

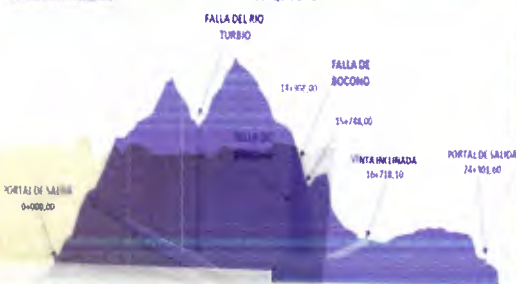
4454654

UCAB Universidad Católica
ANDRÉS BELLÓ
CENTRO CULTURAL PADRE CARLOS G. PLAZA S.J.
BIBLIOTECA CENTRAL - SALA P. PLAZA S.J.
PLANTA BAJA - REFERENCIA

GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA CIVIL



TUNEL DE TRANSMISIÓN SISTEMA HIDRAULICO YACAMBÚ-QUIBOR C.A.



TRAB
IC2013
G3

Ing. Geólogo
ROQUE GARCÍA RUIZ

Agregado 2013

COMENTARIOS DEL AUTOR

La experiencia en la vida profesional y la enseñanza de la materia Geología Aplicada a través de los años ha llevado a la formación de un programa dentro de los lineamientos originales de la materia que relaciona la geología con las obras de ingeniería civil, lo cual está representado por el presente libro de GEOLOGIA APLICADA, que constituye las experiencias de más de cuatro décadas en las grandes obras construidas en el país. Considero que implementar un libro no es tarea fácil y más aún transmitir lo aprendido entre éxitos y reconsideraciones, donde los criterios entre profesionales pueden ser encontrados.

La GEOLOGIA APLICADA como materia del plan de estudios en la carrera del Ingeniero Civil en la Universidad Católica Andrés Bello, (UCAB) al igual que en otras universidades del país, está limitada a un semestre, donde la materia debe abarcar la relación de la Geología con las Obras Civiles. Para el Ingeniero Civil el conocimiento geológico requerido como ciencia debe ser encaminado a su importancia como aplicación en las distintas obras de Ingeniería, tales como presas, túneles y autopistas, en donde los aspectos más importantes que se requieren conocer deben abarcar desde las formas topográficas y su relación con el control geológico, hasta los problemas de estabilidad que pueden afectar el buen funcionamiento de la obra.

La Geología como ciencia la cual abarca para la formación del profesional amplios capítulos en el pensum de estudio desde la formación de la tierra y la actual corteza terrestre, clasificación detallada de minerales y rocas, estructuras geológicas y el desplazamiento de los continentes, los glaciales y la sedimentación, paleontología, etc, todo lo cual debe ser resumido en una materia que se llama GEOLOGÍA APLICADA, en un semestre, indicándose su aplicación en obras de Ingeniería.

En la actualidad las condiciones geológicas en las obras de ingeniería, tienden a simplificarse por los profesionales de diseño mediante un modelo físico, el cual es aplicado a fórmulas complejas para la determinación de deformaciones y resistencia, con resultados visualmente llamativo. Dicho número requiere de criterios adecuados de las condiciones geológicas relacionada con el sitio de la obra.

En el libro se desarrollan una serie de términos en los distintos capítulos, como "macizo rocoso" el cual comienza a utilizarse para la década de los 70, involucra la roca intacta con las llamadas discontinuidades, término el cual en este libro, se considera no acorde a la Geología Aplicada, donde se asocian los planos originales de la formación de la roca según su origen, como son los planos de estratificación y foliación, con el fracturamiento y/o diaclasas. El origen del plano que definen las diaclasas se asocia con el confinamiento del macizo, lo cual involucra variación en el área de dichos planos, pudiendo llegar a las dimensiones de fisura con la profundidad. A lo anterior le podemos agregar el término de meteorización, ampliamente descrito en el capítulo respectivo, cuya aplicación adecuada depende de los efectos climáticos en las rocas, los cuales son más intensos en la zona tropical que en altas altitudes.

“Solicitud” es un término que se utiliza en distintas parte del libro, que relaciona los esfuerzos que se generan en una masa rocosa por las modificaciones topográficas del terreno, dependiendo las propiedades mecánicas de dicha masa del volumen de material involucrado. La resistencia en una masa geológica depende del tamaño de la muestra a la solicitud, donde su homogeneidad se obtendrá a mayor volumen y como consecuencia, uniformidad en sus propiedades mecánicas, tendiendo a disminuir los parámetros de resistencia.

El presente libro de GEOLOGÍA APLICADA abarca 12 Capítulos, los cuales describen en forma aplicada y siempre relacionado con las obras de ingeniería civil los temas de Geomorfología, Mineralogía y Rocas, Estructuras Geológicas, Meteorización, Macizo Rocoso, Exploración del Sub-suelo, Clasificación del Macizo Rocoso, Aspectos Geológicos en obras de Ingeniería: Presas, Túneles y Vialidad. La teoría del libro debe ser combinada con una serie de trabajos prácticos semanales que deben abarcar lo siguiente: a) Delimitación de formas topográficas similares y sus características mecánicas a esperar como dureza del sub-suelo, condiciones de excavación, permeabilidad. La identificación de valle aluvial, terrazas antiguas y problemas de estabilidad debido a la presencia de anfiteatros topográficos. b) Identificación de minerales y rocas c) Problemas de estructuras geológicas mediante trazas de capas, combinando rumbo y buzamiento en tope y base de capa con secuencia de varias capas y determinando rumbo, buzamiento y espesor de capa mediante intercepción en el sub-suelo con perforaciones. d) perfiles geológicos involucrando meteorización y control geológico estructural en diseño de taludes de corte, incluyendo topografía modificada en planta, e) Planillas de perforaciones incluyendo el cálculo y representación gráfica de RQD y permeabilidad, f) Ejercicio integrando trazas de capas, perfil de meteorización determinados mediante perforaciones y/o geofísica sísmica, nivel de agua subterránea, con clasificación del macizo rocoso en un túnel, mediante puntaje de acuerdo a las distintas condiciones geológicas a lo largo del perfil del túnel.

Caracas Diciembre 2012

ÍNDICE

CAPITULO N°1. GEOLOGÍA APLICADA

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 GEOLOGÍA APLICADA.....	4
1.3 OBRAS DE INGENIERÍA A NIVEL MUNDIAL.....	6
1.4 OBRAS DE INGENIERÍA EN VENEZUELA.....	9
1.5 RAMAS DE LA GEOLOGÍA.....	13
1.6 SUELO Y ROCA.....	13
1.7 SOLICITACIÓN.....	15
1.8 EVENTOS GEOLÓGICOS.....	18
1.8.1 EVENTOS DEL PASADO REFLEXIONES PARA EL FUTURO.....	20

CAPITULO N° 2. FORMAS TOPOGRÁFICAS

2.1 INTRODUCCIÓN.....	24
2.2 FORMAS TOPOGRÁFICAS.....	26
2.2.1 PERFIL TOPOGRÁFICO.....	26
2.2.2 FORMAS TOPOGRÁFICAS EN PLANTA.....	29
2.3 DRENAJE.....	33
2.3.1 PATRONES DE DRENAJE.....	33
2.3.2 VALLE ALUVIONAL.....	35
2.4 CONOS COLUVIALES.....	38
2.5 ANFITEATROS TOPOGRÁFICOS.....	40
2.6 EJEMPLOS DE INTERPRETACIÓN DE LAS FORMAS TOPOGRÁFICAS.....	45

CAPITULO N°3. MINERALES Y ROCAS

3.1 MINERALES.....	51
3.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MINERALES.....	53
3.1.2 MINERALES MÁS COMUNES.....	55
3.1.3 MINERALES PRODUCTO DE ALTERACIÓN DE OTROS MINERALES.....	57
3.1.4 LA FORMACIÓN DE MINERALES.....	58
3.2 ROCAS.....	60
3.2.1 ROCA ÍGNEAS.....	60
3.2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS.....	62
3.2.1.2 CUERPOS DE ROCAS ÍGNEAS.....	64
3.2.1.3 INVESTIGACIÓN DE ACTIVIDAD SÍSMICA POR MEDIO DE DIQUES.....	65

3.2.2 ROCAS SEDIMENTARIAS	66
3.2.2.1. ROCAS SEDIMENTARIAS CLÁSTICAS	67
3.2.2.2 ROCAS SEDIMENTARIAS DE ORIGEN ORGÁNICO	70
3.2.2.3 ROCAS SEDIMENTARIAS DE ORIGEN QUÍMICO	70
3.2.2.4 RESISTENCIA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS	71
3.2.3. ROCAS METAMÓRFICAS.....	71
3.2.3.1 CLASIFICACIÓN DE ROCAS METAMÓRFICAS.....	73
3.2.3.2 RESISTENCIA DE ROCAS METAMÓRFICAS.....	76
3.3 CICLO DE LAS ROCAS	77

CAPITULO N° 4. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

4.1 INTRODUCCIÓN.....	79
4.2 PLIEGUES.....	80
4.3 DIACLASAS.....	82
4.4 FALLAS GEOLÓGICAS	83
4.4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS GEOLÓGICAS.	85
4.4.2 DEFORMACIÓN DEL MACIZO ROCOSO POR LA POSICIÓN DE LA FALLA GEOLÓGICA	86
4.4.3 EVIDENCIAS GEOMORFOLÓGICAS DE FALLAS GEOLÓGICAS	87

CAPITULO N° 5. PLANOS. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

5.1 REPRESENTACIÓN DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS.....	92
5.1.1 DIAGRAMA DE ROSETA.....	95
5.1.2 DIAGRAMA DE BARRAS.....	96
5.1.3 REPRESENTACIÓN ESTEREOGRÁFICA.....	96
5.2 EL PLANO GEOLÓGICO EN GEOLOGÍA APLICADA.....	100
5.3 TRAZAS DE CAPAS	102
5.3.1 CAPAS HORIZONTALES.....	103
5.3.2 CAPAS VERTICALES.....	104
5.3.3 CAPAS INCLINADAS.....	106

CAPITULO N° 6. LA METEORIZACIÓN

6.1 DEFINICIÓN	107
6.2 EFECTOS EN LAS ROCAS	108
6.3 LA METEORIZACIÓN EN EL PLANETA TIERRA.....	109
6.4 EROSIÓN	110
6.5 RELACIÓN METEORIZACIÓN –EROSIÓN	111

6.6 PROCESOS DE EROSIÓN EN ROCAS.....	112
6.7 ZONAS DE METEORIZACIÓN	115
6.7.1 EFECTO EN LA RESISTENCIA DE LA ROCA	117
6.8 PERFIL DE METEORIZACIÓN	118
6.9 METEORIZACIÓN DE DIACLASAS	121
6.10 COMENTARIOS	122

CAPITULO N° 7. DIACLASAS, SU ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS

7.1 INTRODUCCIÓN.....	124
7.2 PERSISTENCIA (DESARROLLO DE LAS DIACLASAS)	127
7.3 FRECUENCIA	130
7.4 ABERTURA	132
7.5 RUGOSIDAD	136
7.6 RELLENO	137
7.7 COMENTARIOS SOBRE EL ORIGEN DE LAS DIACLASAS	138

CAPITULO N° 8. EL MACIZO ROCOSO

8.1 LIMITACIÓN DEL TERMINO DISCONTINUIDAD.....	141
8.2 EL MACIZO ROCOSO	144
8.2.1 RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO DE ACUERDO A LA SOLICITACIÓN.....	145
8.3 LA METEORIZACIÓN Y EL MACIZO ROCOSO	150
8.4 PRESENCIA DE INTERVALOS O CAPAS BLANDAS	153
8.5 LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO CON EL TIEMPO.....	154
8.6 LA GEOLOGÍA APLICADA Y LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO.....	155

CAPITULO N° 9. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

9.1 INTRODUCCIÓN.....	156
9.2 PERFORACIONES	158
9.3 ÍNDICE DE CALIDAD DE LAS ROCAS (RQD).....	161
9.3.1 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD A PRESIÓN	162
9.4 MÉTODO GEOFÍSICO SÍSMICO DE REFRACCIÓN.....	166
9.5 MÉTODO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	170
9.6 ETAPAS EN LA EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO	172

CAPITULO N° 10. DATOS GEOLÓGICOS DE CAMPO

10.1 INTRODUCCIÓN.....	174
10.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA	175

10.3 EFECTO DE SOLICITACIÓN EN EL MACIZO	181
10.4 INFLUENCIA DE LAS DIACLASAS	183
10.5 COMENTARIOS	185

CAPITULO N° 11. CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO

11.1 INTRODUCCIÓN	186
11.2 RSR (WICKHAM ET AL 1972)	187
11.3- ÍNDICE Q (BARTON ET AL 1974)	187
11.4 BIENAWSKI (1979)	188
11.5 GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI)	189
11.6 LIMITACIONES GEOLÓGICAS PARA EL USO DE LOS MÉTODOS EMPÍRICOS	189
11.7 FRACTURAMIENTO EN MACIZOS ROCOSOS	192
11.8 VARIACION EN LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO	193
11.9 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICO	194
11.9.1 VALORACIÓN EN MACIZOS ROCOSOS	196
11.10 MODELO GEOTÉCNICO	200

CAPITULO 12. ASPECTOS GEOLÓGICOS EN OBRAS DE INGENIERÍA

12.1 VIALIDAD	208
12.1.1 CASO 1. CONTROL TOPOGRÁFICO DE DISEÑO	209
12.1.2 CASO 2. POSICIÓN DE PLANOS CONTINUOS	210
12.1.3 CASO 3. FRACTURAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO	211
12.1.4 CASO 4. OBRAS DE ESTABILIZACIÓN	212
12.2 OBRA DE EMBALSE	214
12.2.1 CUENCA	214
12.2.2 VASO DE ALMACENAMIENTO	216
12.2.3 PRESA	218
12.3 TÚNELES	219
12.3.1 DEFORMACIÓN SEGÚN EL TIPO DE ROCA	221
12.3.2 ESQUEMA DE DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN	225
12.3.3 ÓVALOS TEÓRICOS DE RESISTENCIA EN SECUENCIA ESTRATIFICADAS O FOLIADAS	227
12.3.4 PORTALES	229
12.4 CONSIDERACIONES FINALES	232

BIBLIOGRAFIA

GEOLOGÍA APLICADA

Los primeros utensilios del hombre durante la edad de piedra utilizados en su defensa y como parte de su evolución en su vida cotidiana, fueron manufacturados con rocas seleccionadas por su gran dureza y propiedades de corte, convirtiendo al hombre prehistórico en los primeros geólogos (8000 AC).

1.1 INTRODUCCIÓN

Como definición, la Geología abarca el estudio de la corteza terrestre a partir de observaciones en su superficie y de la investigación del subsuelo, en forma tal para conocer la secuencia litológica de la formación de dicha corteza en el tiempo y su relación con la aparición de las plantas y los seres vivos.



La persona común relaciona la geología con observaciones en museos donde la presencia principalmente de los grandes esqueletos del pasado constituye la principal atracción. La geología abarca ciento de millones de años que relaciona la formación de la corteza terrestre con la evolución de plantas, animales y el hombre.

Para lo anterior, se considera que toda la superficie de la corteza terrestre se encuentra asociada al tiempo geológico, el cual ha sido dividido por distintos autores en Eras, Períodos y Épocas, desde el primer origen de la vida, en el período Cámbrico de la era Paleozoica hasta el presente, han pasado unos 600 millones de años.



Museo Muja. Asturias. España

En la Lámina Nº 1-1 se encuentra indicada en forma gráfica las distintas eras, períodos y épocas, así como su relación con la aparición de seres vivos, destacándose en el espesor superior de 1/250 mm los eventos más importantes del hombre en los últimos 8000 años, después de la edad de piedra. La evolución alcanzada por los seres humanos hasta el presente constituye un exponencial de conocimiento tecnológico donde el aspecto geológico estuvo presente en dicha evolución, desde

el uso de utensilios de piedras seleccionadas por el hombre de las cavernas hasta la explotación de grande yacimiento minerales en nuestros días.



Museo Villa Romana de Veranes. Asturias. España

Así mismo la construcción de ciudades, monumentos, puentes, acueductos se encuentra relacionada con los aspectos geológicos desde las antiguas civilizaciones del pasado donde el conocimiento adecuado de la piedra como material de construcción, debió constituir una profesión particular, lo cual fue evolucionando con los conocimientos de los yacimientos metálicos.

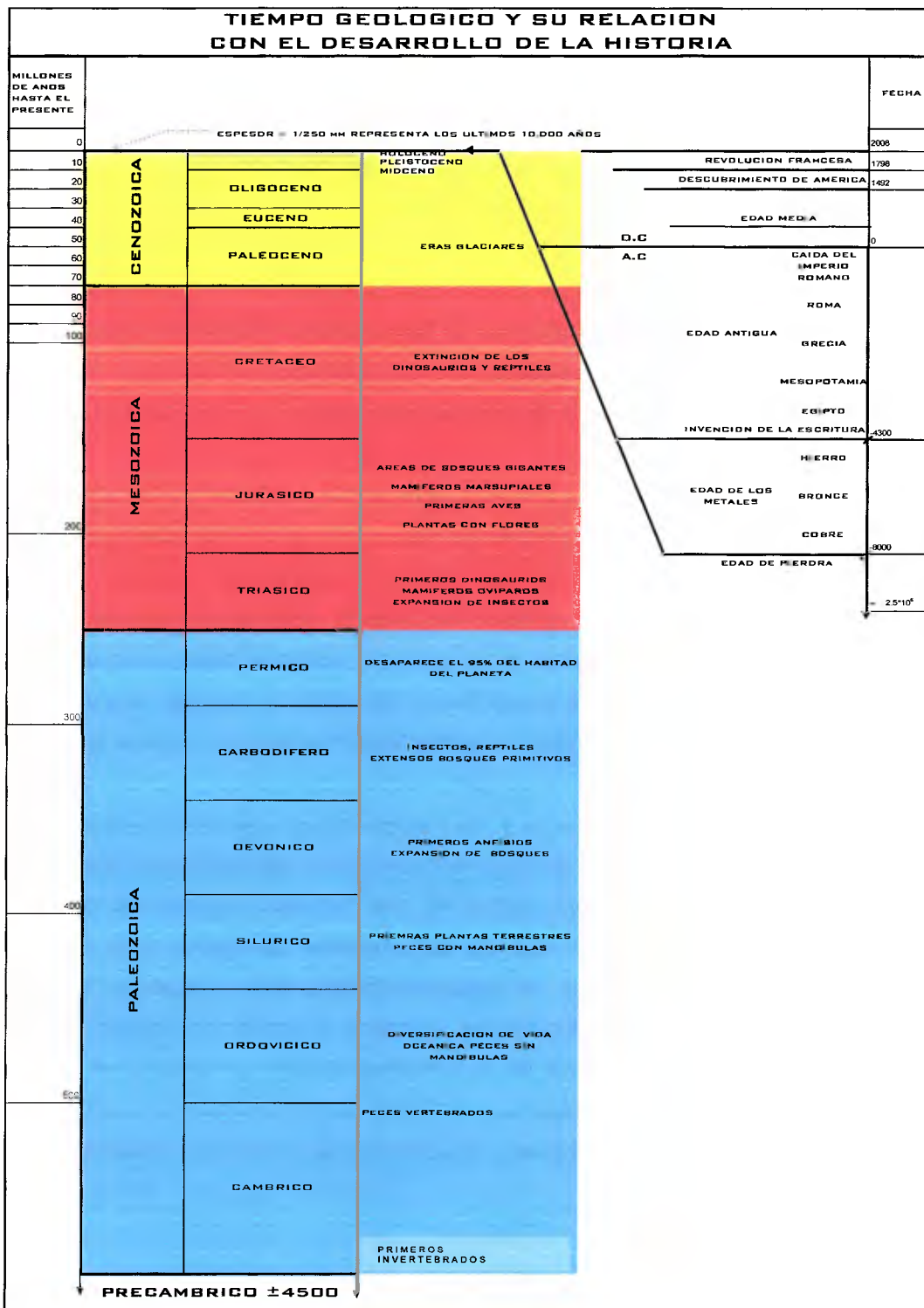


Lámina No. 1.1. Eras, períodos y épocas, así como su relación con la aparición de seres vivos.

1.2 GEOLOGÍA APLICADA

Aunque la **GEOLOGIA** aparenta una gran complejidad, la **GEOLOGÍA APLICADA** abarca el conocimiento de los materiales locales de superficie y del subsuelo donde se desarrollarán la obras de ingeniería, en donde los aspectos geológicos aplicados están relacionados con el comportamiento mecánico de dichos materiales a las solicitaciones generadas por la obra. Las solicitaciones abarcan modificaciones en el estado de esfuerzo ya sea por las cargas aplicadas o excavaciones tanto en superficie como sub-terráneas. El buen entendimiento de los aspectos geológicos por el Ingeniero Proyectista, en conjunto con el Geólogo relacionado con la ingeniería, garantizan la optimización en costos y calidad de la obra.

La Geología Aplicada comienza con la interpretación de las formas topográficas, donde gran número de problemas que pueden presentarse en el futuro seguramente están evidenciados en los planos topográficos. Aunque la interpretación geomorfológica es una rama de la geología muy amplia, existen principios básicos que el ingeniero dedicado a la geología aplicada debe conocer, los cambios de pendiente en el relieve topográficos, densidad de drenaje, conformación de curvas de nivel, son evidencia del comportamiento mecánico a esperar en el sub-suelo.

Las condiciones geológicas y las propiedades mecánicas utilizadas por el Ingeniero de Proyectos en obras de ingeniería, requieren de clasificaciones del macizo rocoso acorde a la solicitud, factor el cual produce variaciones en los parámetros mecánicos, requiriendo que los profesionales dedicados a la Geología Aplicada, entiendan la mecánica de esfuerzo-deformación a esperar. El comportamiento mecánico de una masa rocosa sometido a esfuerzos, no es constante, la cual dependerá de una serie de condiciones donde se destaca el tipo de roca y la presencia de planos estructurales. Estos últimos le infiere una anisotropía al macizo de cuya posición con respecto a la solicitud variara su resistencia.

Las obras de Ingeniería pueden ser agrupadas de la siguiente forma:

- Autopistas, carreteras, vías férreas y de penetración, las cuales forman el grupo de obras de vialidad.
- Presas, derivaciones, conducciones, en general asociadas a obras hidráulicas.
- Túneles, los cuales forman parte de las obras de vialidad e hidráulicas.
- Líneas de transmisión eléctrica y patios de distribución.
- Centrales hidroeléctricas, relacionadas con las obras hidráulicas.
- Urbanismo, en parte relacionados con obras de vialidad.
- Canteras y materiales de préstamo, cuya investigación forma parte de todas las obras anteriores.
- Fundaciones particulares de edificaciones, puentes y viaductos.
- Agua subterránea, tema particular relacionado tanto para el consumo humano, como su presencia en las obras indicadas.

Los aspectos geológicos relacionados con las obras indicadas, los cuales forman parte del alcance de la GEOLOGÍA APLICADA, son los siguientes:

- Litología aflorante y estratigrafía en el subsuelo.
- Estabilidad de las laderas donde se plantean las obras.
- Tipo de excavación requerida, mecánica, escarificador y explosivos.
- Condiciones geológicas que controlan la estabilidad en los taludes de cortes y uso de pantallas ancladas de estabilización.
- Uso del material excavado para construcción de terraplenes.
- Localización y tipo de canteras, así como material de préstamo.
- Condiciones de fundación para estructuras y obras de contención.
- Condiciones de excavación y estabilidad en túneles.
- En general la estabilidad de excavaciones tanto superficiales como subterráneas requerirán de parámetros geomecánicos, relacionados con las condiciones geológicas.
- Presencia, niveles y caudales de flujo de agua subterránea.

En general la factibilidad técnica de una obra de ingeniería está relacionada con las condiciones geológicas, de donde los costos de obra para garantizar su estabilidad pueden ser de mayor o menor importancia. Ejemplo de lo anterior lo podemos considerar en el trazado de una autopista donde para garantizar la estabilidad de altos cortes se pueden requerir o no de pantallas ancladas, lo cual involucra costos importantes. Las condiciones de excavación y sostenimiento de un túnel dependen de las condiciones geológicas, pudiendo requerir de un sostenimiento liviano de bajo costo, o un sostenimiento fuerte a muy fuerte con problemas de estabilidad durante la excavación. Para el caso de una presa la estanquidad del vaso requiere su garantía, así mismo la estabilidad de las laderas.

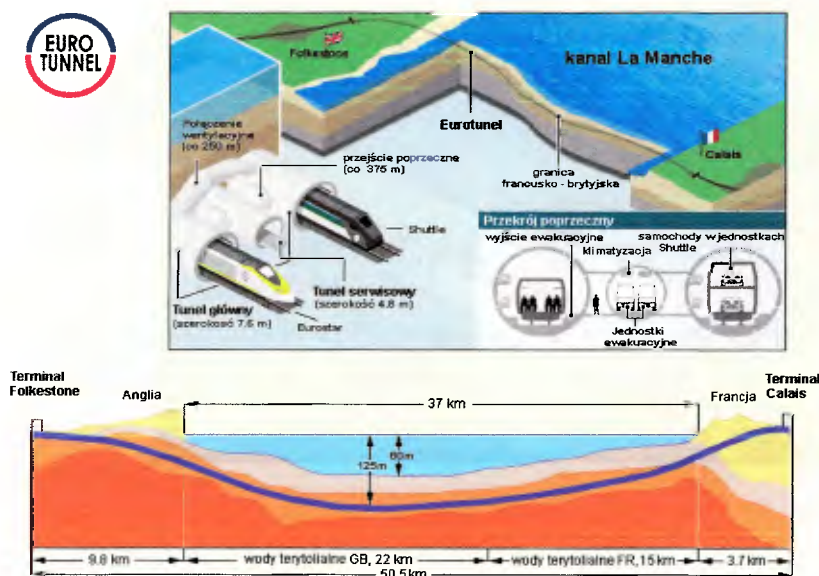
1.3 OBRAS DE INGENIERÍA A NIVEL MUNDIAL

Son numerosas las obras de ingeniería donde los aspectos geológicos son el fundamento para la ubicación y ejecución de las mismas, principalmente en represas y vialidad, existiendo numerosos ejemplos a nivel mundial. Estos rebasan por su importancia las fronteras de las naciones, como fue a comienzos del siglo XX



el canal de Panamá, el cual permitió la comunicación entre los Océanos Atlántico y Pacífico con una longitud de 80 Kilómetros y en la actualidad, al comienzo del siglo XXI, la construcción del Eurotúnel entre Inglaterra y Francia, de 50 Kilómetros de longitud, de

los cuales 39 Km son submarinos. Para el Canal de Panamá, se requirieron excavar $183 \times 10^6 \text{ m}^3$ haciendo uso de las primeras máquinas de excavación a vapor, donde gran parte del material fue transportado con ferrocarriles. Lo anterior contrasta con el Eurotúnel constituido por dos túneles principales de 7,6 m de diámetro y uno de servicio de 4,8 m, excavado con máquina rotativa de tecnología de punta, denominadas *Tunnel Boring Machine* (TBM).



Fuente Google 2011

Son numerosos los túneles excavados y en excavación en Europa, pudiendo mencionar el túnel carretero de San Gotardo a través de los Alpes Suizos, de 17 Kilómetros de longitud y de 7,8 m de ancho, entrando en funcionamiento en 1980. El túnel fue excavado por medio convencional de avance, con voladuras y sostenimiento con concreto lanzado y pernos de anclaje. En la actualidad se encuentran en excavación para el ferrocarril en el sector de San Gotardo, los túneles más largo del mundo, constituido por dos ductos de 57 Kilómetros de longitud, utilizando máquina excavadora TBM, teniendo como fecha prevista para su funcionamiento el año 2014.

En Noruega, en el año 2000, entro en funcionamiento el túnel carretero de Laerdal de 24 Kilómetros de longitud. En Irlanda, el Proyecto Hidroeléctrico de Karahnjukar está constituido por varias presas, donde una de ellas alcanza la altura de 193 metros. Tiene 72 Kilómetros de túnel (uno de ellos de 39,7 Kilómetros), excavados con TBM, su construcción comenzó en el 2000 y entro en funcionamiento en el 2009.



Presa Tres Gargantas, República China. (Google)

Una de las presas de gravedad en concreto más alta del mundo, se encuentra en China, denominada Las Tres Gargantas sobre el río Amarillo, de 185 m de alto y 2300 metros de longitud, con 32 turbinas para una potencia instalada de 700 MW cada una, para un total de 22.500 MW.



Presa Raúl Leoni, CVG, Venezuela

En Venezuela la presa Simón Bolívar (Raúl Leoni) sobre el río Caroní, tiene una altura de 162 metros, el sector principal donde se encuentra el aliviadero y las unidades de generación es de concreto gravedad con transición a presas de enrocado, seguido por sección en tierra, donde la longitud total de presa es unos 7000 ml. La potencia

instalada es de 10.000 MW.

La Presa de Guavio en Colombia sobre el río del mismo nombre, es la tercera presa más alta del mundo, posee 247 m de altura y está constituida por enrocado con núcleo de arcilla, las aguas pasan a través de un túnel hacia una central subterránea, disponiendo de una potencia instalada total de 1.213 MW.

La represa de Itaipu entre las fronteras de Brasil y Paraguay, sobre el río Paraná, posee 196 m de altura de concreto gravedad y de 7750 m de longitud.

La presa de Nurek en Tadjikistán de concreto gravedad constituye en su tipo la más alta del mundo con 300 metros.



Una obra estructural de imponente belleza, lo constituye el Viaducto Millau en la Autopista Paris- Barcelona, tramo Clermont- Perpignan, de 2460 m de longitud y pilas de 336 metros de altura, en siete (7) tramos.

1.4 OBRAS DE INGENIERÍA EN VENEZUELA

En los últimos 50 años de la Ingeniería en Venezuela, se han realizado una serie de obras de gran importancia para el país, principalmente entre las décadas de los 70 y 80, en donde los aspectos geológicos controlaron el diseño, pudiendo destacar las siguientes:

- Presa hidroeléctrica Raúl Leoni, sobre el río Caroní, con una sección de presa de concreto gravedad de 162 m de alto y 1500 m de longitud, seguida por presas de enrocado y tierra, hasta completar una longitud de 7 Km.
- Complejo hidroeléctrico José Antonio Páez, constituida por una presa de contrabóveda de unos 70 m de alto, seguido por 10 Kilómetros en túnel y una caída vertical de 600 m.
- Complejo hidroeléctrico Uribante-Caparo, constituido por cuatro presas de unos 100 m de alto cada una, con generación a través de túneles de 8,5

Kilómetros de longitud. Así como la generación al pie de presa en el río Caparo a la cota inferior del sistema.

- Sistema Hidráulico Yacambu- Quibor (SHYQ), de importancia mundial por un túnel de 24 kilómetros de longitud que atravesó la falla geológica de Bocono,



con un espesor de brecha de 1300 metros. El sistema lo complementa una presa de enrocado de 160 metros de alto, con pantalla de concreto, la cual se muestra en la fotografía. El agua será utilizada una parte para consumo humano de la ciudad de Barquisimeto y otra distribuida para riego en el amplio valle de Quibor. Se tiene previsto el funcionamiento del sistema para finales del año 2012.

- El país cuenta con 97 presas, de las cuales 85 fueron construidas a partir del año 1960, destacándose en la década del 70, un total de 30 presas inauguradas.
- El sistema de abastecimiento de agua que conforman el Acueducto Regional del Estado Táchira, conocido por sus siglas ART, en funcionamiento desde 1982. Está constituido por 20 Kilómetros de túneles de longitudes 8, 9, 2 y 1 Kilómetros, por donde trasvasa el agua de los ríos en cuenca montañosa, la cual es captada por medio de derivaciones.
- Las líneas subterráneas del Metro de Caracas, que cruzan la región capital, donde están construidas y se han puesto en funcionamiento las líneas 1, 2 y 3, junto al sistema Metro Los Teques, la primera en funcionamiento en 1989 y la última recientemente construida en el año 2005.
- La ciudad de Caracas cuenta con un sistema vial de acceso de alto estándar, donde se han requerido varios túneles a) Autopista Caracas-La Guaira, con los túneles de Boquerón N° 1 y N° 2 b) El enlace la Planicie-El

Valle con tres túneles c) La autopista Centro Occidental con 2 túneles d) La Autopista de Oriente con dos túneles.

- La carretera Mérida – El Vigía de especial interés, en donde se requirieron varios túneles y estructuras sucesivas en el tramo entre Estanques y El Vigía: Túnel Estanques 1500 m, Túnel Caña Brava 600 m, Túnel Mocoties-Santa Teresa de 2800 metros.



- Líneas Eléctricas de 400 y 800 Km entre el Gurí y el Centro-Occidente del país con más de 3000 Kilómetros de longitud.

En la actualidad en el país están previstas o en ejecución una serie de obras de Ingeniería, donde las condiciones geológicas son de gran importancia, como son las siguientes:

- Líneas 4 y 5 del Metro, esta última unida a un ferrocarril entre Petare-Guarenas y Guatire de 38 Kilómetros de longitud.
- La Línea 2 del Metro de Los Teques – San Antonio – La Mariposa en ejecución con una longitud de unos 20 Kilómetros.
- La continuación de la Autopista de Oriente hasta Píritu, con una longitud de unos 100 Kilómetros y la autopista Cumaná – Puerto La Cruz de unos 60 Kilómetros.
- Ferrocarril San Juan de Los Morros – Dos Caminos – San Fernando de Apure con unos 250 Kilómetros, actualmente en construcción.

- Ferrocarril Chaguaramas – Caicara, 205 Kilómetros en ejecución.
- Tercer puente sobre el río Orinoco, entre Caicara – Cabruta, de unos 2000 metros, seguido por largas estructuras de acceso.
- Autopista Los Llanos, desde Tinaco hasta Crucero de Aragua, así como el ramal Dos Caminos – San Juan con una longitud total de 525 Kilómetros.
- Construcción en la actualidad de la presa Tocoma, que en conjunto con la presa Caruachi, Macagua y Gurí, forman el sistema de aprovechamiento hidroeléctrico del río bajo Caroní con generación de unos 10.000 MW en Guri, con un total de 17.760 MW.



En general, las obras de ingeniería actualmente para el año de 2011-13 en proyecto y ejecución, están relacionadas con obras de vialidad y ferrocarriles, estando previsto en el presente año el comienzo de la construcción de la presa Cuira, localizada sobre el río de igual nombre, a unos 50 km al Oeste de la zona de Caracas, constituyendo el ultimo aprovechamiento hidráulico para abastecimiento de agua cercano al área capital. La presa Cuira tendrá 85 metros de alto, con proyecto a base de concreto compactado (RCC).

1.5 RAMAS DE LA GEOLOGIA

La Geología como ciencia de investigación se apoya en distintas ramas, que constituyen especialidades particulares en profesionales, pero las cuales deben ser conocidas por el Ingeniero Proyectista, fundamento en su uso como GEOLOGIA APLICADA. Dichas ramas son las siguientes:

ESPECIALIDAD	DESCRIPCIÓN
Mineralogía	Estudio de la formación y composición de minerales, estando relacionada en geología aplicada, con su dureza y durabilidad.
Petrología	Estudio de las rocas, de uso en todas las obras en construcción, debiendo conocer sus condiciones de dureza y durabilidad con el tiempo.
Geomorfología	Estudio de las formas topográficas superficiales, las cuales son un reflejo de las condiciones geológicas del subsuelo.
Geología Estructural	Estudio de los efectos de fuerza tectónica en las rocas, siendo las más conocidas las denominadas fallas geológicas, así como el fracturamiento en las rocas.
Geofísica	Relaciona las propiedades físicas de las rocas en el subsuelo con la investigación a través de mediciones indirectas desde la superficie o en el subsuelo, permitiendo su identificación y cuantificaciones mecánicas.
Paleontología	Estudio del origen de la vida en el tiempo geológico, su uso en geología aplicada puede estar relacionado con eventos catastróficos recientes.

En general, las ramas anteriores constituyen materias particulares para la formación del **GEÓLOGO**, las cuales deben ser conocidas para su aplicación en **GEOLOGÍA APLICADA** y forman parte del conocimiento profesional.

1.6 SUELO Y ROCA

Un aspecto importante en **GEOLOGÍA APLICADA**, es la diferenciación de los termino Suelo y Roca, ampliamente analizados a nivel mundial con temas específicos respectivamente como Mecánica de Suelos y Mecánica de Rocas. En la práctica común el uso de ambos términos no está bien limitado, donde de acuerdo a Terzaghi “se llama suelo a todo agregado natural de partículas minerales separables por medios mecánicos de poca intensidad, como agitación en agua”.

Los suelos se forman de las rocas existentes, sobre las cuales actúan efectos mecánicos y/o químicos, debilitando su superficie, seguidos por fenómenos de erosión y transporte del material disgregado, los cuales se sedimentan al disminuir la velocidad de dicho transporte. En algunos casos puede no existir transporte, lo cual da lugar a alteración de la roca en sitio. La definición de suelo de Terzaghi puede ser complementada de acuerdo a su origen, principalmente lo podemos clasificar en: aluvial, coluvial y residual; los dos primeros transportados y el tercero con formación en sitio.

Suelo Aluvial. Se forma por el transporte en presencia de agua de partículas, producto del proceso de erosión en la superficie terrestre, cuya deposición depende de los cambios de velocidad en el flujo, en forma selectiva, acumulándose en estratos en general horizontales y con lenticularidad. Normalmente en la fracción gruesa, las partículas se encuentran en forma sub-redondeadas a redondeadas.

Los depósitos aluviales están generalmente constituidos en forma vertical y alternante por estratos de gravas, arenas, limos y arcillas, donde las curvas granulométricas pueden ser clasificadas como mal gradadas.

Suelos Coluviales. En general se forman cercanos a la fuente de origen, ya sea por inestabilidad en las laderas y/o grandes aportes de materiales saturados producto de la erosión, donde el transporte lo constituye principalmente la gravedad. Los materiales obtenidos constituyen mezclas heterogéneas con curvas granulométricas generalmente bien gradadas. Como ejemplo, los materiales se clasifican como gravas areno-arcillosas o arenas limo-arcillosas, donde comúnmente la fracción gruesa posee forma angular a sub-angular.

Suelos Residuales. Son suelos que se forman en sitio (*in-situ*), debido a cambios mineralógicos por efecto de "meteorización", término que será ampliamente analizado en los capítulos siguientes. Ocurre en este caso, un cambio químico en los minerales, principalmente por procesos de oxidación y/o hidratación, sin transporte. Están constituidos por materiales arcillosos y/o limosos, con generación de colores rojizos relacionados con minerales con presencia de hierro en su composición.

Otros tipos de suelos de acuerdo a su origen y de gran importancia local se encuentran relacionados con los glaciares, lagos y desiertos. En los glaciares, los cuales ocuparon grandes extensiones en el pasado, el proceso de erosión al paso del hielo y la sedimentación por el transporte del agua del deshielo, originaron suelos arenosos y gravosos de características especiales. En las zonas relacionadas con antiguos lagos es característica una sedimentación gradada en forma de delgadas capas que pasan de arenas muy finas, a limos y arcillas, denominados como varvados. En los desiertos son conocidas las grandes extensiones de arenas de transporte constante por el viento.

El término **Roca** es definido como un agregado de minerales o de fragmentos de otras rocas, fuertemente cementadas, cuyas características de textura dependen de su clasificación según su origen; ampliamente conocidas como: a) Ígneas, formadas por la solidificación del magma, b) Sedimentarias, formadas por fragmentos provenientes de otras rocas, y c) Metamórficas, donde las rocas existentes, ígneas, sedimentarias y metamórficas, han sido sometidas a altas presiones y temperaturas.

La diferencia entre suelo y roca, lo constituye principalmente en estas últimas, su textura o fábrica, relacionadas con la dureza, muy superior a la de los suelos. Es importante destacar que el término de roca es relacionado por el profesional común con la dureza, pero en Geología Aplicada dicha dureza está asociada a la condición física de la roca por efectos del proceso de meteorización, termino el cual será ampliamente descrito en el Capítulo N°6. En general, el relieve montañoso está controlado por rocas y los terrenos planos o de baja pendiente por suelos.

1.7 SOLICITACIÓN

El término Solicitación debe ser entendido por el especialista en GEOLOGÍA APLICADA, como los esfuerzos que se generan en una masa rocosa por las modificaciones topográficas del terreno, dependiendo las propiedades mecánicas de dicha masa del volumen de material involucrado. Los valores de resistencia de una masa rocosa no son constantes y dependerá de la magnitud y la anisotropía de la masa involucrada en dicha modificación. La resistencia en una masa geológica depende del tamaño de la muestra a la solicitud, donde su homogeneidad se obtendrá a mayor volumen y como consecuencia, uniformidad en sus propiedades

mecánicas, tendiendo a disminuir los parámetros de resistencia. Ejemplo de lo anterior lo podemos visualizar en una muestra arenosa, donde a tamaño de grano, su estabilidad y resistencia dependerá de la resistencia en si del sólido, en cambio en una excavación de mayor magnitud que abarque la masa arenosa, los valores de resistencia dependerán de la fricción interna entre los granos de arena, con pérdida de la denominada cohesión. Véase Figura N°1-1.

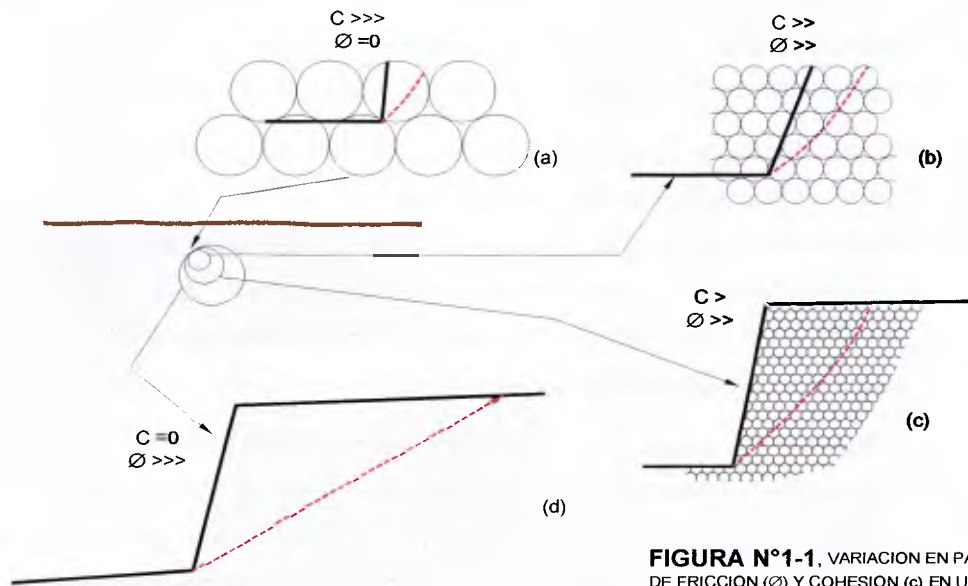


FIGURA N°1-1. VARIACION EN PARAMETROS DE FRICCION (ϕ) Y COHESION (c) EN UNA MASA ARENOSA, DE ACUERDO A LA ESCALA

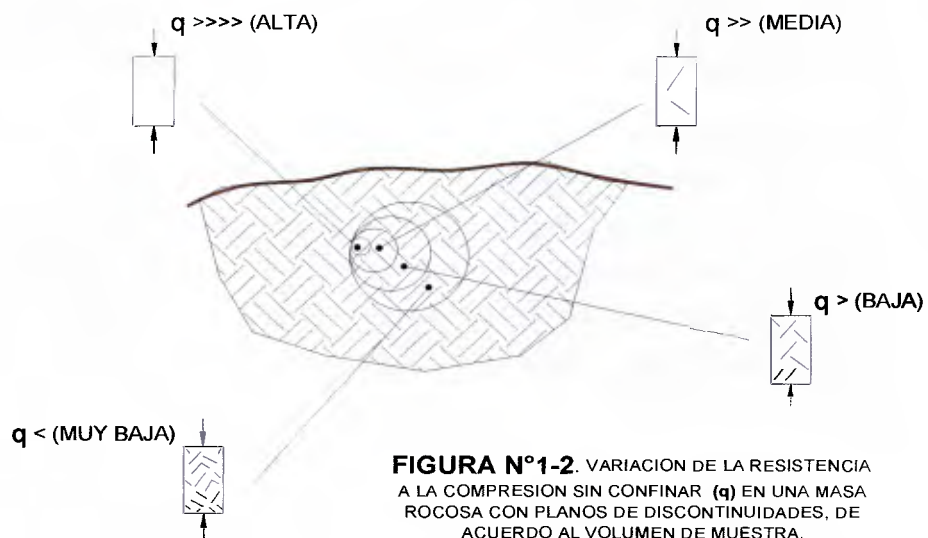
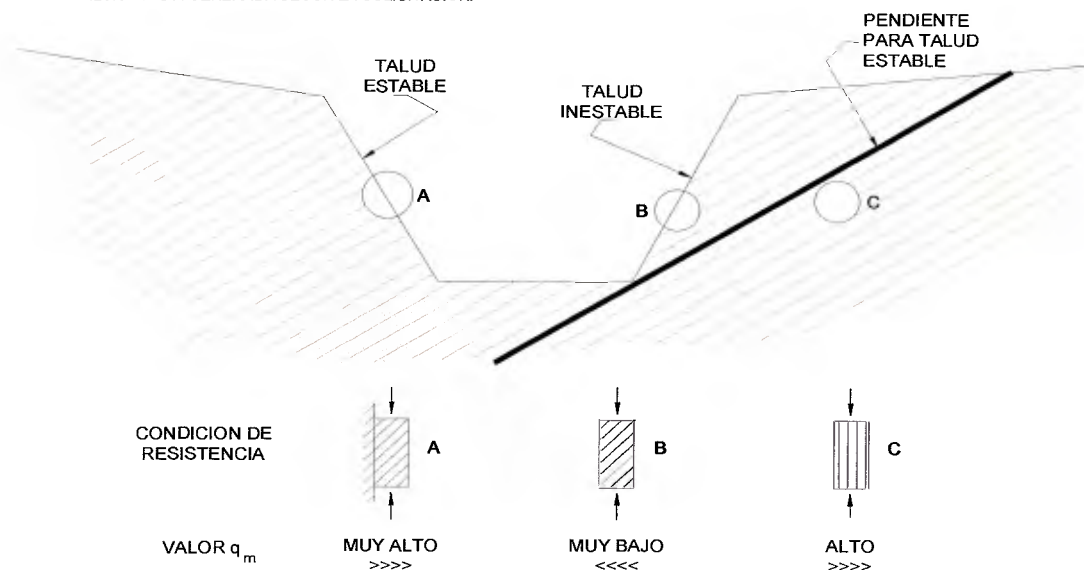


FIGURA N°1-2. VARIACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION SIN CONFINAR (q) EN UNA MASA ROCOSA CON PLANOS DE DISCONTINUIDADES, DE ACUERDO AL VOLUMEN DE MUESTRA.

