jr)

| | |
|----------------------------|-----|
| A.- Juntas Discontinuas. | 4.0 |
| B.- Asperas y Onduladas. | 3.0 |
| C.- Tersas y Onduladas. | 2.0 |
| D.- Lustrosas y Onduladas. | 1.5 |
| E.- Asperas y Planas. | 1.5 |
| F.- Tersas y Planas. | 1.0 |
| G.- Lustrosas y Planas. | 0.5 |

- c) Cuando no hay contactos roca con roca al existir desplazamiento de corte.

H.- Rellenas de arcilla, limos, arenas o gravas con espesores tales que impiden el contacto de roca con roca. 1.0

NOTA.- Sumar 1.0 al Jr si el espaciamiento medio de las discontinuidades importantes es mayor de 3m.

4) Número de Alteración y Relleno de Juntas (Ja)

- a) Cuando existe contacto entre roca y roca en las juntas.

(Ja)

| | |
|---|------|
| A.- Juntas limpias con rellenos resistentes impermeables como cuarzo y epidoto. | 0.75 |
| B.- Juntas ligeramente oxidadas superficialmente. | 1.0 |
| C.- Paredes ligeramente alteradas. Relleno de materiales que no pierden resistencia al deformarse como roca desintegrada y partículas de arenas sin arcilla. | 2.0 |
| D.- Paredes recubiertas o con rellenos arcillo-arenosos que no pierden resistencia con la deformación. | 3.0 |
| E.- Rellenos de minerales de arcilla que pierden resistencia al deformarse como caolinite, mica y también talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los rellenos de esta clase son discontinuos y de 1 a 2 mm ó menos de espesor. | 4.0 |

- b) Cuando existe contacto roca y roca en las juntas antes de 10cm de cortante.
- F.- Relleno de partículas arenosas o roca desintegrada sin arcilla. 4.0
- G.- Rellenos continuos de menos de 5mm de espesor de arcilla fuertemente consolidada que no pierde resistencia al deformarse. 6.0
- H.- Rellenos continuos de menos de 5mm de espesor de arcilla con preconsolidación de media a baja, que pierde resistencia al deformarse. 8.0
- I.- Rellenos continuos de menos de 5mm de espesor de arcilla de alta plasticidad al valor de J_s depende del porcentaje de partículas de arcilla expansiva, de la factibilidad de entrar en contacto con el agua etc. 8.0 a 8.2
- c) Cuando no hay contacto con la roca al existir desplazamientos de cortante.
- K.L.M.- Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcilla. 6.0, 8.0 ó 8.0 a 12
- N.- Zonas o bandas de limo o arena arcillosa con pequeñas cantidades de arcilla (no pierde resistencia al deformarse). 5.0
- O.P.R.- Zonas o bandas de arcilla continuas y de espesor considerable (véase la descripción de la arcilla de G, H, I respectivamente). 10.0, 13.0 ó 13.0 a 20.0
- 5) Factor de Reducción Dadas las Condiciones de Flujo de Agua
- | | (Jw) | Presión hidroestática aproximada, en kg/cm ² |
|--|------|---|
| A.- Ambiente seco o flujo reducido por ejemplo, 5l/min localmente. | 1.0 | 1.0 |
| B.- Flujo a presión mediana lavado ocasional de relleno de las juntas. | 0.66 | 1.0 a 2.5 |

| | | |
|---|-----------|------------|
| C.- Flujo o presión grandes en roca competente, con juntas limpias. | 0.50 | 2.5 a 10.0 |
| D.- Flujo o presión grandes, lavado considerable del relleno de las juntas. | 0.33 | 2.5 a 10.0 |
| E.- Flujo excepcionalmente grande o agua a presión durante las voladuras que decae con el tiempo. | 0.2 a 0.1 | 10.0 |
| F.- Flujo excepcionalmente grande o agua a presión constante sin reducirse en forma perceptible. | 0.1 a 0.5 | 10.0 |

NOTA I.- Los factores C a F están burdamente estimados. El valor de JW deberá aumentarse si hay necesidad de instalaciones de drenaje.

NOTA II.- Los problemas especiales que causa el hielo al formarse en el interior de las grietas no han sido considerados.

6) Factor de Reducción debido al Estado de Esfuerzos (SRF)

a) Existencia de zonas de debilidad que intersectan la excavación y pueden ocasionar que se formen zonas de material suelto al excavar el túnel.

| | | |
|--|-------|------|
| | (FRF) | |
| A.- Numerosas zonas de debilidad conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente o roca muy suelta a cualquier profundidad. | | 10.0 |
| B.- Zonas de debilidad aisladas conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente a una profundidad de 50m o menor. | | 5.0 |
| C.- Igual a D, a una profundidad de más de 50m. | | 2.5 |
| D.- Numerosas zonas cizalladas en roca competente sin arcilla o roca suelta a cualquier profundidad. | | 7.5 |
| E.- Zonas cizalladas aisladas, en roca competente sin arcilla a una profundidad de 50m o menor. | | 5.0 |
| F.- Igual a E, a una profundidad mayor de 50m. | | 2.5 |
| G.- Roca suelta con discontinuidades abiertas, roca intensamente fracturada. | | 5.0 |

| b) Roca competente con altos esfuerzos R_c/σ_1 | | | |
|--|----------------|-------------|---------|
| | R_t/σ_1 | SRF | |
| H.- Esfuerzos reducidos cerca de la superficie del terreno. | 200 | 13 | 2.5 |
| J.- Esfuerzos medianos. | 200 a 10 | 13.0 a 0.99 | 1.0 |
| K.- Esfuerzos grandes estructura bien interconectada. | 10 a 5 | 0.66 a 0.33 | 0.5 a 2 |
| L.- Ocurrencia leve de estallidos en roca masiva. | 5 a 2.5 | 0.33 a 0.16 | 1 a 10 |
| M.- Ocurrencia importante de estallidos en roca masiva. | 2.5 | 0.10 | 10 a 20 |
| c) Extracción de la roca incompetente bajo la acción de grandes esfuerzos. | | | |
| | | | (SRF) |
| N.- Extrusión leve. | | | 5 a 10 |
| O.- Extrusión importante. | | | 10 a 20 |
| d) Roca expansiva debido a la presencia de agua. | | | |
| P.- Expansión leve. | | | 5 a 10 |
| Q.- Expansión importante. | | | 10 a 15 |

NOTA I.- Reducir el valor de SRF del 25% al 50% si las zonas cizalladas importantes influyen pero no intersectan la excavación.

NOTA II.- Para esfuerzos fuertemente anisotrópicos (medidos), cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, debe de reducirse σ_c y σ_t a 0.8 σ_c y 0.8 σ_t . σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales mayor y menor, σ_c y σ_t son la resistencia decompresión y tensión de la roca respectivamente.

NOTA III.- En H se sugiere aumentar el valor de SRF de 2.5 a 5 cuando la profundidad del túnel sea menor que su claro.

D) CLASIFICACION DE BIENIAWSKI

En la actualidad la clasificación geomecánica preparada por Bieniawski, es una de las más aceptadas en el medio geotécnico. La clasificación Rock Mass Rating (RMR) a la roca que va de 0 a 100, basándose en cinco parámetros derivados de las características de la propia masa de roca y un sexto parámetro para aplicaciones específicas a excavaciones subterráneas, cimentaciones o minería:

- a) Resistencia de la Roca.
- b) RQD.
- c) Condiciones del Flujo de Agua Subterránea.
- d) Espaciamiento de las Discontinuidades.
- e) Características de las Discontinuidades.
- f) Orientación de las Discontinuidades.

A cada uno de estos parámetros corresponde una calificación parcial que cuando son sumados todos ellos se determina una calificación global o RMR del macizo rocoso.

a) Resistencia de la Roca

La resistencia de la roca se puede evaluar usando pruebas de compresión simple en laboratorio o mediante la prueba de carga puntual que se relaciona directamente con su resistencia a compresión simple.

La Tabla C muestra la relación entre los rangos de variación de la resistencia a compresión simple, carga puntual y su calificación respectiva.

TABLA C

| Resistencia a Compresión Simple (kg/cm ²) | Índice de Carga Puntual (kg/cm ²) | Calificación |
|---|---|--------------|
| > 2000 | B1 | 15 |
| 1000 - 2000 | 40 - B1 | 12 |
| 500 - 1000 | 20 - 40 | 7 |
| 250 - 500 | 10 - 20 | 4 |
| 100 - 250 | - | 2 |
| 30 - 100 | - | 1 |
| < 30 | - | 0 |

b) Índice de Calidad de Roca (RQD)

La Tabla D relaciona los valores de RQD con una calificación válida para esta clasificación geomecánica.