Las masas rocosas, tal como será descrito en los capítulos siguientes, no son homogéneas, sino que están afectadas por una serie de planos que han sido mal agrupados en cuanto a la denominación con el término de discontinuidad. Éstos varían en extensión y características de su superficie, y pueden ser visualizados como planos que rompen la continuidad de masa rocosa, donde a mayor volumen de relieve modificado, el numero de planos será mayor, disminuyendo la resistencia final. Véase Figura N°1-2.

Cuando los planos son de gran continuidad, la resistencia de una masa rocosa dependerá de la posición de dicho plano a la solicitación. Ejemplo de lo anterior lo observamos en la Figura N°1-3, que muestra una excavación en trinchera, controlada por una secuencia de rocas sedimentarias, constituidas por capas, las cuales están limitadas por planos continuos y en donde la estabilidad depende de la posición de dichos planos con respecto al talud de corte.

FIGURA N°1-3. CONDICIONES DE ESTABILIDAD EN UNA EXCAVACION EN TRINCHERA, EN UN MACIZO DE ROCAS ESTRATIFICADO, DE ACUERDO A LA RESISTENCIA GENERADA SEGUN LA SOLICITACION.



Otro ejemplo de solicitación lo podemos entender en un túnel controlado por capas de rocas sedimentarias, limitadas por planos paralelos, donde la estabilidad de la sección depende de la posición de la capa con respecto a la cavidad excavada y la relación espesor de capa versus ancho del túnel, los cuales constituye un factor a

los fenómenos de flexión, similar al comportamiento de una viga. En la Figura N° 1-4 se muestra la deformación a esperar de acuerdo al ancho del túnel, la cual será proporcional a la relación B/D , siendo B el ancho del túnel y D el espesor de las capas.

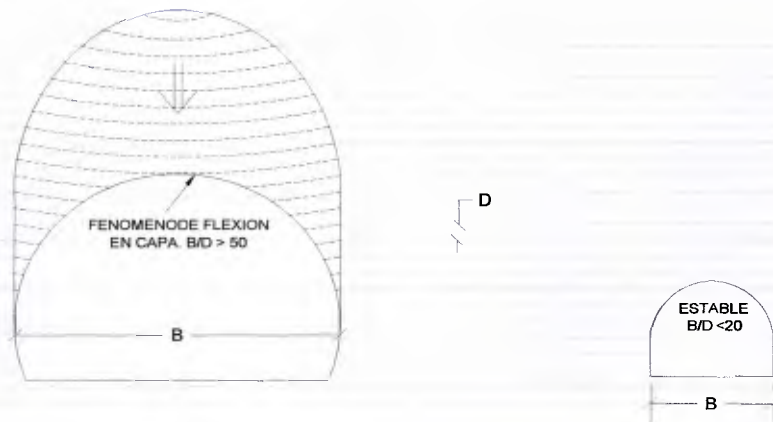


FIGURA N° 1-4. PROBLEMA DE DEFORMACION EN TUNELES EXCAVADOS EN UN MACIZO DE ROCAS ESTRATIFICADA, CON LAS CAPAS HORIZONTALES. DEFORMACION A ESPERAR SEGUN LA RELACION ANCHO DE LA EXCAVACION / ESPESOR DE CAPA

1.8 EVENTOS GEOLÓGICOS

Es importante destacar que los mismos eventos que afectan la corteza terrestre en el presente, han actuado en el pasado, y su efecto se multiplica por el tiempo geológico. Los evidentes procesos de erosión y aporte de sedimentos que normalmente controlan los diseños de embalse en períodos de 20 a 50 años, constituyen grandes aportes de material tomando en cuenta que en un millón de años, su acumulación alcanzará 20.000 veces lo estimado. Lo anterior es la evidencia de un desgaste acentuado de las montañas, con cambio total en el tiempo geológico de las formas topográficas.

Los cambios climáticos, en conjunto con la rotación del eje de la tierra, son eventos de gran magnitud, que han afectado tanto la fauna como la flora en su evolución como se evidencia en una historia geológica mostrada en museos y películas.

Anualmente los llamados desastres naturales son noticias, como:

.....amplios deslizamientos de tierra cubrieron el caserío.....

.....las costas fueron abatidas por altas olas producto de un tsunami.....

- terremoto ocasiona pérdida de vidas.....
- deslaves afectan amplias áreas urbanas.....
- el nivel del mar sube un centímetro al año por efectos climáticos en la corteza terrestre.....
- la falla geológica de San Andrés se desplazó 10 centímetros.....
- la placa tectónica del Caribe avanza sobre el Pacífico.....

Dichos desastres, aumentados o afectados por el tiempo geológico, modifican la corteza terrestre y el hábitat, lo cual se puede observar en cualquier museo de Ciencias Naturales a nivel mundial.

Cualquier obra de ingeniería no está exenta de los fenómenos anteriores, donde el riesgo debe ser evaluado en forma similar a los efectos sísmicos en construcciones, que toman en cuenta , por ejemplo, la fuerza de aceleración para dar respuesta a las ondas sísmicas en las estructuras. Lo anterior forma parte del diseño hasta cierta magnitud, en donde valores de aceleración pueden generar grandes deformaciones en la corteza terrestre con volcamiento de obras y estructuras.

Muchas ciudades antiguas en Europa, pudiendo mencionar Roma, Paris y Londres



se encuentran construidas en la actualidad sobre los restos de niveles inferiores, a 15 o 20 m de profundidad, los cuales están siendo rescatados por medio de excavaciones, en donde contrasta en forma vertical la civilización antigua de la moderna.

Las urbanizaciones o ciudades al pie de monte, pueden estar sometidas con el tiempo a problemas de deslaves o inestabilidad en las laderas cuyo riesgo puede ser evaluado. Así mismo, se pueden planificar obras de control de forma tal de aminorar estos efectos. En la actualidad, las mediciones con satélites y las imágenes generadas por éstos, pueden ser implementadas para establecer medidas

preventivas y controles de desastres en zonas donde pueden ocurrir movimientos de masas catastróficos.



Un ejemplo reciente de lo anterior lo tenemos en Venezuela, donde en Diciembre del año 1999, lluvias anormales ocurridas principalmente en el área de Maiquetía – Caraballeda, ocasionaron una serie de deslaves desde la montaña hacia las zonas pobladas aguas abajo, con grandes

aportes de sedimentos que cubrieron viviendas y edificaciones, con espesores de hasta 10 m. En la actualidad, los sedimentos han sido removidos casi en su totalidad con la ayuda de equipos modernos de excavación, con el despeje de los restos de viviendas, las cuales han sido reconstruidas al nivel original. Si el desastre hubiera ocurrido hace unos 1000 años atrás, la remoción de los materiales no sería posible, tal como ha ocurrido en la antigüedad en otros países y donde normalmente se procedía a ejecutar nuevas construcciones

Detalle de materiales arrastrado en el deslave de Vargas. Diciembre de 1999. Venezuela



sobre la superficie existente. El termino deslave se relaciona por problemas de estabilidad en laderas, debido a la perdida de resistencia de los materiales por efecto de saturación, relacionado con periodos de lluvias constantes.

1.8.1 Eventos del pasado reflexiones para el futuro.

En la actualidad debido a los adelantos tecnológicos de comunicación, el ser humano en su corto periodo de vida (70 años) en el tiempo geológico, tiene conocimiento en tiempo real de una serie de eventos naturales como: terremotos, tsunamis, amplios deslizamientos de tierra, deslaves etc., que afectan poblados y ciudades, con crecido número de víctimas. Estos eventos han ocurrido en el tiempo

geológico y han afectado al ser humano desde su aparición en la tierra, donde su conocimiento dependía de rastros físicos y/o la transmisión oral de un ser humano a otro.

Cuando observamos reportajes de las grandes civilizaciones del pasado, nos preguntamos cómo afectaron a la humanidad los eventos naturales que se han generado en el tiempo geológico con una mayor o menor intensidad que los actuales. ¿Dichos eventos orientaron la ubicación de ciudades en sectores de menor riesgo, o fueron ubicadas a capricho o por condiciones religiosas? En el continente Americano abarcando las civilizaciones Aztecas, Mayas e Incas, se destaca la alta tecnología para la época en construcción de edificaciones, abastecimiento de agua, riego, estudio científico del sistema solar y condiciones de tiempo, nos preguntamos porque la ubicación de sus construcciones, tienen relación con los eventos naturales?.

Cuando observamos, como ejemplo, ciudades como Machu-Pichu en Perú, construida en un relieve de cotas altas, abrupto, escarpado, pudo haber sido una solución habitacional y/o cultural, ubicada para mayor seguridad en un terreno rocoso, que su construcción a cotas bajas hacia los valles de ríos, donde las lluvias intensas generan los denominados deslaves, así como amplios deslizamientos de tierra e inundaciones, que podrían afectar las poblaciones hasta su



Vista de la ciudad de Machu-Pichu. Perú

desaparición total. Los Ingenieros y geólogos, para la época debieron analizar distintas alternativas de ubicación de poblados y riesgos de los existentes, basados en las experiencias propias o de sus antepasados cercanos, lo cual los llevo a la construcción de ciudades que se han conservado en el tiempo. Las experiencias debido a posibles cambios climáticos en el pasado en conjunto con eventos geológicos destructivos, debieron orientar su ubicación en sitios con menos problemas.

En los últimos 50 años, la Tierra ha tenido importantes cambios climáticos, que en conjunto con las fuerzas destructivas de la naturaleza, han acabado con ciudades y poblados, llevándose un gran número de vidas humanas. Los casquetes polares han retrocedido y fenómenos de cambios climáticos del Niño y la Niña, han originado intensas lluvias con problemas de deslaves y/o deslizamientos, siendo el más reciente el sucedido en Brasil a comienzo de Enero de 2011, donde en la región de Serrana a unos 100 kilómetros al Norte de Sao Paulo, hubo unos 1000 muertos.



Recientemente el 11 de Marzo de 2011, el mayor terremoto de la historia de Japón se origina en la costa oriental, en el sector de Tohuko a unos 300 kilómetros al norte de Tokio, cuya magnitud 9, lo coloca como el cuarto a nivel mundial.



El origen del terremoto ocurrió en el mar frente a la ciudad Sendai, a unos 130 kilómetros de la costa, lo cual origino un gran tsunami, con olas de más de 10 metros de alto, que avanzaron sobre la isla, arrastrando un número importante de poblados. De acuerdo con la información existente el número de muerto se estima en 10.000 sumados a más de 16.000 desaparecidos.



Gran parte de las poblaciones y ciudades importantes se encuentran localizadas hacia la línea de costa, donde la variación en ascenso del nivel del mar constituye un problema que debe ser evaluado y considerado en la expansión y desarrollos futuros. Así mismo un numero importantes de ciudades se encuentran en amplios valles de ríos y quebradas, cuyo origen de conformación topográfica suave, en el pasado geológico cercano, se debió a grandes aportes de sedimentos, debido a deslaves y deslizamientos, cuyas cicatrices en las laderas se evidencian en la actualidad.

Los cambios climáticos y su relación con eventos geológicos del pasado, constituyen un tema de interés que debe ser tomado en cuenta en los desarrollos urbanísticos del presente y futuro cercano.

CAPITULO Nº 2

LAS FORMAS TOPOGRÁFICAS DEL TERRENO Y SU USO EN GEOLOGÍA APLICADA

Por debajo de la superficie actual del terreno donde se encuentran las grandes capitales de la antigua Europa, se ocultan urbanismos antiguos sepultados por materiales productos de grandes aportes de sedimentos, asociados a avalanchas provenientes de las serranías cercanas. La falta de equipos de remoción como los existentes en nuestra época moderna, obligaron a la construcción de edificaciones encima de las antiguas, donde su efecto en el desarrollo de la actividad humana es poco comentado en la historia.

2.1 INTRODUCCION

Las formas topográficas y su origen constituyen la primera aproximación de las condiciones geológicas del área en proyecto, siendo tan importante como la investigación del subsuelo a realizar.

El relieve topográfico es el resultado de los procesos de erosión o desgaste de la corteza terrestre a lo largo del tiempo geológico, donde la conformación depende de la resistencia general del macizo rocoso relacionada con la litología y las estructuras geológicas. Es importante para el Ingeniero dedicado al amplio campo de la Ingeniería Civil, prever las condiciones geotécnicas del subsuelo con base en las formas topográfica, lo cual en conjunto con la información geológica de superficie encaminará adecuadamente la investigación del subsuelo para el proyecto, debiendo ser obligatorio dicha evaluación previa.

En cualquier observación visual de un paisaje, podemos diferenciar distintas condiciones geológicas, relacionadas con la litología, con los problemas de estabilidad y la permeabilidad. Ejemplo de lo anterior lo tenemos en la fotografía de la impresionante montaña del Cerro El Ávila (El Guaraira Repano) que limita el amplio valle donde se ha desarrollado la ciudad de Caracas, Venezuela.

La conformación actual del valle de Caracas es producto de grandes aportes de materiales procedentes de las laderas del Cerro El Ávila, sometidas en el pasado a fenómenos de inestabilidad y erosión. Los cuales aportaron grandes volúmenes de

material de carácter coluvial, de gran heterogeneidad, donde el subsuelo en la actualidad está constituido por mezclas gravo arenosas y arenas gravosas con presencias de bloques de rocas, siendo estos últimos muy abundante al pie de la ladera, tal como se evidencia en las exploraciones del subsuelo para las edificaciones que se han establecido a lo largo del tiempo.



Valle de Caracas, limitado por el cerro El Ávila, Venezuela

Los problemas de estabilidad en las altas pendientes de las laderas del Cerro El Ávila, se evidencian en sus formas topográficas de anfiteatro, que constituyen cicatrices de amplios deslizamientos en el pasado.

La conformación topográfica es el reflejo de las condiciones geológicas del subsuelo, y pueden ser relacionadas en forma preliminar, con términos comunes en obras de ingeniería como son excavaciones, permeabilidad y estabilidad.

En el desarrollo del presente capítulo se describen los aspectos del relieve o formas topográficas tanto en planta como perfil, asociándolos con propiedades geológicas del terreno. Estas formas son las siguientes: a) perfil topográfico, b) formas topográficas en planta, c) patrones de drenaje y valle aluvial, d) anfiteatros topográficos debido a problemas de estabilidad. Posteriormente se aplica lo descrito en varias láminas con distintas condiciones topográficas, unas correspondientes a ejercicios académicos y otras a planos Cartográficos Nacionales utilizados normalmente en cualquier país.

2.2 FORMAS TOPOGRÁFICAS

Un relieve plano o con curvas de nivel muy distanciadas, indica en general la presencia de materiales de alta permeabilidad vertical y fácil excavación, pudiendo ser relacionado con suelos aluvionales.



La sabana plana que se muestra en la fotografía superior, del sector de Soledad en el estado Anzoátegui, Venezuela, es representativa de amplia extensiones en los llanos de este país, evidenciando alta permeabilidad del sub-suelo y ausencia de cauces de drenajes, sin efectos de erosión, lo cual está relacionado con la presencia de secuencias de carácter arenoso.

En un relieve montañoso, una litología uniforme debiera controlar un desgaste regular en el relieve, y cualquier asimetría dependerá de las condiciones geológicas, relacionadas con la litología y estructuras geológicas, términos que serán desarrollados en los Capítulos siguientes.

Las formas topográficas tanto en perfil como en planta, reflejan las condiciones geológicas, lo cual es descrito a continuación.

2.2.1 Perfil Topográfico

En el perfil topográfico el relieve está representado en dos dimensiones, definido por las cotas a través de la longitud. A lo largo de un perfil topográfico la pendiente y forma del terreno pueden ser delimitadas de acuerdo a su expresión, donde las

condiciones geológicas pueden ser inferidas. La similitud en cota o forma topográfica permiten delimitar tramos o sectores de similares condiciones geológicas relacionadas con resistencia y la permeabilidad.

Como ejemplo se describen a continuación tres formas distintas en un perfil topográfico: plano, ondulado y montañoso, donde se indican las posibles condiciones geológicas de control en el subsuelo.

- 1) En un relieve plano, el perfil topográfico se caracteriza en general por una línea casi horizontal con poca pendiente, relacionada con una amplia llanura aluvial o un valle aluvial, donde debe esperarse una permeabilidad alta. En general los materiales que conforma un perfil plano, deben de estar relacionados con suelos aluviales, depositados por ríos y quebradas. El agua de lluvia tendera en su mayor volumen a infiltrarse, lo cual se facilita por la permeabilidad del subsuelo evidenciando la presencia de litología de carácter arenoso. Ver Figura N° 2.1.

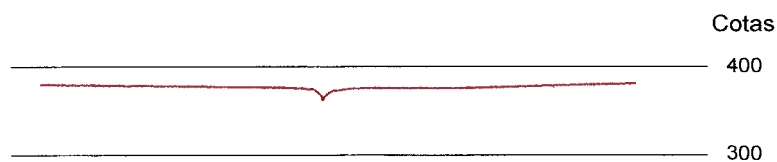


FIGURA N° 2.1

- 2) En un relieve ondulado, el perfil puede estar constituido por colinas consecutivas, donde en general las cotas más bajas se relacionan con cauces de quebradas, las cuales permiten el drenaje, relacionada con una baja permeabilidad del subsuelo. La pendiente suave de la ladera puede estar relacionada con la resistencia de los materiales en el subsuelo, donde los efectos de erosión se han facilitado con el tiempo debido a rocas de baja resistencia, ver Figura N° 2.2.

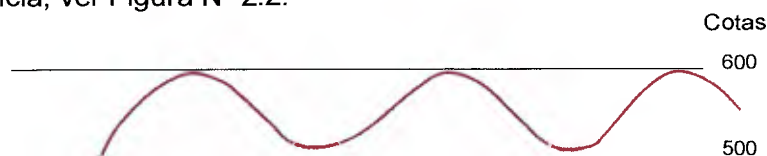


FIGURA N° 2.2

- 3) Un relieve de pendiente fuerte, con grandes diferencias de cotas, debe su control geológico a la presencia de rocas duras de alta resistencia a poca profundidad, donde en general los cauces de quebradas poseen un perfil longitudinal de alta pendiente, donde se suelen destacar saltos y cascadas controlados por escarpados de roca, ver Figura No 2.3.

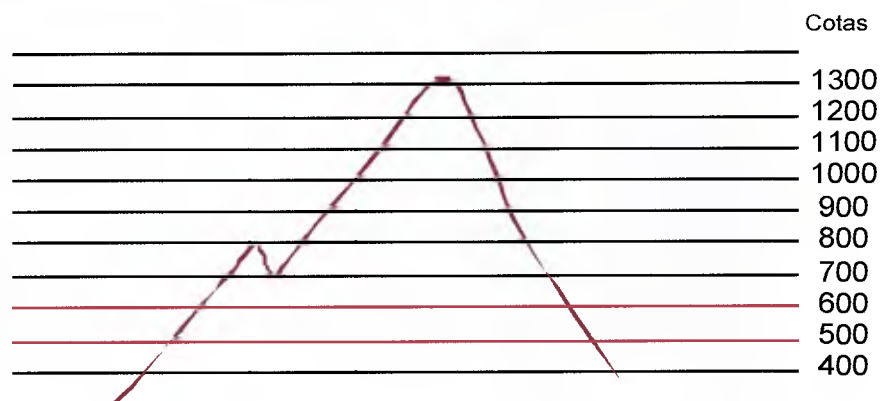
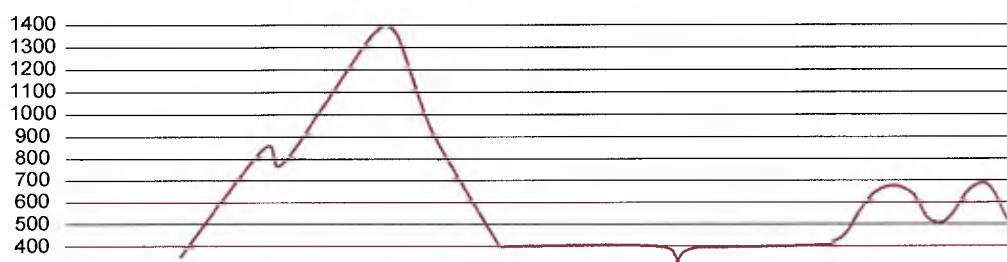


FIGURA N° 2.3

Si asociamos los tres perfiles anteriores en una escala conveniente se tiene como resultado la Figura N° 2.4.



Unidad geológica	U-1	U-2 (aluviones)	U-3
Excavación	Difícil	Fácil	Moderada
Permeabilidad	Baja	Alta	Media
Problema de estabilidad	Alto	Ninguno	Bajo riesgo

FIGURA N° 2.4

De acuerdo a la expresión del perfil podemos considerar como Unidades Geológicas las distintas formas del relieve, diferenciando el relieve plano, ondulado y de pendiente fuerte, así mismo dicha expresión permite correlacionar con las condiciones de excavación en términos comparativos, tal como: difíciles, fáciles ó moderada. La permeabilidad de un relieve plano evidencia el paso del agua verticalmente hacia el subsuelo, sin problemas de erosión que modifiquen el perfil topográfico. En contraste, en un relieve ondulado, su forma evidencia que la mayor parte del agua erosiona y una menor proporción se infiltra, así mismo en forma similar con un relieve montañoso donde las altas pendientes facilitan el escurrimiento.

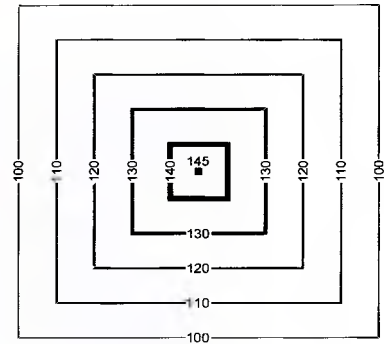
Los problemas de estabilidad podemos relacionarlo con la pendiente, en donde a mayor pendiente del terreno existe riesgo de deslizamiento generado en forma natural o artificial.

2.2.2 Formas Topográficas en Planta

Las formas topográficas del relieve están representadas en planos topográficos mediante proyección acotada, donde se encuentra dibujada curvas de nivel de igual cota de acuerdo a la expresión del relieve.

Los planos topográficos a distintas escalas reflejan las condiciones del sub-suelo, relacionadas con las formas de las curvas de nivel y su densidad, pudiendo identificar aspectos geológicos desde su origen de formación hasta el control del sub-suelo, así como propiedades mecánicas de los materiales.

Si visualizamos la representación mediante curvas de nivel de una pirámide en planta, tal como se muestra la fotografía de la pirámide Keops en Egipto, su expresión en plano estará constituida por curvas en forma de cuadrados concéntricos, cuyas dimensiones disminuyen hacia el centro donde se obtiene la mayor cota.



Los cráteres lunares o la parte interna de la boca de un volcán, estará representada en planta con curvas de nivel en forma de círculos, de mayor diámetro externo, disminuyendo en diámetro y en cota hacia la parte central, tal como se observa en la foto y su representación en planta.



Las formas topográficas representadas en planos permiten predecir una serie de condiciones geológicas tanto del origen de su formación como el control geológico, relacionadas con la litología, efectos de estabilidad o tectónicos.

Cuando las curvas de nivel se acercan, se define un relieve montañoso cuyas formas y orientación están controladas por la litología formacional y las estructuras geológicas. En las plantas y el perfil topográfico de la Figura N° 2.5, se destaca lo siguiente: a) curvas circulares, simétricas en cualquier dirección, geología uniforme, b) forma alargada, control geológico sigue la dirección de mayor longitud, c) forma

asimétrica, con pendiente suave definida por curvas de nivel separadas que contrastan con curvas de nivel juntas, controlan una pendiente fuerte lo cual se debe al control geológico, d) relieve irregular que indica heterogeneidad en el control geológico.

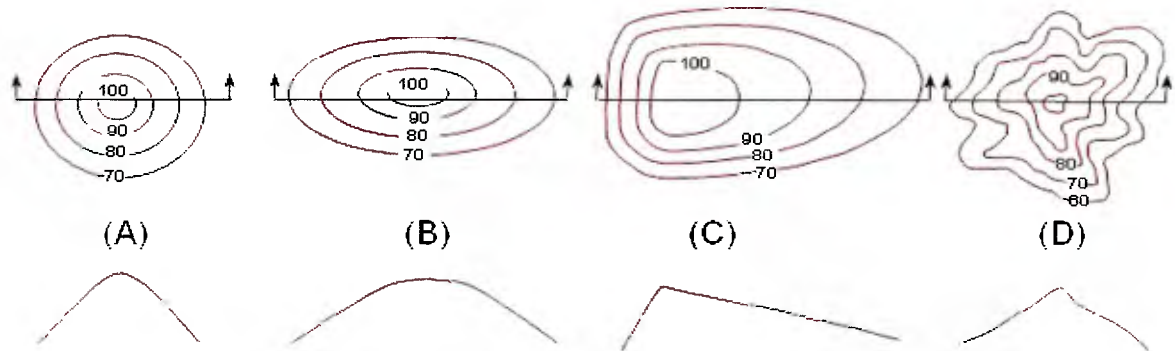
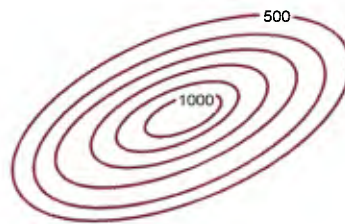


FIGURA N° 2.5

En cualquier plano de topografía las formas del relieve están identificadas con curvas de nivel, cuya densidad y forma se deben al control geológico del subsuelo. Si los ejemplos en dos dimensiones los representamos en tres dimensiones por medio de curvas de nivel, tenemos lo siguiente en la Figura N° 2.6:

Montaña Alta:



Colinas:



FIGURA N° 2.6

Terreno de pendiente suave:



Cont. FIGURA N° 2.6

Si unimos las formas anteriores en un solo plano, Véase Figura N° 2.7, podemos diferenciar una serie de unidades geológicas, con condiciones preliminares de uso común relacionadas con las obras de Ingeniería.

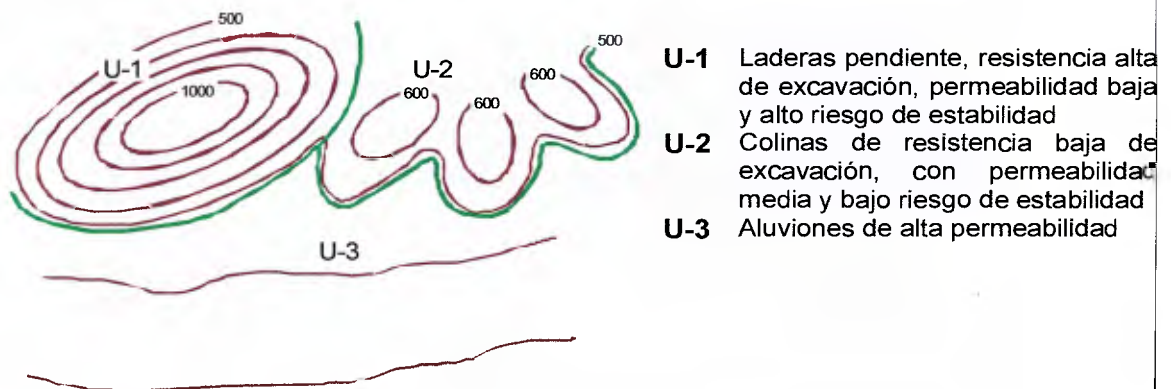


FIGURA N° 2.7

En la foto siguiente se destaca el sector montañoso del nacimiento del Río Santo Domingo en el Edo. Mérida, que contrasta con el relieve plano de un antiguo valle aluvial, cortado por un drenaje paralelo a la carretera existente.



2.3 DRENAJE

El drenaje tiene relación con las condiciones geológicas, donde los patrones de cauces de quebradas, así como los valles de grandes ríos que contrastan en el relieve montañoso, se encuentran controlados o estrechamente relacionados con la litología y las estructuras geológicas.

2.3.1 Patrones de drenaje

Los cauces de quebradas definidos por curvas de nivel en forma en “V” pueden formar patrones relacionados con los sistemas de Fracturamiento, lo que permite cuantificar su densidad y orientación. En general dicha orientación de cauces de drenaje en planta se pueden asociar en tres grupos tal como se muestra en la Figura N° 2.8 a) irregular, donde el patrón de drenaje está definido por numerosas orientaciones, pudiendo tener cursos preferenciales, b) rectangular, donde los cauces poseen cambios bruscos, pudiendo su orientación asociarse a formas rectangulares, c) circular, donde en general los cauces siguen formas de semicírculo.

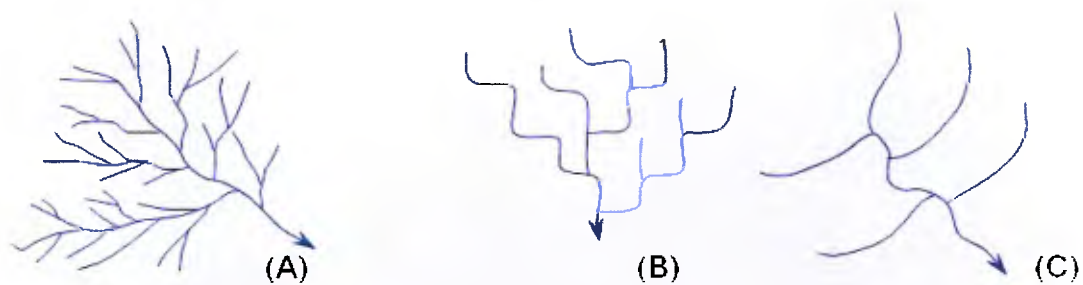


FIGURA N° 2.8

En terreno montañoso los patrones de drenaje están definidos por las condiciones geológicas, principalmente asociadas a fracturas en el macizo rocoso. La orientación geográfica de los tramos que definen el cauce de quebrada o ríos, permiten su análisis en forma estadística, así como su correlación con mediciones de patrones de fracturas. Un drenaje irregular puede estar controlado por dos o más sistemas de fracturas, diferenciándose del patrón rectangular en que el cauce puede presentar cambios sucesivos del rumbo cercano a los 90°.

Algunos sistemas de drenaje presentan patrones con descargas endorreicas en depresiones topográficas, los cuales están relacionados con la presencia de calizas,



debido a fenómenos de disolución asociado a la formación de cuevas. Dicho relieve es conocido como *kárstico*, asociado a la presencia de calizas en el subsuelo cuyos fenómenos de disolución, permite la infiltración del agua a través de depresiones, donde en general en el subsuelo se

presentan una serie de cuevas conectadas, asociada a ríos subterráneos.

En Venezuela dicho fenómeno lo tenemos en la Sierra de San Luis, Estado Falcón y en la Sierra de Perijá, Estado Zulia.



Depresión topográfica en Sarisariñama. Edo Bolívar. Venezuela

Un fenómeno similar se destaca al suroeste del estado Bolívar hacia las cabeceras del río Caura, en el sector de Sarisariñama, en una secuencia de areniscas de edad Cámbrica que controlan grandes extensiones de relieve plano a suavemente ondulado denominados *tepuyes*, en donde se destacan unas amplias

depresiones de forma circular. Dichas depresiones deben su origen a fenómenos de erosión a través de grietas, donde el poder erosivo del paso del agua en el tiempo geológico, aumenta su abertura, creando ríos subterráneos, cuyo efecto de erosión aumenta la cavidad disminuyendo la cobertura con la superficie y originando la falla del techo.

2.3.2 Valle Aluvionales

Otra forma de relieve que fácilmente puede ser reconocida en los planos topográficos, es la presencia de valles aluviales de ríos y quebradas entre montañas, en donde contrastan áreas planas alargadas, constituidas por depósitos sedimentarios, donde su forma topográfica se muestra en la Figura N° 2.9.



Valle río La Mucuy. Tabay. Edo. Mérida. Venezuela

En general, **las curvas de nivel** hacia el valle poseen forma de “U”, donde los cambios en dichas curvas indican la delimitación del aluvión o material arrastrado y depositado por el río o quebrada, estando constituidos por sedimentos de arenas, gravas, arcillas o combinaciones de ellos.

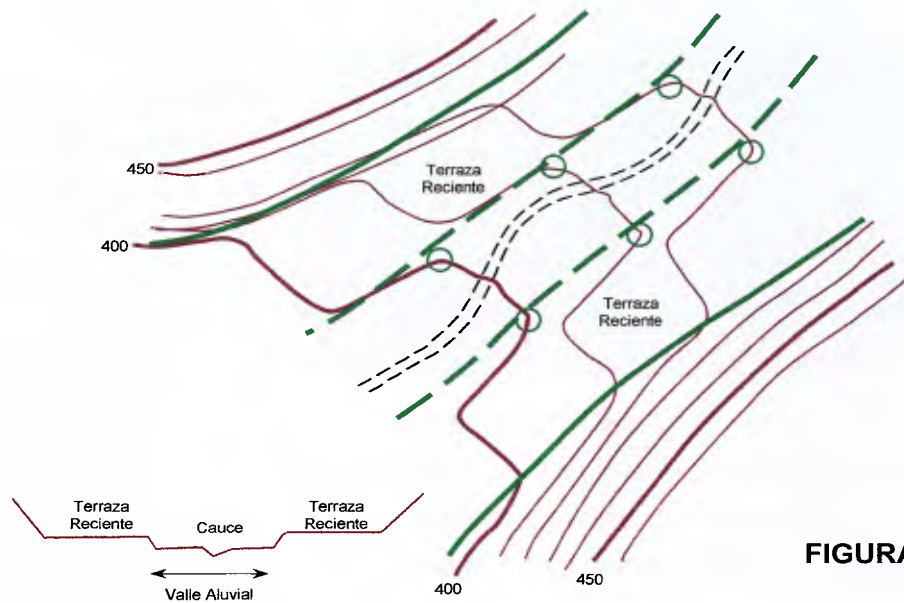


FIGURA N° 2.9

Las terrazas recientes estarán delimitadas entre el pie de montaña y los bordes de los planos aluviales, constituidos materiales similares depositados por niveles de cauce a cota superior a la existente.

En las zonas de llanuras, los ríos divagan por las amplias planicies, donde el cauce posee forma sinuosa, con cambio y migración lateral en el tiempo, lo cual depende de un complejo equilibrio entre el aporte de sedimentos y la erosión, sumado a los efectos de las crecientes.

En las amplias llanuras aluviales, los ríos se caracterizan por un proceso de divagación del cauce, lo cual con el tiempo da una sinuosidad, originando los llamados *meandros* con forma en "U". Estos *meandros* con el tiempo se cierran y quedan abandonados, formando lagunas que en general constituyen un hábitat particular.

En la foto tomada desde un avión hacia el sector de EL Piñal, Edo. Táchira, Venezuela, se muestra el cauce del rio Chururu y su amplio valle aluvial donde los

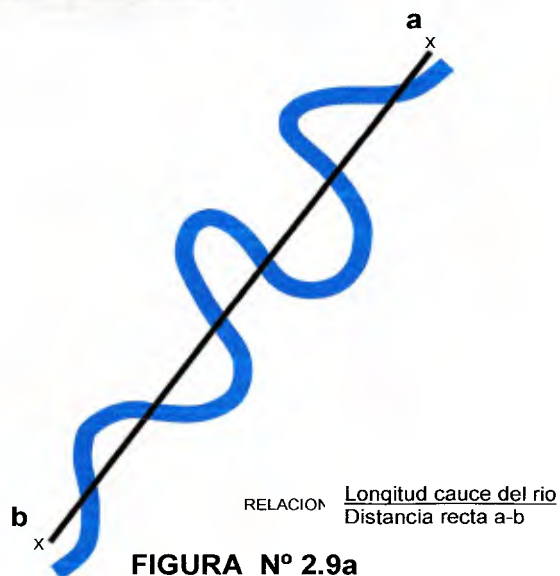


Valle Rio Chururu, Edo Táchira. Venezuela



viejos cursos del rio se destacan en el alineamiento de la vegetación más densa. Lo anterior se debe a la presencia de lagunas alargadas, donde las condiciones de humedad se mantienen en época de sequia.

La longitud del cauce sinuoso del rio, relacionada con la distancia recta del tramo a-b, da un valor de poder erosivo y estabilidad. Véase Figura N° 2.9a. Si el valor es cercano a 1, el cauce puede considerarse estable y a medida que alcanza valores de 2 o mayores, el cauce tiende a ser inestable y cambiante, con cierre de meandros, muy común en los amplios llanos venezolanos.



2.4 CONOS COLUVIALES

Los conos coluviales tienen forma de abanico, donde las curvas de nivel en general poseen forma de semicírculo, cuya separación entre curvas es mayor hacia cotas superiores y se presentan más juntas hacia el pie. Los conos son producto de inestabilidad de cuencas a cotas superiores, donde el material procedente por deslizamientos en las laderas, en estado saturado y en presencia de agua desciende por el valle por efecto de la gravedad, depositándose en forma heterogénea hacia el pie de la ladera.



En la foto correspondiente a un sector montañoso de los Andes Venezolanos se muestra un gran cono coluvial, cuya amplia superficie es utilizada para cultivos y viviendas, destacándose el contraste topográfico con las laderas adyacentes. La inestabilidad en las laderas de la cuenca puede o no ser permanente, pudiendo ocurrir largos periodos de estabilidad, lo cual permite el desarrollo en superficies topográficas suaves de los conos, en comparación al relieve que los circunda. Gran parte de los desastres naturales en área montañosas están relacionados con estos depósitos, los cuales constituyen asientos de caseríos y en donde la estabilidad de las cuencas puede ser afectada por variaciones climáticas acentuadas, tal como está sucediendo con los fenómenos del Niño y la Niña.

Un ejemplo reciente de desastre naturales mencionado en el Capítulo N°1 en la parte de Eventos Geológicos, y relacionado con conos coluviales lo tenemos en las costas Venezolana, en el sector de las urbanizaciones Los Corales y Caraballeda, donde el poblado se desarrolló en un área de pendiente suave, en forma de cono, limitada entre el pie de monte y el mar, producto de grandes aportes de sedimentos en el pasado geológico cercano, debido a problemas de inestabilidad de la cuenca. Las laderas que limitan el cono se caracteriza por altas pendientes alcanzando los picos de la divisoria de agua cotas del orden de los 2000 m.s.n.m. a distancias horizontal no mayores a los tres (3) kilómetros, con un patrón de drenaje de cursos cortos



formando el río Camurí. Los problemas de estabilidad en cuencas similares a la del río Camurí, tienden a tener largos periodo de tiempo sin actividad, con el cauce bien definido y caudales de crecientes sin grandes aportes de sedimentos, permitiendo el avance hacia el cauce de los desarrollos urbanísticos. En la foto del área de Camurí tomada después del deslave de 1999, los aporte de materiales debido a la

inestabilidad de la cuenca, ampliamente descrito en www.aguasarriba.com, desbordó el río, el cual arrasó con gran número de viviendas y edificios, definido en dicha foto por largas zona de color blanquecino, que corresponde a la acumulación de grandes volúmenes de bloques y peñones en una matriz gravo arenosa, cuyo espesor alcanzó los 10 metros. El gran aporte de material hacia el mar ocasionó modificaciones en la línea de costa, alejándola más de 300 metros.

2.5 ANFITEATROS TOPOGRAFICOS

Son formas topográficas que reflejan o evidencian viejos problemas de estabilidad en las laderas, y como su término lo indica, las curvas de nivel forman anfiteatros, donde la separación horizontal entre curvas es menor que la distancia que define lateralmente la ladera.

La formación de estos anfiteatros se muestra en la Figura N° 2.10, donde se observa que el material del deslizamiento que afecta la ladera se deposita a cotas inferiores. En planta las curvas de nivel a cotas superiores disminuyen su distancia horizontal definiendo el denominado escarpado del deslizamiento, el cual conforma la cicatriz en forma del anfiteatro. Hacia la parte media las curvas de nivel se separan formando un relieve suave a plano, a veces asociado a lagunas. Al pie el material deslizado se acumula sobre la ladera donde las curvas de nivel van disminuyendo su distancia horizontal. Si el material deslizado se erosiona el relieve original se conserva, quedando solo una cicatriz en forma de anfiteatro.