TABLA D

| RQD (%) | Calificación |
|----------|--------------|
| 91 - 100 | 20 |
| 76 - 90 | 17 |
| 51 - 75 | 13 |
| 25 - 50 | 8 |
| < 25 | 3 |

c) Flujo de Agua

El flujo de agua en la masa de roca puede tener una fuerte influencia en el comportamiento de ésta durante las excavaciones subterráneas. Si existen socavones de exploración o un túnel piloto se puede medir directamente las presiones de agua por medio de gatos hidráulicos. Sin embargo si sólo se dispone de barrenos exploratorios, únicamente se podrán asignar cuatro categorías a las condiciones de flujo de agua, la Tabla E da estas relaciones:

TABLA E

| Gasto por cada 10m de longitud túnel (l/min) | Presión del agua dividida entre el esfuerzo principal mayor | Condición General | Calif. |
|--|---|----------------------------|--------|
| ninguno | 0 | Seco | 10 |
| 25 | 0.0 - 0.2 | Húmedo | 7 |
| 25 - 125 | 0.2 - 0.5 | Agua a presión moderada. | 4 |
| 125 | 0.5 | Problemas severos de agua. | 0 |

d) Espaciamiento de las Discontinuidades.

La presencia de discontinuidades en el macizo rocoso tiene un efecto directo en su comportamiento al reducir su resistencia; el espaciamiento entre éstas así como su rumbo y echado gobiernan esta relación. La Tabla F da las relaciones entre el espaciamiento de las discontinuidades y su calificación:

TABLA F

| Espaciamiento (m) | Calificación |
|----------------------|--------------|
| 3 | 30 |
| 1 - 3 | 25 |
| 0.3 - 1 | 20 |
| 0.005 - 0.3 | 10 |
| 0 - 0.005 | 5 |

e) Características de las Discontinuidades.

Se incluye la separación o abertura de las discontinuidades, continuidad, rugosidad en las superficies de contacto y el material de relleno. La separación o abertura de una fractura o junta tiene una repercusión en la resistencia de la masa así como también la rugosidad de ella. La Tabla G relaciona las condiciones de las discontinuidades con su respectiva calificación:

TABLA G

| Descripción | Calificación |
|--|--------------|
| Superficies muy rugosas de extensión limitada; superficies de roca dura. | 25 |
| Superficies ligeramente rugosas; abertura menor de 1mm; superficie de roca dura. | 20 |
| Superficies ligeramente rugosas; abertura menor de 1mm; superficie de roca blanda. | 12 |
| Superficies lisas, o rellenas de selbando de | |

1 a 5mm de espesor, o abiertas de 1 a 5mm; las juntas se extienden más que algunos metros. 6

Juntas abiertas rellenas con más de 5mm de salbanda, o abiertas más de 5mm; las juntas se extienden más que algunos metros. 0

f) Orientación de las Discontinuidades.

La orientación de una fractura o discontinuidad con respecto a la obra puede tener una influencia notable en el comportamiento del macizo de roca. En esta clasificación geomecánica, Bieniawski recomienda ajustar la suma de los primeros cinco parámetros con un sexto valor que dependerá de esta influencia. La Tabla H presenta esta relación.

TABLA H

| Influencia de la Orientación con la Obra. | Calificación para Túneles. | Calificación para Cimentaciones. |
|---|----------------------------|----------------------------------|
| Muy favorable | 0 | 0 |
| Favorable | - 2 | - 2 |
| Regular | - 5 | - 7 |
| Desfavorable | - 10 | - 15 |
| Muy desfavorable | - 12 | - 25 |

En la Tabla I se muestran los efectos que guarda el rumbo y el echado de una fractura o junta en las excavaciones subterráneas. Esta Tabla fué preparada por Wickman, basada en un estudio detallado y que Bieniawski considera importante:

TABLA I

| Rumbo perpendicular al eje del túnel | | | | Rumbo paralelo al eje del túnel | |
|---|---------|----------------------|---------|---------------------------------|---------|
| a favor del echado | | en contra del echado | | al eje del túnel | |
| echado | echado | echado | echado | echado | echado |
| 45°-90° | 20°-45° | 45°-90° | 20°-45° | 45°-90° | 20°-45° |
| muy favorable favorable regulares favorable | | | | muy desfavorable regular | |

NOTA: Para el echado de 0°-20°: desfavorable, sin tomar en cuenta el rumbo.

Una vez obtenida la suma total de cada uno de los seis parámetros se determina la clase y calidad del macizo rocoso de acuerdo con la Tabla J:

TABLA J

Clasificación Geomecánica

| Clase | Descripción | RMR |
|-------|----------------|----------|
| I | Muy buena roca | 81 - 100 |
| II | Buena roca | 61 - 80 |
| III | Roca regular | 41 - 60 |
| IV | Roca mala | 21 - 40 |
| V | Roca muy mala | 0 - 20 |

CAPITULO 6

ESFUERZOS IN SITU, GEOLOGIA ESTRUCTURAL-TECTONICA

A) ESTRUCTURA GEOLOGICA

El término estructura geológica se emplea para describir las masas rocosas considerando las tres dimensiones. Las estructuras principales están compuestas por un conjunto de otras pequeñas, las cuales han sido formadas por los procesos de sedimentación, intrusión magmática, deriva continental, así como por el ascenso y descenso del nivel de la superficie terrestre en diferentes lugares. La unidad estructural fundamental de las rocas sedimentarias se denomina capa o estrato (estructura en forma de estratificación). Por lo general, los sedimentos se acomodan en forma de capas horizontales sobre el lecho oceánico. Después de millonada de años de sedimentación el movimiento ascendente del lecho oceánico eleva las rocas, dando lugar a la formación de las características topográficas; este movimiento provoca que las formaciones de roca sobresalgan del plano horizontal, como las estructuras en forma de domo (FIG 1.a, Ref. 4). En un domo, las capas buzan radialmente hacia afuera de la cima. La compresión de la corteza terrestre provoca que las capas se plieguen formando estructuras denominadas anticlinales y sinclinales (FIG 1.b,c, Ref. 4).

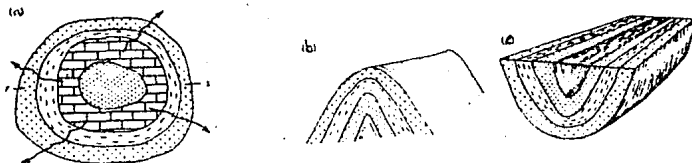


FIGURA 1

B) BUZAMIENTO

Es una de las estructuras geológicas fundamentales. Se define como el ángulo que forma con la horizontal; la dirección de esta pendiente con respecto al Norte también se debe de medir. El echado, también llamado buzamiento, se mide con un clisímetro, (FIG II.a, Ref. 4) el cual se coloca sobre el plano de estratificación de un afloramiento de roca dura, con la brújula se mide el rumbo. La línea que forma un ángulo recto con la máxima pendiente de la capa de roca se llama rumbo. Es la línea horizontal sobre la superficie de la roca (FIG II.b, Ref. 4). El echado se define como el ángulo máximo de inclinación de la capa rocosa, pero hay valores menores de echado en otras direcciones,

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

donde la inclinación decrece a medida que la dirección considerada se dirige hacia la del rumbo, a lo largo del cual el echado, por definición, es por supuesto igual a cero (FIG II.c, Ref.). Las capas muestran su máxima inclinación cuando la visual es paralela a la dirección del rumbo.

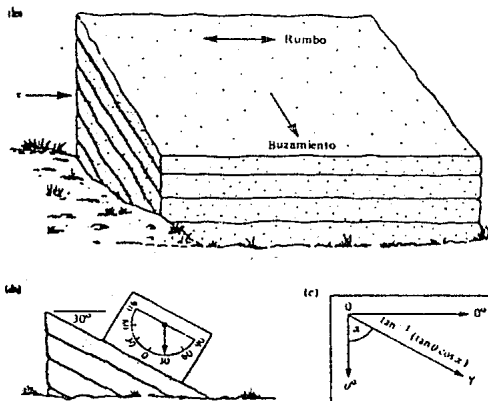


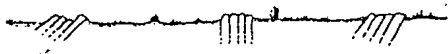
FIGURA II

El objeto de medir el echado es obtener información total sobre la posición tridimensional de las formaciones rocosas que se encuentran bajo la superficie, así como aquellas partes de las mismas que son visible. Los afloramientos aislados de un tipo de roca en particular pueden estar conectados bajo de la superficie o pueden ser partes de diferentes capas. La FIG III (Ref. 4) muestra una de las posibilidades de la forma en que los afloramientos pueden tener continuidad bajo de la superficie como parte de la combinación de un anticlinal y sinclinal. Si las capas desaparecen bajo de la superficie, el análisis estructural se llevará a cabo mediante la estimación de la profundidad de las capas en otros lugares. La FIG III.c (Ref. 4) indica como se calculan las profundidades cuando se conoce el echado. Hay varias razones por las cuales un manto específico no se localiza a la profundidad esperada. La FIG III.d (Ref. 4) ilustra tres de ellas; el echado puede haberse cambiado; el manto pudo haber adelgazado hasta cero; o fallas o fracturas pudieron haber desplazado las capas en varias direcciones. Es común que las