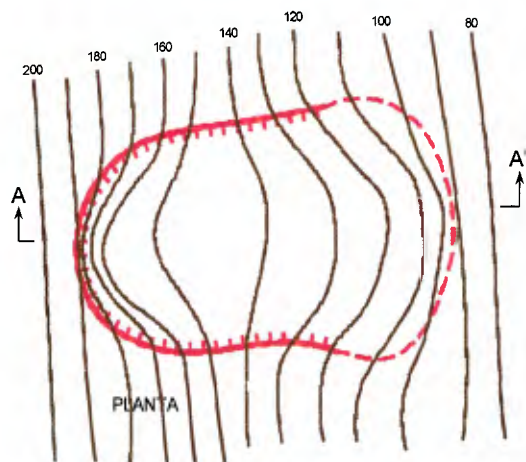


Deslizamiento en Caraballeda. Edo Vargas, Venezuela

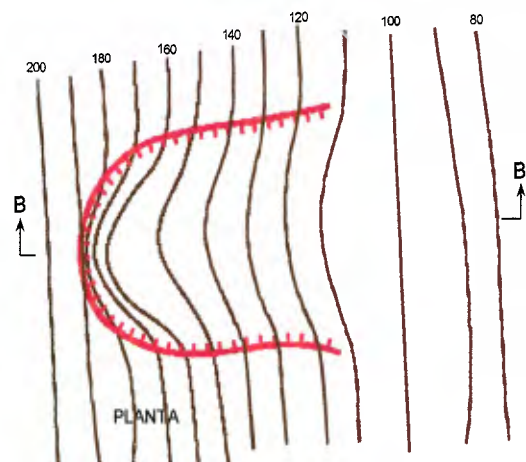
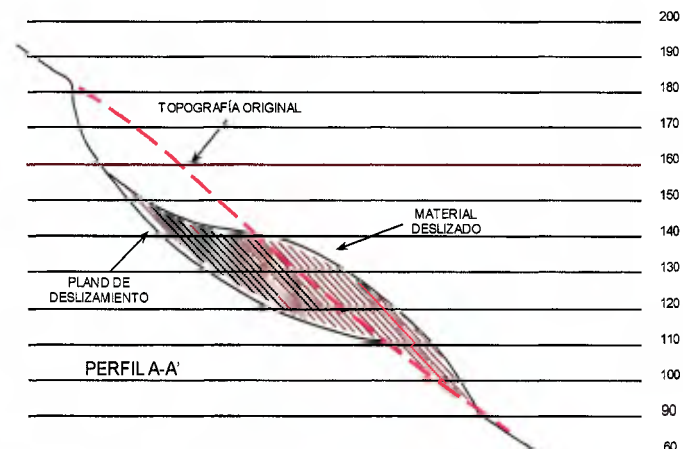
Los anfiteatros topográficos identifican laderas inestables, donde las fuerzas de corte aumentadas por la pendiente y relacionada con los efectos de saturación, vencen la resistencia interna de los materiales. En la fotografía del sector Caraballeda, Edo. Vargas, Venezuela, en Julio

2011, se produce un deslizamiento en una ladera pendiente, totalmente cubierta por una densa vegetación. El anfiteatro resultante en general se considera estable, donde con el tiempo la vegetación suele cubrir el área afectada, quedando como evidencia del problema de estabilidad su forma topográfica.

El material acumulado al pie, puede ser o no erosionado con el tiempo, donde en el primer caso de erosión, el anfiteatro tendrá una pendiente uniforme hasta el pie originar del deslizamiento. En caso de mantenerse el material acumulado del



DESlizAMIENTO CON MATERIAL ACUMULADO AL PIE DE LA LADERA



DESlizAMIENTO DONDE EL MATERIAL ACUMULADO AL PIE DE LA LADERA FUE EROSIONADO

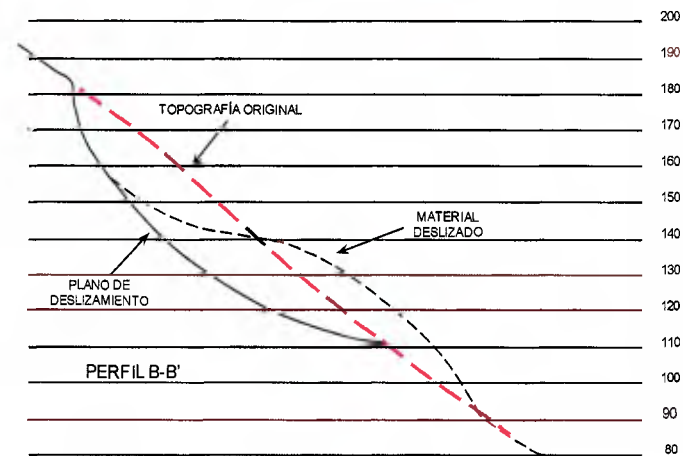


FIGURA N° 2.10

deslizamiento en la ladera, el relieve topográfico suele presentar una pendiente suave que contrasta lateralmente a una pendiente mayor que conforma la amplia ladera. En dicha pendiente suave, principalmente muy codiciada en terrenos montañosos, suelen construirse viviendas de haciendas, así mismo aprovechadas para el paso vial, cuyas condiciones críticas de estabilidad fácilmente pueden ser alteradas, principalmente por la infiltración de aguas servidas, con efectos en deformaciones de estructuras de las viviendas y hundimientos en la vialidad.



Deslizamiento ladera Sur, Autopista Petare- Guarenas, DC. Venezuela

Los problemas de estabilidad en las laderas pueden ser fácilmente identificados con algo de práctica, pudiendo destacar en la representación por distintos pintores del Cerro El Ávila, excelentes ejemplos de los procesos de inestabilidad geológica que afectan dichas laderas. El pintor Ítalo-Venezolano Giovanni Di Munno (1919-1993), desde noroeste del valle de Caracas realiza una vista del Cerro El Ávila, resaltando sus formas topográficas, las cuales constituyen reflejos de problemas de estabilidad en el pasado, tal como se muestra en la siguiente Lamina, donde se encuentra el cuadro del pintor en la parte superior y la interpretación geomorfológica en la parte inferior.



GIOVANNI DI MUNNO (1985), PINTOR VENEZOLANO.



**LOS TRAZOS DEL PINTOR, PERMITEN VER LOS PROCESOS
GEOMORFOLOGICOS DE EROSION E INESTABILIDAD EN EL PASADO CERCAÑO**



Otro ejemplo de anfiteatro topográfico se puede observar en la vista área del sector de Turgua, Edo. Miranda, Venezuela, donde en la ladera pendiente se produce un deslizamiento en Diciembre 2012. El deslizamiento interrumpe la carretera existente, en un ancho de unos 100 metros, estando bien definido un alargado anfiteatro topográfico, cuya cresta se encuentra a una diferencia de cota de 140 metros y a una distancia horizontal con la vía de unos 200 metros. El relieve está controlado por una secuencia de rocas metamórfica, constituida por esquistos cuarzo micáceos, en un estado muy avanzado de meteorización (termino que será analizado y descrito en el Capítulo N°6). La pérdida de resistencia de la masa deslizada se relaciona por el efecto de saturación, debido a la amplia superficie superior deforestada, la cual está siendo utilizada para el cultivo de tubérculos, cuyas

raíces una vez extraídas facilitan la percolación del agua, sumado a la falta de canalización de las aguas servidas de las viviendas. En el plano de deslizamiento se observa una superficie estriada, con surcos longitudinales que siguen dicho plano, efecto del desplazamiento de la masa en parte saturada, sobre el esquistos con mayor resistencia. Hacia la cresta y lateralmente el área deslizada está delimitada por planos de alta pendiente, también con estrías, que constituye la denominada escarpa del deslizamiento, definida por curvas de nivel en anfiteatro, cuya estabilidad se considera crítica, tendiendo a disminuir la pendiente con el tiempo, con aporte de material ladera abajo. El material acumulado ocupa el área media inferior del valle de una quebrada, el cual con el tiempo será lavado y transportado, destacándose que las curvas de nivel tienden a forma de abanico.

2.6 EJEMPLOS DE INTERPRETACIÓN DE LAS FORMAS TOPOGRÁFICAS

2.6.1 Ejemplo N° 1

En la **Figura N° 2.11** se muestra en la parte izquierda un plano topográfico, en donde se destaca el cauce de un río entre un relieve montañoso, donde contrasta una serie de formas topográficas, las cuales permiten diferenciar en la parte derecha de la figura cinco unidades geológicas (ver Tabla N° 2.1), que en grandes rasgos presentan las siguientes características:

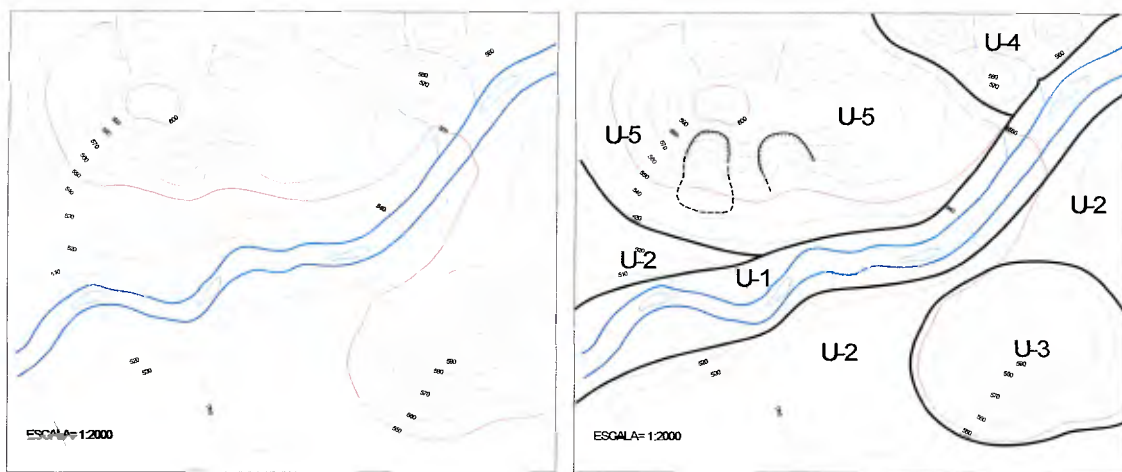


FIGURA N° 2.11

Tabla N° 2.1. Unidades Geológicas

U-1	Valle aluvional. Caracterizado por un relieve suave alargado por donde divaga el cauce del río.
U-2	Terraza aluvial reciente. Se presenta un relieve suave a cota superior al valle del río, delimitado por curvas topográficas en forma de "U".
U-3	Colina prominente pendiente uniforme, simétrica. Las curvas de nivel presenta forma cercana a la circular, evidenciando uniformidad de condiciones geológicas en el subsuelo.
U-4	Pequeñas colinas. Relieve de varias colinas de poca amplitud, evidenciando fácil proceso de erosión.
U-5	Fila topográfica orientada Este – Oeste, con problemas de estabilidad en el flanco Sur. Relieve prominente alargado, limitado por laderas de pendiente alta, con problemas de estabilidad del lado Sur, sin problemas de estabilidad en la ladera Norte.

2.6.2. Ejemplo N° 2

En la **Figura N° 2.12** se muestra un relieve montañoso, de ladera muy pendiente, cortado por el cauce de un río. Se pueden diferenciar cinco unidades geológicas (ver Tabla N° 2.2), cuyas condiciones geotécnicas en forma resumida serían las siguientes:

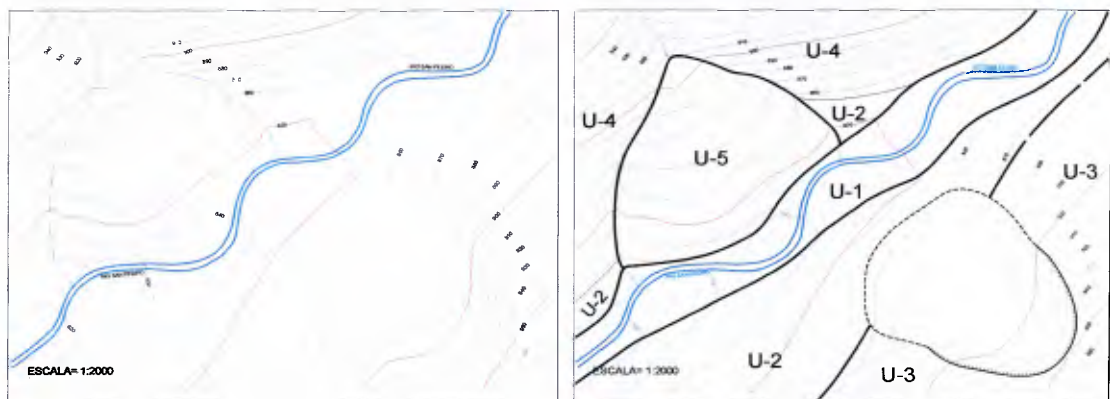


FIGURA N° 2.12

Tabla N° 2.2. Unidades Geológicas.

U-1	Valle aluvial del río. Se caracteriza por una franja alargada de pendiente suave, por donde divaga el cauce del río.
U-2	Terraza aluvial reciente Nivel superior al valle aluvial donde las curvas de nivel se orientan en forma de "U".
U-3	Ladera con problemas de estabilidad Ladera de pendiente moderada a fuerte, donde se destaca una forma de anfiteatro, con las curvas de nivel en la parte superior cercanas una a otra, hacia cota inferior la distancia entre curvas se amplía en donde se encuentran materiales acumulados del deslizamiento.
U-4	Ladera de pendiente fuerte uniforme Debe estar controlada por una geología de alta dureza, que controla la ladera de pendiente fuerte.
U-5	Depósito coluvial que cubre la ladera U-4 Tiene una forma de cono definido con curva de nivel en forma convexas que solapa la Unidad U-4, dichos materiales proceden de problemas de estabilidad a cotas superiores

2.6.3 Ejemplo N° 3

En la Figura N° 2.13, correspondiente a un plano reducido de escala 1:2000, muestra el trazado de una carretera que une los caseríos A con el B, donde se desea describir las condiciones geológico – geotécnicas en base a la interpretación del relieve. Si indica que hacia la parte Norte el relieve pendiente corresponde a una unidad granítica. Las distintas unidades geológicas de acuerdo al relieve serían las siguientes:

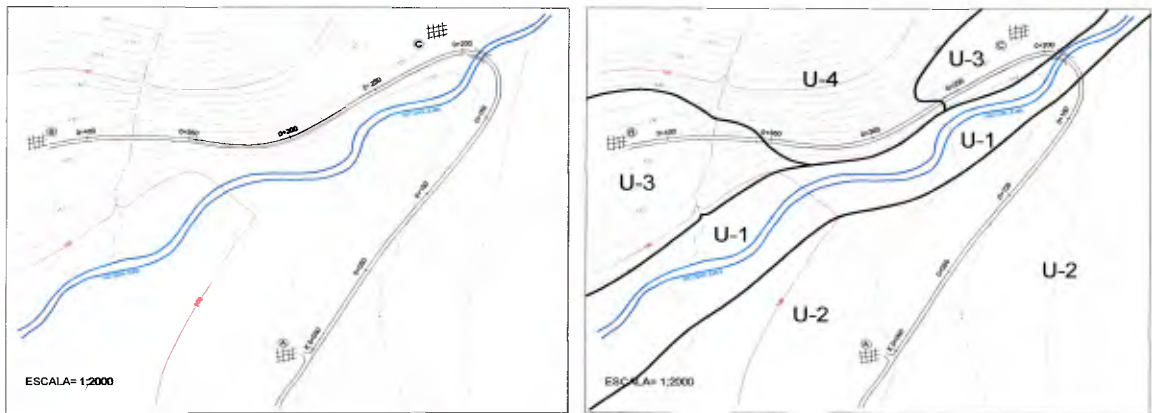


FIGURA N° 2.13

Tabla N° 2.3. Unidades Geológicas.

U-1	Valle aluvial
U-2	Terraza aluvial reciente
U-3	Depósito de ladera
U-4	Unidad de granito

La descripción del trazado de la vía de acuerdo a las distintas unidades geológica – topográficas son las desarrolladas en la Tabla N° 2.4.

Tabla N° 2.4. Descripción del trazado de la vía según sus características geológicas y topográficas.

0+000 al 0 + 170	El trazado pasa por una terraza aluvial de alta permeabilidad, constituida posiblemente por materiales areno gravosos, de fácil excavación.
0+170 al 0+200	Cruce del valle aluvial
0+200 al 0+260	Depósitos coluviales que se forman por aporte de materiales de cotas superiores debido a problemas de estabilidad, cuya acumulación hacia el pie de monte forma un relieve de pendiente moderada que contrasta con la ladera pendiente controlada por granitos. La presencia de grandes bloques de roca, debe dificultar la excavación, así como su baja cohesión, debido a la forma de deposición debe preverse problemas de estabilidad en los cortes.
0+260 al 0+350	Sector topográfico de pendientes escarpadas, controladas por rocas graníticas, de alta dureza, donde se requerirá el uso de explosivos para la excavación.
0+350 al 0 + 420	Depósitos coluviales, similares a los indicados entre los Km 0 + 200 a 0 + 260.

2.6.4 Ejemplo N° 4

La **Figura N°2.14** corresponde a un plano de Cartografía Nacional a escala 1:25.000, donde contrastan dos tipos de relieve, uno de alta pendiente hacia la parte Oeste denominado Unidad U-1, y otro de relieve suave asignado como Unidad U-2.

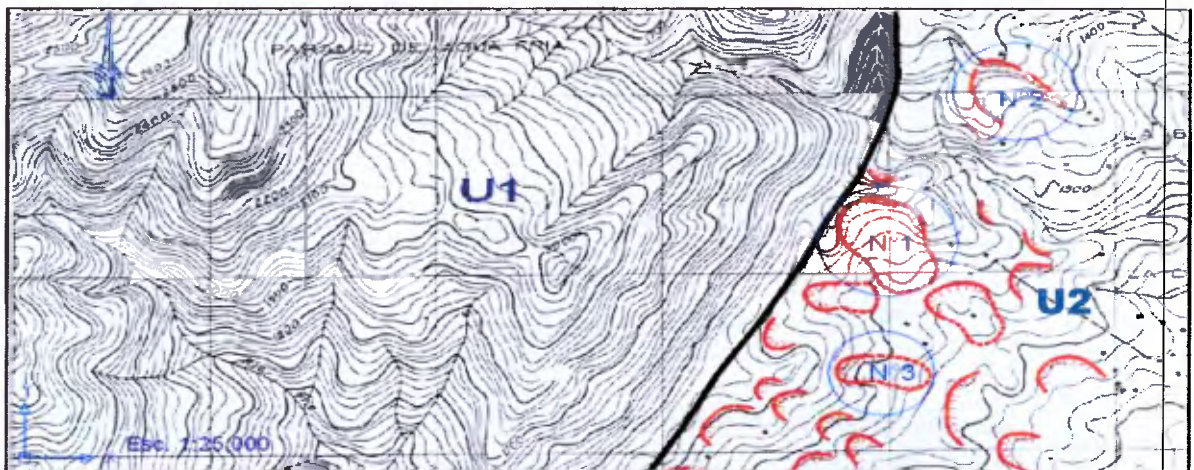


FIGURA N° 2.14

Hacia el Este, el relieve es de pendiente moderada a suave asignada a la Unidad U-2. El relieve de la unidad geológica U-1, presenta una orientación N20°E en donde se destaca una forma de fila, con la ladera muy pendiente, pudiendo diferenciar una

zona central de relieve moderado donde la roca podría ser menos competente. En la Unidad U-2 se destacan un gran número de viejos deslizamientos evidenciado por formas de anfiteatros topográficos. En la lámina se muestran tres deslizamientos caracterizados por su forma típica hacia cotas superiores con curvas de nivel en forma de anfiteatro, destacándose una forma de “U” dada por las mismas.

En los deslizamientos N° 1 y N° 3 con depósitos al pie de monte, las curvas de nivel cambian a cotas inferiores a una forma cóncava, inversa a la convexa de la parte superior. En el deslizamiento N° 2 las curvas de nivel inferior en cota presentan similitud a las superiores donde está definido el anfiteatro, cuyo material deslizado debió ser sometido a procesos de erosión.

2.6.5 Ejemplo N° 5

La **Figura N° 2.15**, corresponde a un plano a escala 1:5000 del río San Carlos en el Edo. Cojedes, Venezuela. Se puede diferenciar fácilmente un amplio valle aluvial, denominado U1, de relieve suave por donde escurre el río. Hacia la parte Oeste, en la margen derecha del río, se encuentra un relieve con cotas superiores a 20 metros por encima del valle aluvial, correspondiente a una terraza antigua constituido por material gravo arenoso, que se denominará U-2.

El relieve montañoso se caracteriza por curvas de nivel muy cercanas, que controlan una alta pendiente que se denominará U-3. En el relieve montañoso se destacan dos fenómenos de interés, uno situado en el lado Noreste donde el relieve presenta un contraste debido a la acumulación de materiales procedentes de la ladera superior, donde los cauces de las quebradas pequeñas no presentan continuidad a la infiltración del agua, por la alta permeabilidad del material.

Hacia aguas abajo, el río San Carlos presenta un cambio brusco del cauce debido al efecto de un amplio deslizamiento que se formó a cotas superiores, el cual desplazó su curso, debido al movimiento de la masa deslizada. En la actualidad el material deslizado posee una pendiente moderada, lo que ha permitido su desarrollo para fines agrícolas, donde la masa deslizada debido a fenómenos de erosión del río origina un lento desplazamiento, el cual se evidencia en agrietamiento en las viviendas.

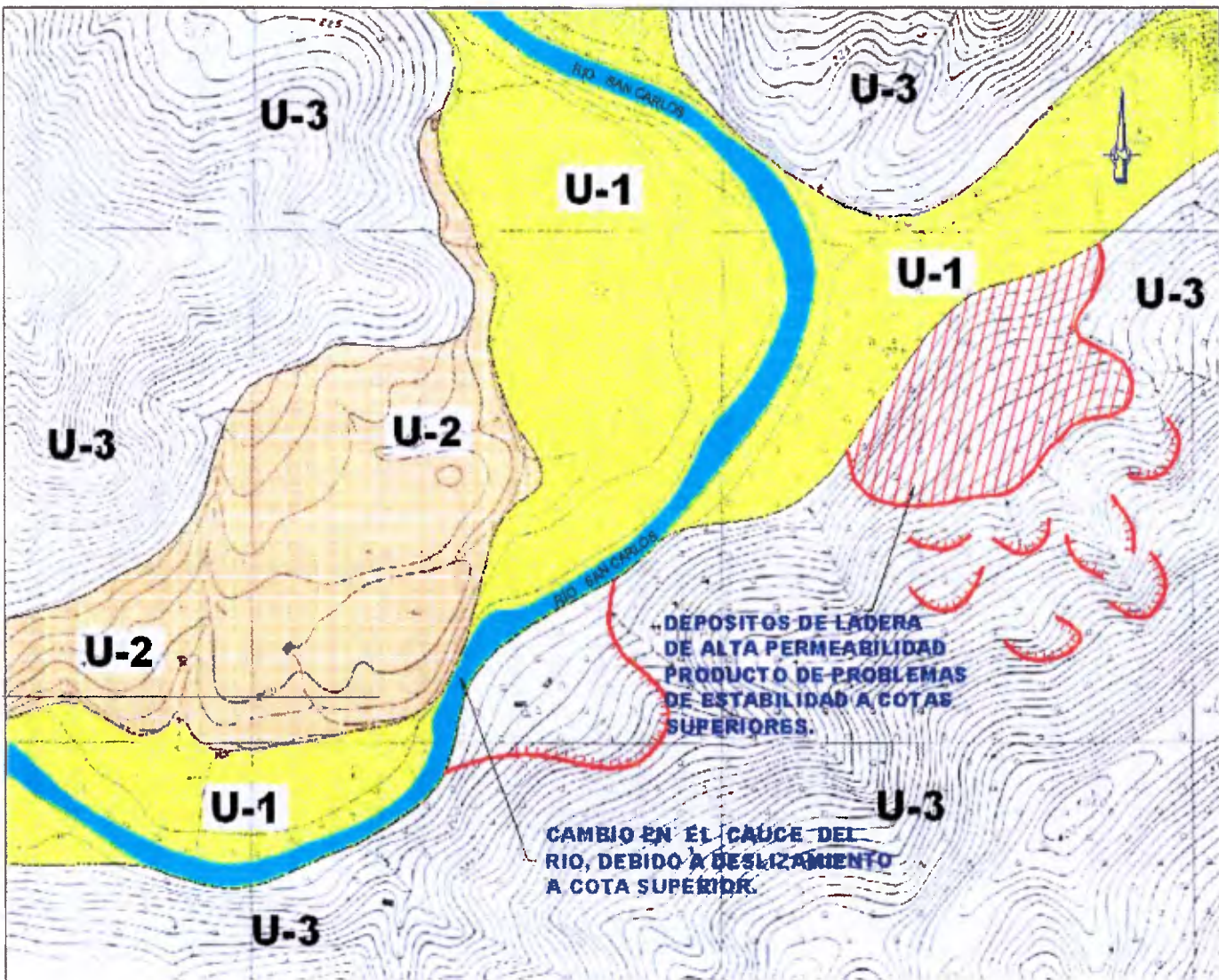


FIGURA N° 2.15

MINERALES Y ROCAS

Los yacimientos minerales en el pasado marcaron las distintas edades en la evolución del hombre, pasando de la edad de piedra a la edad de los metales: cobre, bronce y hierro, donde el geólogo para la época participo en forma importante para la evolución y mejoras en la formación de la sociedad.

3.1 MINERALES

En la amplia literatura geológica el término mineral se puede definir como materiales sólidos que se encuentra en la naturaleza, con propiedades físicas distintivas y una composición química determinada o algo variable dentro de ciertos límites, por lo cual cada mineral se puede expresar por una fórmula química.

Los minerales se componen de los elementos químicos de la Tabla Periódica, algunos integrados por un solo elemento como: oro (Au), plata (Ag), aluminio (Al), hierro (Fe) y dentro del grupo puede encontrarse disposición molecular distinta como en el caso del diamante y el grafito, ambos constituidos por elemento carbono (C). Pero en general los minerales son combinaciones de dos o más elementos químicos, con caracteres física muy diferente a sus componentes, pudiendo mencionarse del conocimiento común la sal (NaCl), yeso ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la calcita (Ca CO_3).

De acuerdo a Kroboth, en el curso de Agua Subterránea UCV (1967), de todos los elementos químicos conocidos (92 más otros 11 obtenidos artificialmente), solo 8 elementos se presentan en cantidades mayores al 1%, formando en conjunto el 98,60% de las rocas de la corteza terrestre hasta una profundidad de 16 Kilómetros.

NOMBRE	SIMBOLO	% EN LA CORTEZA TERRESTRE
Oxigeno	O	46,71
Sílice	Si	27,69
Aluminio	Al	8,07
Hierro	Fe	5,05
Calcio	Ca	3,65
Sodio	Na	2,75
Potasio	K	2,58
Magnesio	Mg	<u>2,08</u>
		98,58

Aunque el término mineral en general se relaciona con la composición de las rocas, su origen se debe principalmente a la solidificación del magma conocida como una mezcla fundida de elementos o transformaciones por medio de altas temperaturas o presiones de rocas existentes. También existen condiciones de formación a partir de soluciones relacionadas con el medio ambiente, como en el caso de la sal común. Muchas de las piedras preciosas utilizadas en joyería son el resultado de mineralización por soluciones en condiciones ambientales, donde se permite el crecimiento del cristal sin confinamiento lateral. Otra forma de mineral en la superficie de la corteza terrestre, está relacionada con el efecto de meteorización, donde ocurren cambios químicos de los minerales, en general por proceso de oxidación e hidratación.

Las arcillas, constituyen minerales cuya granulometría es menor a 0,002 mm, incluyendo coloide (menor a 0,001 mm), las cuales se forman por sedimentación compuesta químicamente por silicatos hidratados en forma de tetraedro, asociado con otros elementos como aluminio, hierro, magnesio.

3.1.1 Características físicas de los minerales

Los minerales presentan una serie de características físicas, que en muchos casos están relacionados con las propiedades en las rocas. Estas características son las siguientes:

- 1) **Forma cristalina.** En general cada mineral puede presentarse en formas de cristales, limitados por caras lisas y planas. La línea perpendicular a cada una de los centros de las caras, así como su número permite agruparlo en seis sistemas:
 - a) Isométrico, tres ejes de igual longitud y perpendicular entre sí
 - b) Hexagonal, tres ejes ecuatoriales de la misma longitud y uno perpendicular al plano de los ejes anteriores.
 - c) Tetragonal, dos ejes ecuatoriales de la misma longitud y otro perpendicular al plano que forma los ejes anteriores.
 - d) Ortorrómico, tres ejes perpendicular entre sí, pero de diferente longitud.
 - e) Monoclínico, dos ejes ecuatoriales según ángulo recto y eje vertical oblicuo.
 - f) Triclínico, tres ejes de diferente longitud, que forman ángulos oblicuo entre sí.



Cristales de Cuarzo

Los minerales de cristales perfectos son raros o de colección, los cuales se pueden desarrollar cuando hay espacio para su formación bajo condiciones ambientales adecuadas. En general los minerales se presentan en masas limitando su crecimiento,

dando origen a la formación parcial de cristales o formas irregulares.

- 2) **Color.** Lo primero que se observa en un mineral es el color. En algunos permiten su identificación fácilmente como por ejemplo: el oro, plata, aluminio, carbón, etc. En otros el color puede presentar variaciones debido a pequeñas diferencias en su composición. Es importante destacar que el color de un mineral debe ser identificado en superficie fresca.
- 3) **Raya.** Es el color del polvo que se obtiene frotándolo contra una placa de porcelana áspera. Los caracteres de color y raya pueden ser idénticos o parecidos, pero también podría ser muy diferentes.
- 4) **Brillo.** Es causado por la reflexión de la luz en su superficie. Puede ser metálico y no metálicos, donde en este último se distingue: vítreo y mate, pudiendo también destacarse diamantino y perlados.
- 5) **Dureza.** Es la resistencia de un mineral a ser rayado por otro. Se utiliza una escala relativa, lo cual indica la dureza de un mineral con respecto a otro. La escala de medición existente se conoce como Escala de Mohs, constituida por 10 minerales, tal como sigue:

1 Talco	6 Ortosa
2 Yeso	7 Cuarzo
3 Calcita	8 Topacio
4 Fluorita	9 Corindón
5 Apatita	10 Diamante

Un mineral es más resistente en forma relativa, cuando este raya la superficie del otro. En general como dureza auxiliar, tenemos: la uña con dureza 2, navaja con dureza 5,5 y con punta de acero 6,5.

- 6) **Clivaje.** Constituyen los planos por donde algunos minerales pueden romper o partir, dejando superficies lisas. Dichos planos pueden variar en número, teniendo como ejemplo la mica con un solo plano y la galena con tres planos perpendiculares entre sí.

- 7) **Estructura.** Es la apariencia o forma exterior del mineral, pudiendo ser cristalina formada por cristales, micácea de forma hojosa, granular, fibrosa, etc.
- 8) **Peso Específico.** Se refiere al peso específico relativo con relación a el de agua a temperatura ambiente, varía entre 1.5 y 20.0, siendo constante para cada mineral, por ejemplo el cuarzo es 2.65, diamante 3.5, magnetita 5.0, plomo 11,5. Se puede notar la diferencia en el peso de las muestras manuales entre un fragmento de carbón de un trozo de plomo o hierro.

3.1.2 Minerales más Comunes

Los minerales más comunes en la corteza terrestre los cuales en general constituyen las rocas, o forman depósitos característicos, están representados por una decena entre más de los 2000 conocidos. Dichos minerales son los siguientes:

Cuarzo (SiO_2). constituye un silicato que se presenta en cristales hexagonales de dureza 7, común en masas cristalinas, asociado a otros minerales, generalmente incoloro a blanco, con colores rosado o morada, debido a impurezas. El brillo es vítreo y de fractura concoidea.

Feldespatos (Silicatos de Al, K, Na, Ca). en general son más comunes que el cuarzo, conocidas según a composición por ortosa, silicato de potasio y aluminio ($\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$) y plagioclasas, silicato de sodio y aluminio ($\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$) existiendo entre ambas composiciones carbonáticas (Ca) y variación entre ellas, que constituye una serie de minerales. En general la ortosa es de color rosado y la plagioclasas blanco a gris claro.

Micas, su composición química es muy compleja, caracterizadas por su clivaje en forma de láminas, que pueden ser separadas fácilmente. Existen dos familias de micas, las de colores claros llamadas moscovita (Silicatos de K y Al) y las oscuras o negras, biotitas, (Silicatos de K, Mg, Fe y Al)

Piroxenos, son silicatos de Ca y Mg, de color verde claro a negro, constituido por cristales de prismas cortos y gruesos de ocho caras, siendo la variedad más común conocida como augita, de dureza 5-6.

Anfiboles, son de composición similar a los piroxenos, constituido por cristales más alargados y de seis caras, siendo la variedad común conocida como hornblenda.

Granates, presenta un color rojo oscuro (vino tinto), constituida por un silicato de Fe y Al, que forma cristales de 12 caras.

Calcita, de fórmula química CaCO_3 , blanca a incolora, de dureza 3. Su propiedad muy característica es su efervescencia con el HCl, el cual la disuelve.

Hierro, dependiendo de su composición se conoce como siderita (Fe CO_3), Magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3) constituyendo menas importantes para la obtención del mineral.

Pirita, constituye un sulfuro de hierro FeS_2 , de color amarillento característico, con cristales cúbicos.



Yeso, de composición química CaSO_4 , de color blanco a incoloro se presenta en forma de masas laminales, que fácilmente se puede rayar con las uñas.

Ilita, es el producto de alteración de rocas ricas en moscovita y feldespato, siendo un mineral arcilloso del tipo mica, presentando una razón molecular silíceo-aluminio elevada.

Montmorillonita, producto de alteración de los feldespatos, en rocas pobres en sílice, de color gris blanco, en masas terrosas, con dureza 1 a 2 y peso específico 1,7 a 2. Es importante el aumento del volumen con la absorción de agua.

Limonita, óxido de hierro hidratado $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, de color pardo oscuro, dureza 5 y peso específico 4.

Los minerales anteriores pueden encontrarse en sitios por efecto de la meteorización de las rocas, o en depósitos de origen sedimentario debido al transporte y deposición de los minerales coloidales arcillosos.

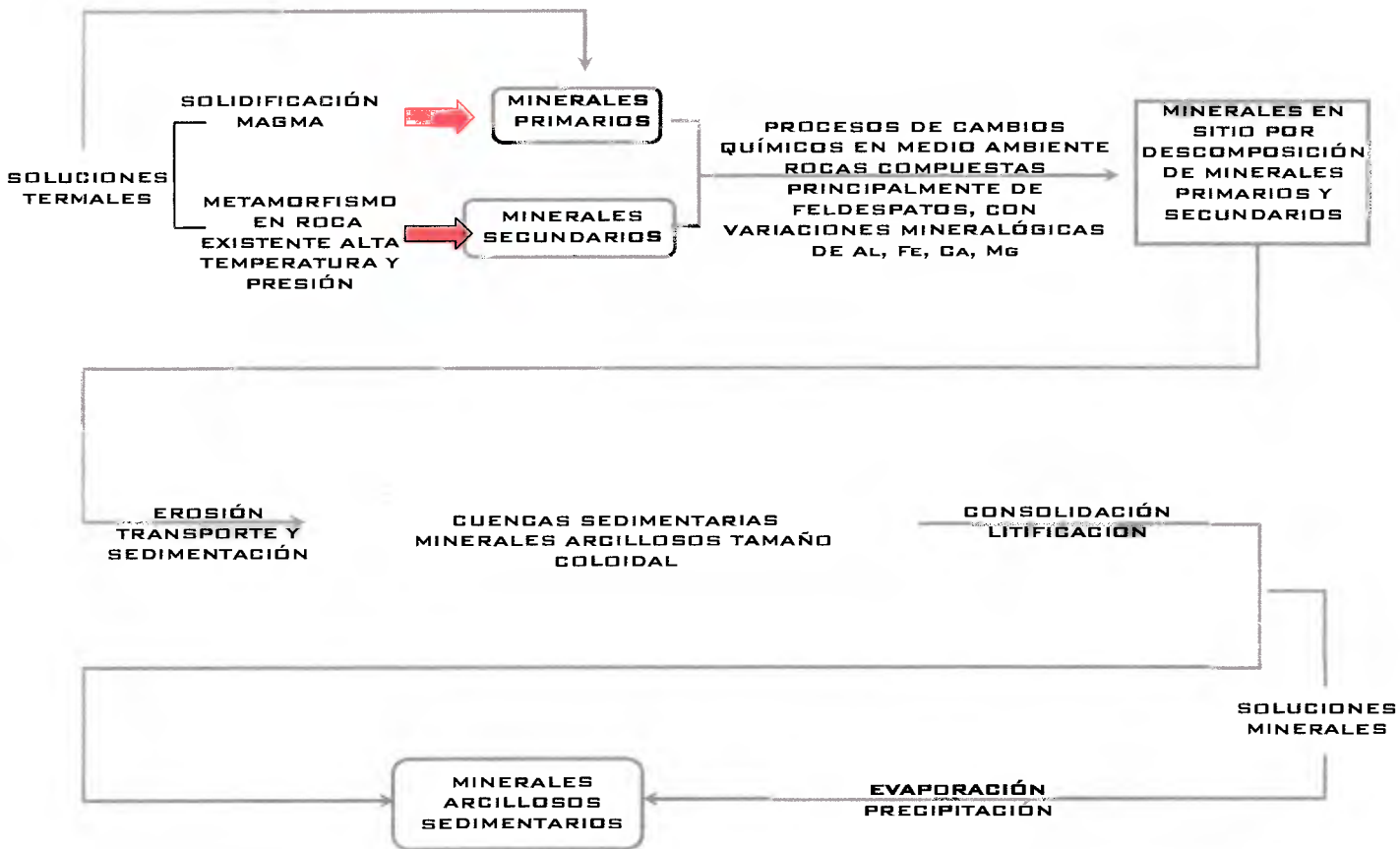
3.1.4 La Formación de Minerales

En general la formación de los minerales está relacionada con las condiciones del origen asociado a la formación de las rocas, pudiendo diferenciar en los procesos dos condiciones:

- a) altas temperaturas y presiones, donde ocurren solidificaciones de soluciones magmáticas o transformación de rocas existentes.
- b) proceso relacionado con el medio ambiente a bajas temperaturas en donde ocurran reacciones químicas con los radicales de O_2 , OH y CO_2 , originando cambio en la composición mineralógica.

En general los minerales transformados en el medio ambiente, principalmente particular de arcillas son sometidos fácilmente a procesos de erosión, transportándolos y depositando en cuencas sedimentarias, en donde los procesos de consolidación y litificación los transforman en depósitos de carácter arcilloso ampliamente utilizado en la industria. El origen de los minerales lo podemos simplificar en el Esquema N° 1-3.

TIPOS DE MINERALES SEGÚN SU ORIGEN



Esquema N° 1-3

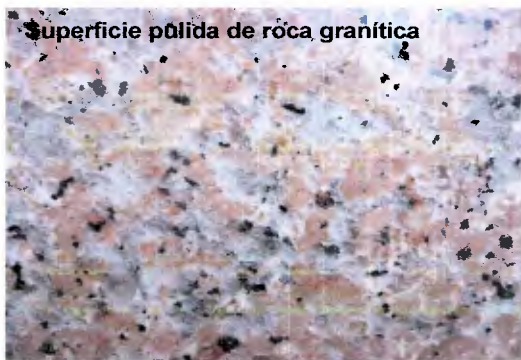
3.2 ROCAS

Conjunto de minerales y/o fragmentos de otras rocas, unidas entre sí mediante fuerzas cohesivas, con aspectos físicos distintivos y una composición mineralógica de cierto rango.

La clasificación universal de rocas se basa de acuerdo a su origen en tres grandes grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas, con características de textura y composición muy diferentes entre sí, diferenciando propiedades y comportamiento mecánico que dependen de dicho origen, el cual debe ser conocido para un uso adecuado en clasificaciones geomecánicas.

3.2.1 ROCA ÍGNEAS

Las rocas ígneas se forman por el enfriamiento de un material líquido denominado MAGMA que se encuentra en el subsuelo, constituido por minerales fundidos y gases disueltos, de composición variable. Se considera que el origen de la Tierra fue un cuerpo incandescente, el cual se ha ido enfriando con el tiempo geológico hacia la superficie, manteniendo un estado líquido hacia su centro y cuyas primeras rocas se denominan Ígneas.



Las rocas ígneas presentan una amplia variedad, dependiendo su clasificación de la composición del magma y de la velocidad de enfriamiento, esto último contribuye en la formación de minerales y su unión, siendo el factor más importante en la resistencia de la roca intacta.

La velocidad de enfriamiento, depende de la profundidad a la cual se forman las rocas. Las denominadas "rocas plutónicas" donde existen grandes masas de roca

encima, con un enfriamiento y solidificación lenta, influye en el tamaño y arreglo de los granos minerales formando rocas compactas. En las denominadas "rocas volcánicas", asociadas con gases, el enfriamiento es más rápido, no permitiendo la formación de los minerales, formando en general rocas de aspecto poroso. Lo anterior puede ser comparado con la fabricación de acero, donde de un estado fundente del material, la velocidad de enfriamiento constituye un factor de la resistencia, originando cualquier cambio brusco de temperatura un acero poroso de baja resistencia.

La velocidad de enfriamiento permite diferenciar una variedad de textura en la roca, donde los granos de minerales pueden ser identificados a simple vista cuando la velocidad es lenta, disminuyendo el tamaño de los granos cuando aumenta la velocidad, hasta afaníticos. Cuando existe variación en el enfriamiento puede ocurrir la formación de una textura de cristales grandes llamados fenocristales rodeados de cristales muy pequeños.

La composición química del magma está constituida principalmente por sílice pudiendo presentarse en forma libre, constituyendo el cuarzo, o asociado a otros minerales principalmente Al, Fe, Mg, Ca, Na y K. Lo anterior permite diferenciar una serie continua que depende del contenido de sílice, subdividiéndose en general en dos clases:

Rocas Ácidas (60-80% $S_1 O_2$) y en las cuales predominan óxido de sodio y de potasio, en general de colores claros. Con contenido de cuarzo.

Rocas Básicas (40-50% $S_1 O_2$) y en donde predominan óxidos de calcio, hierro y magnesio, de color oscuro. Sin cristales de cuarzo.

Existe una clase de roca intermedia cuyo porcentaje de sílice varía entre 50 y 70%, con muy poco sílice libre (cuarzo), con óxidos de una u otra de las clases anteriores.

Los minerales más comunes en las rocas ígneas son:

Colores Claro

Feldespatos (ortosa y plagioclasa)
Cuarzo
Mica clara (moscovita)

Colores Oscuros

Mica oscura (biotita)
Piroxeno (augita)
Anfíboles (hornblenda)
Olivino

3.2.1.1 Clasificación de las rocas ígneas

La clasificación de las rocas ígneas en general se basa en su composición y textura, cuya identificación puede ser resumida en la **Tabla N° 1.3:**

VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO	TEXTURA	COMPOSICION				
		ACIDAS			BASICAS	
		80-60%SiO ₂	70-80% SiO ₂		50-40% SiO2	
LENTA ↓ RAPIDA	EQUIGRANULAR	GRANITO	SIENITA	DIORITA	GABRO	PERIDOTITA
	PORFIDICA-GRANULAR	PORFIDO GRANITO	PORFIDO SIENITA	PORFIDO DIORITA	PORFIDO GABRO	PORFIDO PERIDOTITA
	PORFIDICA-AFANITICA	RIOLITA	FRAQUITA	ANDESITA	BASALTO	
	AFANITICA	FELSITAS				
	VITRIA	OBSIDIANA, PIEDRA POMEZ			VITRIO BASALTO	

qu	RESISTENCIA Kg/cm ²				
	>2000	2000 1000	1000 500	500 250	<250
					
					
					
					
					

COLOR	CLARO	→	OSCURO
-------	-------	---	--------

MINEROLOGIA	CUARZO	POCO A NINGUN		SIN CUARZO
	ORTOSA			PLAGIOCLASA
	MICAS	MICAS (BIOTITAS)		OLIVINO
	ANFIBOLES PIROXENOS	ANFIBOLES PIROXENOS		PIROXENOS (ANFIBOLES)

Tabla N°1-3

La resistencia en las rocas ígneas en general depende principalmente de la textura, en donde en una mineralogía equigranular, los minerales se encuentran fuertemente soldados constituyen planos de alta resistencia con superficie de mayor unión que

en estructuras porfídica, donde el área es menor tal como se muestra en la **Figura N° 1.3**, donde la resistencia dependerá del pórfido.



FIGURA N° 1.3

En general los pórfidos están constituidos por feldespatos, plagioclasas u ortosa, en forma de cristales de caras planas, cuya resistencia al esfuerzo cortante dependerá de la dureza del mineral según la escala de Mohs.

A medida que la velocidad de enfriamiento aumenta el tamaño del grano mineral disminuye, existiendo asociaciones con gases que permiten una textura porosa, así como afanítica sin formación de los minerales, constituyendo en parte rocas vítreas frágiles de resistencia baja.



de rocas graníticas de tonalidades gris oscuro con tonos blancos, de alta resistencia tipo diorita, cuyo uso se indica para las columnas que soportan la nave

Un ejemplo en el uso de las rocas graníticas debido a su resistencia se tiene en la impresionante obra del templo de la Sagrada Familia, en Barcelona, España, diseñado por el Arquitecto Antonio Gaudí, comenzando su construcción en 1882 y la cual continúa en la actualidad, estando prevista su culminación en los próximos 10 años. En la exhibición de materiales de construcción se observan muestras

central. La resistencia a la compresión simple de esta roca es del orden de 1900 kg/cm².

En monumentos egipcios exhibidos en museos se puede destacar el uso de rocas ígneas de distintas tonalidades rosadas, verdes, grises y negras, las cuales abarcan

los tipos de granitos, dioritas, gabros y peridotitas, respectivamente.

Las rocas ígneas tipo abisal, de enfriamiento lento, permiten la formación de minerales, con una fuerte traba de resistencia mayor al mineral.



Diorita. Sala de exposició La Sagrada Família

3.2.1.2 Cuerpos de Rocas Ígneas

De acuerdo a la profundidad de su formación las rocas ígneas se denominan Intrusivas (también denominadas plutónicas e hipobisales) donde el enfriamiento es a grandes profundidades y Volcánicas las cuales se forman por solidificación del magma en superficie.

En las rocas ígneas intrusivas se destacan los Batolitos, que son amplios cuerpos ígneos que se han formado a grandes profundidades y ocupan en la actualidad áreas de relieve montañoso con escasa actividad sísmica y constituyen los sectores de las rocas más antiguas de los continentes, área de Guayana – Brasil, Norte de Canadá, parte central del África.

Como cuerpos ígneos de menor tamaño se encuentran los diques, los cuales cortan la secuencia geológica y con el término “sills” se denominan los que siguen paralelos a la estratificación como parte del proceso de sedimentación. Otro término asociado a las rocas ígneas intrusivas son los lacolitos, los cuales son cuerpos

ígneos lenticulares inyectados a grandes presiones en secuencia sedimentaria. En la **Figura N° 2-3** se muestra los dibujos de los distintos cuerpos ígneos

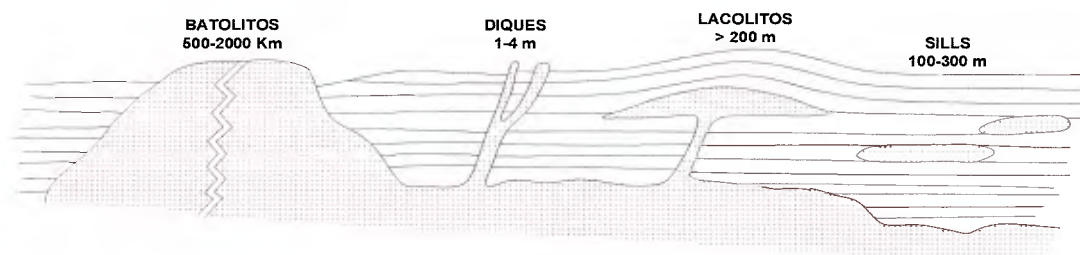
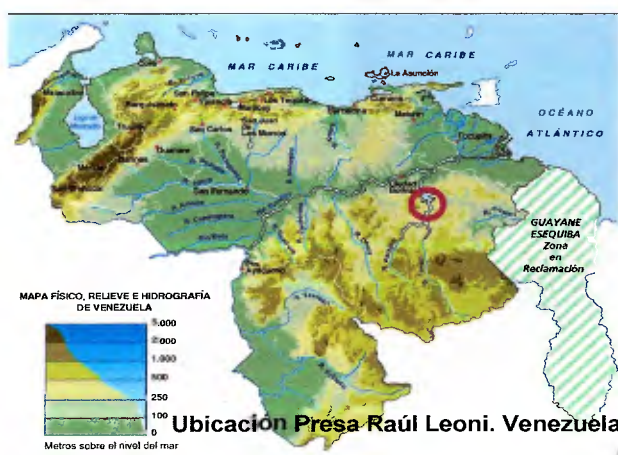


FIGURA N°2-3

3.2.1.3 Investigación de Actividad Sísmica por medio de Diques

Como experiencia en el uso de cuerpos ígneos en Geología Aplicada se tienen la evaluación de la actividad sísmica para las obras del Complejo Hidroeléctrico Raúl Leoni sobre el río Caroní en Venezuela, en funcionamiento desde 1970 y su última etapa en 1990, donde el nivel de agua alcanza 150 metro de altura. El aprovechamiento está implantado en un complejo formacional ígneo- metamórfico



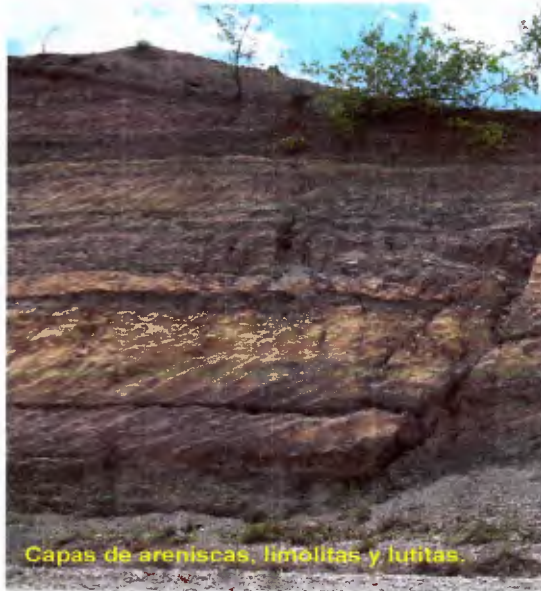
con edades entre 1500 y 2300 millones de años, cruzado por un enjambre de diques y sills de diabasa o doleritas. El área de embalse la cruzan dos anchos sistemas de fallas geológicas, paralelas, de rumbo Noreste denominadas El Pao y Gurí evidenciadas en el área de

inundación, que se amplía a lo largo del alineamiento de dichas fallas. Las fallas están cubiertas en la actualidad por una carga de agua de 150 metros de altura,

cuyo efecto de reactivación sísmica fue evaluado entre los años 1971 a 1974, lo cual debería ser considerado en el diseño de las obras. En la amplia zona de falla, de varias decenas de kilómetros, se determinaron una serie de diques ígneos, tanto identificado por la interpretación de fotos aéreas, como recorrido de campo, los cuales cruzan la traza de la falla, sin ningún desplazamiento. Lo anterior corrobora, que la actividad o desplazamiento de las fallas geológicas, se limitan por lo menos hasta la intrusión de los diques, ampliamente investigado y descrito por O. De Sola (1978). La edad de los diques fue determinada por medio de mediciones radiométrica, obteniendo edades de unos doscientos (200) millones de año. Dentro del proceso de inactividad sísmica, dicha edad se consideró suficiente para garantizar que el diseño no dependería del movimiento de las fallas El Pao y Gurí, corroborando los bajos factores de aceleración en el diseño de las obras.

3.2.2 ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias se forman principalmente por sedimentos de origen



Capas de areniscas, limolitas y lutitas.

clástico, constituidos por fragmentos de otras rocas, que son transportados y depositados, sometidos a procesos de consolidación debido a expulsión del agua, con un efecto de cementación entre granos por la presencia de soluciones minerales. También pueden ser de origen orgánico, constituido por acumulación de restos de plantas y/o animales y de origen químico debido a precipitado de soluciones por evaporación o reacciones químicas.

Las rocas sedimentarias se caracterizan por su arreglo en forma de estratos o capas, pudiendo definirse como dos planos paralelos que limitan una litología determinada de aspectos físicos distintivos, como son el tamaño de grano, color etc y de composición mineralógica en general uniforme. El espesor de la capa sería la

perpendicular entre dichos planos. Así mismo el tope de la capa sería el plano superior que limita la litología distintiva y el plano inferior a dicha litología se conoce como base. Una secuencia de capa, indicando los espesores de cada una, en el orden de deposición se conoce como Columna Estratigráfica, donde las capas inferiores son las más antiguas y las superiores la más reciente. Véase Figura N° 3.3. La columna está constituida por las capas A,B,C y D, donde la A sería la más antigua y D la reciente.

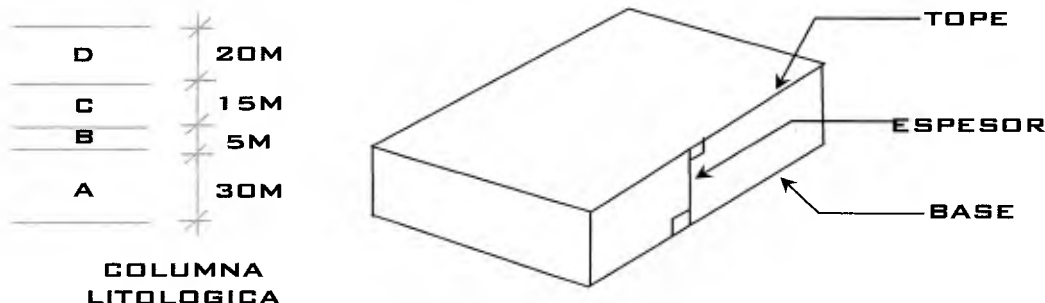


FIGURA N° 3.3

Las capas en general no mantienen un espesor constante, dependiendo del origen de los sedimentos, así mismo se presentan transiciones tanto verticales como horizontales y comúnmente lenticularidad.

3.2.2.1. Rocas Sedimentarias Clásticas

Los sedimentos clasificados de acuerdo al tamaño de grano como gravas, arenas, limos y arcillas recién depositados son poco denso, sobresaturado, incoherentes y muy poroso, en los cuales ocurre un proceso de consolidación principalmente por efecto del peso de la columna sedimentaria ocurriendo el desalojo del agua intersticial. En los materiales granulares dicho efecto es menor, siendo la reducción de volumen más importante en las arcillas y limos. La cementación es el proceso de deposición de material mineral en los espacios intergranulares, principalmente en las gravas y arenas. Dichos espacios de menor tamaño en suelos arcillosos, son

ocupados por el propio mineral de arcilla. En la **Figura N° 4.3** se observa a partir de los sedimentos clasificados en Mecánica de Suelos, específicamente según el American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), el tipo de roca resultante y el proceso más importante en su formación.

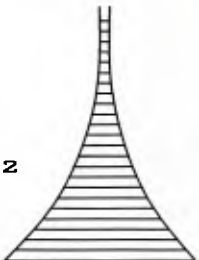
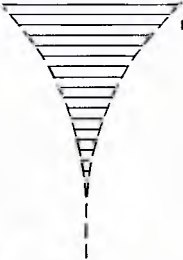
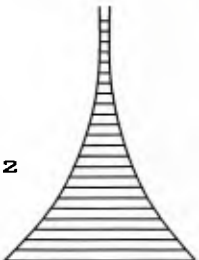
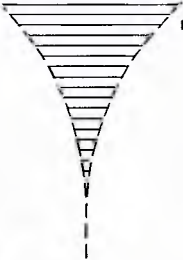
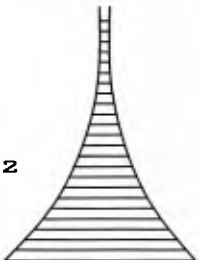
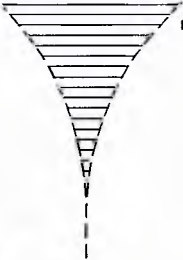
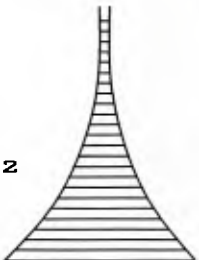
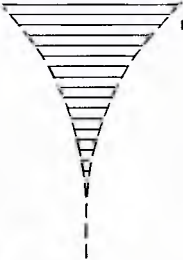
SEDIMENTO	TAMAÑO DE GRANO	CONSOLIDACIÓN	CEMENTACIÓN	ROCA
GRAVAS Y PEÑONES	> 2MM			CONGLOMERADO
ARENAS	2 A 0,06			ARENISCAS
LIMOS	0,06 A 0,002 MM			LIMOLITAS
ARCILLAS	< 0,002			LUTITAS

FIGURA N° 4.3

Los conglomerados están formados por fragmentos de rocas, en general de resistencia alta a los procesos de erosión, pudiendo estar asociado con arenas que ocupan parte de los espacios intergranulares.

En general el conglomerado se identifica por el tamaño de grano predominante, siendo su clasificación común la siguiente:

Tipo de roca		
Gravilla	2 a 4 mm	Conglomerado de grava o gravilla
Gravas	4 a 64 mm	
Peñas	64 a 256 mm	
Peñones	> 256 mm	Conglomerado de peñas o peñones

En general el grano del conglomerado presenta forma sub-redondeada a redondeada, pero pueden encontrarse formado por fragmentos sub-angulares a angulares en cuyo caso lo clasifican como Brecha.

La arenisca, está constituida por arena cementada, en general los granos son de cuarzo y donde el cemento puede ser de origen silicio o calcáreo. Las areniscas pueden ser clasificadas de acuerdo al tamaño de grano, como finas, medias o



gruesa. Las areniscas por su formación de granos de cuarzo y dependiendo de su cementación, pueden ser rocas de alta resistencia cuando el cemento es sílice y en otro caso pueden presentarse pobremente cementada de baja resistencia, con cementación carbonática o sin cemento.

Las lutitas son el resultado de consolidación de minerales de arcilla, de tamaño coloidal, cuya estructura molecular y composición le infiere propiedades particulares de resistencia y comportamiento mecánico. Las lutitas en general son de resistencia baja y altamente sensibles a los cambios de humedad, donde los núcleos del subsuelo, una vez extraídos y en contacto con el medio ambiente, absorben humedad y se produce un fuerte agrietamiento debido a la generación de esfuerzo por el aumento de volumen. Muchas de las lutitas están relacionadas con minerales arcillosos de montmorillonita, de propiedades expansivas conocidas.

Las limolitas son el resultado de procesos de consolidación y cementación en partículas de limo, cuyo comportamiento mecánico se asemeja a rocas de carácter arenoso, pudiendo alcanzar alta resistencia principalmente cuando su mineralización está constituida por soluciones silíceas.

3.2.2.2 Rocas sedimentarias de origen orgánico

Las rocas sedimentarias de origen orgánico están constituidas principalmente por restos de animales y plantas, que absorben el CaCO_3 disuelto en el agua, para formar sus partes duras. Estas rocas se conocen como calizas, caracterizadas por ser macizas, constituidas por masas calcáreas, donde se pueden identificar principalmente restos de conchas, que contrastan con el color de la matriz de la roca. En algunas rocas las conchas son muy abundantes conservando su forma natural en una matriz más porosa generalmente asociada a arena, la cual se identifica con el nombre de coquina.

El carbón, aunque se identifica como un mineral, resulta de un proceso de transformación de abundantes restos vegetales que por pérdida de O_2 conservan los radicales de carbón.

Las calizas son utilizadas en mezclas de concreto debido a su resistencia algo mayor que el material cementante y en donde su abundancia en la corteza terrestre y en general su dureza media, permiten la explotación con explosivos en grandes áreas de canteras así como su trituración de forma económica. Parte del material de caliza es procesado para la obtención del cemento mediante calcinación e hidratación, lo cual ha constituido el material cementante para las obras de ingeniería desde la antigüedad.

3.2.2.3 Rocas Sedimentarias de origen químico

Son las menos comunes que forman las rocas sedimentarias, destacando la ftanita, constituida por material silíceo producto de precipitación de soluciones químicas de SiO_2 . En algunos casos la solución silícea ocupa el espacio intergranulares de limolitas, infiriendo alta resistencia de las rocas, en general denominadas limolitas Silíceas.

Otro tipo de roca que resulta de la sustitución de parte del Ca de las calizas por Mg, es la Dolomía, cuyo proceso se conoce como dolomitización.

También pueden ocurrir precipitaciones químicas de soluciones calcáreas formando calizas de origen químico en general de poca importancia.

3.2.2.4 Resistencia de las rocas sedimentarias

La resistencia de las rocas sedimentarias de muestra intacta depende del grado de cementación y su composición, presentando valores muy dispersos pero que en general se han simplificado en los rangos que muestra en la **Figura N° 5.3**

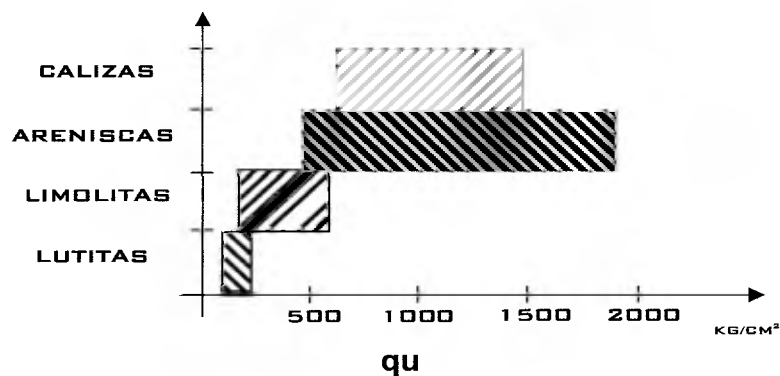


FIGURA N° 5.3

3.2.3. ROCAS METAMÓRFICAS

Las rocas metamórficas son el resultado de procesos de altas temperaturas y presión en rocas existentes ígneas, sedimentarias y también metamórficas, resultando en parte cambios mineralógicos y de textura.



Los factores causantes del metamorfismo son la temperatura, la presión y las reacciones químicas de los mismos materiales de la roca original o con adición de material nuevo aportado por soluciones mineralógicas.

La temperatura aumenta la plasticidad de las rocas, en forma de flujo plástico, lo cual facilita y acelera las reacciones químicas entre los minerales, apareciendo nuevos minerales de origen metamórfico como los granates, estaurolitas, clorita, serpentinitas, etc. También el material arcilloso en las rocas de lutitas es recrystalizado y forman nuevos minerales como micas y anfíboles.

Las altas presiones, pueden actuar de forma distinta dependiendo de la profundidad de confinamiento, a poca profundidad de la superficie se pueden generar mayores esfuerzos cortantes, en cambio a grandes profundidades las masas se encuentran confinadas, con un comportamiento isotrópico plástico. En el primer caso se pueden generar mezclas de secuencia litológicas con fuerte plegamiento isoclinal y en el segundo caso los cambios están limitados al espacio confinante, donde se formarán minerales más pesados y densos.

En la **Figura N° 6.3** se muestra en forma esquemática el efecto de la presión de acuerdo a la profundidad.

Las reacciones químicas que se realizan durante los procesos metamórficos dependen de la presión, temperatura y la composición original de las rocas, cuyo complejo proceso de cambio mineralógico forma parte de estudios particulares, pudiendo destacar la transformación de minerales arcillosos en micas y anfíboles.

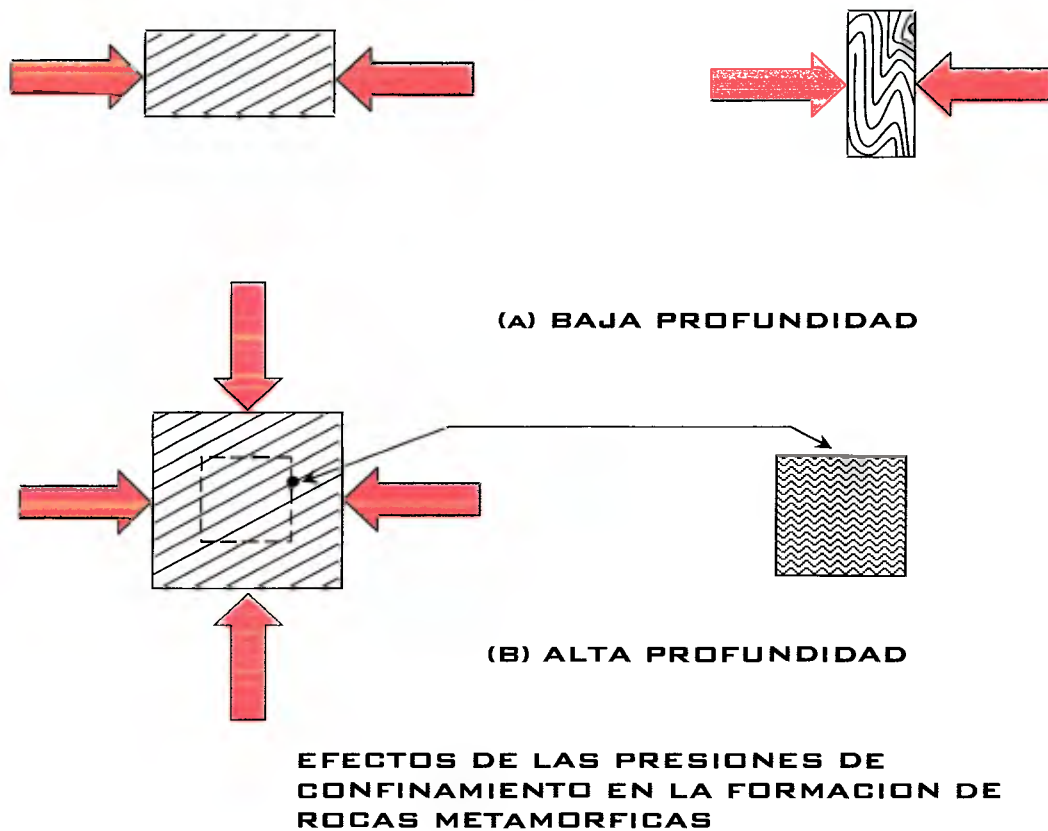


FIGURA Nº 6.3

3.2.3.1 Clasificación de Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas se clasifican en general en dos grupos: foliadas y no foliadas. La foliación constituye las mayores características de estas rocas.

La foliación se debe al arreglo paralelo de los granos minerales, lo cual constituye una debilidad natural de la roca, por donde se puede partir con mayor facilidad. La

foliación también llamado esquistosidad constituye un defecto en las rocas metamórficas, lo cual le infiere un comportamiento mecánico anisotrópico dependiendo del esfuerzo de sollicitación con respecto a la posición de los planos de foliación. Véase Figura N° 7.3



FIGURA N° 7.3

De acuerdo al espesor de los planos de foliación, las rocas metamórficas reciben el



Filita silícea. Túnel de Yacambu. Venezuela

nombre de esquistos pizarra, filitas y gneises. En los esquistos se pueden identificar a simple vista o con ayuda de lupa bandas de 1 a 2 mm, de mineralogía definida de alternancia cíclica con variación en la cementación de dichas bandas, presentando planos ondulados con baja o nula cohesión que permite

fácilmente su separación al golpe del martillo. En la fotografía de una muestra manual de filita silícea maciza, de 12 centímetros de espesor, limitada por planos sin cementación, la resistencia del macizo dependerá de la localización de la muestra de acuerdo a dichos planos, tal como se representa en la **Figura N° 8.3**



Las filitas poseen una mineralogía en general de micas, con laminación muy fina, untuosa, de muy baja cohesión. En general se presentan intercaladas con los esquistos.

Las pizarras son rocas foliadas que resultan del metamorfismo bajo de lutitas, con foliación de superficie plana, que permite fácilmente su separación en placas que son utilizada para cubrir paredes y pisos.

Los gneises son rocas macizas bandeadas, con planos de foliación a separación mayores de 1 metro, presentando intervalos uniforme de más de 20 metros.

Las rocas metamórficas se clasifican, como esquistos, filitas, pizarras o gneises y su denominación depende de su composición mineralógica. Un esquisto compuesto por cuarzo y mica, se identifica como Esquistos cuarzo micáceos, si su composición es calcita (>80%) y grafito (<5%), se identifica como Esquistos calcáreo grafitosos. En caso de gneises son comunes gneis cuarzo feldespático, gneis cuarzo micáceo granatífero, etc.

Las filitas dependiente de su composición mineralógica, se denomina como filitas micáceas, filitas grafitosas, etc.

Las rocas metamórficas macizas más comunes son las cuarcitas y los mármoles. Las cuarcitas son el resultado del metamorfismo en una arenisca, donde por recristalización del cuarzo adquiere un aspecto vítreo, maciza y con alta dureza. Los mármoles son rocas metamórficas que se han formado de calizas o dolomías, en donde se eliminan los espacios porosos y resulta una roca muy compacta y de mayor resistencia que la roca original.

3.2.3.2 Resistencia de rocas metamórficas

La resistencia de las rocas metamórficas foliadas depende de la posición de los planos de foliación con respecto a la sollicitación, donde los valores mayores de resistencia se obtienen cuando dicha posición de la foliación se encuentran a 90° con respecto a la carga, tal como se muestra en la **Figura N° 9.3**, de acuerdo a una serie de ensayos realizados en esquistos, por R. García (1971):

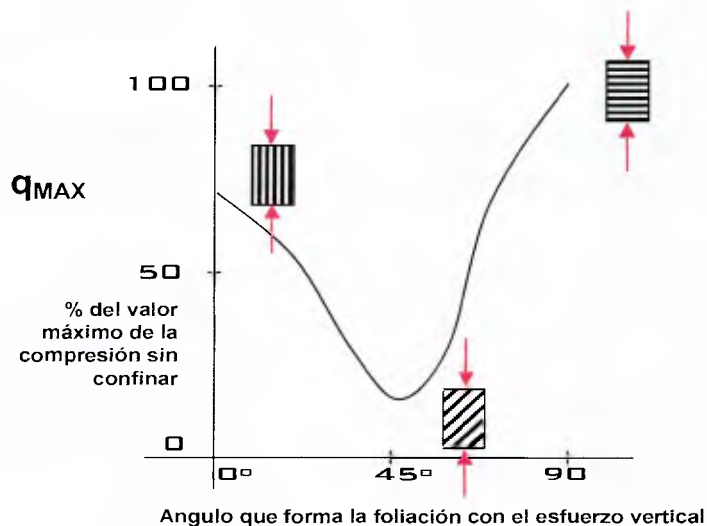


FIGURA N° 9.3

Las rocas no foliadas, sin alteración mineralógica, gneises, cuarcitas y mármoles, presentan resistencia a la compresión muy alta estimándose entre 1000 y 2000 Kg/cm² lo cual en general contracta con las rocas foliadas, esquistos, pizarras y filitas de valores inferiores que dependen de la orientación del esfuerzo con los planos de foliación.

3.3 CICLO DE LAS ROCAS

De acuerdo con la teoría que afirma que la tierra se encontraba originalmente en un estado incandescente, las primeras rocas que se formaron fueron rocas de origen ígneo, debido a un enfriamiento progresivo de la corteza terrestre. Si aceptamos que la creación de la atmósfera dio origen a los fenómenos climatológicos y los procesos de erosión actuaron sobre las masas ígneas, se producen los primeros sedimentos cuya deposición en grandes cuencas dieron su origen a las rocas sedimentarias. Las primeras rocas ígneas sometidas a los procesos de erosión debieron servir en el tiempo geológico como superficies de apoyo a cuencas de sedimentación de edad más reciente.

Es importante destacar que encima de las grandes masas ígneas originales se encuentran grandes espesores de rocas sedimentarias, como las existentes en el macizo Guayanés que se extiende hacia Brasil, las cuales conforman un topografía características de relieve plano limitado por altos escarpados. Dicha expresión topográfica es similar en el continente Africano, lo cual forma parte de los argumentos que corroboran la teoría de los desplazamientos continentales. Las



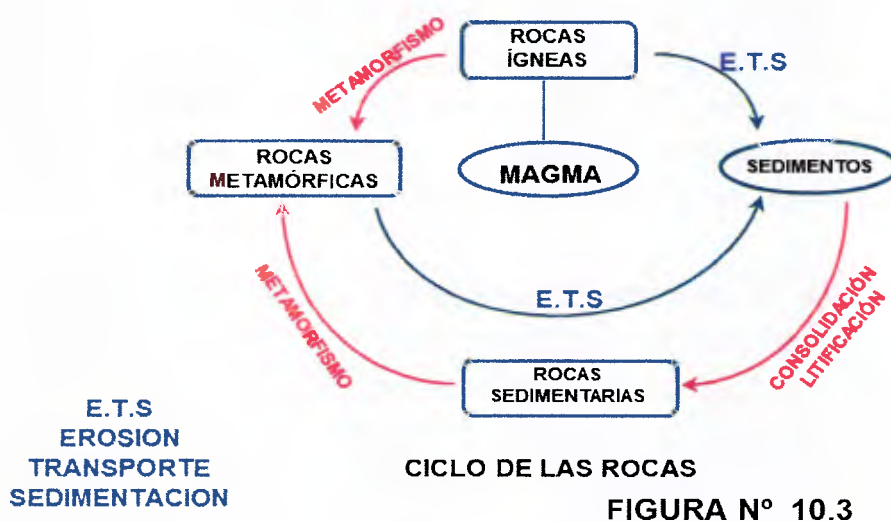
amplias mesetas planas que yacen sobre basamentos graníticos, similares al escarpado que controla el salto Ángel en Venezuela, considerado como el más alto del mundo, con 1000 metros de altura, están constituidas por areniscas silíceas, las cuales son el resultado de erosión de otras

antiguas masas ígneas, cuyos sedimentos se acumularon en cuencas donde los

basamentos graníticos se encontraban en procesos de formación. Es importante destacar la formación en el tiempo geológico de grandes masas continentales a partir de los procesos de erosión, transporte y sedimentación.

El efecto a profundidad de altas temperaturas y presiones, originaron el metamorfismo de rocas sedimentarias e ígneas, dando lugar a las rocas metamórficas. En general los procesos de erosión, transporte y deposición, dieron origen a nuevas cuencas sedimentarias y a la formación de rocas sedimentarias.

Todas las rocas anteriores, ígneas, sedimentarias y metamórficas entran en un ciclo, que en forma resumida se muestra en la **Figura N° 10.3**:



ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

El termino Estructura en Geología abarca un amplio proceso de resistencia y deformación en la Corteza Terrestre, donde la magnitud de las fuerzas generadas han movido continentes, pudiendo comparar el comportamiento del acero más resistente a dichas fuerzas, con los resultados de comprimir una hoja de papel con las manos.

4.1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras geológicas son el resultado de esfuerzos de origen tectónico sobre las rocas que forman la corteza terrestre, cuyos efectos generan pliegues, fallas y diaclasas.

Una forma de visualizar los efectos de esfuerzos sobre la corteza terrestre es el ensayo de carga en un cilindro de concreto, tan común en el control de obras, donde la carga aplicada da como resultado el fracturamiento del cilindro y la determinación de la carga de falla. En lo anterior podemos diferenciar dos condiciones, una de fracturamiento sin desplazamiento relativo entre las caras que limitan las fracturas y otra de falla con desplazamiento a lo largo del o los planos de fracturas. La primera condición de fracturas sin desplazamiento se le asigna en geología al término de diaclasas y cuando ocurre el desplazamiento a lo largo del plano de fractura se asigna como falla geológica.

Otro ejemplo sería el de una secuencia de hojas de cartulina o papel de distintos colores en posición horizontal, sometida a esfuerzos horizontales, lo cual produce una serie de arrugas o dobleces en forma cóncavas o convexas, conocido en geología como pliegues.

Los efectos anteriores, requieren condiciones que dependen de la clasificación de las rocas según su origen, conocidas como ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las primeras son el resultado de enfriamiento del magma, asemejándose a una masa homogénea, donde los esfuerzos producen fracturas y fallas geológicas.

En las rocas sedimentarias constituidas por capas y en las rocas metamórficas caracterizadas por planos de foliación, poseen condiciones que permiten deformaciones de dobleces y el desarrollo de pliegues, de acuerdo a la magnitud de la fuerza al desarrollo de fracturas y fallas geológicas.

4.2 PLIEGUES



Son deformaciones de las capas que forman las rocas sedimentarias y los planos de foliación que definen las rocas metamórficas, que se originan debido a esfuerzos sobre las rocas, que son identificados de acuerdo a su forma como anticlinales de forma convexas y sinclinales de forma

cóncava, tal como se muestra en la **Figura N° 1-4**:

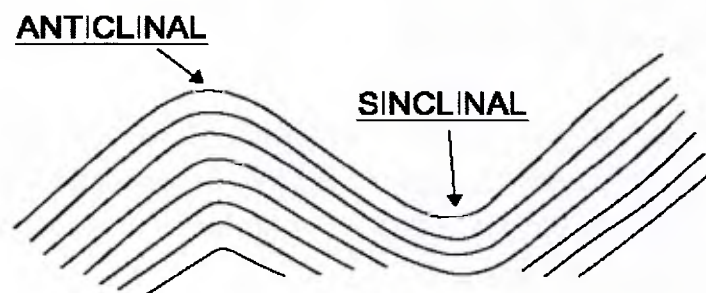
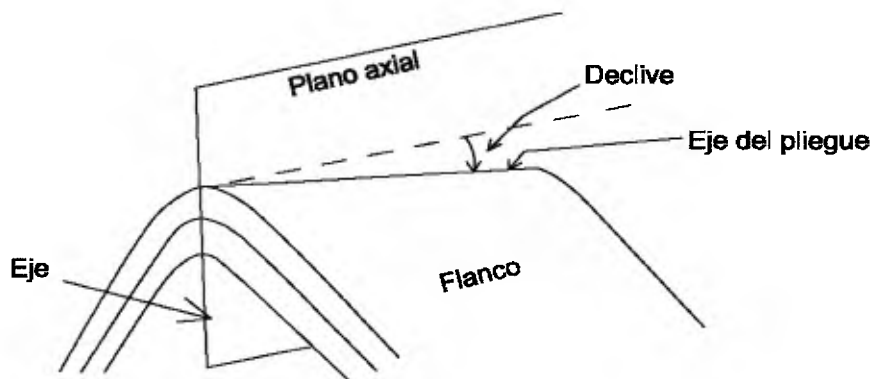


FIGURA N° 1-4

En general la parte de un pliegue en tres dimensiones son las siguientes: a) Flanco, que son los planos laterales inclinados, b) Eje de pliegue, que corresponde a la

línea en planta donde ocurre el cambio de sentido de los planos que definen los flancos, c) Plano Axial, definido como el plano que bisecta el ángulo formado por los flancos que definen el pliegue, d) Declive, es la inclinación del eje de pliegue con respecto al plano horizontal. Véase **Figura N° 2-4**:



Partes de un pliegue

FIGURA N° 2-4

De acuerdo a la posición del plano axial los pliegues se clasifican como a) recto, cuando la inclinación de los flancos son iguales, b) inclinado, donde los flancos presentan inclinaciones distintas y en sentido contrario y c) acostado, cuando ambos flancos están inclinando en el mismo sentido. Véase **Figura N° 3-4**:



Clasificación de los pliegues

FIGURA N° 3-4

En geología aplicada los pliegues tienen dos condiciones importantes, una la repetición de la secuencia, lo cual para el caso de túneles, la experiencia de excavación y sostenimiento en condiciones similares puede ser aplicada en la secuencia repetida. Otro efecto es la respuesta del estado de esfuerzo de su formación a las modificaciones por la excavación, donde las condiciones de liberación de tensiones constituyen un conocimiento importante para la estabilidad de la obra. Si consideramos un paquete de hojas y las doblamos formando un pliegue, cualquier corte paralelo a las hojas, tendrá un efecto de liberación de tensiones, condiciones que podrían asemejarse en la excavación de un túnel en la misma dirección. En cambio si con un taladro efectuamos un orificio perpendicular a las hojas, el resultado es una abertura limpia.

En general los esfuerzos que forman las estructuras geológicas tienden a disiparse con el tiempo, donde el efecto residual aunque de pequeña magnitud requiere de su conocimiento adecuado para el proyecto de las obras.

Otro fenómeno común en los pliegues, es el efecto de tensiones en el eje, lo cual origina fracturas abiertas, bien conocidas por los geólogos petroleros en las búsqueda de hidrocarburos, principalmente cuando estratos de mayor dureza están limitados por secuencias superiores plásticas de mayor deformación, que sirven como sello a la acumulaciones de petróleo, gas y agua.

4.3 DIACLASAS

Son fracturas en las rocas, sin desplazamiento relativos, pudiendo existir cierto movimiento perpendicular al plano de fractura. Las diaclasas se forman por efectos tectónicos o cargas geoestática, no pudiendo definirse como un plano de dimensiones constante, el cual depende de las condiciones de esfuerzos ya sea por nuevos efectos tectónicos o por relevación de carga sobre el macizo debido a excavaciones o efectos naturales de erosión y/o meteorización.

Es común encontrar en las perforaciones de exploración una disminución del fracturamiento con la profundidad, en general relacionado con la meteorización, en donde las pruebas de permeabilidad tienden a valores muy bajos o nulos.

Cantera de Boticcino. Brescia. Italia

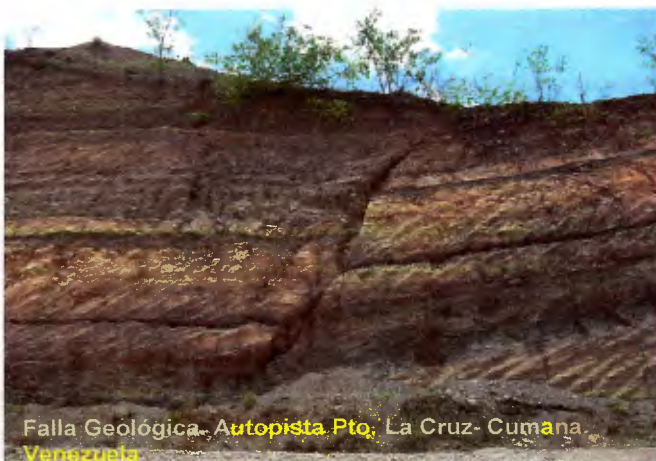


desarrollo que facilitan la explotación de la caliza.

Las diaclasas se presentan en patrones o sistemas que en general se conservan en áreas o sectores, donde las condiciones geológicas estructurales son similares. En la cantera de la fotografía se destacan patrones de diaclasas de gran

La geología aplicada requiere de un conocimiento detallado de las diaclasas, por ser un defecto de las rocas que influirá en la estabilidad de excavaciones tanto superficiales como subterráneas, así como la permeabilidad del macizo rocoso, todo lo cual es analizado en forma detallada en el **CAPITULO 7**.

4.4 FALLAS GEOLÓGICAS



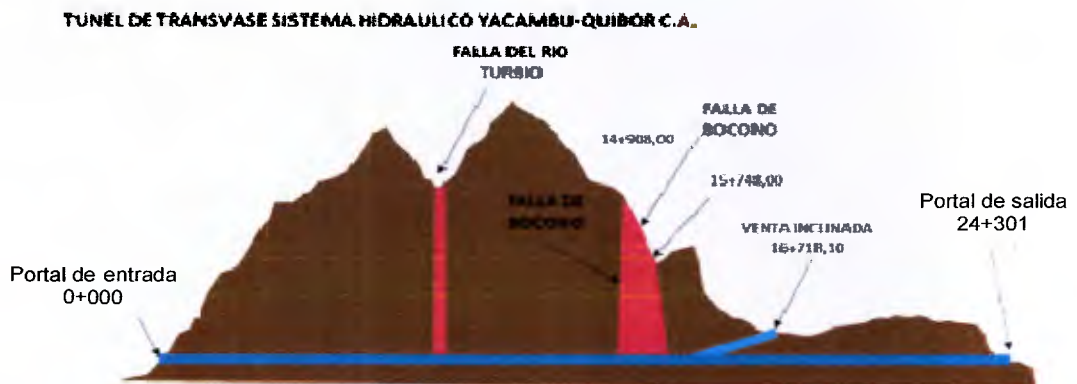
Son fracturas en la corteza terrestre, a lo largo de la cual se produjo algún desplazamiento, pudiendo estar limitada a un plano delgado de 1 mm de espesor o una zona contorsionada asociada a brechas arcillosas, roca triturada, de decenas o cientos de metros de espesor.

Las fallas geológicas poseen desarrollo longitudinal y espesor variable, con muy baja resistencia al corte con relación al medio que la limita y en donde el estado de esfuerzo constituye interés particular de acuerdo a la orientación de la obra, donde debe ser evaluado tanto efectos locales como regionales.



En Venezuela, como ejemplo de fallas de importancia regional se tiene la falla de Bocono, la cual ha sido determinada como límite de la placa tectónica del Caribe, formada por un sistema de fallas en general paralelo, donde sus espesores y zona de influencia varían a lo largo de sus trazas. Como ejemplo a

nivel mundial de obra relacionada con la falla de Bocono, lo constituye el Trasvase del Sistema Yacambu- Quibor, en el estado Lara, constituido por un túnel de 24 kilómetros de longitud, cuyo perfil longitudinal se muestra en la Figura N°4-4. En el sector de Sanare – Cubiro, atraviesa dicha zona de falla geológica, con un espesor encontrado de 1300 metros. Se destaca la presencia de sectores de brecha de carácter arcilloso de color negro, muy compacta, denominados “gouge” con espesores de centímetros a decenas de metros, donde son comunes la presencia de espejos de falla o superficies pulidas.



(Fuente Sistema Hidráulico Yacambu-Quibor, SHYQ, 2001)

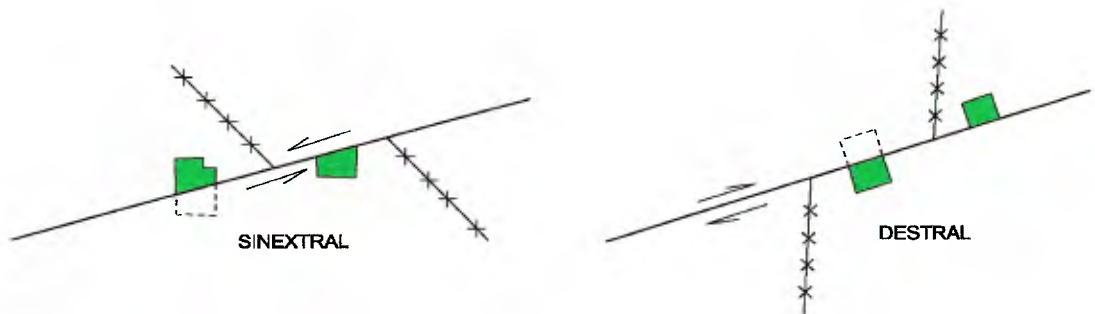
FIGURA N°4-4

Se asocian sectores de rocas muy fracturadas y plegadas con milonitas, en donde los altos esfuerzos existentes son liberados por la excavación, con efectos de desintegración en dichas rocas. El cruce del sector de la falla de Bocono en la excavación del túnel de Yacambu fue realizado mediante método minero y sostenimiento a base de costillas metálicas, siendo numerosos los ejemplos de re-excavación por cierre de la sección donde dichas costillas se plegaron en forma de zigzag a los esfuerzos tectónicos.

En el sector del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santo Domingo en Mérida, Edo. Mérida, el espesor de la zona de falla Bocono es de unos 300 m., caracterizados por una zona asociada a rocas graníticas en general con alto fracturamiento.

4.4.1 Clasificación de las fallas geológicas.

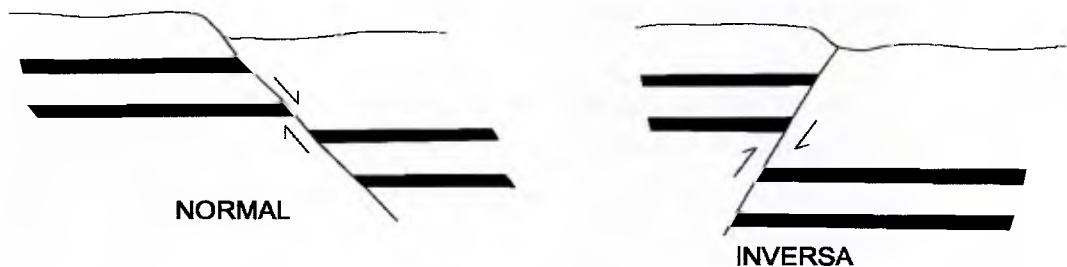
Debido al efecto del movimiento de los continentes con desplazamiento de la corteza terrestre paralelo a la superficie terrestre, el principal movimiento en las fallas se considera horizontal, conocidas de acuerdo a su desplazamiento relativo, como diestral o siniextral, derecha o izquierda, tal como se indica en la Figura N° 5-4, en donde el movimiento es independiente de la posición del observador en cualquiera de los lados de la falla.