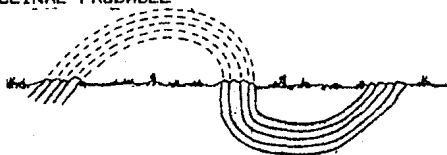
lecturas de los echados no sean constantes en todo el afloramiento ya que las capas no son planos perfectos, sino superficies curvas e irregulares.

FIGURA III

a) AFLORAMIENTO

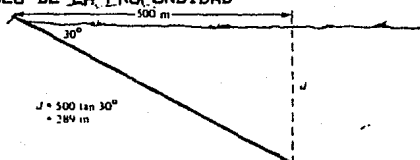


b) ANTICLINAL PROBABLE

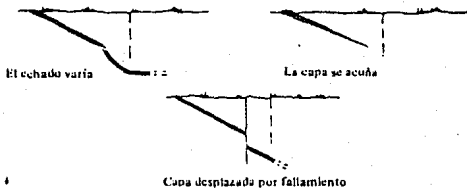


SINCLINAR

c) CALCULO DE LA PROFUNDIDAD



d) VARIACIONES PARA CALCULAR LA PROFUNDIDAD ESPERADA



C) PLIEGUES

Las estructuras plegadas se deben a la compresión dentro de la corteza terrestre generada por el movimiento lateral de los continentes. Los estratos en la zona de compresión se pliegan en forma de estructuras corrugadas (FIG IV.a, Ref. 4). Los plegamientos son provocados por esfuerzos que van de ligeros

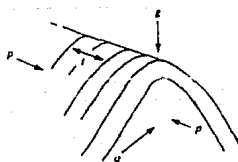
hasta muy fuertes. Cuando la intensidad es muy alta, las formaciones de las rocas se someten a esfuerzos superiores al límite elástico y se rompen. Este proceso se llama fallamiento y, también, cuando las rocas se cizallan debido a la compresión y ocurre un traslape. Cuando todos los planos axiales del pliegue son paralelos entre sí, el plegamiento se denomina isoclinal. El plegamiento es una de las causas de las discontinuidades en las rocas.

El análisis de las rocas sometidas a compresión indica que están sujetas a un campo de esfuerzos, el cual puede representarse por tres componentes (FIG IV.b, Ref. 4): la fuerza lateral activa, que es la que causa la distorsión; la fuerza de confinamiento lateral, debido a la rigidez de la corteza terrestre en el lugar correspondiente; y la fuerza de gravedad, con dirección vertical hacia el centro de la Tierra. Esta fuerza incluye el peso de la roca, desde donde se produce el fenómeno hasta la superficie. Cuando la fuerza lateral activa supera las otras dos, la masa total de la roca es forzada o empujada hacia arriba, formando pliegues y expandiéndose lateralmente. Los fragmentos de rocas rotas en forma natural muestran formas geométricas definidas: planas, rectangulares o rombóedricas. Las estructuras de pliegues y fallas que se forman al mismo tiempo son las principales causas de las discontinuidades que estudian los ingenieros especializados en geotecnia.

FIGURA IV.a



FIGURA IV.b



- g. Gravedad
- p. Fuerza lateral de confinamiento
- q. Fuerza lateral activa
- r. Fracturas de tensión. Se forman cuando se supera la fuerza p

D) FALLAS

Cuando las rocas se pliegan por compresión o cuando se estiran por tensión pueden soportar una cierta cantidad de distorsión, pero finalmente se rompen. Estas grietas en las rocas se llaman fallas. Las fallas tienen estrechos vínculos con las fracturas y con frecuencia, son paralelas. En una falla ha habido rompimiento y desplazamiento, mientras que en una fractura no ha habido movimiento a través del plano de discontinuidad. Cuando las rocas se someten a esfuerzos se generan sistemas de fracturas y, finalmente, ocurre algún movimiento a lo largo de las mismas dando origen a una falla. Todas las fallas causan desplazamiento de las capas y se pueden detectar con facilidad en el terreno.