Clasificación de las Fallas de acuerdo al desplazamiento horizontal

FIGURA N° 5-4

Las fallas también se clasifican de acuerdo a su movimiento vertical relativo, como normales e inversas, en general asociadas a esfuerzos de tensión o compresión, tal como se muestra en la Figura N° 6-4. Para la falla normal la extensión horizontal aumenta y para falla inversa la extensión horizontal disminuye.



Fallas de diversos desplazamiento vertical

FIGURA N° 6-4.

Otro tipo de falla asociada con secuencia de roca sedimentaria es conocida como falla de rumbo cuya traza sigue la dirección de las capas. También existen fallas geológicas en forma de cabalgamiento en general de ángulo bajo, en donde la secuencia litológica inferiores se colocan encima de las superiores.

4.4.2 Deformación del macizo rocoso por la posición de la falla geológica

Una falla geológica está definida por un espesor de material cuyas propiedades mecánicas de resistencia y de deformación presenta valores bajos de gran contraste con la roca que lo limita. Dichas propiedades deben presentar una transición hacia la roca no afectada.

Para el caso de un túnel, la menor afectación en el cruce de una falla geológica será cuando el alineamiento se encuentre perpendicular al plano de falla, y la mayor cuando el alineamiento del túnel coincida con la falla geológica. Así mismo la cercanía del túnel a la falla tendrá incidencia en mayor deformación de la roca hacia

la cavidad. En la Figura N° 7-4 se muestra en un modelo tridimensional una falla geológica, donde se encuentra dos alineamientos de túneles, uno perpendicular a la

DEFORMACIÓN DEL MACIZO ROCOSO HACIA LA CAVIDAD DEL TÚNEL SEGÚN LA ORIENTACIÓN DEL TÚNEL CON RESPECTO A LA FALLA GEOLÓGICA

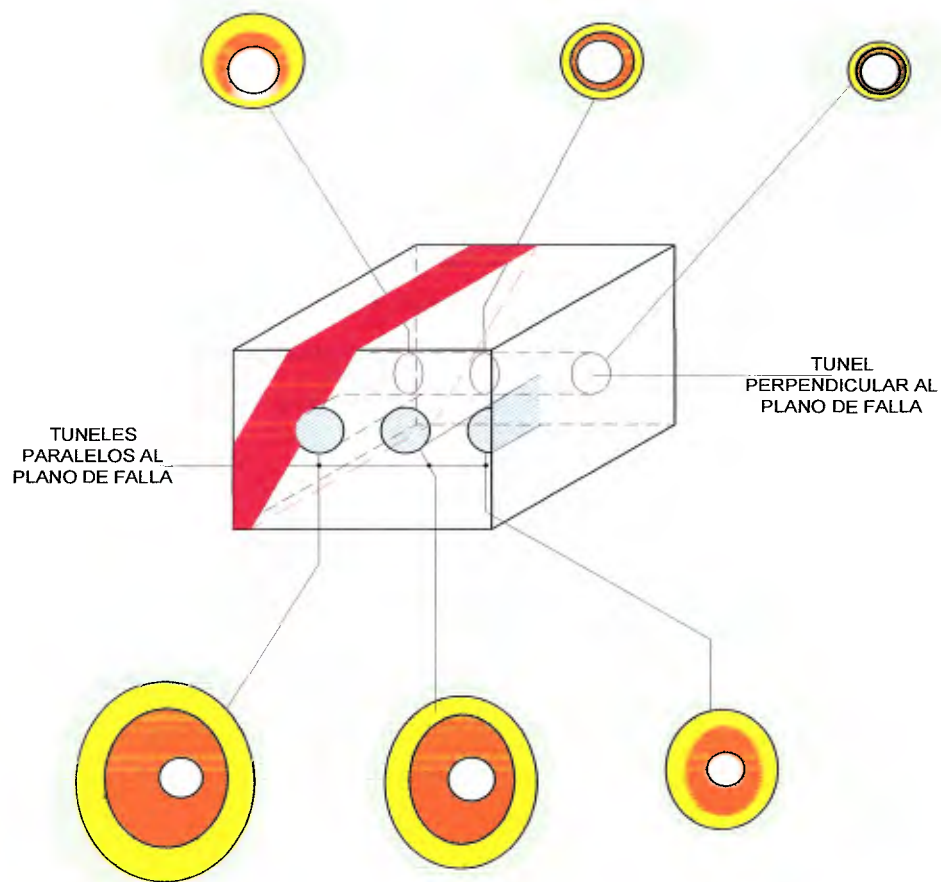


FIGURA N°7-4

falla y otros en posición paralela al plano de falla, en estos últimos el hastial izquierdo se encuentra más cercano a dicho plano que el derecho. De acuerdo a la posición del alineamiento con respecto al plano de falla y su cercanía a dicho plano, se muestra en forma esquemática en distintas secciones circulares la posible deformación del macizo circundante a la excavación, donde las deformaciones serán mayores en los alineamiento paralelos y mucho menor cuando el eje del túnel se encuentre perpendicular al plano de falla.

La magnitud de las deformaciones se muestra en colores, siendo el rojo indicativo de mayores esfuerzos con altas deformaciones hacia el túnel, el amarillo esfuerzos moderados al igual que las deformaciones y el verde corresponde a la roca con muy poca deformación. Las zonas se han representado en forma asimétrica con respecto al túnel lo cual se debe a la cercanía del hastial izquierdo al plano de falla geológica. Las grandes fallas geológicas, que forman patrones paralelos con el límite de placas tectónicas, controlan altos esfuerzos de compresión paralelos a dichas fallas, los cuales constituyen esfuerzos residuales en el macizo rocoso, que tienden a liberarse con la excavación.

Cuando el alineamiento del túnel se encuentra paralelo al sistema de falla geológica se produce un efecto de compresión horizontal en la sección transversal del túnel, con generación de grandes esfuerzos hacia la bóveda y piso donde la roca se deforma y en caso de roca muy dura se produce fracturas con estallidos. Cuando el alineamiento del túnel se encuentra perpendicular al plano de falla geológica, la componente de esfuerzo hacia la sección transversal es mucho menor.

Por lo anterior, durante la fase de estudios preliminares, es importante en el planteamiento de un túnel, analizar su alineamiento con respecto a la posición de las estructuras geológicas regional, de forma tal de orientarlo lo más perpendicular a dichas estructuras. La presencia de zonas débiles constituidas por brechas de

fallas geológicas debe ser atravesada por un túnel perpendicular a su rumbo, lo cual limita el problema al ancho de dichas brechas.

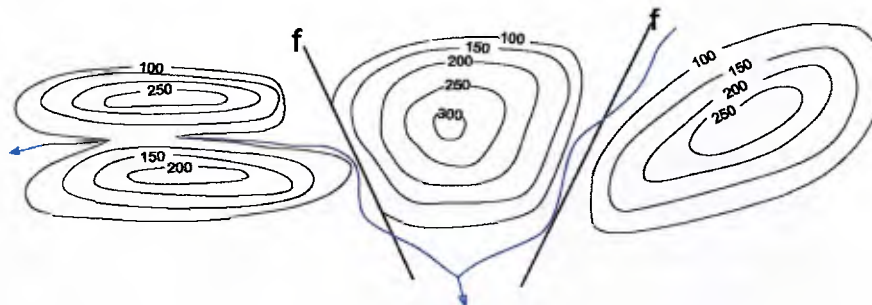
4.4.3 Evidencias geomorfológicas de fallas geológicas

En general las fallas geológicas tienen un gran control sobre el relieve topográfico, cuyas evidencias permiten clasificar en importancia el fenómeno geológico. Entre las evidencias geomorfológicas más comunes se encuentran las siguientes:

- a) Truncamiento brusco de una cadena montañosa, siendo el mejor ejemplo el Valle de la ciudad de Caracas a cota 900 m.s.n.m. localizada al pie de la Serranía El Ávila con cotas del orden de los 2000 metros. En la foto de la ciudad de Caracas se destaca la alta densidad de población que han ocupado el amplio valle coluvial de fácil construcción en comparación con las altas pendientes montañosas. La larga y alta Serranía de El Ávila en contraste con la presencia de un valle alargado, evidencia un origen tectónico asociado a fallas geológicas cuyas evidencias de campo se observan al pie de las laderas, donde son comunes la presencia de brechas y zonas contorsionadas en las rocas que controlan el relieve montañoso.



- b) Desplazamiento de filas o colinas, cuyas formas contrastan lateralmente, no presentando continuidades, tal como se muestra en la **Figura N° 8-4**. En general el relieve topográfico depende de las formas de las curvas de nivel, la pendiente controlada por la densidad de curvas y las cotas. El contraste de formas topográficas distintas, puede ser evidencia de la presencia de fallas geológicas por dicho contacto.



Fallas indetificadas por cambios en el relieve

FIGURA N° 8-4.

- a) Cambios bruscos en los cauces de ríos y quebradas, en donde el material afectado por la falla facilita la erosión permitiendo la formación del valle. Ejemplo de gran interés lo constituye en el Estado Trujillo, cercano a la Ciudad de Boconó, la confluencia del río Burate en río Boconó, cuyo valle está controlado por el importante sistema de fallas de Boconó de carácter regional, fácilmente identificada en el relieve del sistema montañoso andino de Venezuela, debido a su coincidencia con el alineamiento de valles y ríos importante. Dichas fallas controla la mayor parte de las depresiones topográficas en el relieve andino, con un alineamiento noreste similar al rumbo de la cordillera.



Ejemplo de lo anterior se muestra en la lamina superior tomada de Google Earth donde el valle del rio Boconó con drenaje al oeste, cercano al caserío de Tostó, le desemboca el rio Burate con drenaje al Este, en forma encontrada. Es importante destacar que hacia la margen Sur del rio Bocono se observa una zona paralela al cauce de unos quinientos (500) metros de ancho donde predominan rocas trituradas angulosas en una matriz gravo arenosa que son explotadas para engrazonado de carreteras rurales.

- c) Facetas Triangulares, donde las laderas pendientes al pie de monte, están limitadas por quebradas transversales de cauces profundos, presentando dichas laderas formas triangulares. La superficie es el resultado de la presencia de fallas geológicas, donde su orientación e inclinación coincide con las facetas



En general la ladera que conserva la forma triangular está controlada por rocas de mayor resistencia, donde la roca triturada que limitaría el plano de falla sería sometida fácilmente a proceso de erosión, permitiendo exponer el plano de mayor resistencia.

CAPITULO N° 5

PLANOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS. UNIDADES LITOLÓGICAS

El entendimiento en tres dimensiones de los distintos planos que definen las estructuras geológicas, así como su representación en planta, constituye una herramienta que permite evaluar y prever problemas simples de estabilidad y el conocimiento de información geológica a cotas inferiores de la superficie del terreno.

En geología aplicada es importante contar con planos topográficos a escala adecuadas para las distintas fases de proyecto para obras, pasando desde su nivel conceptual o preliminar a escalas amplias 1:100.000, 1:25.000, 1:10.000 a escalas detalladas para las fases de anteproyecto o proyecto con base topográfica en general 1:1000 o 1:500. Así mismo las distintas estructuras geológicas requieren ser evaluadas en forma detalladas siendo representadas en forma gráfica para su análisis y uso en los distintos problemas geotécnicos.

5.1 REPRESENTACION DE ESTRUCTURAS GEOLOGICAS

La representación geológica de los distintos planos de las estructuras geológicas, son medidos en afloramiento de campo por medio de una Brújula, la cual permite obtener la información en tres dimensiones, con base a la posición en el espacio de dichos planos mediante el rumbo y buzamiento.



- El rumbo se define como la posición de la línea horizontal con respecto al Norte, que resulta de interceptar el plano que define la estructura (capa, diaclasas, fallas) con un plano horizontal.
- El buzamiento (β) es el ángulo que forma la línea de máxima pendiente perpendicular al rumbo contenida en el plano estructural, con el plano horizontal.

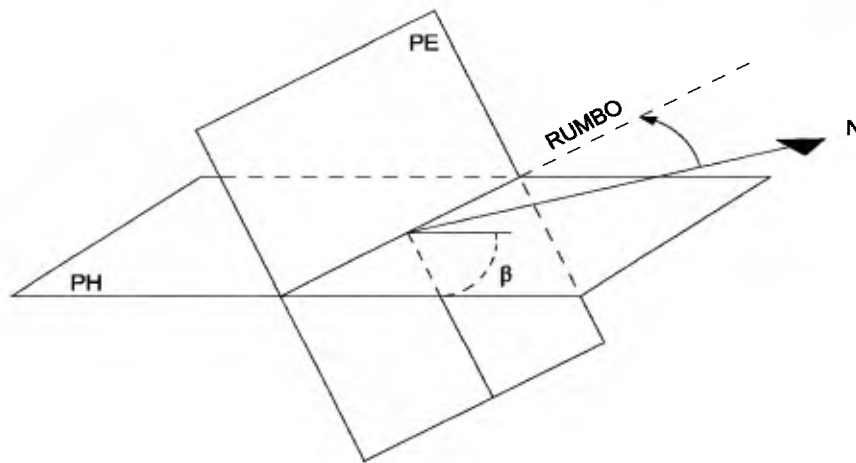


FIGURA N° 1-5

Cualquier punto de información geológica en un plano está localizado por sus coordenadas y cota, permitiendo su ubicación espacial, el cual puede ser usado bajo principio de geometría para determinar los problemas geotécnicos, como son la estabilidad en taludes de corte, estabilidad y sostenimiento en túneles, orientación de perforaciones, localización de estratos de explotación en minas, etc.

La representación gráfica más común de los datos geológicos que tienen relación con la geología aplicada son los siguientes:

RUMBO Y BUZAMIENTO DE ESTRATIFICACION	
RUMBO DE CAPA VERTICAL	
CAPA HORIZONTAL	
RUMBO Y BUZAMIENTO DE FOLIACION	
RUMBO DE FOLIACION VERTICAL	
FOLIACION HORIZONTAL	
RUMBO Y BUZAMIENTO DE DIACLASA	
RUMBO DE DIACLASA VERTICAL	
DIACLASA HORIZONTAL	
EJE DE PLIEGUE ANTICLINAL	
EJE DE PLIEGUE SINCLINAL	
FALLA GEOLOGICA	

En cada punto de información geológica se combinan ya sea los planos de estratificación o foliación con los distintos planos de diaclasas, como por ejemplo:

Capa de Caliza	R: N 50° N	B: 60° N
Diaclasa D1	R: N – S	Vertical
Diaclasa D2	R: N 60° O	B: 80° S
Diaclasa D3	R: E – O	B: 60° S

La representación gráfica en plano del punto ubicado geográficamente, tanto en coordenada como cota, la información geológica anterior es como sigue:

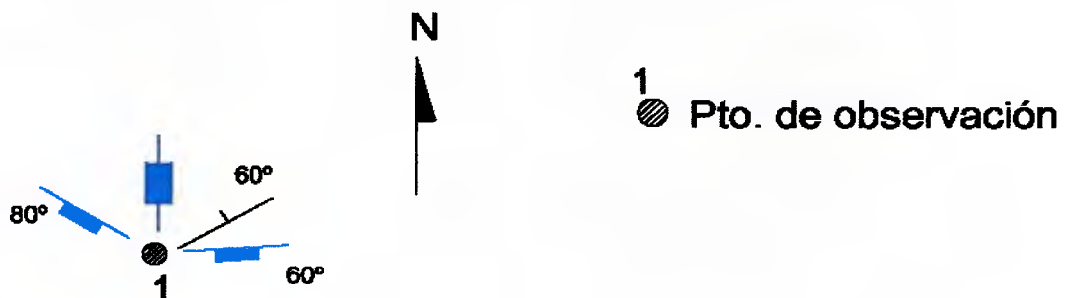


FIGURA N° 2-5

Toda la información en un área determinada constituye una serie de puntos que en general se analizan en conjunto, de forma tal de facilitar su interpretación en problemas de estabilidad o relacionada con geología aplicada. Las representaciones más comunes de la data de planos estructurales son las siguientes:

5.1.1 Diagrama de Roseta

En donde se representa la orientación y frecuencia del rumbo de las estructuras en un semicírculo dividido en dos cuadrantes de 90°, orientado en su parte medio con el Norte (N) y a la derecha e izquierda corresponde respectivamente al Este (E) y Oeste (O). De acuerdo al número de mediciones la altura representa la frecuencia en porcentaje. Véase Figura N° 3-5

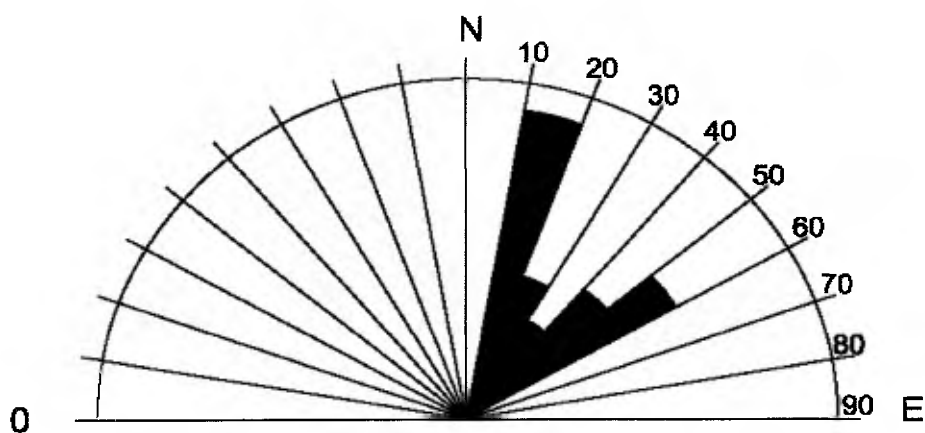


FIGURA N° 3-5

El diagrama de Rosa en conjunto con el diagrama de barra es de gran utilidad en programas de inyecciones de fundaciones, cuya orientación más efectivas se obtiene con las perforaciones orientadas lo más cercano a la perpendicular de la estructura geológica predominante.

5.1.2 Diagrama de Barras

Para cada uno de los rangos predominantes de rumbos en el diagrama de Rosa, se acompaña con una representación en forma de barra de las medidas del buzamiento, diferenciando de acuerdo a la posición del rumbo, hacia el Norte-Sur o Este y Oeste, este último si el rumbo se encuentra cercano a la Norte – Sur. Véase Figura N° 4-5.

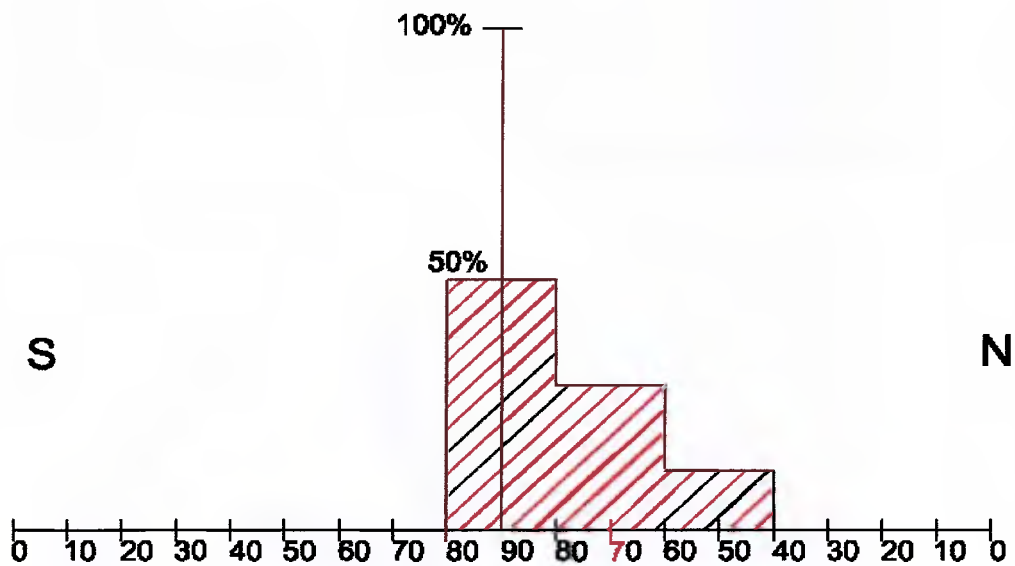


FIGURA N° 4-5

En el diagrama se destaca que un 50% de los datos se encuentran verticales, 30% con buzamiento de 70° Norte y el resto 20% con buzamiento de 50° también Norte.

5.1.3 Representación Estereográfica

La representación estereográfica es utilizada en cristalografía, para obtener la posición de las caras de los cristales minerales en tres dimensiones. Posteriormente su uso ha sido ampliado en la representación de datos de

estructuras geológicas y como herramienta para el análisis de problemas geotécnicos, principalmente relacionados con problemas de estabilidad en macizos rocosos.

La representación se realiza en el hemisferio inferior de una esfera en donde el plano estructural está representado por la perpendicular a dicho plano que pasa por el centro del círculo que limita el hemisferio y su intercepción se proyecta en el plano horizontal denominados polos. Véase Figura N° 5-5

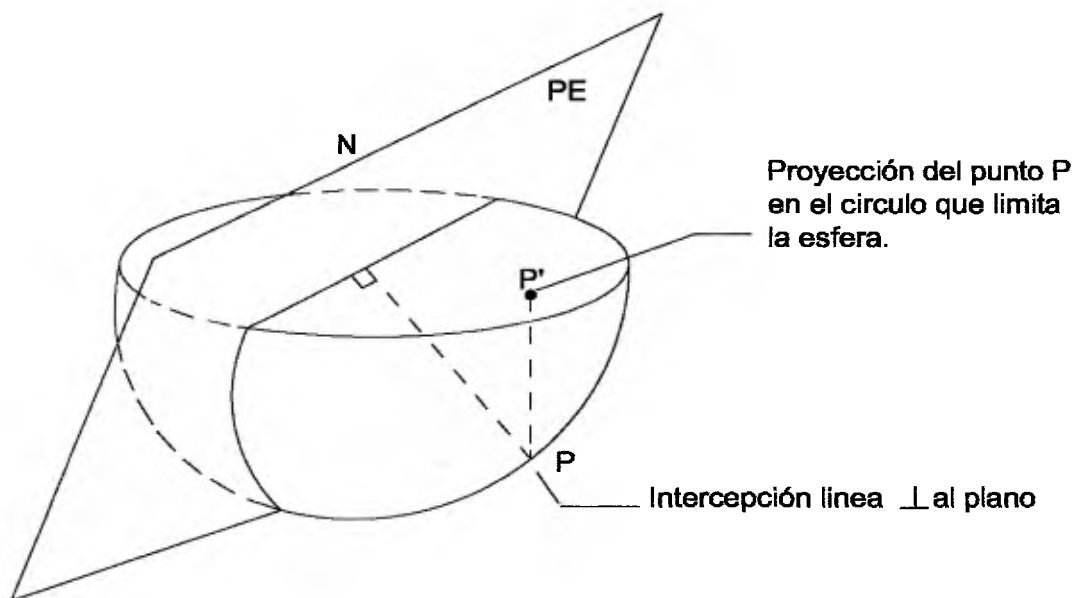


FIGURA N° 5-5

Los datos se representa en un círculo en el cual está delimitado una especie de cuadrícula denominada de Wulff, en donde se encuentra una serie de semicírculos que corresponde a la intercepción de los planos con la esfera y su proyección en el plano horizontal, lo cual permite identificar cualquier plano en estudio de acuerdo a su orientación e inclinación. Los puntos de los polos permiten el análisis de acuerdo

a su concentración en porcentaje, pudiendo definirse a dichas concentraciones los planos más frecuentes. Los polos definen las estructuras más frecuentes que pueden ser representadas en el hemisferio inferior como líneas en forma de semicírculos, cuya orientación debe ser tomada en cuenta en la sollicitación de la masa rocosa. Los semicírculos se pueden interceptar formando cuñas, cuya posición en el espacio permite analizar las condiciones cinemática de estabilidad que dependerá de la posición de un talud de corte o la excavación de un túnel. La representación de los polos y de los planos se muestran en la Figura N°6-5, donde los planos P-1 y P-2 forman una cuña con inclinación a la izquierda del círculo. Para el análisis de estabilidad de taludes, se encuentra el concepto de cono de fricción, representado cuando la fuerza que se opone al deslizamiento está controlada por la fricción entre los planos, cuya estabilidad depende del ángulo de inclinación de la cuña o del plano con respecto a dicho ángulo de fricción.

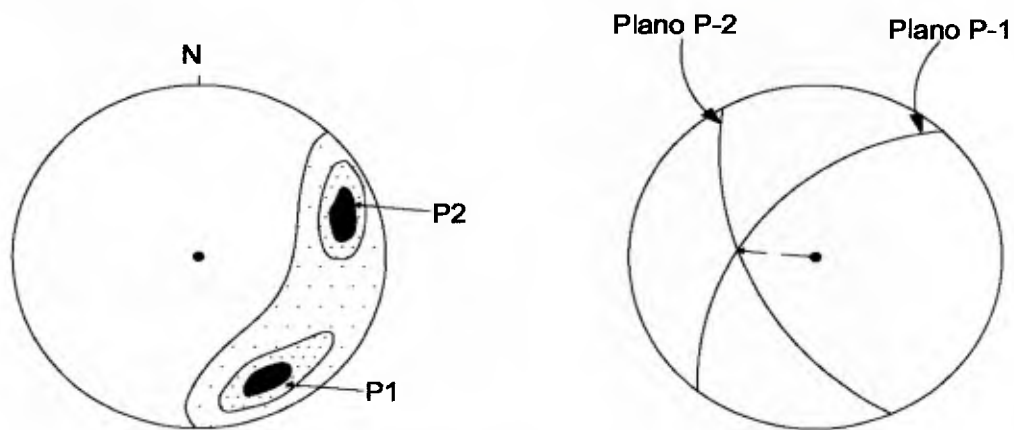
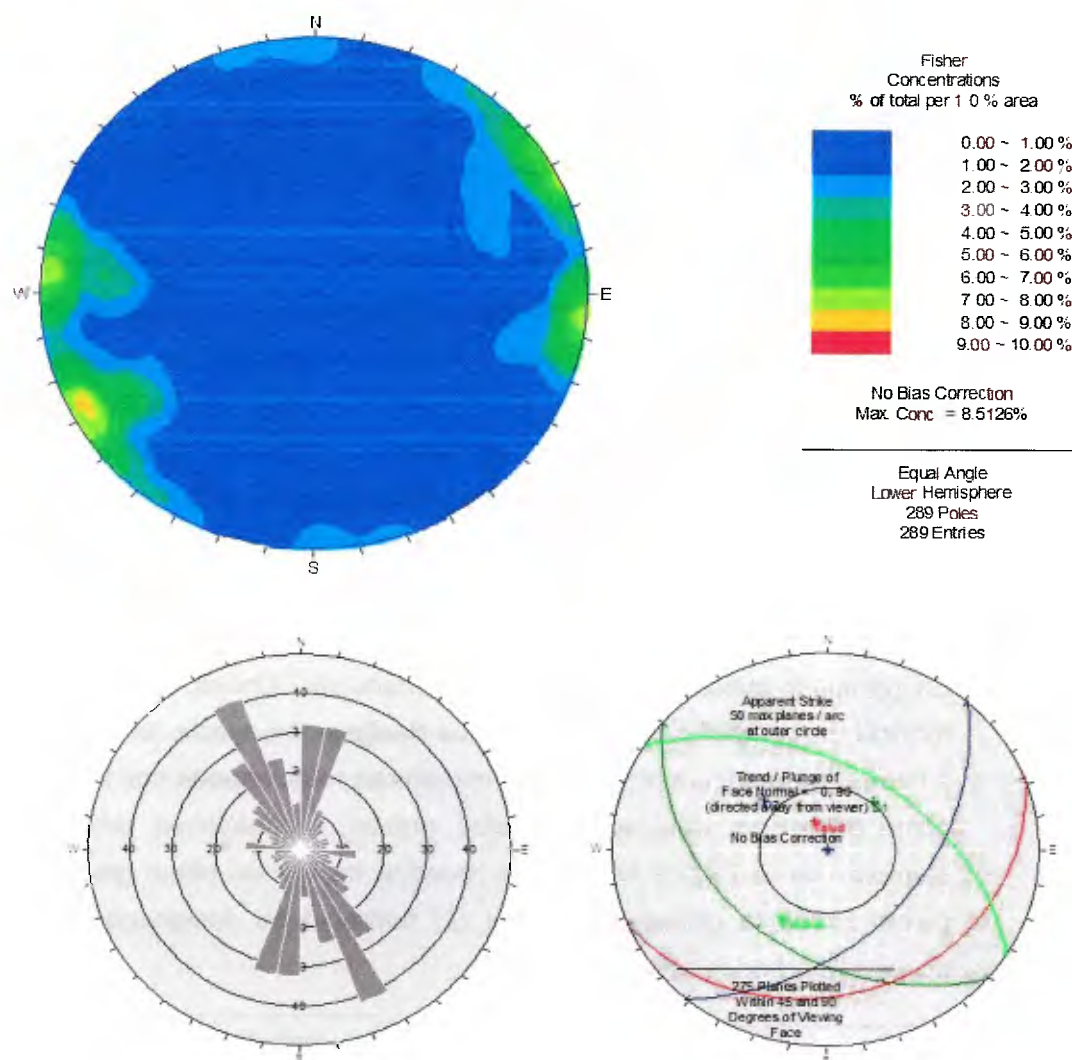


FIGURA N° 6-5

El estudio de estabilidad de taludes mediante proyección estereográfica, tomando en cuenta los distintos planos estructurales ha sido objeto de trabajos de investigación detalladas en el pasado, que en la actualidad se facilitan mediante el uso de programas como el Dips, con la representación de polos, planos, etc, tal como se muestra en la FIGURA N° 7-5.



Resultados a partir del Estudio de Discontinuidades generados por el programa DIPS: Diagrama que muestra la concentración de polos (arriba), un estudio de estabilidad de taludes con dos familias de diaclasas (D1, D2), la foliación y ángulo de fricción de 24° (abajo derecha) y la roseta de planos correspondiente a la imagen superior (abajo izquierda)

FIGURA N°. 7-5

5.2 EL PLANO GEOLOGICO EN GEOLOGIA APLICADA

El plano geológico en Geología Aplicada debe ser representativo de los aspectos que deben tenerse en cuenta en las distintas obras de ingeniería como son problemas de estabilidad, litología particular, condiciones de excavación, etc.

En geología se utiliza el término "Formación" para designar un conjunto de rocas, con condiciones litológicas distintivas y que abarcan un rango de tiempo geológico determinado, ocupando un área medida en Kilómetros cuadrados, indicando las normas internacionales que debe ser cartografiables en planos a escala 1:25.000. En general las formaciones son asignadas por una primera letra mayúscula que indica la edad geológica, seguida por letras minúsculas que abrevian el nombre de la formación, como ejemplo Tlp que corresponde al Terciario y la formación geológica Las Piedras.

En geología aplicada, es común el término de "Unidad Geológica" con un área medida en general en hectáreas y una designación aparte de su litología particular, a la cual se le asocia propiedades mecánicas relacionadas con la obra de ingeniería como carreteras, autopistas, túneles, presas, edificaciones, urbanismo, etc. En el ejemplo de la Figura N° 8-5, se muestra en a) un plano geológico regional de planta indica la presencia de dos (2) formaciones designadas como Tpd y Teb ocupando grandes áreas.

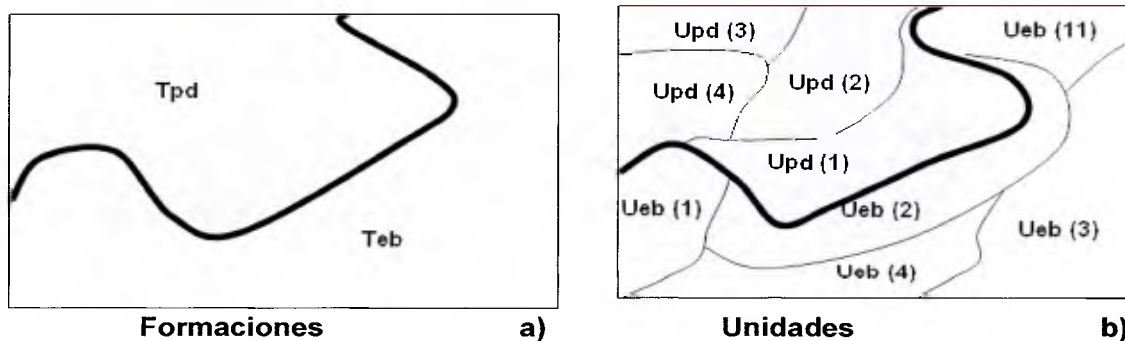


FIGURA N°.8-5

Cada una de las formaciones puede abarcar descripciones como lo siguiente:

Formacion Tpd, que se caracteriza por un predominio de una secuencia litológica X con intervalos de Z y M en proporciones variable. En (b) dicha formación para su aplicación en geología aplicada puede ser dividida en diversas unidades, de la forma siguiente:

Upd (1). Secuencia X, con laderas estables, excavación con explosivos.

Upd (2). Secuencia Z, problemas de estabilidad local, excavación por medios mecánicos.

Upd (3). Secuencia M, relación con problemas de arcillas expansivas, fácil excavación, baja capacidad de soporte.

Upd (4). Secuencia XZ, laderas estables, excavaciones mecánicas.

Similar descripción sucede con la formación Teb, cuya división en unidades geológicas tomaría en cuenta las condiciones requeridas en geología aplicada.

La información del plano de Geología Aplicada debe ser representativa y de utilidad para el Ingeniero Proyectista de una obra determinada, debiendo ser identificadas



las zonas de riesgo con problemas de estabilidad, de manera de evitar o tener en cuenta su cruce. En la lámina a la izquierda los colores oscuros representan problemas de estabilidad. El alineamiento de un túnel siguiendo el rumbo de capas blandas o con las estructuras principales paralelas al eje, puede ser muy

problemático para su excavación y sostenimiento, debiendo ser evaluadas otros alineamientos alternativos. La presencia de calizas en zonas de embalse requiere de un detallado reconocimiento de campo y su delimitación en conjunto de cuevas o problemas de disolución, así mismo la estabilidad de las laderas requiere de atención especial principalmente durante el funcionamiento del embalse.

5.3 TRAZAS DE CAPAS

Una forma de extender la geología de superficie hacia el subsuelo, es con el uso de secuencias de capas en rocas sedimentarias, interpretando mediante procedimiento geométrico la ubicación en planos de planta y continuidad hacia cotas inferiores por medio de líneas rectas paralelas. En general en la naturaleza dicho paralelismo es local, existiendo problemas de lenticularidad, pliegues y variación del buzamiento a profundidad, donde la interpretación requiere del conocimiento adecuado de la geología de superficie, complementada con investigaciones del subsuelo con perforaciones y/o con métodos geofísicos.

El dibujo de las trazas de capas sobre planos topográficos representados por curvas de nivel, es la intercepción de cada una de dichas capas, definidas por dos planos paralelos, con la superficie del terreno. Dicha representación puede ser extendida hacia el sub-suelo, para conocer condiciones de excavaciones hacia el alineamiento de un túnel o cualquier información geológica que requiera ser conocida a profundidad.

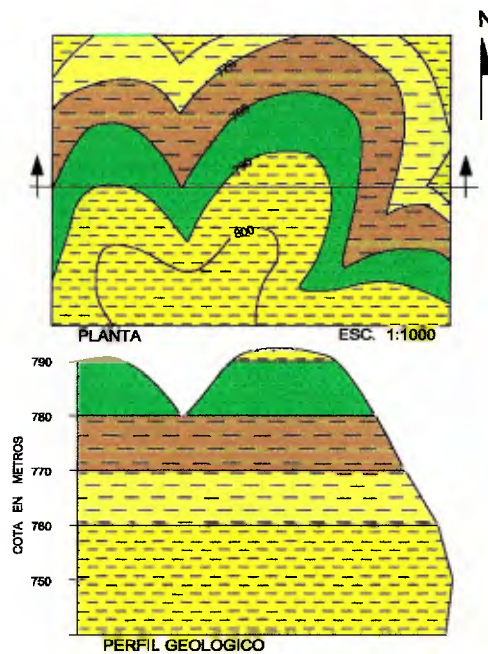
La forma más fácil de familiarizarse con el dibujo de trazas es mediante representación de secuencias sedimentarias constituidas por capas cuyos espesores teóricamente pueden ser mantenidos a profundidad.

Para entender el dibujo de las trazas de las capas en superficie y su interpretación en el subsuelo se muestran a continuación tres ejemplos, que abarcan la posición de las capas: horizontal, vertical e inclinada.






5.3.1 Capas Horizontales

Las capas horizontales constituyen la representación más sencilla sobre planos topográficos con curvas de nivel, destacándose lo siguiente:

- las trazas de las capas horizontales siguen las curvas de nivel
- en cualquier sección o perfil se mantienen horizontal y conservan su espesor.



El tope de una capa horizontal de carbón se encuentra a cota 780 y su espesor es de 10 metros. La columna litológica donde se encuentra el carbón es la siguiente

LUTITAS		+ 50 m.
ARENISCAS		10 m.
CARBON		10 m. 780 m.
LIMOLITAS		10 m.
LUTITAS		+ 50 m.

Dibuje las trazas de las capas y el perfil geológico en la sección indicada.

FIGURA N° 9-5

En la naturaleza las capas horizontales suelen estar asociadas a la presencia de yacimientos sedimentarios con bajos efectos tectónicos, siendo común en secuencias de carbón.

5.3.2 Capas Verticales

Las trazas de las capas verticales cortan las curvas de nivel y su espesor en planta se mide perpendicular al rumbo. En el subsuelo, cualquier intercepción con una capa vertical, se mantiene vertical.

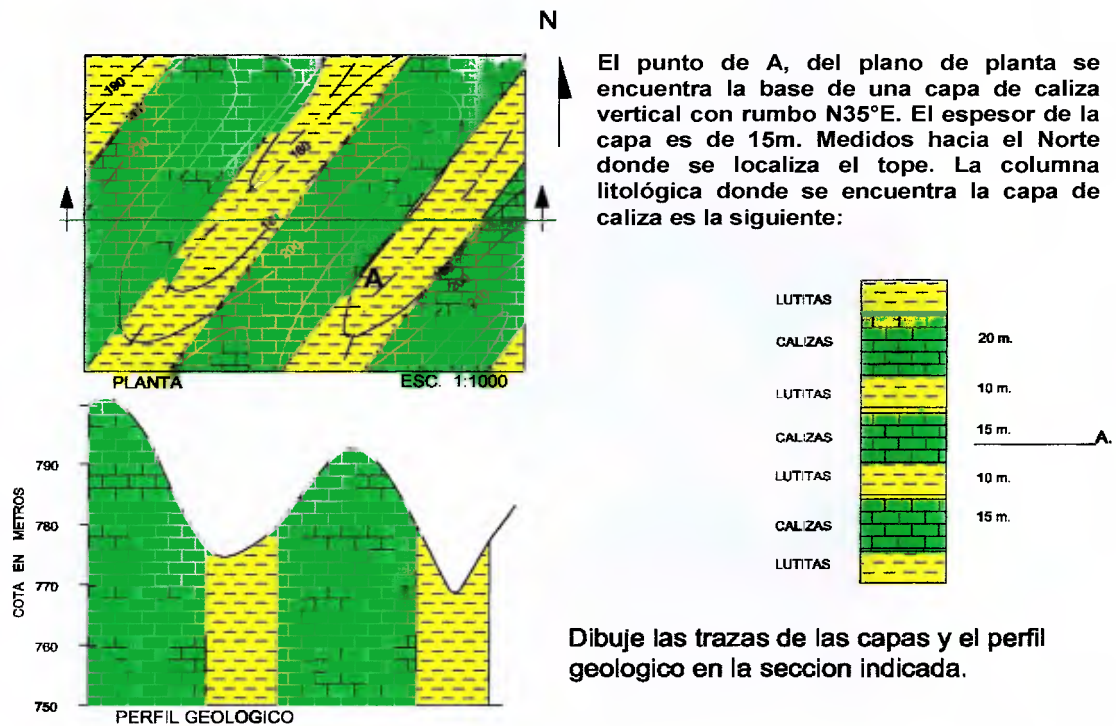
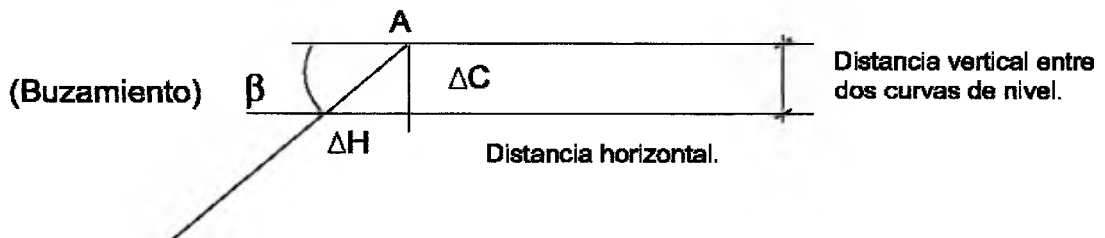


FIGURA N° 10-5

Es importante destacar que en el perfil el ancho de la capa vertical corresponde a su espesor solo cuando la sección se encuentra perpendicular al rumbo de la capa, aumentando su ancho a medida que aumenta la oblicuidad con la línea de sección. Abarca totalmente la capa cuando la sección se encuentra paralela al rumbo. En caso de un túnel donde el alineamiento se encuentre subparalelo a la secuencia de capas verticales, cualquier estrato de baja resistencia representara un largo trayecto del túnel, cuyos problemas se multiplican en comparación con un alineamiento perpendicular al rumbo de las capas.

5.3.3 Capas Inclinadas

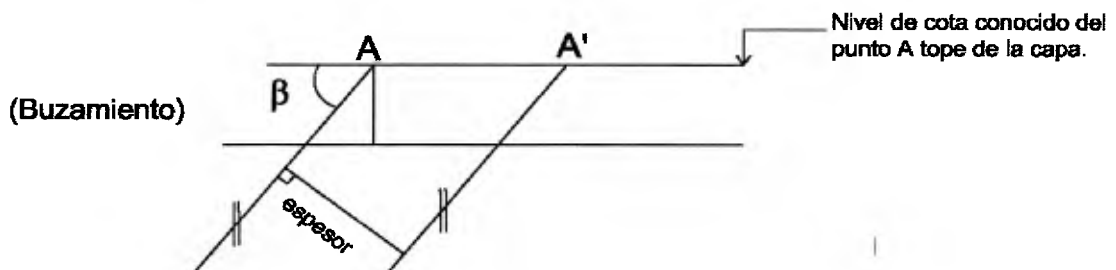
Constituye el caso más común en la naturaleza. La posición de la capa en el espacio está definida por su localización en coordenada, cota, rumbo y buzamiento y su espesor. La posición de los planos que definen la capa, tope y base, en un plano horizontal, se basan en la proyección acotada, donde cada uno de los planos de la capa, está definido por rectas paralelas entre sí de acuerdo al rumbo y separadas a distancia horizontal entre las líneas que definen el plano inclinado. Su cálculo gráfico es el siguiente:



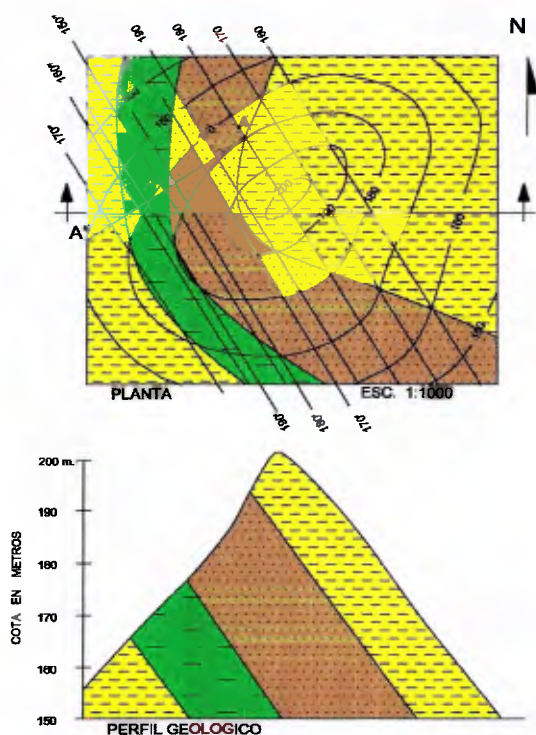
o analíticamente por media de $\text{tag}\beta = \Delta C / \Delta H$ $\Delta H = \Delta C / \text{tag}\beta$

β = buzamiento

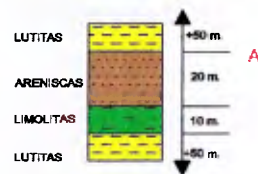
La distancia horizontal a una misma cota entre el tope y base de una capa se calcula gráficamente de la siguiente forma:



Una vez dibujada las rectas que definen tanto el tope como la base de la capa se interceptan con las curvas de nivel de la topografía, uniéndose los puntos de intercepción. A continuación se presenta un problema con una secuencia de capas inclinadas (Figura N° 11-5):



En el punto A se encuentra el tope de una capa de arenisca de 20 m de espesor, con rumbo N30° y $\beta=60^\circ$. Por debajo de la capa de arenisca se encuentra una capa de limolita de 10 m de espesor. Por encima de la arenisca y por debajo de la limolita existen grandes espesores de lutita. La columna estratigrafica es la siguiente:



Dibuje las trazas de las capas y el perfil geológico en la sección indicada.

La escala es 1:1000 o sea que 1 centímetro es igual a 10 metros. Curvas de nivel cada 10 m = ΔC

La distancias AA' se mantiene entre las rectas a igual cota de la base y el tope.

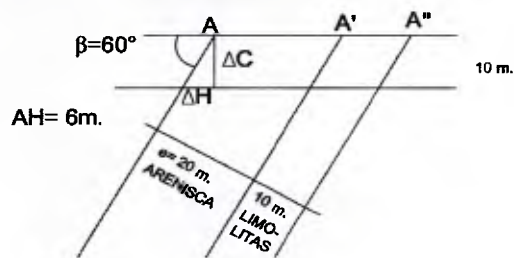


FIGURA N° 11-5

LA METEORIZACIÓN

La superficie terrestre está sometida a un desgaste constante, asociados a los fenómenos de erosión, producto de las condiciones climáticas. En las rocas aflorantes actúa otro fenómeno relacionado con la pérdida de resistencia por reacciones de las rocas con el medio ambiente, asignado como meteorización. El tipo y magnitud de dichas reacciones en conjunto con los fenómenos de erosión y sumado al tiempo geológico, montañas de alta cotas pasaran a formar terrenos de menor cota, con grandes aportes de sedimentos.

6.1 DEFINICIÓN

El termino meteorización en los diccionarios técnicos, está definido como la “desintegración y descomposición de una roca en la superficie terrestre o próxima a ella”...asociado en algunos casos a los fenómenos de erosión y transporte, diferenciando meteorización física o mecánica, la química y la biológica. El término erosión, está mejor definido en los diccionarios técnicos como:

“el desgaste producido en la superficie de un cuerpo por la fricción de otro” y ampliado en términos geológicos “a la degradación del relieve y el transporte y acumulación del material arrancado”.

Como mejor uso en problemas de Geología Aplicada en Venezuela y áreas Tropicales, se plantea restringir el término de **METEORIZACIÓN** al efecto en las rocas, en sitio, debido a cambio químico en los minerales, por reacción con el medio ambiente que lo circunda. Dicho medio está relacionado con la atmósfera y el agua, en donde los radicales de oxígeno (O_2), carbono (C) y hidróxido (OH), disueltos o en soluciones, facilitan las reacciones químicas con los minerales, dando lugar a procesos como: a) Oxidación, reacción con el O_2 b) Hidratación, fijación de moléculas de H_2O en el mineral c) Hidrólisis, desdoblamiento de un mineral o molécula por los radicales OH y H proveniente del H_2O y d) Disolución, disociación de las moléculas debido a un agente disolvente, este último se debe a una reacción

particular, donde las moléculas que componen el mineral son arrastradas y/o sustituidas.

6.2 EFECTOS EN LAS ROCAS

Las rocas están compuestas por minerales y esto a su vez por elementos predominantes hace que en contacto con el medio ambiente una roca dependiendo de su composición puede desarrollar distintas reacciones químicas, principalmente en rocas metamórficas e ígneas de composición muy variable. En un esquisto cuarzo micáceo calcáreo, ocurrirá en primer lugar hidratación del conjunto seguido por la disolución de la calcita y posteriormente oxidación de la mica. En una roca granítica cuarzo feldespática micácea, el feldespato será sometido a fenómeno de hidrolisis generando suelos arcillosos blanquecinos, que dependiendo del tipo de mica, podrá generarse óxidos.

Para el caso de rocas sedimentarias clásticas cuya litología depende del tamaño de grano del sedimento y del tipo de cementación, en el caso de conglomerados y areniscas, la cementación puede reaccionar primero con el medio ambiente. En las limolitas y lutitas de textura fina, el fenómeno de meteorización actúa en forma uniforme, generalmente sometiendo las rocas a un proceso de hidratación.

En las calizas el proceso de meteorización tiene un efecto de disolución, donde las moléculas de CaCO_3 son solubles en agua con bióxido de carbono (CO_2), arrastrándolas en solución y dejando espacios vacíos. Las rocas no se conservan en sitio y los minerales son arrastrados, quedando oquedades, las cuales aumentan de dimensiones con el tiempo. El mejor término aplicado a dicho fenómeno debe ser **Disolución**, tal como indica la reacción química.

En término de Meteorización puede ser definido como el proceso activo de alteración química en los minerales que forman las rocas, el cual genera un cambio en las propiedades mecánicas, principalmente relacionado con la transformación de minerales de menor peso unitario con desarrollo de una estructura molecular de

menor densidad relacionado con un aumento de volumen, así como pérdida de cohesión entre los minerales. Lo anterior origina una disminución de resistencia proporcional al porcentaje de alteración de los minerales, así como aumento en la permeabilidad.

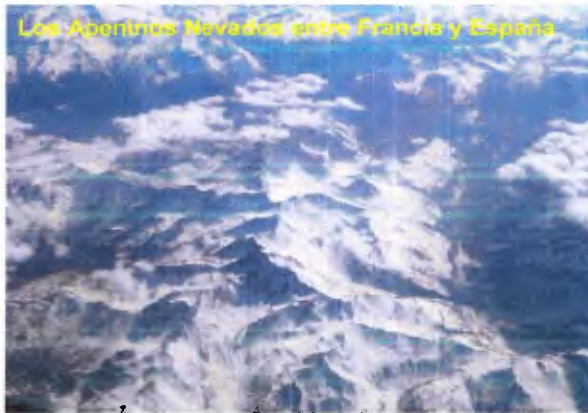
6.3 LA METEORIZACIÓN EN EL PLANETA TIERRA

Las condiciones climáticas a nivel mundial están relacionadas con la ubicación respecto al Ecuador, círculo de mayor radio que divide el planeta en dos partes iguales, donde el movimiento de traslación alrededor del sol y la incidencia de los rayos calóricos, diferencian épocas climáticas conocida como: invierno, otoño, primavera y verano, cuya duración y efectos depende de su localización en el planeta. En la zona Tropical, cercanas al Ecuador se tienen solo dos épocas claramente diferenciadas, invierno (lluvias) y verano (sequia) y pasando hacia los hemisferios Norte y Sur: Europa, Norte y Sur de América, Rusia, China, etc, donde se diferencian las cuatro épocas climáticas, donde el invierno está relacionado con periodo de nieve. Hacia los polos las condiciones climáticas que predominan son de hielo permanente.



Todo lo anterior tiene un efecto muy variado sobre la superficie terrestre, donde el desarrollo del perfil de meteorización tiende a ser mayor hacia el trópico, con espesores importante de minerales alterados, que

pueden alcanzar decenas de metros y hasta más de una centena, tal como se evidencian en las minas de bauxitas.



asociado a un efecto de desintegración de la superficie del terreno.

Hacia las áreas con largos periodos de nieve, el agua entra en los espacios vacíos tanto en suelo como rocas, donde su congelación, produce un efecto mecánico de expansión, de mayor importancia que las alteraciones químicas de los minerales. En dichas condiciones el término de meteorización debe ser

6.4 EROSIÓN

La erosión es un proceso mecánico de desgaste en la corteza terrestre, donde los factores climatológicos como viento, agua y temperatura, actúan como elementos independientes o combinados en dicho proceso abrasivo, con aportes de sedimentos hacia cotas inferiores. El pasar un papel de lija sobre una superficie de madera, origina un desgaste, que es semejante al efecto de la lluvia sobre una superficie de un terreno sin vegetación, donde los granos de suelo, son desprendidos y arrastrados por el agua. Efecto similar lo constituye el viento, el cual dependiendo de su velocidad suspende granos de arena que actúan en forma abrasiva por el impacto sobre superficies rocosas, similar al proceso de "Sand Blasting" que permite remover superficies deterioradas. En forma similar actúan las corrientes de agua con arena y grava en suspensión, cuyo impacto sucesivo y proporcional a la velocidad actúan como elementos abrasivos.

El hielo, resultado de agua congelada, actúa como elementos expansivos en grietas o fracturas presentes en las rocas, así como en las estructuras porosas de suelos.

Dicho efecto disloca la estructura de las rocas y suelo, facilitando el proceso de arrastre de materiales por el hielo, una vez que cambian las condiciones climáticas.

El cambio de temperatura en la superficie de las rocas origina efectos de dilatación que con el tiempo y causa micro- fracturas que facilitan los procesos erosivos.

6.5 RELACIÓN METEORIZACIÓN –EROSIÓN

El proceso de meteorización constituye cambios químicos de los minerales de las rocas en sitio, lo que lo diferencia del proceso de erosión que es un efecto mecánico de desgaste de la corteza terrestre, asociado al transporte. Dicho efecto de erosión se facilita por el proceso de meteorización que debilita la resistencia de las rocas, donde los agentes atmosféricos actúan fácilmente.

Con el tiempo geológico una zona montañosa cubierta por vegetación que está parcialmente protegida contra los procesos de erosión, la meteorización actuara lentamente profundizándose, debilitando la resistencia del macizo rocoso, haciendo que dicha montaña sea más susceptible en el tiempo a cualquier problema de estabilidad.

En la **Figura N° 1-6** se muestra en un relieve montañoso un ciclo del efecto de la meteorización con el tiempo geológico donde se incrementa los espesores de las distintas zonas, cuya resistencia al corte hacia la zona superficial disminuye con el tiempo, alcanzando un valor menor que el ángulo de la pendiente del terreno, en donde cualquier efecto de saturación y/o sismo, podría desencadenar problemas de estabilidad que facilitan los problemas de erosión, hasta alcanzar un nivel de roca



resistente. Dicho fenómeno está representado en el deslave de Vargas (1999) en Venezuela y recientemente en la misma zona en la ladera Sur del sector Macuto, tal como se observa en la fotografía, se encuentra en proceso un amplio deslizamiento, destacando la ladera cubierta por una densa vegetación.

La deforestación permite que las condiciones climáticas actúen directamente sobre la superficie del terreno, donde se concentran los efectos de dichas condiciones, facilitando los procesos de erosión e inestabilidad. La concentración de la escorrentía sobre terrenos deforestados posee mayor poder erosivo que sobre áreas cubiertas por vegetación y en consecuencia implicara mayor aporte de sedimentos.

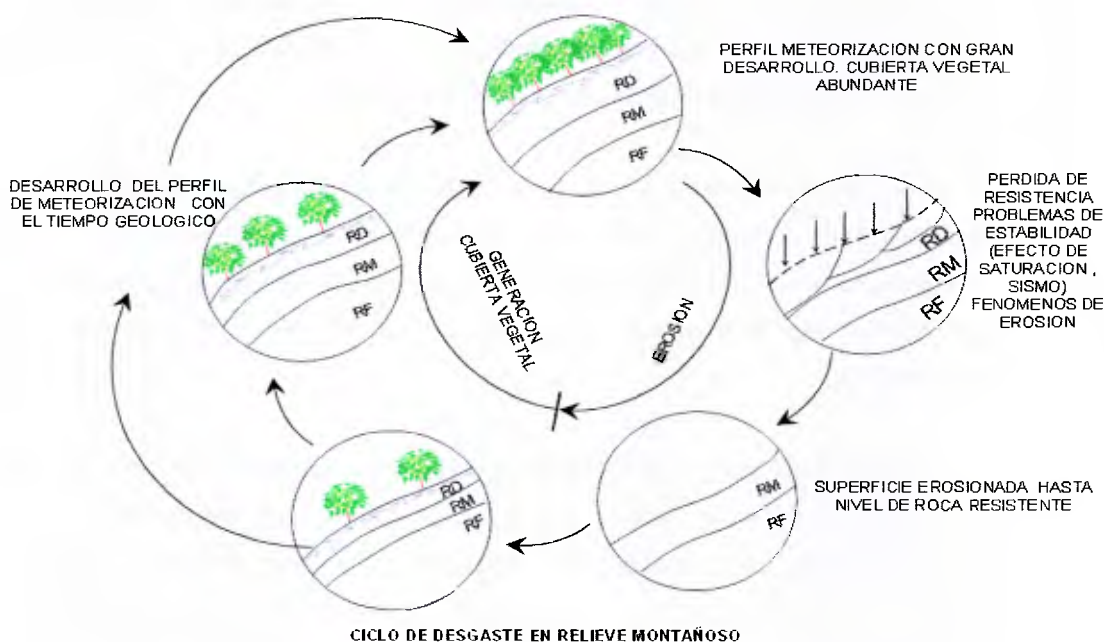


FIGURA N° 1-6

El equilibrio en estabilidad de un área, puede estar afectado por cambios bruscos o anómalos en las condiciones climáticas. Por el efecto del tiempo geológico la meteorización cambia las condiciones de resistencia de las rocas, alcanzando el límite del equilibrio interrumpido por cualquier evento de menor importancia.

6.6 PROCESOS DE EROSIÓN EN ROCAS

Tal como ha sido descrito, los procesos de erosión en las rocas dependen de las condiciones climáticas siendo muy distinto en zonas montañosas donde predominan las nieves que en las zonas selváticas tropicales. En el primero controlado por hielo,

donde los efectos mecánicos predominan debido al congelamiento del agua y el arrastre por movimiento de masas de nieve. En la zona tropical los efectos de meteorización son más acentuados, debilitando con el tiempo la superficie del terreno, con problemas de estabilidad asociado a altas precipitaciones, originando los llamados deslaves y la formación a cotas inferiores de amplios depósitos coluviales.

Llama la atención en los depósitos coluviales, cuyos materiales proceden de las laderas a cotas superiores, en general por efectos de deslaves, la presencia de grandes bloques de roca de aristas angulosas, asociadas a sistemas de fracturas o planos de estratificación y/o foliación.

En la investigación de A. Muguerza (2008) sobre los deslaves en el Edo. Vargas, Venezuela, destaca la presencia de grandes bloques de roca angulosos, procedentes aguas arriba de sectores de valle angosto, teniendo su origen en la profundización del cauce y problemas de estabilidad en las laderas rocosas. Concluye que la velocidad de erosión vertical en sectores de afloramientos de roca, está muy relacionada con las estructuras geológicas.



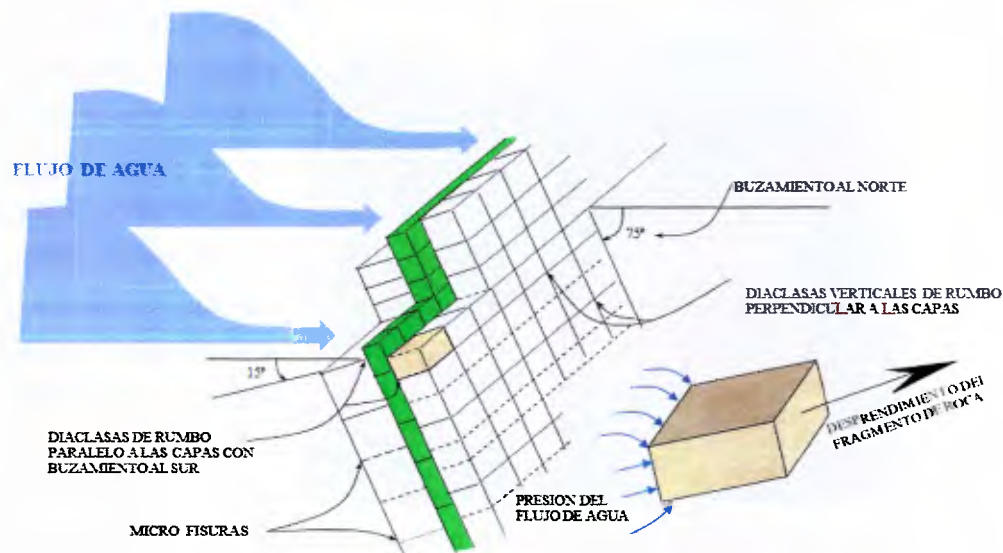
Para la misma fecha del evento de Varga, a unos 100 kilómetros hacia el Este, ocurrió la falla del aliviadero de la presa El Guapo, construida unos 20 años antes, donde parte de la fundación está controlado por macizo rocoso de capas estratificadas de arenisca y lutitas silíceas, el cual descendió unos 10 metros durante el evento, bajo la acción de un caudal de más de 2000

m³/s, tal como se observa en la foto al día siguiente del evento. La fundación en el sector del aliviadero se encuentra constituida por una secuencia de capas casi verticales, de areniscas con espesores de 10 cm a 1,00 metro, e intercalaciones de capas de lutitas en general silíceas, formando un conjunto masivo, cuyo rumbo de la estratificación se encuentra paralelo al eje de presa, con buzamiento de 75° aguas



abajo. Se destacan un sistema de diaclasas verticales perpendicular al rumbo de las capas y otro sistema que solo se observa hacia la superficie, también de rumbo paralelo a las capas pero con buzamiento no mayor de 15° al Sur, aguas arriba donde el plano de fractura se observa brillante. En la foto se destaca la secuencia de capas de color negro, sin meteorización, con diaclasas perpendiculares a las capas, verticales que controlan el cauce del río. El proceso

de la rápida erosión ocurrida en el sector se muestra en la Figura N°2-6 donde la estructura geológica delimita bloques de roca los cuales son sometido al empuje hidrostático, con un efecto de desprendimiento desde aguas abajo hacia aguas arriba, profundizando la cavidad y ampliándola lateralmente.



EFFECTO DEL FLUJO DE AGUA DURANTE EL PROCESO DE EROSION EN LAS CAPAS DE LUTITAS Y ARENISCAS EN EL ALIVIADERO DE LA PRESA DE EL GUAPO

FIGURA N°2-6

6.7 ZONAS DE METEORIZACIÓN

Es bien conocido el proceso químico de alteración en el acero, que conjuntamente con el concreto forman los elementos principales en la construcción de obras. El acero estructural se altera a una velocidad fácilmente identificada en periodos muy cortos de tiempo, en general relacionada con las cercanías al mar, donde el ambiente salino atmosférico produce una reacción rápida con el hierro, mineral que lo compone. Dicho mineral se transforma a óxido de hierro hidratado, pudiendo diferenciarse un efecto muy acentuado en la superficie que va disminuyendo a profundidad con distintos grados de oxidación. El concreto es un compuesto, constituido por el cemento o material cementante y los agregados que provienen de rocas duras. La reacción química en la superficie del concreto es muy lenta, y su apreciación puede requerir decenas de años o siglos, produciéndose una lenta hidratación desde la superficie. Si pudiéramos observar este efecto después de 1000 años en una masa de concreto, se presentaría una superficie muy hidratada que ha afectado en parte el agregado pétreo, constituyendo un delgado espesor de un suelo arcilloso calcáreo con presencia de grava, pasando a una zona en donde la matriz de cemento se encuentra parcialmente hidratada y con menor alteración del agregado. A profundidad el efecto es menos acentuado, diferenciándose una serie de zonas de alteración de distintas resistencias. Ejemplo de lo anterior lo tenemos en monumentos históricos y edificaciones antiguas.

Los efectos anteriores, se producen en todas las rocas conocidas. Dicho efecto es muy acentuado en superficie, disminuyendo a profundidad, cuyo desarrollo dependerá de las condiciones atmosféricas, que se encuentran relacionadas principalmente con la altura sobre el nivel del mar y la ubicación según los paralelos de la tierra. Un ambiente húmedo selvático a 300 a 600 m.s.n.m., en el trópico, tendrá un efecto de alteración en las rocas, mucho mayor que a la misma cota en otras latitudes..

El proceso químico de alteración de minerales es muy acentuado en la superficie de la corteza terrestre y disminuye a profundidad, lo cual permite delimitar las zonas de meteorización de acuerdo al porcentaje de minerales alterados. Dichas zonas son las siguientes:

Suelo residual (Sr). Los minerales se encuentran 100% alterados, presentando deformaciones y amasado del grano, sin evidencia de la estructura original de la roca.

Roca descompuesta (RD). Se conserva la estructura original de la roca, estando un alto porcentaje mayor al 60% de minerales alterado. Presenta colores marrones.

Roca meteorizada (RM). La alteración de minerales puede variar entre 10 y 40%, presentando poco brillo, opaco.

Roca fresca (RF). La alteración es menor al 10%, la superficie de rupturas presenta brillo a la luz.

En forma gráfica un perfil de meteorización se muestra en la **Figura N° 3-6**

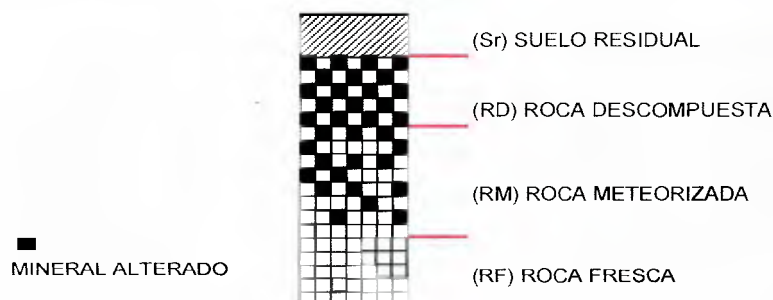


FIGURA N° 3-6

Debido a la variación vertical de la alteración mineral, los límites son transicionales por lo cual, dependiendo del espesor de dicha transición, puede usarse terminología combinada como roca descompuesta a meteorizada (RD-M) ó roca meteorizada a fresca (RM-F).

6.7.1 Efecto en la Resistencia de la roca

La resistencia en la roca está directamente relacionada con la meteorización, pudiendo asimilarse al caso más común de oxidación en una cabilla de acero. En la **Figura N° 4-6** se muestra una cabilla de acero, oxidada, de cuyo perfil podemos obtener la siguiente relación de resistencia.



FIGURA N° 4-6

Similar variación se obtiene en una roca granítica de La Guayana Venezolana, donde se encuentra implantada la presa Hidroeléctrica de concreto gravedad Raúl Leoni, con una altura de 162 metros. El perfil de meteorización típico en estas rocas graníticas en forma gráfica sería el que se muestra en la **Figura N° 5-6** en donde se indica la relación de resistencia y propiedades mecánicas.

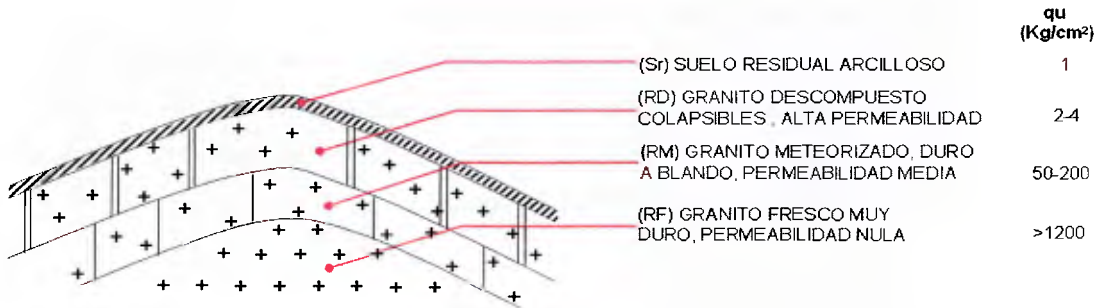


FIGURA N° 5-6

Tanto en la cabilla de acero como en las rocas graníticas, las propiedades mecánicas dependen del grado de alteración de los minerales, lo cual debe tenerse en cuenta en la clasificación de la roca, con la terminología de descompuesta, meteorizada y fresca.

6.8 PERFIL DE METEORIZACIÓN

En un perfil topográfico el espesor de meteorización presenta mayor desarrollo en los topes de colina y menor desarrollo hacia las laderas. En el cauce de quebradas y ríos, la zona de suelo residual y roca descompuesta no existe, debido al proceso erosivo del agua, que lava lentamente las materias de baja resistencia. En general un perfil de meteorización típico sería el que se muestra en la siguiente **Figura N° 6-6**:

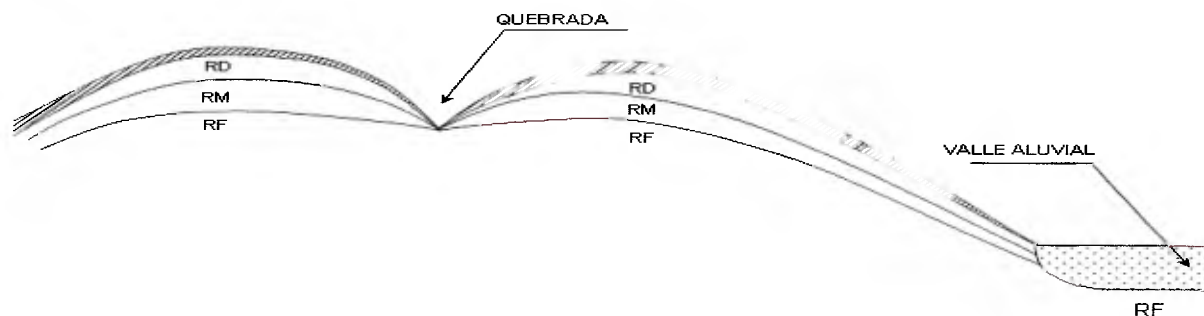


FIGURA N° 6-6

En general puede existir un equilibrio entre el proceso de erosión y el avance de la meteorización con el tiempo geológico, manteniendo los espesores de alteración estables.

En condiciones geológicas similares y bajo las mismas condiciones climáticas, se mantienen en general los espesores del perfil de meteorización. Cualquier anomalía en el perfil puede estar relacionada con cambios litológicos o fenómenos estructurales como fallas geológicas o mayor fracturamiento. Ejemplo de lo anterior lo tenemos en la **Figura N° 7-6**, donde se muestra un embudo de roca descompuesta, producto de su facilidad de alteración ante cambios litológicos o estructurales, dicha condición fue común encontrarla en sectores del área de la presa Raúl Leoni, donde existen depresiones en la roca descompuesta que alcanzaron en algunos casos más de 100 m de profundidad, debido a la presencia de capas de cuarcitas ferruginosas entre los gneises graníticos. Dichas capas presentan un alto fracturamiento asociado a su composición ferruginosa, donde se facilita los procesos de oxidación.

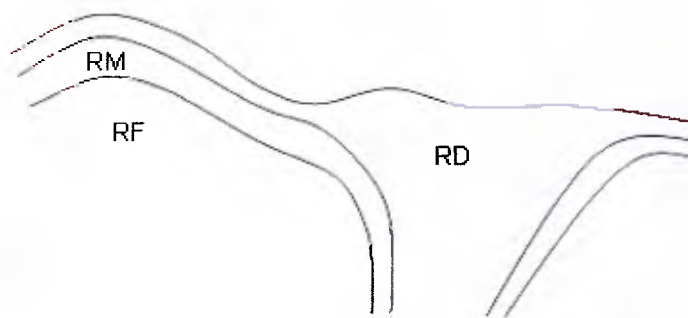


FIGURA N° 7-6

La variación del perfil de meteorización, bajo unas mismas condiciones climáticas, está relacionada con el tipo y dureza de la roca, tal como se muestra en la **Figura N° 8-6:**

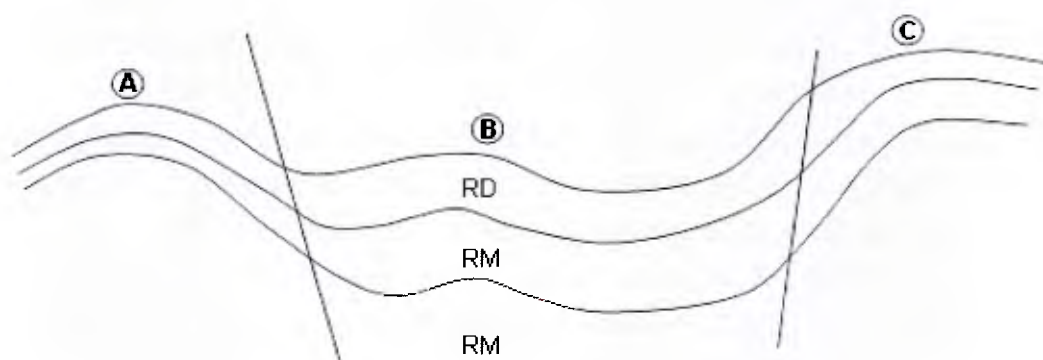


FIGURA N° 8-6

El sector A presenta poco desarrollo del perfil de meteorización, seguido por el C y el B, donde los espesores alcanzan mayor profundidad. De lo anterior se puede concluir que la roca debe ser de mejor calidad geotécnica en A, seguido de C y de menor resistencia la sectorizada en B.

6.9 METEORIZACIÓN EN DIACLASAS

Las diaclasas son bien conocidas en su definición como fracturas sin movimientos, donde los efectos de relevación de esfuerzos, ya sean tectónicos o por proceso de erosión o meteorización, producen un cambio en las tensiones del macizo rocoso, siendo su frecuencia y la persistencia de los planos mayor hacia la superficie del terreno. En profundidad las diaclasas, están confinadas, y los efectos atmosféricos en el macizo rocoso están limitados a la presencia de niveles de saturación. En general por debajo del límite inferior de la zona de roca meteorizada dentro de la roca fresca los efectos de meteorización a profundidad se limitan a los planos de diaclasas, en los cuales puede haber óxidos o manchas de alteración de minerales, en general relacionado con variación en el nivel de agua subterránea. Dichos efectos de alteración en los planos de diaclasas, en los gneises granítico del área de Guayana Venezolana, no alcanza profundidades mayores a los 20 m en la zona de roca fresca y en los esquistos del área de Caracas presentan profundidades no mayores a los 30 metros en la zona de roca fresca, donde no hay alteración en las diaclasas.

En general las condiciones de alteración de los planos de diaclasas, disminuye rápidamente con la profundidad, pudiendo considerarse que en la roca fresca, no existen fenómenos de alteración. Cualquier obra subterránea excavada en roca fresca a una profundidad igual o mayor al espesor de meteorización, en general no presentan alteración en los planos de diaclasas. Hacia la superficie los planos de diaclasas están afectados por un proceso de meteorización más acentuada,

pudiendo destacarse rellenos de carácter arcilloso y/o limoso cuya resistencia depende del grado de humedad.

En zonas donde el macizo rocoso fue sometido a los efectos de grandes sobrecargas como en el caso de glaciales que cubrieron las zonas Nortes del Continente Americano y Europeo, superior a los 2000 metros, el proceso de erosión del hielo glacial contra las rocas eliminaron todo el perfil de meteorización. Posteriormente por un efecto de relevación de esfuerzos en el macizo han generado diaclasas abiertas y con efectos de meteorización a más de 100 metros.

6.10 COMENTARIOS

El termino meteorización en macizos rocosos en zona Tropical, incluyendo Venezuela, queda mejor orientada a los problemas de Geología Aplicada, como el fenómeno en sitio debido a cambios químicos en los minerales que forma la roca, en donde los efectos se encuentran muy acentuados hacia la superficie, disminuyendo a profundidad. Lo anterior, de acuerdo al porcentaje de minerales alterados, genera un perfil de meteorización, conocido en forma mundial y de uso común en clasificación geotécnica como: descompuesto (RD), meteorizado (RM) y fresco (RF). Dicho perfil tiene mejor desarrollo hacia la zona tropical por debajo de los 1000 m.s.n.m., y en general posee espesor del orden de los 30 metros. Dentro de la roca fresca, pueden encontrarse efectos de meteorización en los planos de diaclasas que van disminuyendo con la profundidad.

En general en la clasificación de los macizos rocosos, el valor de meteorización adquiere una gran importancia en obras superficiales, relacionada principalmente con excavación a cielo abierto, en donde la resistencia al corte del macizo aumenta con la profundidad, debido a menor efecto de meteorización. En las diaclasas, el efecto de la alteración del plano de fractura también disminuye con la profundidad y en general no se presenta ninguna alteración a partir de 60 m de profundidad desde la superficie.

El termino de **Meteorización** puede ser ampliamente debatido por profesionales de distintas partes del planeta dependiendo de la experiencia local de cada quien. Lo importante es su uso adecuado a los problemas de Geología Aplicada relacionado con las obras en proyecto, principalmente con cambios en las propiedades mecánicas del macizo rocoso.

Si comparamos los paisajes de las fotos presentes al comienzo del capítulo, selva tropical y relieve montañoso de Los Apeninos, es evidente que los procesos de alteración química se encuentran muy acentuados en la selva, pero los procesos de erosión son muy lentos debido a la protección por la cubierta vegetal. En cambio en Los Apeninos el proceso más importante es la desintegración mecánica debido al efecto del hielo, donde los procesos de erosión se facilitan, con grandes aportes de sedimentos en forma torrencial y de avalanchas.



Selva tropical.



Relieve montañoso nevado

DIACLASAS, SU ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS

La influencia de los sistemas de diaclasas en el análisis del macizo rocoso es considerada por distintos profesionales como un valor constante cuyas medidas en la superficie son mantenidas con la profundidad, elaborando diseño muy conservador, que no toman en cuenta sus variaciones de acuerdo al estado de tensiones, la disminución del desarrollo y frecuencia con el confinamiento aumenta la resistencia del macizo, representado una economía importante en el diseño.

7.1 INTRODUCCIÓN

La definición de diaclasas presentada en el Capítulo N°4 Estructuras Geológicas, es la siguiente: “son fracturas sin movimiento en las rocas”, las cuales dentro de la aplicación geotécnica son consideradas como un parámetro primordial en la valoración de la resistencia de una masa rocosa, donde es importante destacar que las observaciones en afloramientos y excavaciones son representativos de un estado de esfuerzos.



Gneises fracturados. Puerto Cabello. Venezuela

En la foto de cualquier excavación se puede observar una serie de fracturas que tiende a orientarse en patrones, los cuales tienen una orientación en el espacio y cuya continuidad está limitada a un estado de tensión del macizo rocoso.

Existen numerosos ejemplos a la vista, como es el caso de la ciudad de Sirmione al Norte de Italia, limitada por el gran lago de Garda, de origen glaciar, donde parte de la ciudad se prolonga por una península hacia dicho lago, terminando en una antigua fortaleza romana. Las fotos turísticas del sector permiten observar el macizo rocoso que sustenta el relieve prominente, en cuyo perímetro hacia el lago destacan los distintos patrones de diaclasas, con gran desarrollo hacia el borde de la plataforma rocosa la cual se hunde rápidamente.

Las diaclasas presentan patrones en general ortogonales, con longitudes que alcanzan varias decenas de metros en el borde de la plataforma, disminuyendo cuando se aleja de dicho borde.



En las perforaciones exploratorias que se realizan en la investigación de un sitio de presa, el número de diaclasas y su abertura en los núcleos de roca tienden a disminuir con la profundidad, lo cual está relacionado con la disminución de la

permeabilidad, garantía de la estanquidad de cualquier obra de embalse.



El efecto de meteorización en un macizo rocoso que en la presente publicación se relaciona principalmente con la reacción química que ocurre en los minerales que forman las rocas cambiando sus propiedades mecánicas de resistencia y densidad, también tienen relación con las diaclasas, donde dichos fenómenos originan cambios en las propiedades mecánicas del macizo rocoso. Cuando el grado de meteorización es alto, la resistencia del macizo es muy baja, destacándose en general la presencia de gran densidad de diaclasas, con planos oxidados, pudiendo estar abiertas, rellenas de partículas de arcillas, en general con alta permeabilidad. A medida que los efectos de meteorización disminuyen el desarrollo de planos de diaclasas es menor, el macizo se clasifica como de alta resistencia y de baja permeabilidad.

Las diaclasas en estudios geotécnicos se asocian a una serie de términos como **persistencia, frecuencia, abertura, rugosidad y relleno**, cuyo uso aplicado en obras civiles requiere de un conocimiento adecuado de su origen o formación. Cada uno de los términos anteriores está relacionado en general con su formación, lo cual facilita el entendimiento de las propiedades mecánicas, que debe tenerse en cuenta, para su aplicación en obras de ingeniería. Es importante aclarar que en mecánica de roca es común el término de **persistencia** que se describe como la extensión longitudinal de una discontinuidad. Dicha extensión define una superficie que corresponde a un plano, cuyo "**desarrollo**" depende del estado de tensión en el macizo rocoso.

Bajo unas condiciones iniciales de esfuerzo, un macizo rocoso de acuerdo al tipo de roca debe desarrollar una serie de fisuras y microfisuras, las cuales debido a efectos posteriores, tectónicos y/o cambio en la carga geostática, podrán desarrollar a partir de dichas fisuras planos de mayor extensión, así como abertura en dichos planos debido a tensión por efectos de los esfuerzos. Los cambios en las condiciones de dichos esfuerzos pueden deberse a nuevos efectos tectónicos o por relevación de carga sobre el macizo debido a excavaciones o efectos naturales de erosión y/o meteorización.

La formación de microfisuras en un macizo rocoso confinado podra tener su origen en el efecto de aplicación de esfuerzos por largos periodos de tiempo, los cuales se disipan debido a cambios en las propiedades elastoplástica de las rocas por la presencia de dichas microfisuras.

A profundidad, fuera de los efectos de meteorización, las diaclasas se pueden desarrollar debido a los fenómenos de erosión con el tiempo geológico donde grandes espesores de la corteza terrestre han sido removidos, ya sean decenas, centenas o miles de metros, por la relevación de esfuerzos. Véase **Figura N° 1-7**.

A grandes profundidades los efectos tectónicos, con cambios en la magnitud y dirección de esfuerzos, originan ajustes en las tensiones del macizo, pudiendo desarrollar diaclasas abiertas, que en general suelen mineralizarse con el tiempo.

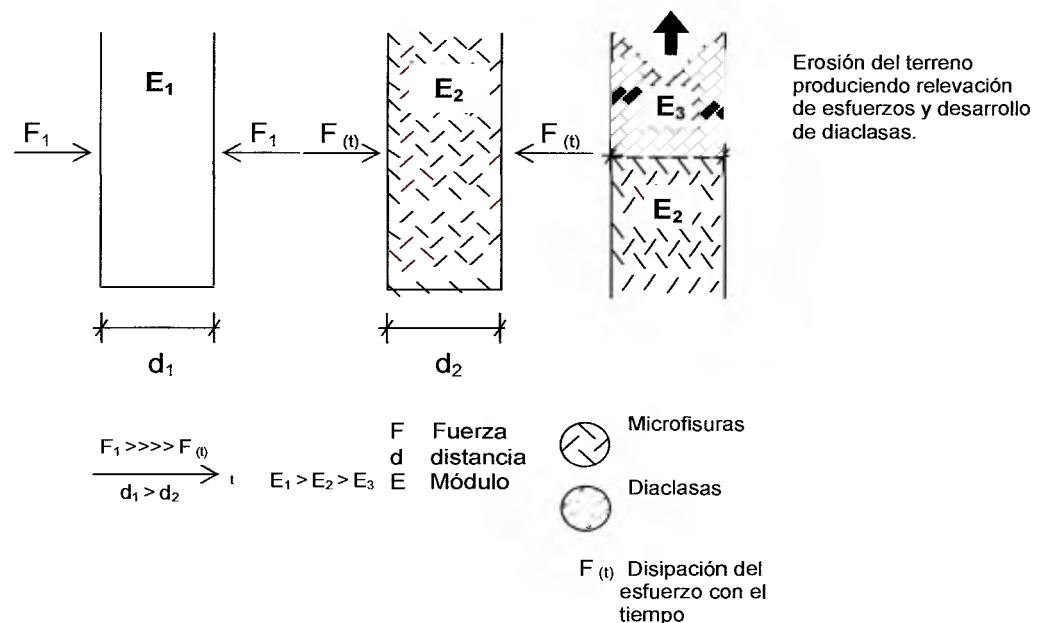


FIGURA N°1-7

7.2 PERSISTENCIA (DESARROLLO DE LAS DIACLASAS)

El término persistencia se relaciona con el área del plano de diaclasas, siendo evidente que tendrán mayor desarrollo en rocas uniformes como el granito (roca

ígneas), calizas (roca sedimentaria) y en capas gruesas. Estarán limitadas en extensión en rocas estratificadas y foliadas (respectivamente rocas sedimentarias y metamórficas).

Las rocas sedimentarias están constituidas por capas de distintas durezas, siendo común indicar como ejemplo la secuencia estratificada de capas de areniscas con lutitas, donde las primeras poseen alta resistencia comparada con las lutitas de baja resistencia y alta deformación. La aplicación de esfuerzos en un macizo de rocas sedimentarias (areniscas y lutitas) ya sea por efecto tectónico o carga vertical, origina fisuración en las capas duras de areniscas, en cambio en las lutitas ocurrirá una deformación plástica. Con el tiempo cualquier variación de las condiciones de esfuerzo en el macizo, desarrollarán las diaclasas en las capas de areniscas. Las capas de lutitas, deben presentar un módulo de deformación muy bajo. En una secuencia de rocas sedimentarias con intercalaciones de capas de distintas litologías, se observa principalmente que las diaclasas se limitan al espesor de la capa. La resistencia al corte en dicha secuencia será mucho mayor que en el caso de considerar un plano teórico único de corte por continuidad de las diaclasas.

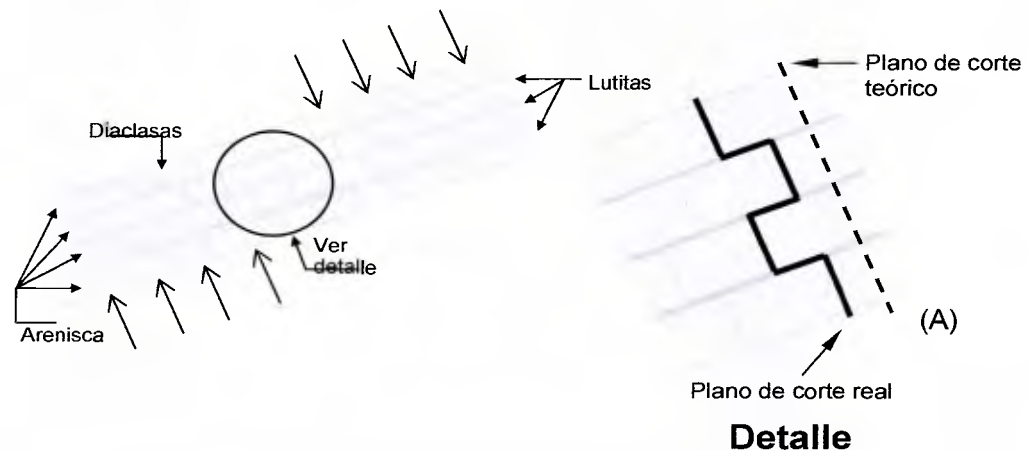


FIGURA N°2-7

En las rocas metamórficas suceden fenómenos similares debido a variaciones litológicas verticales en la secuencia, destacándose cambios en la textura o composición, con propiedades mecánicas diferentes, que limitan el desarrollo de diaclasas, a condiciones litológicas iguales, **(Ver Figura N° 3-7):**

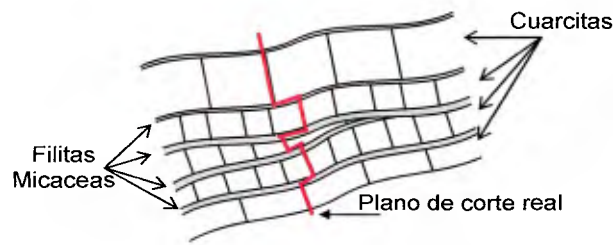


FIGURA N° 3-7

En afloramientos donde se encuentran secuencias de intervalos duros y blandos, la resistencia del macizo a cualquier esfuerzo lo constituye principalmente los



intervalos duros, donde fuerzas tectónicas deben actuar en forma distinta que en macizo uniforme, con resultados de fracturamiento distintos en dichos intervalos. Es importante destacar que debido a la estructura en capa o foliación pueden ocurrir fenómenos de desplazamiento en el contacto con estratos de menor resistencia. En la foto,

correspondiente a una secuencia de esquistos cuarzo micáceos, se diferencia intervalos gruesos de otros más delgados, donde en los primeros se destacan los sistemas de diaclasas limitados a su espesor, y en los intervalos delgados se pueden presentar o no una frecuencia mayor de diaclasas, destacándose falta de continuidad de las diaclasas de mayor desarrollo hacia dichos intervalos.