Las fallas son estructuras geológicas de gran importancia y trascendencia en la ingeniería práctica. Estos accidentes tectónicos pueden ser de diferentes longitudes, pudiendo llegar a medir hasta centenas de kilómetros; dependiendo de la edad, las fallas pueden generar terremotos a lo largo de ellas (debido a la energía liberada), causando daños y destrucción de las estructuras construidas. Al generarse un terremoto, en las fallas se producen desplazamientos diferenciales del terreno, con roturas del mismo, ocasionando saltos, torsiones e inclinaciones superficiales. Estos fenómenos pueden también cambiar las propiedades geotécnicas del terreno, disminuyendo la resistencia, modificar las condiciones de permeabilidad, poner en contacto formaciones litológicas distintas y activar en la mayoría de los casos la erosión diferencial. Las fallas tectónicas en términos generales, se puede dividir en fallas activas o fallas inactivas. Las fallas activas se podrán dividir en fallas sísmicas y fallas a sísmicas. Las fallas sísmicas en términos generales son las que presentan microsisimidad con desplazamientos relativamente transitorios del orden de 10 a 100 cm/seg a lo largo de varias decenas de segundos en intervalos de decenas o miles de años. En las a sísmicas, el desplazamiento es mucho menor, del rango de 0.10 a 10 cm/años.

E) DIACLASAS

Las diaclasas son planos de debilidad en las rocas duras; también se pueden encontrar en rocas suaves muy comprimidas como las arcillas (arcilla sobreconsolidada). Son de las estructuras geológicas más comunes pues afectan a todas las rocas competentes en la superficie. Las diaclasas se pueden clasificar o describir con relación a las características siguientes:

- 1) La Forma.- En el caso de que las diaclasas sean planas y paralelas o subparalelas formando un conjunto o familia se dice que son sistemáticas. Por el contrario, si las discontinuidades de las juntas son curvas, presentando fracturas concoidales y no forman una familia con orientación subparalela se dice que no son sistemáticas.

- II) El Tamaño.- La clasificación es algo arbitrario, sin embargo, el tamaño de las discontinuidades están íntimamente relacionado con la litología y los parámetros de la deformación.
- III) Frecuencia Asociada al Tamaño y a la Orientación.- La frecuencia de las juntas indica el número de planos de un familia de diaclasas en particular. Estas se miden en una dirección transversal entre sí, formando un ángulo recto.

La diferencia entre una diaclasa y una falla es que en la primera no ha habido movimiento a lo largo del plano de debilidad. Las rocas están sometidas a esfuerzos durante millones de años y si se expanden, se forman diaclasas que permiten que el agua se mueva através de la roca, transformando y depositando minerales en solución y rellenando las fracturas. El cuarzo es un mineral de relleno que se encuentra comúnmente en las diaclasas de areniscas; la calcita en las de las caliza.

F) DISCORDANCIAS

Una discordancia es una estructura geológica en la cual un conjunto de capas yacen sobre los bordes inclinados de otro conjunto (FIG V). Hay una discordancia angular entre las dos formaciones o cuerpos de roca. La historia de esta estructura es la sedimentación de las capas "e" a la "n", seguida por un levantamiento del lecho oceánico, erosión de la superficie A-B y, luego, el hundimiento de la zona abajo del nivel del mar, seguido por más sedimentación, lo cual dio origen al grupo superior de rocas (w,x,y). Una discordancia se distingue por la intersección de los límites de dos distintas variedades de roca. La importancia de las discordancias en la geotécnica está relacionada con las notables discontinuidades que contienen; dichas discontinuidades son causadas por dos clases de roca muy distintas entre sí, pero que están depositadas juntas.

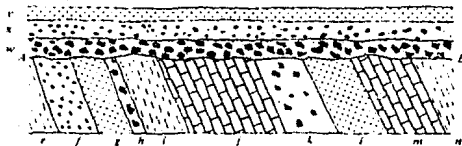


FIGURA V

G) DEFORMACION

La deformación puede ser homogénea o heterogénea basada en los siguientes principios:

Deformación Homogénea.-

- I.- Líneas originalmente rectas permanecen rectas después de la deformación.
- II.- Líneas originalmente paralelas permanecen paralelas.

Deformación Heterogénea.-

- I.- Líneas originalmente paralelas no permanecen rectas, después de la deformación.
- II.- Líneas originalmente paralelas no pueden permanecer paralelas.

La deformación heterogénea puede estudiarse de manera homogénea considerando elementos infinitesimales.