7.3 FRECUENCIA

El término frecuencia se define como la cantidad de diaclasas en un ancho determinado. El ancho de medición puede variar de 1 a 3 m. pudiéndose hablar de frecuencia de diaclasas de una en un metro (1:1), dos en un metro (2:1), una cada tres metros (1:3), etc. Es de esperar que en un macizo rocoso la frecuencia de fisuras sea inversamente proporcional al volumen de masa homogénea, como por ejemplo, a un mismo esfuerzo tectónico en una masa granítica, las fisuras tendrán una amplia separación, equilibrando el esfuerzo con la deformación. En una secuencia de capas de areniscas con intercalaciones de lutitas, la mayor resistencia a una fuerza tectónica se aplica a las areniscas, ya que las lutitas tienen una deformación plástica muy alta, por lo cual la cantidad de fisura que equilibra la deformación producida por el esfuerzo, dependerá del espesor de capa, debiendo ser muy densa en capas delgadas y más separada en capas gruesas. Estos fenómenos se manifiestan en rocas metamórficas en forma similar, si en una secuencia que en su composición predomina el cuarzo, alternando con secuencias micáceas o filíticas. Tanto las lutitas como filitas micáceas, debido a su bajo módulo de deformación, tenderán deformaciones plásticas y no se formarán fisuras. (**Ver Figura N° 4-7**):

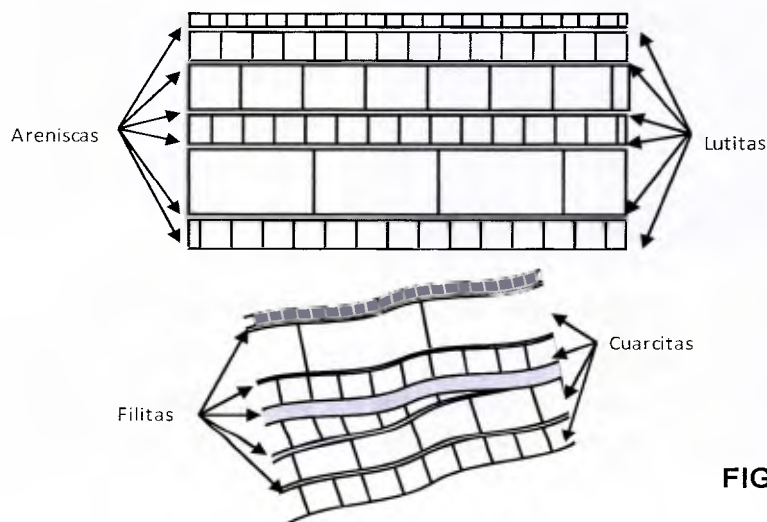
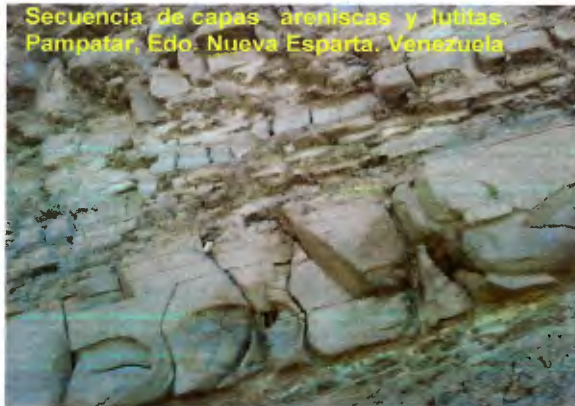


FIGURA N°4-7

En la fotografía tomada en un talud de corte en el sector de Pampatar, Estado



Nueva Esparta, Venezuela, se destaca una secuencia de areniscas de distinto espesores con intercalaciones de lutitas, en la cual se puede observar la variación de la frecuencia de diaclasas de acuerdo al espesor de capa de arenisca. En las lutitas intercaladas con las areniscas no se observa continuidad

de las diaclasas que afectan al macizo, debido a su condición de menor resistencia.

Las fisuras se desarrollarán en patrones que responden a los esfuerzos a que se somete el macizo rocoso, donde fácilmente resultan mínimos dos (2) sistemas cuya orientación depende de la dirección de los esfuerzos, pudiendo presentar angularidad entre los 60° y 90° . La presencia de otros sistemas se desarrollará debido a cambios en los esfuerzos en el macizo. Otros fenómenos que deben tenerse en cuenta es la posibilidad de cambios en la magnitud de la fuerza vertical, pudiendo originar, perpendicular a su aplicación, fisuras microscópicas sub-



horizontales por efecto de tensión, que posteriormente se convertirán en diaclasas, asemejándose a capas. En el canal de descarga de la presa Tocoma, en su excavación se destacaron en roca granítica fresca, diaclasas sub-horizontales, la cuales pueden ser el resultado de erosión de grandes cargas verticales. En la fotografía se

observan diaclasas verticales que se encuentran en general limitadas por las horizontales.

7.4 ABERTURA

El término se define como la distancia perpendicular entre los planos de las diaclasas. La abertura de una fisura o diaclasa debe estar relacionada con un fenómeno de tensión, el cual es el producto de cambio en la aplicación de una fuerza, ya sea tectónica o no. Las tensiones en fisuras existentes originan su abertura, las cuales a grandes profundidades podrían rellenarse por mineralización. En caso de asociaciones con rocas productoras de petróleo o gas, la permeabilidad generada por efecto de tensión en las rocas, en conjunto con la porosidad primaria, constituyen reservorios adecuados para hidrocarburos, cuya acumulación dependerá de la presencia de sellos litológicos. En caso de rocas estratificadas o foliadas con distintos módulos, el efecto de carga vertical puede originar tensión en capas de modulo alto de deformación entre intervalos de menor modulo. Este efecto en macizos rocosos puede estar relacionado con cambios del estado tensional debido a procesos de erosión con el tiempo geológico. Lo anterior tiene relación con la acumulación de agua subterránea en fracturas debido a recarga superficial.

Hacia la superficie, un macizo está sometido en mayor o menor grado de los efectos de meteorización, lo cual desde el punto de vista práctico es solo un cambio de volumen debido a cambios mineralógicos en las rocas, donde disminuye su densidad ocurriendo un fenómeno de tensión, desarrollando sistemas de diaclasas con patrones muy densos en general con alta permeabilidad, que disminuyen a profundidad a medida que los efectos de meteorización también disminuyen. Es común en la investigación del subsuelo con perforaciones que a medida que la meteorización disminuye con la profundidad, la permeabilidad del macizo es menor, así como la frecuencia de diaclasas, estando evidentemente relacionadas con permeabilidad. La meteorización actúa como un efecto de dilatación del macizo al igual que cualquier objeto metálico en contacto con el aire se oxida, dilatándose, ejerciendo importantes presiones hacia la superficie cuyo efecto solo se puede cuantificar a través del tiempo geológico.

La excavación de un túnel tiene un efecto violento en el macizo rocoso, pues el estado de tensiones producto de un largo proceso geológico cambia bruscamente a un fenómeno de liberación de tensiones, permitiendo la dilatación del macizo rocoso hacia la abertura. Dependiendo principalmente de la expansión del macizo, se desarrollan rápidamente diaclasas abiertas, cuyos efectos se deben disipar a medida que nos alejamos del túnel. **(Ver Figura N° 5-7):**

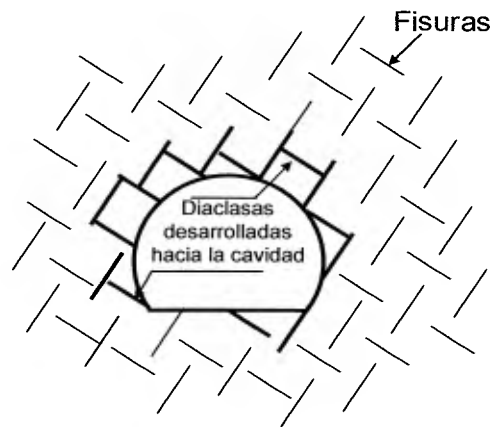


FIGURA N° 5-7

En una roca maciza y de alta resistencia como un granito, el efecto alrededor del perímetro del túnel será muy local con la formación de pequeñas cuñas. En caso de rocas estratificadas y foliadas la deformación dependerá de la relación de los espesores de capas duras con el diámetro del túnel.

Durante el año 1989 (UCAB) se realizó una tesis de grado sobre "Análisis de Deformación en Túneles a Partir de Ensayos de Modelos en Dos Dimensiones", basada en una máquina de modelos de fricción de base, similar a la descrita por R. Goddman (1976). Los modelos ensayados representan un macizo rocoso estratificado o foliado con un sistema de diaclasas perpendicular a dichos planos. Sobre los modelos la fuerza geostática se asimiló a una fuerza horizontal ejercida por una tela de apoyo que se desplazaba horizontalmente. Los resultados fueron de gran interés, donde el efecto de flexión de las capas constituye el factor más importante en la deformación del macizo, con aberturas de diaclasas debido a dicho

efecto. En la **Figura N°6-7**, se muestran, con fotos de los modelos, las deformaciones finales en dos (2) ensayos.

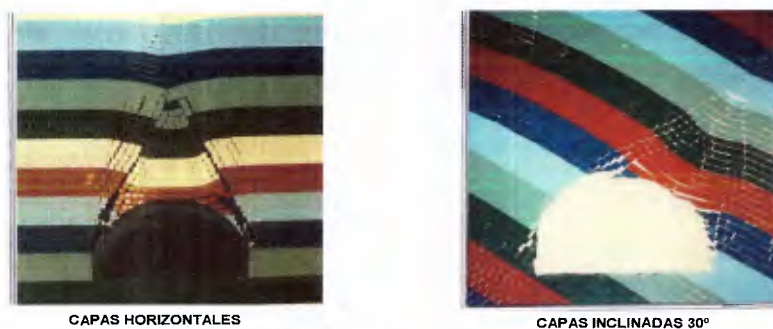


FIGURA N°6-7

En los modelos se observó que al aumentar la relación entre el diámetro de la excavación y el espesor de capa, aumentan las deformaciones. Es importante destacar que debido al fenómeno de flexión, los planos de diaclasas se separan o abren, siendo de poca importancia las características de dichos planos. También se observó que cuando la inclinación de las capas se encuentra libre hacia la abertura se producen fenómenos de deslizamientos entre los planos.

Los resultados del trabajo que se puede aplicar a túneles con cobertura donde los esfuerzos principales son verticales, concluye que los procesos de deformación en túneles dependen de tres factores principales:

- La orientación de las capas o planos de foliación con respecto al eje del túnel (abertura).
- Relación entre el espesor de las capas y el diámetro del túnel.
- La fricción entre planos de capa o foliación.

Para el caso "A" que se muestra en la **Figura N° 7-7**, el diámetro del túnel es similar al espesor de las capas por lo cual no altera el estado de tensiones. En cambio para

el caso "B", la descompresión hacia la abertura originara un desarrollo de fracturas hacia los hastiales y fenómenos de flexión de las capas hacia el techo, donde las diaclasas se abrirían delimitando en forma de triángulo un macizo descomprimido por encima de la bóveda.

Los fenómenos de flexión se desarrollan perpendicular a las capas tal como se muestra en la figura C donde se simulan capas inclinadas. Los efectos de deformación de un macizo foliado o estratificado serán similares a los indicados en las figuras mientras el esfuerzo principal sea vertical. El problema de deformación en dichas rocas se complica a medida que la relación σ_h/σ_v se acerque o sea mayor a uno, debido a la compresión horizontal de la sección del túnel.

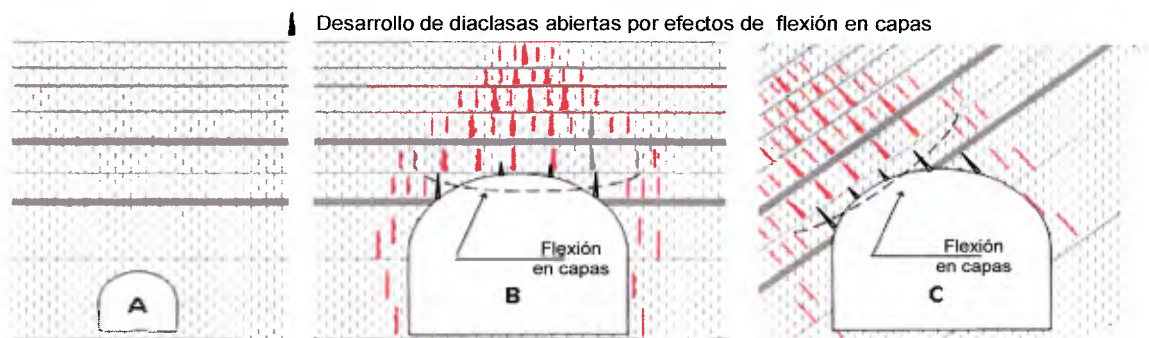


FIGURA N° 7-7

En la foto siguiente se muestra un problema de estabilidad en la bóveda de un túnel de trasvase, que abarca parte del hastial derecho. El fenómeno se presentó a partir de los 15 años de su excavación, donde su sostenimiento fue a base de pernos y concreto lanzado, lo cual se usó como sostenimiento hacia la parte superior del túnel, existiendo en la parte inferior un canal de concreto vaciado, por donde se encuentra canalizada el agua. La secuencia litológica está constituida por capas de areniscas de distinto espesor, entre 40 y 5 centímetros, con intervalos de lutitas, cuya condición física tiende a deteriorarse con el humedecimiento o al contacto con el agua.



Desprendimiento de la bóveda. Túnel Turimiquire. Edo. Anzoátegui. Venezuela

7.5 RUGOSIDAD

La rugosidad de los planos que delimitan las diaclasas puede ser definida como la irregularidad de la superficie al tacto. Donde se puede diferenciar en general entre lisa, ligeramente rugosa y muy rugosa, cuya superficie de corte tendrá respectivamente baja, mediana y alta resistencia. Ejemplo de lo anterior, puede ser representado con dos láminas de papel lija, los cuales en contacto por su parte áspera presentan alta resistencia al desplazamiento, en cambio por contacto hacia su parte lisa, fácilmente las superficies pueden ser deslizadas.

Existe una amplia bibliografía sobre la medición de la rugosidad en el amplio término de las discontinuidades, incluyendo en la medición los planos de foliación y estratificación, lo cual debe ser claramente diferenciado por el especialista, ya que dichos planos constituyen las características de la formación de las rocas según su origen.

En las diaclasas se utilizan los términos de muy rugosa, ligeramente rugosa y lisas. En roca fresca la formación de fisuras a diaclasas, la rugosidad del plano estará controlada por la composición mineralógica de la roca. En presencia de minerales afaníticos, las diaclasas serán lisas en cambio cuando la composición son minerales granulares el plano será rugoso. El estado inicial de dichos planos puede variar con el tiempo por los efectos de meteorización, los cuales se encuentran más acentuados hacia la superficie, donde los procesos de cambios en los minerales disminuyen la resistencia original del plano.

7.6 RELLENO

En un macizo rocoso sin efecto de meteorización, las diaclasas son fracturas limpias en las rocas, sin relleno. Los efectos de tensión debido a fenómenos tectónicos pueden originar separación en los planos que definen las diaclasas, los cuales pueden ser rellenados debido al paso de soluciones con procesos de mineralización. También se puede originar alteración por flujo subterráneo de las paredes, con relleno hacia la abertura de material procedente de las rocas.

En general el relleno más común en diaclasas está relacionado con el proceso de meteorización y el cambio de volumen del macizo con presencia de diaclasas abiertas, sumado a variación del flujo subterráneo, produciendo oxidación en las paredes, así como deposición de partículas de arcillas, los cuales disminuyen la resistencia al corte.

El flujo subterráneo en un macizo rocoso está relacionado principalmente con su permeabilidad secundaria debido a la presencia de diaclasas abiertas, donde su relleno puede ocurrir por cambio en la composición de los minerales y/o sus soluciones.

7.7 COMENTARIOS SOBRE EL ORIGEN DE LAS DIACLASAS

- Las diaclasas son defectos en las rocas bien expuestas hacia la superficie del terreno y en las excavaciones, cuya frecuencia y desarrollo tiende a disminuir con la profundidad. Una masa rocosa confinada, sometida a un estado original de esfuerzos, desarrolla fisuras o microfisuras, cuando el cambio de dichos esfuerzos, ya sea por fenómenos tectónicos o relevación de esfuerzos por efectos de erosión, origina los planos de diaclasas.
- Comúnmente el desarrollo (persistencia) de diaclasas o extensión de sus planos está relacionado con el tipo de roca, teniendo mayor desarrollo en rocas uniformes como el granito. En rocas sedimentarias con alternancia de capas dura y blandas, las diaclasas suelen estar limitadas en extensión, principalmente al espesor de capas dura, y en los intervalos blandos ocurre un proceso de deformación. Similar fenómeno puede suceder en las rocas metamórficas foliadas, con intervalos gruesos de foliación cementada e intercalaciones delgadas de poca cementación. Lo anterior trae como consecuencia que los planos de diaclasas no son continuos, existiendo puentes de roca que aumenta la resistencia al corte del macizo.
- La frecuencia de fisuración depende del volumen de roca dura sobre el cual aplica el esfuerzo. En secuencias sedimentarias o metamórficas dicha frecuencia y posterior desarrollo a diaclasa dependerá respectivamente del espesor de capa dura o intervalos cementados de foliación. La presencia de diaclasas en general es inversamente proporcional al espesor de capa, o sea, en capas gruesas menor frecuencia y en capas delgadas mayor.
- Las diaclasas abiertas deben su origen a efectos de tensión en el macizo, ya sea por cambios en la dirección de los esfuerzos o a fenómenos por relevación de carga, debido a la erosión y/o a la meteorización. A profundidad el cambio del estado de tensión puede dar origen a diaclasas abiertas relacionada con la acumulación de petróleo y agua subterránea.

- La frecuencia de diaclasas varía con el confinamiento del macizo y el perfil de meteorización, presentando en general mas desarrollo, alta frecuencia y mayor abertura cercano a la superficie en zonas muy meteorizadas y con poco desarrollo y frecuencia, así como cerrada hacia la roca fresca. Lo cual debe tenerse en cuenta para el análisis de excavaciones superficiales.
- En obras subterráneas dependiendo de la profundidad y del estado de esfuerzos, la abertura origina un cambio brusco de tensiones en el macizo con desarrollo de sistema de diaclasas abiertas, que tiende a desaparecer cuando nos alejamos de dicha abertura. En rocas sedimentarias y foliadas, dependiendo respectivamente de la posición de las capas o los planos de foliación con respecto a la abertura de un túnel, se puede originar un proceso de deformación del macizo con fenómenos de flexión en las rocas, generando la mayor apertura de diaclasas.
- La rugosidad de los planos de diaclasas está relacionada con la composición de las rocas. Las diaclasas serán lisas donde hay presencia de minerales afaníticos en cambio cuando se presentan minerales granulares serán rugosas.
- La abertura de diaclasas se debe a fenómenos de tensión ya sea por procesos tectónicos o relevación de esfuerzo debido a efecto de erosión y/o meteorización, cuyo relleno entre las paredes está relacionado por el paso de flujo de agua subterránea o soluciones mineralógicas.
- En el **Cuadro N° 1-7** se muestra en forma gráfica el origen de las diaclasas y las condiciones que se deben tener en cuenta de acuerdo a la profundidad. En la parte izquierda del cuadro se visualiza la masa rocosa original a gran profundidad, donde predominan las fisuras, las cuales debido a los efectos tectónicos, relevación de esfuerzos por procesos de erosión y la meteorización, cambian a diaclasas donde su condiciones de desarrollo, frecuencia, abertura, rugosidad y relleno, son variable con la profundidad.

MACIZO ROCOSO

El macizo rocoso constituye un término que involucra la roca intacta, las estructuras geológicas y los efectos de meteorización. La resistencia no solo depende del volumen de muestra, si no de la sollicitación o el esfuerzo a que es sometido el macizo de acuerdo a la orientación de la modificación del terreno con respecto a la posición de las estructuras geológicas. Un macizo rocoso de acuerdo a la sollicitación, puede tener alta resistencia y gran estabilidad o baja resistencia con problema de estabilidad.

8.1 LIMITACIÓN DEL TÉRMINO DISCONTINUIDAD

El termino discontinuidad definido por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) 1981, indica lo siguiente: .. “termino general para cualquier discontinuidad mecánica en un macizo rocoso que tiene una resistencia a la tracción nula o muy baja. Es el termino colectivo para la mayoría de las diaclasas, planos de estratificación débiles, planos de esquistosidad débiles, zonas débiles y fallas”. Algunos profesionales utilizan el término genérico discontinuidad para referirse indistintamente a diaclasas, fallas, foliación y estratificación, teniendo en cuenta que la resistencia al corte en estas superficies, siempre es menor que la resistencia de la roca intacta que constituye el macizo. En ambas definiciones no se toma en cuenta que los planos de estratificación y foliación constituyen planos originales de las rocas y no corresponden al efecto mecánico en la formación de diaclasas y/o fallas geológicas.

Cualquier Geólogo por su formación profesional cuando clasifica una roca metamórfica como esquistos, ampliamente distribuido en el sistema montañoso de la costa Venezolana, y parte de Los Andes, está indicando que la roca intacta está formada por una serie de planos de foliación de mucha extensión. Así mismo en las secuencias de rocas sedimentarias, las cuales controlan el relieve montañoso Oriental, parte de Los Andes y de la Sierra de Perijá, los planos de estratificación en

secuencia alternantes de capas constituyen planos muy extensos, cuyas propiedades mecánicas en problemas de estabilidad y diseño de túneles, constituyen controles muy distintos a los sistemas de diaclasas, por lo cual se requiere la separación de dichos planos para analizar en forma adecuada los problemas geológicos.

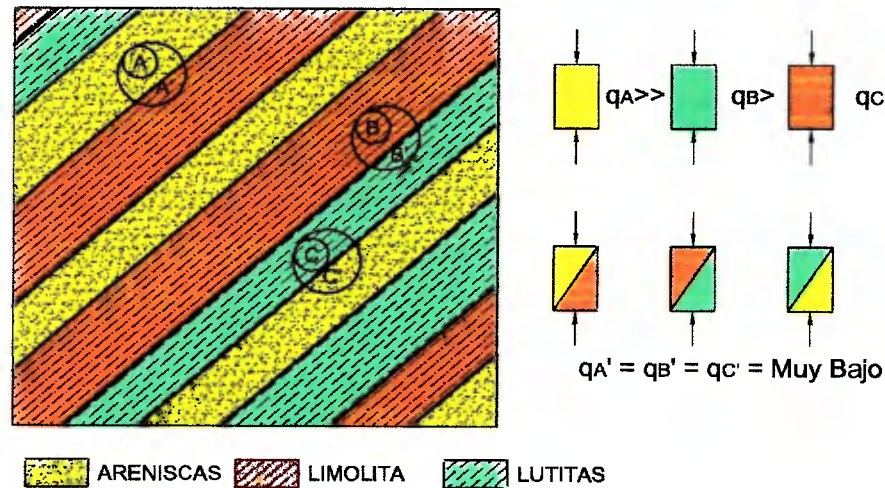


En una secuencia de rocas metamórfica esquistosas, tal como se muestra en la foto, la roca intacta está formada por numerosos planos de foliación, donde la cementación entre dichos planos varía a lo largo y ancho de cada una de sus superficies. Los planos de foliación son característicos de la roca intacta clasificada como esquistos calcáreos grafitosos.

Así mismo en las secuencias de rocas sedimentarias los planos de estratificación constituyen límites litológicos, y la roca intacta se encuentra entre dichos planos. Los planos de foliación y estratificación tienen una resistencia a la tracción muy baja a nula, pero la foliación es parte de la roca intacta y los planos de estratificación no tienen ninguna relación con la roca intacta.

En una secuencia alternante de capas de areniscas, lutitas y limolitas, tal como se muestra en la **Figura N°1.8**, la resistencia de la roca intacta será distintas para cada una de las capas, muy alta en la areniscas, media en las limolitas y baja en las lutitas, pero si consideramos dentro de la muestra el plano de estratificación, se obtendrán valores de resistencia muy baja, indistintamente de las capas involucradas.

Para el caso de rocas foliadas, la aplicación del término discontinuidad se complica, debido a que la roca intacta estaría constituida por muchos planos de discontinuidad.



VARIACION DE RESISTENCIA CONSIDERANDO LAS MUESTRAS DE ROCA INTACTAS EN LAS DISTINTAS CAPAS E INTEGRANDO EL PLANO DE ESTRATIFICACION

FIGURA N° 1.8

Quien suscribe considera que englobar en el término discontinuidad, la totalidad de los planos geológicos, no diferenciando los originales en las rocas sedimentarias y metamórficas (estratificación y foliación), de los efectos mecánicos, diaclasas y fallas geológicas, ha originado un mal uso de los sistemas de clasificación de macizos rocosos utilizados con éxitos en condiciones litológicas uniforme, principalmente relacionado con rocas ígneas e ígneas-metamórficas con escasos planos de foliación.

En cualquier evaluación geológica de un macizo rocoso, los planos de estratificación y foliación, deben ser debidamente separados de los planos de diaclasas, donde el amplio término de "discontinuidad" debería ser restringido a descripciones muy generales. En las diaclasas los términos de persistencia, frecuencias, rugosidad, abertura y relleno, constituyen su evaluación adecuada.

8.2 EL MACIZO ROCOSO

El macizo rocoso abarca un volumen mayor del correspondiente a una muestra manual. En general la resistencia dependerá de las estructuras geológicas que afectan el área estudiada, así como el grado de meteorización. Un ejemplo típico del uso del término macizo rocoso se muestra en la **Figura N° 2.8**, donde la resistencia a la compresión sin confinar de una muestra manual es muy alta, disminuyendo a medida que el área que se abarca en el macizo aumenta, y la resistencia depende de las condiciones estructurales por los planos de discontinuidades.

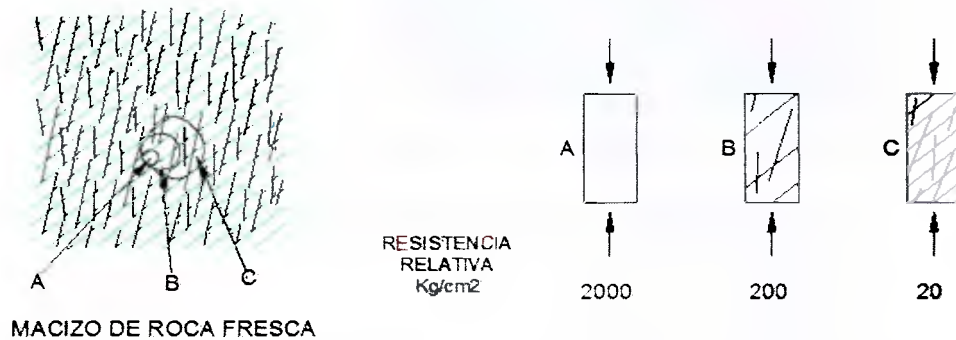


FIGURA N° 2.8

Un ejemplo común para visualizar la relación del fracturamiento con la escala de la muestra, lo constituye un cilindro de concreto ensayado a la falla, donde el resultado puede estar en el orden de los 250 kg/cm^2 . Si obtenemos una muestra del cilindro ensayado en un sector no fracturado, la resistencia de un nuevo ensayo de compresión sin confinar, daría resultados similares al obtenido. Si la muestra aumenta de tamaño con algunos planos de fracturas, su resistencia disminuye, siendo cercana a cero cuando la muestra alcanza la mayor parte del cilindro de concreto ensayado.

Las condiciones anteriores pueden ser visualizadas en la fotografía siguiente, correspondiente a una excavación en rocas graníticas, donde en forma similar a la figura anterior podemos diferenciar la roca intacta de volúmenes mayores, donde la resistencia dependerá de las distintas estructuras geológicas.



A medida que el volumen de muestra es mayor, hay que tener en cuenta el confinamiento de la estructura con respecto a la sollicitación, donde a mayor volumen será también el número de planos estructurales, de cuya posición con respecto al esfuerzo dependerá la resistencia a la sollicitación.

8.2.1 Resistencia del macizo rocoso de acuerdo a la sollicitación

La resistencia del macizo rocoso no es constante. Dependerá del volumen de la masa involucrada y de la posición de las estructuras geológicas con respecto a la sollicitación.

En la sección de la Figura N° 3.8 se muestra un corte en trinchera, en el cual se muestra la presencia de capas con inclinación a la izquierda y sistemas de fracturamiento sub-verticales con inclinación tanto a la derecha como a la izquierda. Las condiciones representativas de un ensayo de corte dependerán de la

solicitud a que estaría sometido el macizo, principalmente relacionada con el confinamiento de las distintas estructuras geológicas por la pendiente de los taludes.

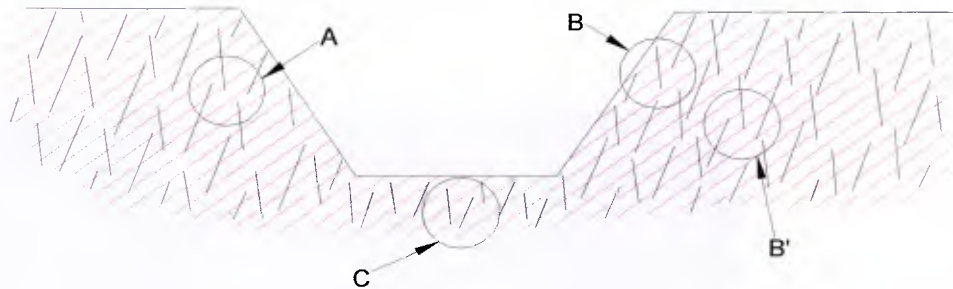
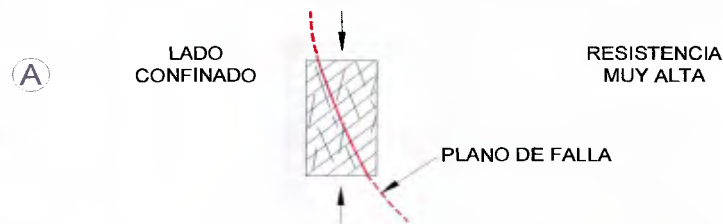


FIGURA N° 3.8

A continuación se presentan distintas situaciones para visualizar las condiciones en cada una del ensayo representativo:

1) Para el talud "A", la muestra estaría con su cara libre hacia la derecha de la figura con confinamiento de los planos continuos con buzamiento en sentido contrario a la pendiente del talud.



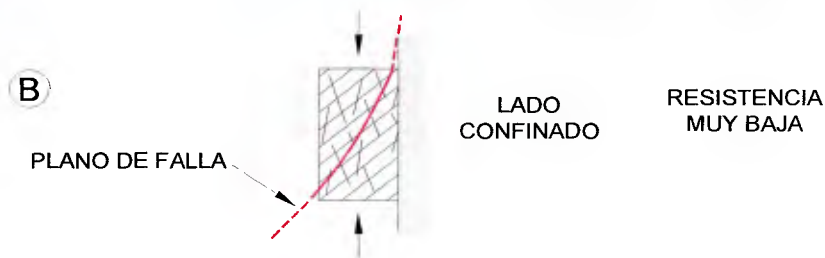
De acuerdo a la figura, no existen planos estructurales hacia la cara libre del talud, y en donde los planos principales de acuerdo a su inclinación hacia el lado izquierdo se encuentran confinados, por lo cual la resistencia que se alcanza será muy alta.

El plano de falla debe vencer la resistencia de la roca intacta, lo cual le infiere al macizo rocoso mayor estabilidad.



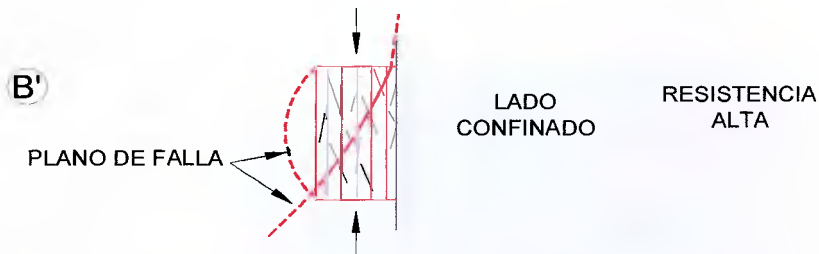
La foto a la derecha corresponde a un talud de corte en rocas graníticas, donde los planos principales de diaclasas se encuentra con el buzamiento en sentido contrario a la pendiente, lo que ha permitido con el paso de más de 40 años un proceso de reforestación natural, sin problemas de estabilidad.

2) En el lado “B”, los planos estructurales con mayor desarrollo se encuentra en sentido de la cara del talud, donde el ensayo representativo será el siguiente:



La falla tiende a desarrollarse a lo largo del plano estructural no confinado, cuya resistencia depende de la fricción entre dichos planos, donde la estabilidad del talud se considera crítica. Ejemplo de lo anterior lo tenemos en secuencia de rocas sedimentarias o metamórficas cuando los planos estructurales de origen, estratificación y foliación respectivamente se encuentran con buzamiento en sentido de la pendiente del talud de corte.

3) Si en el talud “B” colocamos su pendiente igual al buzamiento de la estructura principal, el ensayo representativo debe considerar la posición de dicha estructura paralela al esfuerzo, teniendo lo siguiente:



Ejemplo de lo anterior lo tenemos en taludes de corte en rocas sedimentarias constituidas por alternancia de capas de areniscas, lutitas y limolitas, y en donde el rumbo de las capas se encuentre paralelo al trazado vial y el buzamiento en sentido



de la pendiente del talud.

En la fotografía se muestra la pendiente alcanzada de un talud de corte, después de una serie de deslizamientos. Dicha pendiente en la actualidad coincide con el buzamiento de una secuencia de capas delgadas alternantes de areniscas y lutitas silíceas. La estabilidad del talud se alcanza

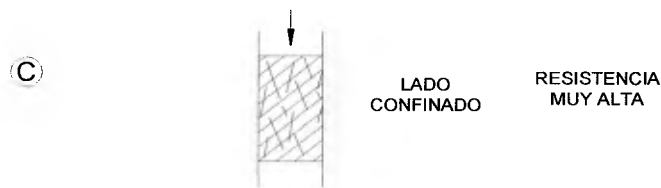
con pendiente iguales o menores al buzamiento, donde debido en algunos casos a las amplias superficies expuestas, requiere de obras de control superficial de erosión. En el detalle hacia el pie del talud de la foto anterior, se destaca el control



de acuerdo al buzamiento de las capas, lo cual constituye en conjunto con los distintos sistemas de diaclasas, un proceso lento pero progresivo de desprendimientos de fragmentos de rocas. La estabilidad del talud se alcanzara cuando las condiciones de confinamiento se acerquen al pie del talud. En caso de

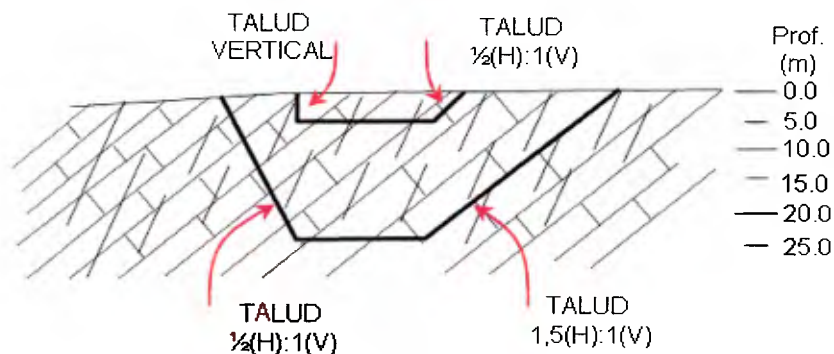
capas delgadas, con presencia de intervalos de baja resistencia, donde la pendiente del talud coincida con el buzamiento, se suelen presentar pliegues en la superficie debido a un fenómeno similar al repteo, debido a que el peso del material delimitado por el plano inclinado del buzamiento, vence la resistencia en dicho plano.

4) Si en "C" colocamos una fundación, la resistencia del macizo estará representada por el confinamiento lateral de la estructura geológica, donde la capacidad de carga estará relacionada con un alto porcentaje de la resistencia en la roca intacta.



Es importante destacar que la resistencia del macizo rocoso depende de la posición la estructura geológica con respecto a la sollicitación, así como el volumen representativo a dicha sollicitación. Ejemplo de lo anterior se muestra en la **Figura N° 4-8** que de acuerdo a la profundidad requerida de un talud de corte los diseños serían distintos para una altura de 5.0 m o de 25.0 m, donde en el primero del lado izquierdo puede ser vertical y del lado derecho sería de $\frac{1}{2}(H):1(V)$.

En el talud de 25.0 m de alto, las pendientes de diseño, de acuerdo a la resistencia del macizo rocoso podría ser $\frac{1}{2}(H):1(V)$ del lado izquierdo y de $1,5(H):1(V)$ en el lado derecho, debido al control de la pendiente por la inclinación de los planos continuos.



IGURA N° 4-8

8.3 LA METEORIZACIÓN Y EL MACIZO ROCOSO

La resistencia de la roca intacta depende del grado de alteración de los minerales o sea, de su meteorización. En la **Figura N° 5-8**, en donde zonificamos un perfil típico de meteorización, tendríamos una variación de resistencia, siendo menor hacia la superficie y aumentando a cotas inferiores.

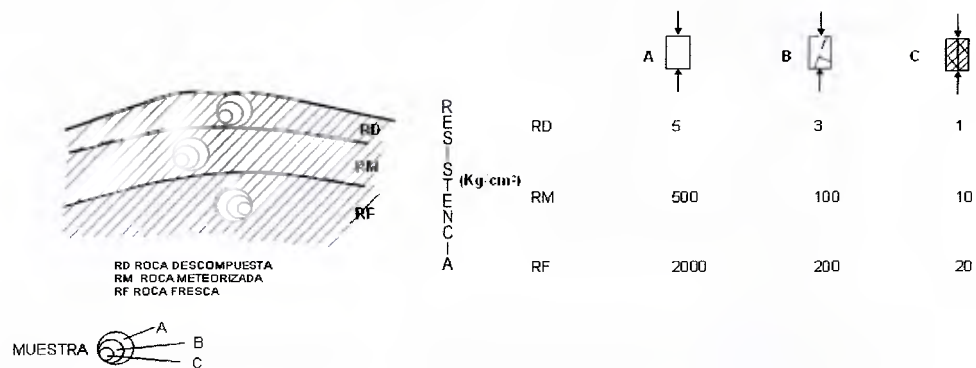


FIGURA N° 5-8

La variación de resistencia en la roca intacta se encuentra muy relacionada con el perfil de meteorización, donde el valor de resistencia a la compresión sin confinar de una roca intacta descompuesta es menor del 1% del valor de resistencia en roca intacta fresca.

Ejemplo de lo anterior se tienen en los numerosos ensayos realizados de compresión sin confinar en las rocas graníticas que sirvieron de fundación a la gran presa de concreto gravedad Raúl Leoni de 160 m de alto, (1974-1976), **Véase Figura N° 6-8**. Los numerosos ensayos realizados para la época mostraron la importancia en la alteración de los minerales en las muestras, principalmente relacionada con el feldespato y/o ortosa, lo cual genera minerales tipo arcilloso, donde valores muy bajo de dicha alteración influían en forma importante en la resistencia y el peso unitario.

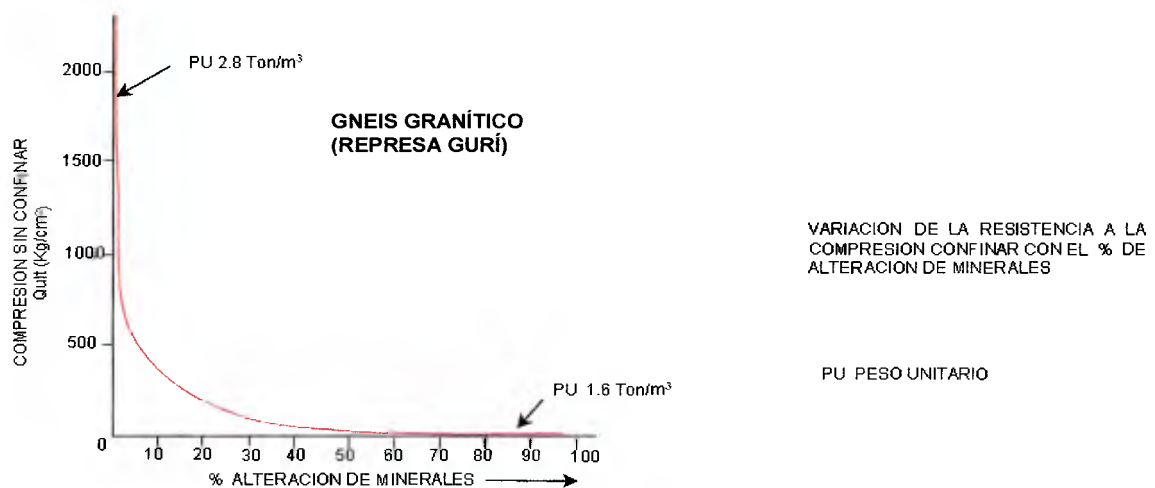


FIGURA N° 6-8

La variación de resistencia del macizo rocoso en una zona de roca descompuesta, puede representar valores del orden del 20% con respecto a la muestra intacta existiendo poca diferencia entre los valores. En cambio en una zona de roca fresca la resistencia del macizo rocoso puede ser de 1% de la muestra intacta, dependiendo de la posición de las estructuras geológicas con respecto a la sollicitación.

Una roca granítica fresca intacta, puede alcanzar una resistencia a la compresión sin confinamiento del orden de 2000 Kg/cm², pero con la presencia de diaclasas o fracturas con buzamiento en el sentido de la pendiente de un talud de corte, la estabilidad del macizo rocoso dependerá solo de la fricción entre los planos de fracturas. En la **Figura N° 7.8** donde se muestra un ejemplo típico de la Autopista Valencia – Puerto Cabello, Venezuela, donde el relieve montañoso está controlado por rocas graníticas, que fueron excavados con explosivos, donde la presencia de fracturas con buzamiento en el mismo sentido de la pendiente del talud, originaron durante las excavaciones graves problemas de estabilidad.

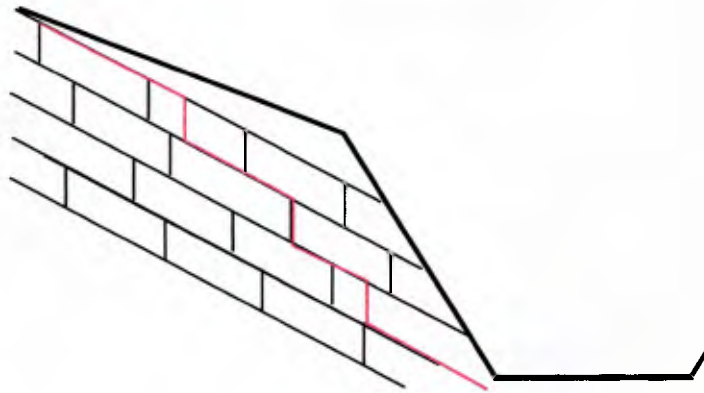


FIGURA N° 7-8

En la actualidad después de 45 años, en la fotografía siguiente tomada a unos de los taludes de corte, se encuentra indicado el diseño original y la pendiente alcanzada con el paso del tiempo. Aún se presentan problemas de estabilidad donde la posición de los planos de diaclasas con buzamiento hacia la vía origina derrumbes principalmente en época de lluvia donde la subpresión en dichos planos disminuye su resistencia al corte.