Se puede decir que un objeto puede presentar cuatro diferentes tipos de desplazamientos:

- a) Traslación.- Transporte relativo a un sistema de referencia.
- b) Rotación .- Giro relativo a un sistema de referencia.
- c) Dilatación.- Cambio de volumen.
- d) Distorsión.- Cambio de forma.

Estos desplazamientos se pueden dividir en dos grandes grupos, es decir, aquellos que presentan un movimiento de un cuerpo rígido y los que presentan un cambio relativo entre partículas, es decir, una deformación.

H) MAGNITUD Y DIRECCION DE LOS ESFUERZOS TECTONICOS

La continua actividad de la tierra hace que las masas continentales se encuentren en movimiento permanente. Como una forma de conservación de energía interna de la corteza terrestre se consume en zonas de subducción de placas continentales y se abastece en las zonas o franjas volcánicas; también en los límites o contactos de placas continentales. Esta actividad tectónica (tanto la de empuje entre placas como la volcánica) genera fuerzas actuantes en la corteza terrestre que da lugar a cambios estructurales y litológicos (casos de metamorfismo) y provoca la ruptura de las formaciones preexistentes. Los esfuerzos generados durante esta actividad son almacenados por la roca y sólo serán liberados en una zona al retirar a la roca que

está confinada lateralmente. La remoción de esta roca confinante puede ser natural (erosión) o artificial (excavaciones superficiales o subterráneas). La determinación de la dirección y magnitud de los esfuerzos tectónicos almacenados por el macizo rocoso permite diseñar adecuadamente los soportes requeridos para la estabilización de excavaciones y además comprender como ocurrió el proceso de fracturamiento local o regional y como estos esfuerzos internos afectan la deformabilidad de la masa rocosa. Los métodos de medición de esfuerzos utilizados para conocer la dirección y magnitud de los esfuerzos tectónicos en el macizo rocoso son el método de la roseta de deformaciones y el método del gato plano respectivamente.

CONCLUSIONES

A partir de la investigación realizada se observó que debida a la dificultad que existe para el estudio de las rocas es necesario disponer de una estrecha colaboración entre la Mecánica de Rocas, Geología Estructural, Geología Física y la Geología Aplicada a la Ingeniería Civil, logrando con ello una descripción más detallada de la masa rocosa.

Otro punto importante que se debe destacar es la necesidad de disponer de estudios tanto de exploración y de ensayos de campo y laboratorio actualizados, de macizos rocosos de diferentes zonas de interés e importancia de la República Mexicana. Esta información debe de verse en mapas Geotécnicos, cartas Geológicas y Fotografías Aéreas, cuya escala sea lo suficientemente clara y precisa para poder ser interpretada por un Ingeniero Civil.

Es importante hacer mención de la necesidad de comparar, reintegrar y ampliar la información obtenida a partir de los estudios de exploración superficial, pruebas de laboratorio y ensayos de campo, lográndose con ello disponer de las características, propiedades y comportamiento de las masas rocosas.

Existen propiedades de las rocas que tienen influencia en el comportamiento mecánico de las mismas, entre estas características de las rocas se tienen la porosidad, microfisuración, textura y la mineralogía.

BIBLIOGRAFIA

- (1) TITULO FUNDAMENTOS DE GEOLOGIA FISICA
AUTOR L. DON LEET Y SHELDON JUDSON
EDITORIAL LIMUSA, MEXICO D.F 1984
- (2) TITULO APUNTES DE ROCAS
AUTOR DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCION
EDITORIAL FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM
- (3) TITULO FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRIA
AUTOR GUALTERIO LUTHE GARCIA
EDITORIAL FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM
- (4) TITULO GEOLOGIA PARA INGENIEROS GEOTECNICOS
AUTOR J. C. HARVEY
EDITORIAL LIMUSA, MEXICO D.F 1987
- (5) TITULO PRINCIPIOS DE GEOLOGIA Y GEOTECNIA
PARA INGENIEROS
AUTOR DIMITRI P. KRYNINE Y WILLIAM R. JUDD
EDITORIAL OMEGA, BARCELONA 1980
- (6) TITULO FOTOGEOLOGIA Y CARTOGRAFIA POR ZONAS
AUTOR J. A. E. ALLUM
EDITORIAL PARANINFO, MADRID 1978
- (7) TITULO ELEMENTOS DE FOTOGRAMETRIA
AUTOR BERNARD HERRERA HERRERA
EDITORIAL LIMUSA, MEXICO 1987
- (8) TITULO GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA
CIVIL Y FOTOINTERPRETACION
AUTOR JUAN B. PUIG DE LA PARRA
EDITORIAL LIMUSA, MEXICO 1970
- (9) TITULO INTRODUCCION A LA MECANICA DE SUELOS
Y CIMENTACIONES
AUTOR GEORGE B. SOWERS
EDITORIAL LIMUSA, MEXICO 1975
- (10) TITULO GEOLOGIA DE LA REPUBLICA MEXICANA
AUTOR INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA
EDITORIAL GEOGRAFIA E INFORMATICA
SECRETARIA DE PROGRAMACION Y
PRESUPUESTO
- (11) TITULO DISEÑO DE EXCAVACIONES SUBTERRANEAS
EN MACIZOS ROCOSOS
AUTOR SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE ROCAS
EDITORIAL CENTRO DE ACTUALIZACION PROFESIONAL
MEXICO D.F 1985