8.4 PRESENCIA DE INTERVALOS O CAPAS BLANDAS

En los macizos rocosos principalmente en rocas sedimentarias o metamórficas, la presencia de capas de menor resistencia y de intervalos con variación en la composición de las secuencias esquistosas, pueden constituir planos potenciales de debilidad, donde la resistencia del macizo rocoso depende de la posición de dichos planos de acuerdo a las solicitaciones.

En la **Figura N° 8-8** se muestra un corte en trinchera, donde se encuentra una alternancia de capas duras y blandas. En las capas de roca dura, la muestra intacta alcanza resistencia de 1000 Kg/cm^2 y las capas blandas, de poco espesor, la resistencia es del orden de los 10 Kg/cm^2 . En el talud de corte del lado izquierdo la posición de las capas con buzamiento en sentido contrario a la pendiente controla un macizo rocoso de alta resistencia a las solicitaciones de diseño. En cambio en el talud derecho la posición de las capas se encuentra en el mismo sentido de la pendiente, donde los problemas de estabilidad son evidentes, clasificando el macizo de muy baja resistencia a las solicitaciones.



FIGURA N° 8-8

8.5 LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO CON EL TIEMPO

Al igual que en Mecánica de Suelos donde se considera condiciones a corto y largo plazo, en Macizos Rocosos dichas condiciones deben ser analizadas de forma semejante, ya que los parámetros de resistencia tienden a variar con el tiempo,

principalmente cuando la deformación puede desarrollarse a lo largo de planos estructurales, donde las irregularidades en dichos planos se suavizan con el desplazamiento.

Es común que las condiciones de estabilidad en el talud B de la Figura N° 3-8, los problemas de estabilidad de acuerdo a la posición de las capas en el mismo sentido de la pendiente del talud, no se presenten de inmediato debido a la resistencia pico entre dichas capas, la cual tiende a disminuir con los desplazamientos, debido a la sollicitación del macizo.

Otro efecto una vez realizada la excavación, lo constituye el cambio de tensiones en el macizo, donde los planos estructurales principalmente constituidos por fracturas o diaclasas, tienden a aumentar su desarrollo y frecuencia con el tiempo, lo cual produce cambio de resistencia en el macizo rocoso. Dicho efecto es muy importante en túneles, donde la abertura origina un cambio brusco de tensiones relacionado hacia la periferia, sometiendo con el tiempo al macizo rocoso a un proceso de esfuerzo/ deformación que puede

estar representado por gran desarrollo de sistemas de diaclasas y/o fracturas, con un aspecto visual de la superficie excavada muy fracturada, lo cual da una visión falsa de las condiciones del macizo a profundidad, cuyas condiciones deberían mejorar a medida que nos alejamos de la cavidad, donde las fracturas tenderán a menor desarrollo.

8.6 LA GEOLOGÍA APLICADA Y LA RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

La GEOLOGÍA APLICADA constituye el entendimiento adecuado de las condiciones geológicas del área donde será construida la obra de ingeniería de acuerdo a las nuevas sollicitaciones a que dicha área será sometida para la implantación de la obra.

El comportamiento del macizo rocoso en excavaciones superficiales o subterráneas depende de la posición de las distintas estructuras geológicas con respecto a la sollicitación, por lo cual se debe diferenciar en forma adecuadas los distintos planos que afectan dicho macizo, abarcando adecuadamente los planos de estratificación, foliación y diaclasas. Los dos primeros planos (estratificación y foliación) constituyen planos de origen de formación de las rocas, asociados, respectivamente, con las rocas sedimentarias y metamórficas. Las rocas ígneas en general forman un conjunto de rocas masivas, donde sus efectos estructurales se limitan a las diaclasas, cuyo entendimiento del origen de formación por parte de los distintos profesionales relacionados con la GEOLOGÍA APLICADA debe ser entendido.

En la corteza terrestre al igual que en cualquier masa sometida a esfuerzos se generan un proceso de deformación con el desarrollo de fisuras y/o fracturamiento cuyo desarrollo estará acorde con la magnitud del esfuerzo y el confinamiento. Los efectos posteriores ya sea por liberación de tensiones debido a los proceso de erosión o a nuevos esfuerzo con orientación distinta a los originales, tendrán como consecuencia el desarrollo de las diaclasas tal como se observan visualmente en las superficie expuestas al observador. El problema se presenta en visualizar qué pasa con las diaclasas cuando el macizo se encuentre confinado a profundidad. Lo anterior puede ser evaluado mediante perforaciones donde la densidad de las diaclasas puede variar con la profundidad, así mismo la investigación con geofísica sísmica de refracción, indica por aumento en la velocidad a través del macizo cambio en la condición física y/o de fracturamiento.

La resistencia del macizo rocoso depende de la sollicitación generada por las excavaciones requerida para la obra, donde se combinan la posición de las distintas estructuras geológica, diferenciando en los sistemas de diaclasas su desarrollo y frecuencia con el confinamiento.

EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

Las exploraciones del subsuelo deben ser consideradas como la ampliación del conocimiento de las observaciones geológicas detalladas de superficie. La ubicación y orientación de las exploraciones, además de los patrones que cubran el área de estudio, deben tomar en cuenta los aspectos geológicos, de forma de obtener una interpretación conjunta.

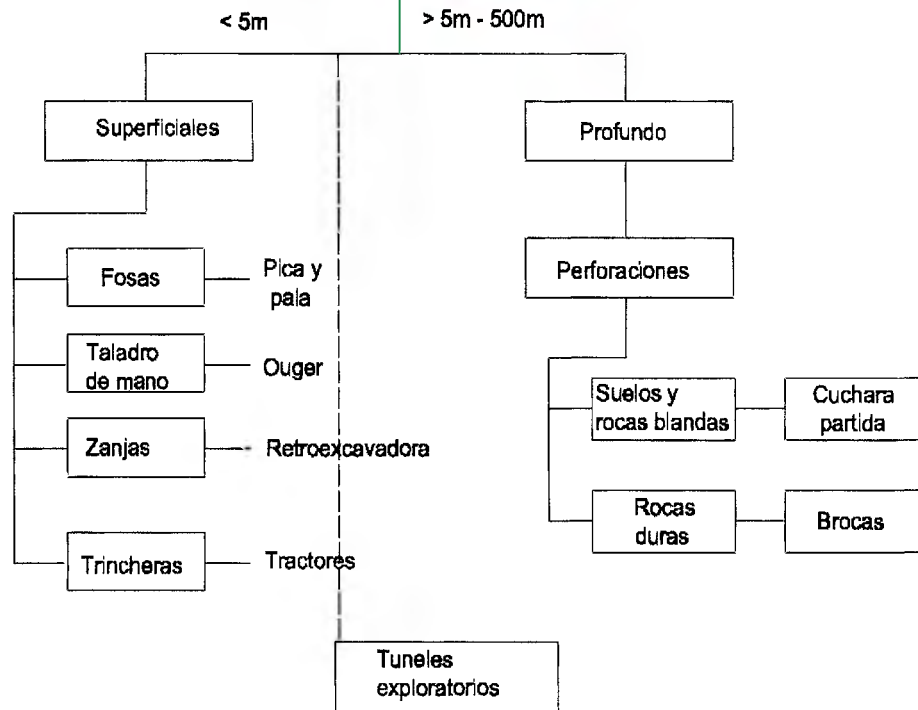
9.1 INTRODUCCIÓN

Previo a la exploración del subsuelo es importante contar con un levantamiento geológico de superficie del área de la obra, en donde se evalúan las condiciones geomorfológicas, unidades litológicas y en caso de afloramientos la condición de meteorización y la posición de las distintas estructuras geológicas. El detalle del levantamiento geológico dependerá de la etapa de estudio de la obra, preliminar, anteproyecto y proyecto, donde la cartografía de la información geológica podrá variar en planos desde escala 1:25.000 a 1:250. La precisión de la información geológica al igual que los levantamientos topográficos depende de la escala. Un plano a escala 1:10.000, la diferencia de cota apreciable puede estar en el orden de los 10 metros, donde 1 centímetro en el plano representa una longitud de 100 metros, y la información geológica estaría limitada a rumbos y buzamiento representativo de las estructuras geológicas, así como la identificación de la formación litológica. Si cambiamos a una escala 1:100, la precisión topográfica es mayor tanto en cotas como coordenadas, donde un metro estaría representado por 1 centímetro, y la información geológica estaría representada por variación en las distintas estructuras, con detalles de la litología aflorante y su condición física.

Una vez obtenido los resultados del levantamiento geológico de superficie, y dependiendo de la etapa del proyecto, se planificará la investigación del subsuelo, ya sea en forma directa con la obtención de muestras o indirecta mediante mediciones geofísicas en superficie, resumida su aplicación en Geología Aplicada, como se muestra en el **Cuadro Nº 1-9:**

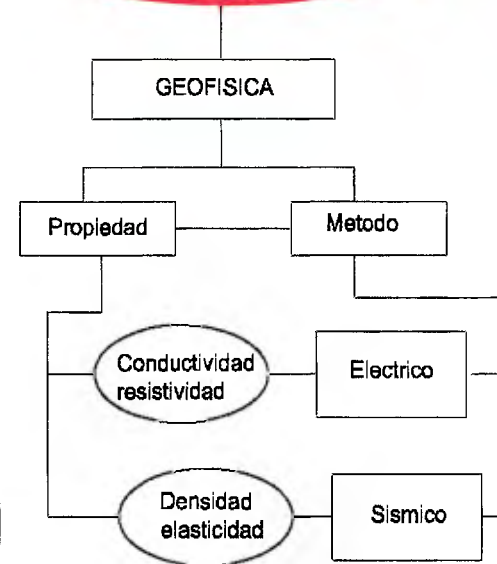
METODOS DIRECTOS

(Obtención de muestras y medición de resistencia o calidad de los materiales del subsuelo con el muestreo)



METODOS INDIRECTOS

(Determinación de las condiciones del subsuelo con mediciones en superficie, utilizando el contraste de propiedad física de los materiales)



Existen otras metodos con poca aplicacion en geologia aplicada
gravimetria (densidad), magnetico (magnetismo), radiomagnetico (radioactividad)

CUADRO N° 1-9

Los métodos directos podemos clasificarlos de acuerdo a la profundidad de investigación, en general hasta cinco (5) metros denominados superficiales y de mayor profundidad denominados profundos con el uso de perforaciones. Para la obtención de las muestras del subsuelo se requiere de un procedimiento mecánico, donde la resistencia a dicho procedimiento permita una primera clasificación de las propiedades de los materiales. El tiempo de ejecución de una fosa excavada manualmente mediante pico y pala, es una medida de las propiedades del suelo, en general a menor tiempo de excavación menor dureza, lo cual sumado a la estabilidad de las paredes, permiten estimar parámetros de cohesión y fricción.

Los métodos indirectos se basan en el contraste de propiedades físicas de los materiales, como son la conductividad, la densidad, el magnetismo, etc. Los dos primeros han permitido el desarrollo de métodos ampliamente utilizados en la investigación del subsuelo para fines geotécnicos.

En general para las exploraciones del subsuelo de áreas de préstamo o edificaciones livianas, la investigación se limita de 2 a 5 metros, con la utilización de pico y pala hasta tractores. Para presas, túneles, altos taludes de corte, la investigación requiere de perforaciones que alcance la profundidad de la rasante de la obra. Por el alto costo de las perforaciones, las investigaciones del subsuelo se combinan con los métodos geofísicos de menor costo y mayor rapidez.

Entre los métodos geofísicos, el método eléctrico de resistividad y el método geofísico de refracción, en los cuales la investigación geofísica abarca los primeros 100 m desde la superficie, en comparación con el método de reflexión que alcanza grandes profundidades y ampliamente utilizado en la investigación petrolera.

A continuación se amplía lo relacionado con perforaciones:

9.2 PERFORACIONES

La perforación también conocida como sondeo constituye el método de exploración del subsuelo ampliamente utilizado en las investigaciones geotécnicas, y

normalmente se utiliza para la obtención de muestras de suelo o rocas blandas la denominada cuchara partida y métodos rotativos con brocas de diamantes para la obtención de núcleos de rocas meteorizadas o frescas.

Las perforaciones requieren de equipos adecuados y de la experiencia de personal de forma tal de obtener muestras representativa de la condición del subsuelo y no realizar un hueco en el subsuelo sin obtención de muestras. La velocidad de



rotación, tipo de broca, fluido, presión de avance, constituye factores para un buen muestreo. En general los diámetros de perforación se encuentra asociado a las letras A, B, N y H, con diámetro respectivo de núcleo de 1", 1.5", 2" y 3". El diámetro del hueco de perforación está asociado a la letra W (AW, BW, NW y HW), así mismo el diámetro interno del muestreador que corresponde al diámetro obtenido del núcleo

se asocia con la letra X (EX, AX, BX y NX). El sistema wireline, en donde las muestras son obtenidas en forma continúa mediante un sacamuestra interno, con diámetro algo menor de núcleo, se denominan con la letra Q (AQ, BQ, NQ y HQ).

La longitud de muestra recuperada sobre el avance y multiplicado por 100% da el (%) porcentaje de recuperación en el intervalo, que en general tiende aumentar con la profundidad.

La cuchara partida está diseñada para obtener la muestra mediante su hincado por medio de un martillo que se golpea desde la superficie la barra de perforación, dicho hincado ha sido estandarizada tanto en la energía de caída del martillo como su penetración, conocida en forma común como S.P.T. (Ensayo Estándar de Penetración). Dicho ensayo consiste en la penetración del muestreado 30 centímetros, hincado mediante la caída de 75 centímetros un martillo de 140 lbs de

peso. El número máximo de golpes o SPT es de 100, luego se requiere a cambio con muestrador rotativo.

El SPT se efectúa en los últimos 45 centímetros de cada metro, donde los 55 centímetros de la parte superior es lavada y extraída a la superficie. A mayor SPT los materiales tendrán mayor resistencia, basado en la densidad o dureza, sean respectivamente suelos arenosos o cohesivos.

Las muestras son colocadas en cajas tal como se muestra en la fotografía, donde las muestra obtenida con la cuchara partida (SPT), se encuentran en frascos y los núcleos colocados en celdas alargadas donde se indican los intervalos muestreados.



Los valores obtenidos del muestreo se representan gráficamente, destacándose que en general el SPT aumenta con la profundidad hasta el máximo de 100 golpes y el porcentaje de recuperación aumenta a medida que los efectos de meteorización disminuyen. En la **Figura Nº 1-9** se muestra los gráficos de perforación típico del SPT y % de recuperación.

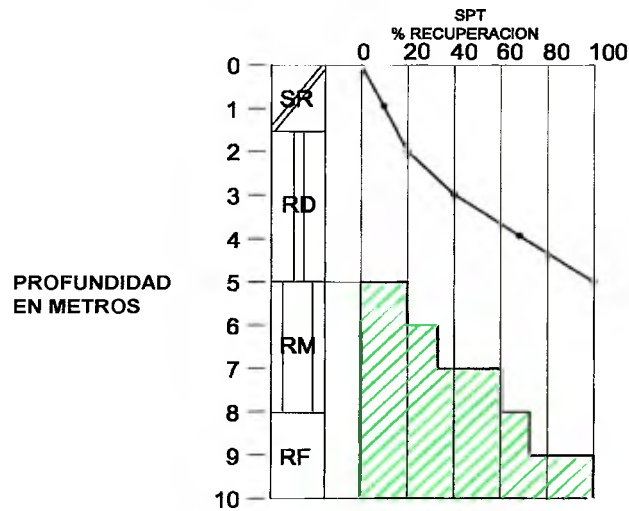


FIGURA N° 1-9

9.3 INDICE DE CALIDAD DE LAS ROCAS (RQD)

El índice de calidad de la roca, designado como RQD (Deere. D.U 1967) por sus siglas del inglés Rock Quality Designation, corresponde a una modificación del porcentaje de recuperación, tomando en cuenta el fracturamiento de los núcleos. El RQD corresponde a la longitud de núcleos iguales o mayores a 10 centímetros en el intervalo recuperado expresado en porcentaje. En la **Figura N° 2-9** se muestra el % de recuperación y el RQD de una longitud de testigo.

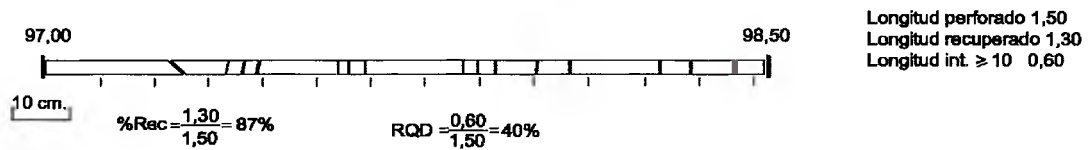


FIGURA N° 2-9

De acuerdo con Deere (1967) la clasificación del macizo rocoso con el RQD resulta así:

RQD	CALIDAD
0 - 25%	Muy Mala
25 – 50%	Mala
50 – 75%	Regular
75 – 90%	Buena
90 – 100%	Excelente

El método fue el resultado de investigación en rocas macizas y tal como lo indica su autor, su uso en rocas sedimentarias y metamórficas requiere de cierto criterio, siendo necesario realizar las mediciones inmediatamente después de extraer los núcleos, principalmente en lutitas y limolitas, las cuales tienden a un desmenuzamiento por efecto de humedad y el aire. Así mismo, en rocas duras no debe ser tomado en cuenta si el testigo está roto por el proceso de perforación o manejo.

Hay que tener en cuenta que una baja recuperación puede estar relacionada con el equipo de perforación y técnicas deficientes. Por lo cual se requiere un adecuado proceso de perforación, "con tubo doble y un diámetro mínimo NX (54 mm), siendo fundamental una adecuada supervisión de la perforación".

9.3.1 Pruebas de Permeabilidad a Presión

Durante la investigación con perforaciones, principalmente en sitios de presa y en grandes excavaciones a cielo abierto se efectúan pruebas de permeabilidad en el hueco de perforación, mediante aplicación de agua a presión, en intervalos de pruebas en general entre 3.00 y 5.00 metros. Dichas pruebas constituyen la cuantificación en sitio de las condiciones de permeabilidad del macizo rocoso, cuyos

resultados permiten evaluar y planificar el tratamiento en fundaciones, así mismo su control y verificación de la efectividad del proceso de inyecciones.

El Manual de Tierra publicado por "Bureau of Reclamation of United States", indica la Norma E-18, para ensayos de permeabilidad de campo en taladros, utilizando para el caso de obturador dentro de la perforación la siguiente formula:

$$K = \frac{Q}{2. \pi . L . Ht} \log e (L/r)$$

Dónde: K = Permeabilidad en cm/s

Q= Velocidad del flujo de agua en perforación en cm³/s.

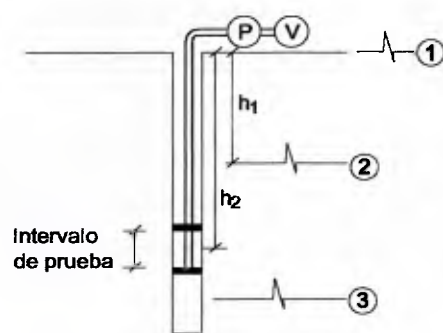
L= Longitud del tramo e Las pruebas de permeabilidad más común se basan en la unidad Lugeon, la cual corresponde a la pérdida de un 1 litro de agua, en 1 metro de sondeo, durante 1 minuto y bajo una carga aplicada de 10 Kg/cm² o 1MP. Planteada en el año 1933 por el Geólogo Suizo Maurice Lugeon, resultando:

$$1 \text{ Lugeon (L)} = 1 \text{ lts/1 m/1 min/10Kg/cm}^2$$

El valor de 1 Lugeon es equivalente a una permeabilidad de 10⁻⁵ cm/s. Las pruebas permiten la evaluación de la permeabilidad a través de fracturas o diaclasas del macizo rocoso, donde la permeabilidad primaria de la roca intacta debe ser menor a dicho valor.

Las pruebas de permeabilidad en campo que requieren de la destreza del perforador y supervisión permanente por personal técnico especializado. Los valores son de fácil obtención y procesamiento, siendo el factor más importante la determinación del nivel de agua subterráneo, el cual influye sobre el valor de la presión aplicada en la prueba.

Se presentan tres condiciones de acuerdo a la posición del nivel de agua, tal como se muestra en la **Figura N° 3-9**



V= Volumen de agua
P= Presión manómetro

Caso 1
presión en el intervalo=P

Caso 2
presión= P + h₁

Caso 3
presión= P + h₂

Nota: h₁ y h₂ corresponde a la presión que ejerce la columna de agua, teniendo en cuenta de que por cada 10 m de columna la presión es de 1 kg/m²

FIGURA N° 3-9

A continuación consideramos el siguiente ejemplo:

- Volumen de Agua 200 lts
- Tiempo de la prueba 10 min
- Longitud del intervalo..... 5 m
- Ubicación del intervalo entre 70 – 75 metros
- Presión aplicada 4 Kg/cm²

Caso 1 Nivel de agua en la superficie

$$K_1 = 200 \text{ lts}/10 \text{ min}/5 \text{ m}/4 \text{ Kg/cm}^2 = 1 \text{ lts/min/m/Kg/cm}^2$$

$$K_1 = 10 \text{ L} \quad (1,41 \times 10^{-4} \text{ cm/s})$$

Caso 2 Nivel de agua a 40 m de la superficie

$$p = 4 + 4 = 8 \text{ Kg/cm}^2$$

$$K_2 = 200 \text{ lts}/10 \text{ min}/5 \text{ m}/8 \text{ Kg/cm}^2 = 0,5 \text{ lts/min/m/Kg/cm}^2$$

$$K_2 = 5 \text{ L} \quad (7,03 \times 10^{-5} \text{ cm/s})$$

Caso 3 Nivel de agua por debajo del intervalo de prueba

$$p = 4 + 7,25 = 11,25 \text{ Kg/cm}^2$$

$$K_3 = 200 \text{ lts}/10 \text{ min}/5 \text{ m}/11,25 \text{ Kg/cm}^2 = 0,35 \text{ lts/min/m/Kg/cm}^2$$

$$K_3 = 3,5 \text{ L} \quad (5,00 \times 10^{-5} \text{ cm/s})$$

Es importante tener en cuenta que la unidad de Lugeon (L) tiene que estar referida a la carga aplicada de 10 Kg/cm².

Los ensayos de permeabilidad de cada intervalo se efectúan en general con tres cargas ascendentes y dos descendente, cuyos valores deben ser cuidadosamente analizados, siendo común su grafico de presión versus caudal. Donde podemos encontrar los casos que se muestran en la **Figura N° 4-9**:

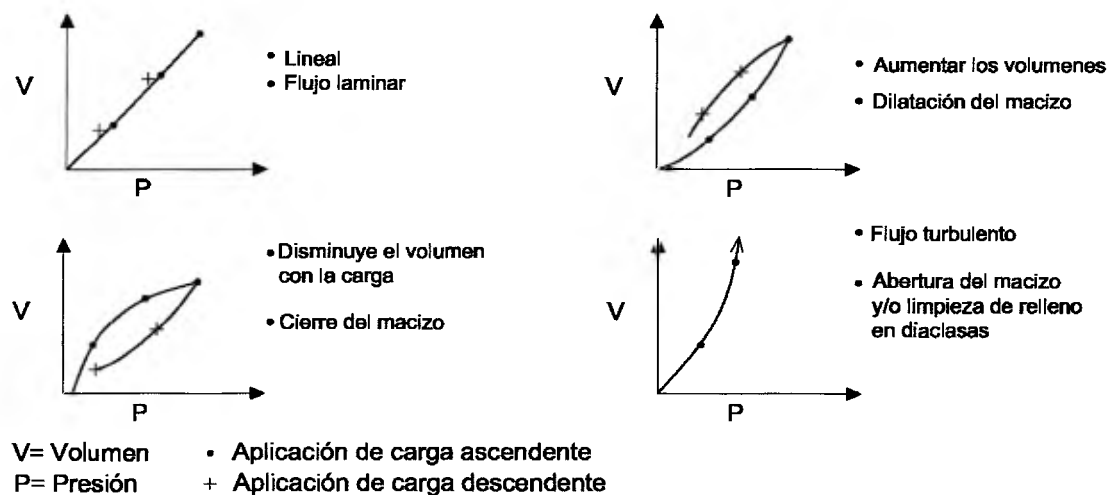


FIGURA N° 4-9

Un factor importante en macizos afectados por la meteorización es el carácter del relleno de las diaclasas, el cual en las pruebas de permeabilidad pueden dar valores aceptables, pero con el tiempo dicho material puede ser lavado por flujo de agua permanente como es el caso de las obras hidráulicas.

Las pruebas de permeabilidad en los sondeos, pueden presentar variaciones de acuerdo a la posición de las estructuras geológicas, con respecto al alineamiento de la perforación. En un macizo rocoso con diaclasas vertical, será menor la permeabilidad en perforaciones verticales que las inclinadas.

9.4 METODO GEOFISICO SISMICO DE REFRACCION

El método geofísico sísmico de refracción constituye en la actualidad un método de fácil uso y de bajo costo para la investigación geotécnica del subsuelo hasta profundidades no mayores a 100 metros. El método consiste en la medición del tiempo transcurrido desde el instante de producirse una perturbación de un punto en superficie hasta el instante de llegar a diferentes puntos de observación el primer impulso de la energía originada por dicha perturbación, basado en el principio de Fernal, donde los tiempos iniciales son mínimos absolutos.

La energía de perturbación se puede originar mediante una explosión desde la superficie o impactos mecánicos, que permita la generación de ondas sísmicas, cuyo tiempo de llegada son medido a través de geófonos electromagnéticos, donde las vibraciones del suelo se transforman en vibraciones eléctricas. Para los años 50 y 60, los equipos geofísicos ocupaban grandes volúmenes que eran transportados mediante camiones, incluyendo repuestos. En la actualidad los equipos de investigación geofísica de refracción son de pequeño tamaño, portátiles, donde la información en general puede ser almacenada en forma digital.

En el esquema de la Figura N°5-9, se muestra en forma de esquema la generación y medición de onda, así como el registro sismográfico de los tiempo de llegada.

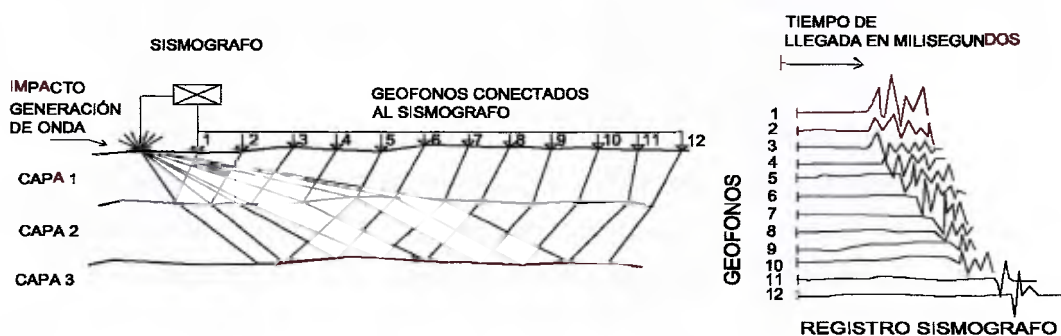


FIGURA N° 5-9

Las leyes de óptica geométrica de Fermat, establecen las trayectorias de las ondas, mediante una serie de ecuaciones, donde se destacan tres tipos de ondas: directa, reflejada y refractada, que permiten obtener las primeras llegadas a los geófonos, los cuales se grafican tal como se muestra en la **Figura N° 6-9** denominadas Dromocrónicas.

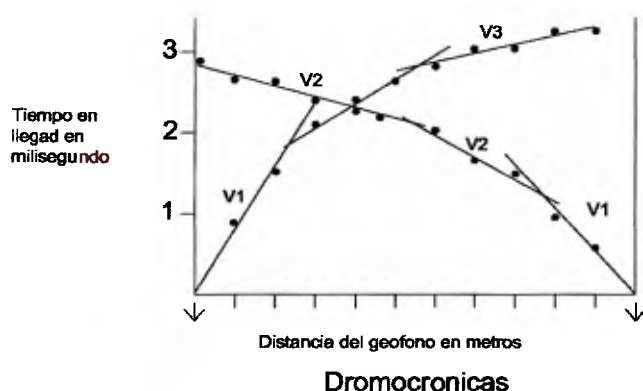
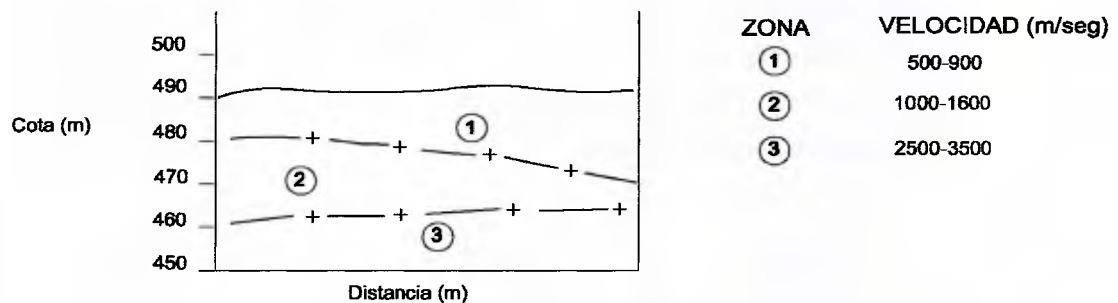


FIGURA N° 6-9

De las dromocrónicas se obtienen las velocidades de los distintos medios, estando limitado a tres capas o zonas, donde el contraste de densidad genera la variación de llegada de las ondas. Dicha densidad debe aumentar con la profundidad, de forma tal de permitir los principios geométricos de las leyes de óptica.

En la actualidad los equipos geofísicos adaptado a computadoras, permiten el procesamiento y revisión en forma inmediata después de realizada las mediciones de las ondas de llegada, pudiendo ser repetido el ensayo en caso que se requiera.

Los resultados finales se generan en un perfil geofísico donde a partir de las velocidades obtenidas se obtienen la zonificación sísmica del subsuelo que es correlacionado con distintas propiedades mecánicas. **Véase Figura N° 7-9:**



Zonificación sísmica del suelo

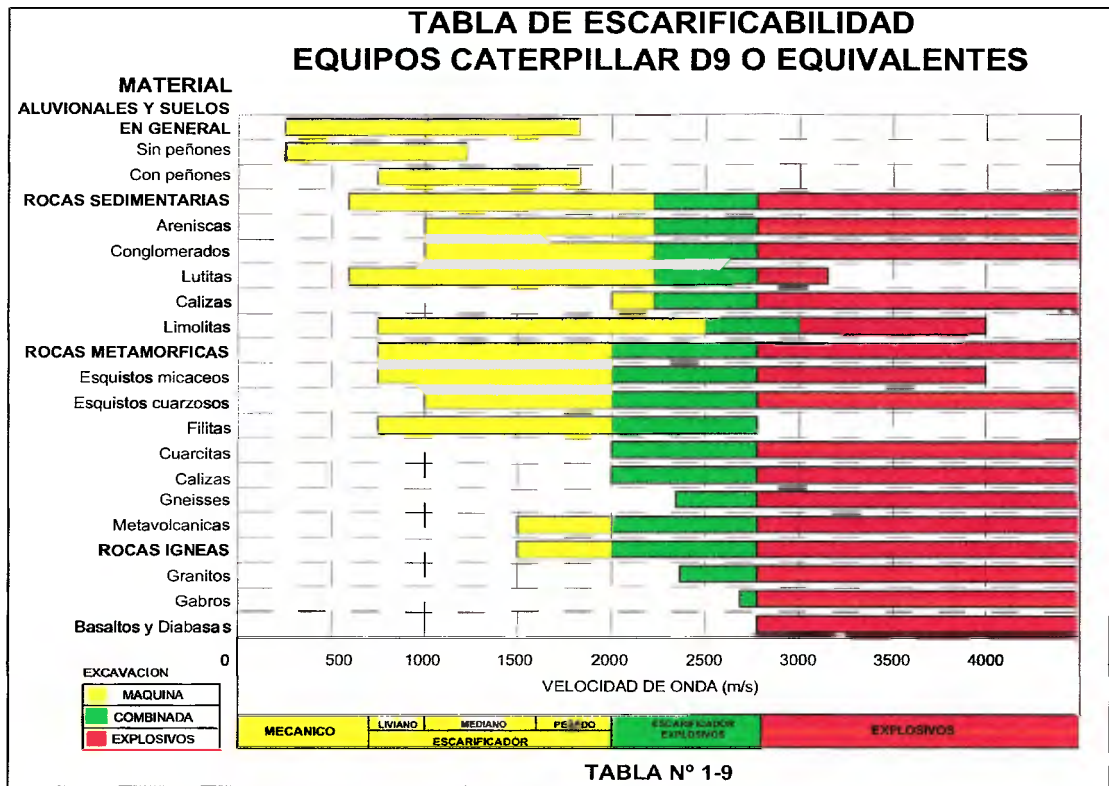
FIGURA Nº 7-9

Las velocidades sísmicas permiten establecer en conjunto con los resultados geológicos de superficie, una serie de características de los materiales a profundidad de gran utilidad en la geología aplicada. Estas deben ser consideradas como guía, requiriendo de experiencia previa y de revisión en conjunto con la ejecución de perforaciones.



Uno de los principales uso de los resultados de la geofísica están relacionados con la excavación, lo cual ha sido investigado por las empresas constructoras de equipo existiendo la **Tabla Nº 1-9** de la Caterpillar para un D-9 serie L o equivalente.

En la Tabla Nº 2-9 se presentan como guía una serie de propiedades las cuales han sido verificadas y complementadas en base a unos 100 proyectos que fueron investigados con geofísica sísmica desde los años 1970 hasta el presente.



VELOCIDAD SISMICA (m/s)	TIPO MATERIAL	EXCAVACIÓN	RQD (%)	K PERMEABILIDAD	ESTABILIDAD	OBSERVACION
400-700	ALUVIONES	MECANICOS		ALTA	MALA	▪ La estabilidad de un talud depende de la posición de la estructura geologica respecto a la inclinación. ▪ En suelos coluviales o terraza con predominio de peñones, suele presentarse alta cohesion, con estabilidad alta.
800-1100	SUELOS					
1200-1600	COLUMBIOS RD					
1600-2000	TERRAZAS RMB	LIVIANO	0	MEDIA	REGULAR	
2000-2500	RMb	MEDIANO	20			
	RMdf	PESADO	40			
	RFf	EXPLOSIVO	60-80 %	BAJA	BUENA	
3500	RFpf	EXPLOSIVO	100 %	MUY BAJA NULA	MUY BUENA	
5000	RFs					

Condiciones generales del macizo rocoso de acuerdo a la velocidad sísmica

Tabla N°2-9

La velocidad sísmica en macizos rocosos también ha sido correlacionada con distintas clasificaciones geomecánicas en general relacionadas con túneles y que serán analizados en el Capítulo N° 11.

Es importante analizar con detalle cualquier anomalía en las velocidades geofísicas que contrastan con observaciones visuales o resultados de perforaciones pudiendo presentarse los siguientes casos: 1) Roca fresca con alta recuperación y bajo fracturamiento que contrasta con velocidad sísmica baja, lo cual puede deberse a un macizo con efectos de descompresión, originados por fenómenos tectónicos o condiciones topográficas 2) Roca fresca con baja recuperación y alto fracturamiento, donde la velocidad sísmica determinada es alta, lo cual puede evidenciar mal muestreo durante la perforación 3) En general en el perímetro de túnel a profundidad media se puede destacar en rocas foliadas o estratificadas un alto fracturamiento donde la clasificación visual hace considerar el macizo muy fracturado de baja calidad. La investigación microsísmica en los hastiales ha evidenciado que el alto fracturamiento puede estar relacionado a un fenómeno local en el perímetro de la excavación, destacándose por la alta velocidad sísmica a poca profundidad un macizo de alta competencia.

9.5 METODO DE RESISTIVIDAD ELECTRICA

El método de resistividad eléctrica se base en la penetración de una corriente eléctrica introducida artificialmente desde la superficie hacia el subsuelo, Δ donde la caída de las líneas de corriente depende del medio investigado. En general el dispositivo típico de resistividad se muestra en la Figura N° 8-9 constituido por un generador que induce líneas de corriente y un voltímetro que mide la caída de potencial a través del medio.

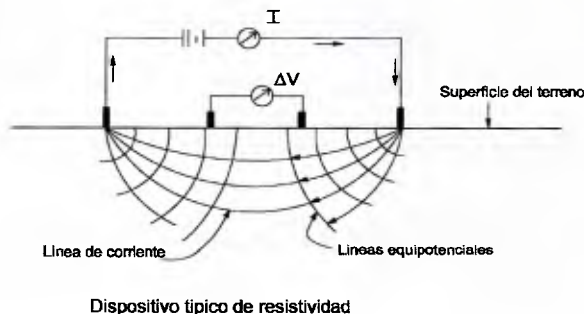


FIGURA N° 8-9

Un ejemplo del uso del método lo podemos visualizar si en el centro del dibujo colocamos una masa de carbón cuya conductividad es nula por lo cual $\Delta V = 0$. Si en el centro colocamos una masa de hierro la conductividad será muy alta, proporcional a la diferencia de potencial.

El método de resistividad se fundamentó en la ley de Ohm, donde la intensidad (I) de un flujo de corriente en un conductor es proporcional a la diferencia de potencial (ΔV) causante del flujo, multiplicado por una constante que se llama resistencia R . La formula sería $\Delta V = RI$.

La resistencia en un medio poroso al paso de corriente es inversamente proporcional a su conductividad, denominado como resistividad expresado en ohm-m, donde los factores que la afectan son las siguientes:

- Composición mineralógica del medio
- Porosidad y saturación del medio
- Conductividad del fluido que ocupa los espacios vacíos

La resistividad en suelos secos y rocas es alta, en suelos arcillosos saturados es baja, y en suelos arenosos saturados moderada. Los valores de resistividad en unidades de 10^3 ohm/cm, representativos, serían de 10 a 50 en materiales arcillosos, 100 a 500 arenas y gravas, y mayor a 500 para rocas. En presencia de agua salina la resistividad es muy baja.

Los dispositivos de medición, constituido por 4 electrodos, presentan configuración variable, pudiendo existir una separación constante entre electrodos, denominado Dispositivos Wenner, o una mayor separación en los dispositivos de corriente denominado Schlumberger, pero en general el conjunto se mueve a lo largo de la superficie, manteniendo un perfil de investigación o una profundidad constante, obteniendo los denominados Perfiles de Resistividad.

Otro sistema de medición lo constituye el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en el cual se van separando progresivamente los electrodos de corriente, manteniendo la separación de los electrodos de medición de voltaje, donde se obtiene una curva de resistividad aparente con la profundidad. Dichas curvas requieren de una serie de

métodos de interpretación ya sea por medios de ábaco o analíticamente, obteniéndose curvas similares a las que se muestran en la **Figura N° 9-9**

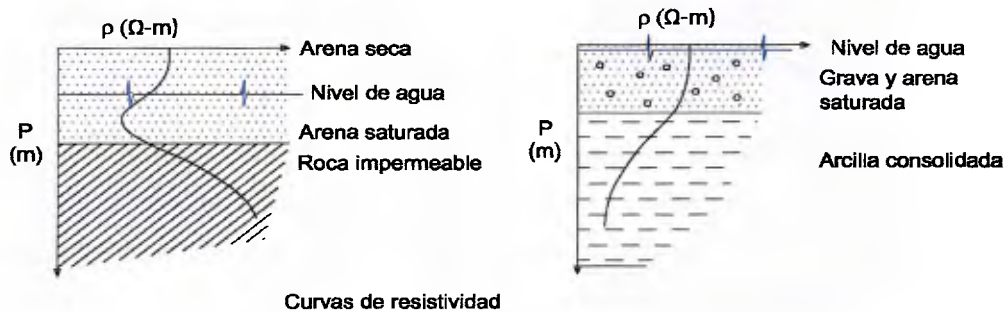


FIGURA N°9-9

En general los métodos de resistividad están muy relacionados con el estudio de agua subterránea, así como en caso de acuífero cercano a la línea de mar determinando la llamada cuña salina, la cual contaminaría los acuíferos.

9.6 ETAPAS EN LA EXPLORACION DEL SUBSUELO

Las exploraciones del subsuelo dependiendo de la magnitud de la obra pueden ser

Traslado de equipo de perforación con helicóptero



realizadas en base a un proyecto final, como en el caso de edificaciones, o en el caso de presas, túneles y autopistas por etapas, las exploraciones tienen relación con la etapa respectiva de la obra, pudiendo considerar preliminar, anteproyecto o básica y proyecto. En la etapa preliminar, donde se combina los costos de inversión de la obra e conjunto con la rentabilidad, requieren que los profesionales involucrados en los aspectos geológicos evalúen los problemas geológicos de las distintas alternativas, cuya solución y costo

debe ser garantizada en la etapa posteriores del proyecto de la obra.

Por lo anterior la investigación del sub-suelo en las distintas etapas debe ser planificada de acuerdo a los resultados de la interpretación geomorfológica y del levantamiento geológico de superficie el cual deberá contar con base topográfica

adecuada. De acuerdo a la escala de dicha base el levantamiento geológico deberá adaptarse tanto en número de observaciones como detalles de las distintas estructuras geológicas. En un plano topográfico a escala 1:5000, un área de un (1) kilómetro cuadrado, una interpretación adecuada de la geología se podrá obtener con unas 20 observaciones, en cambio a una escala 1:1000, se requerirán más de 200 observaciones. Para el caso de planos a escala 1:500 y 1:250, la geología de superficie deberá cubrir en forma continua el área de topografía.



En las grandes obras de ingeniería para la etapa de anteproyecto se construyen vías de acceso, lo cual facilitara la movilidad de equipo y personal. Las labores de investigación del sub-suelo pueden comenzar con métodos geofísicos sísmicos de refracción, combinados con perforaciones. El número de perforaciones dependerán de las distintas partes de la obra que para el caso de un sitio de presa, se debe tener en cuenta el aliviadero, toma, obra de desvío. El numero de perforaciones se incrementara de acuerdo a la etapa, pudiendo alcanzar unas cinco (5) por hectárea, cuya profundidad de investigación no será menor a $\frac{2}{3}$ de la altura de la presa, siempre que las pruebas de permeabilidad en los últimos metros indican valores del orden de 1 Lugeon, donde en caso contrario se requiere profundizar las perforaciones.

En los estudios preliminares de grandes obras como represas, túneles o autopista, la accesibilidad puede ser un primer obstáculo, donde el transporte de equipos de perforación constituye una limitación que requiere logísticas costosas a base de vías de acceso y/o transporte aéreo. Los resultados basados con un número limitado de perforaciones en una primera etapa de investigación, puede ser ampliada la información mediante investigación geofísica, donde los equipos son fácilmente transportados por caminos a pie o picas, constituyendo la mejor alternativa en selvas o relieve agreste.

LOS DATOS GEOLÓGICOS DE CAMPO

La información geológica de superficie debe ser obtenida teniendo como base el conocimiento de la obra de ingeniería que se proyecta, con una revisión previa de las condiciones geomorfológicas del área y del entendimiento de la solicitud a que será sometido el macizo rocoso, ya sea por excavaciones superficiales y/o subterráneas.

10.1 INTRODUCCIÓN

La toma de información geológica de campo es obtenida por distintos especialistas en forma muy personal, la cual depende de la experiencia y de la obra de Ingeniería prevista. Tanto en excavaciones en la superficie como en túneles, todos los métodos de sostenimiento y estabilidad, están relacionados con el conocimiento adecuado del macizo rocoso, con métodos que van desde la identificación del aspecto visual del macizo con