- (12) TITULO EXPLORACION GEOLOGICA PARA OBRAS DE
 AUTOR INGENIERIA CIVIL
 EDITORIAL J. ROSAS LOPEZ Y R. PRIETO VELEZ
 MEXICO D.F 1978
- (13) TITULO FUNDAMENTOS DE MECANICA DE ROCAS
 AUTOR D. F. COATES
 EDITORIAL BLUME, MADRID 1973
- (14) TITULO GEOTECNIA DEL INGENIERO
 AUTOR HENRI CAMBERFORT
 EDITORIAL TECNICOS ASOCIADOS, BARCELONA 1975
- (15) TITULO SIMPOSIO EXPLORACION Y MUESTREO
 EN ROCA. VOL.I, VOL.II
 AUTOR SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE ROCAS
 EDITORIAL CENTRO DE ACTUALIZACION PROFESIONAL
 MEXICO D.F 1978
- (16) TITULO MECANICA DE ROCAS EN LA INGENIERIA
 PRACTICA
 AUTOR STAGG Y ZIENKIEWICZ
 EDITORIAL BLUME, MADRID 1970
- (17) TITULO GEOLOGIA EN LA MECANICA DE ROCAS
 AUTOR SOCIEDAD MEXICANA DE ROCAS
 EDITORIAL CENTRO DE ACTUALIZACION PROFESIONAL
 MEXICO D.F 1986
- (18) TITULO MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES
 GEOTECNIA B 1.1
 AUTOR COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 ELECTRICAS
 EDITORIAL COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 MEXICO D.F 1979
- (19) TITULO MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES
 GEOTECNIA B 1.2
 AUTOR COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 ELECTRICAS
 EDITORIAL COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 MEXICO D.F 1979
- (20) TITULO MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES
 GEOTECNIA B 1.3
 AUTOR COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 ELECTRICAS
 EDITORIAL COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 MEXICO D.F 1979

- (21) TITULO MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES
 GEOTECNIA B 1.4
 AUTOR COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 ELECTRICAS
 EDITORIAL COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 MEXICO D.F 1979
- (22) TITULO MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES
 GEOTECNIA B 1.5
 AUTOR COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 ELECTRICAS
 EDITORIAL COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 MEXICO D.F 1979
- (23) TITULO MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES
 GEOTECNIA B 3.4
 AUTOR COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 ELECTRICAS
 EDITORIAL COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 MEXICO D.F 1979
- (24) TITULO MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES
 GEOTECNIA B 3.6
 AUTOR COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 ELECTRICAS
 EDITORIAL COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 MEXICO D.F 1979
- (25) TITULO MECANICA DE SUELOS. VOL. I
 AUTOR E. JUAREZ BADILLO
 EDITORIAL LIMUSA. MEXICO D.F 1985
- (26) TITULO RESISTIVIDAD EN EL LAGO DE TEXCOCO
 SIMPOSIO: LA CUENCA DEL VALLE DE
 MEXICO TOPICOS GEOLOGICOS
 AUTOR R. MORALES Y ET ALL
 EDITORIAL SOCIEDAD MEXICANA DE MECANICA DE
 SUELOS. MEXICO D.F 1989
- (27) TITULO GEOLOGIA
 AUTOR RICHARD M. PEARL
 EDITORIAL CECSA. MEXICO D.F 1974
- (28) TITULO REGLAMENTO DE CONSTRUCCION PARA
 EL D.F. TITULO DECIMO PRIMERO
 EXPLOTACION DE YACIMIENTOS DE
 MATERIALES PETREOS
 AUTOR DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL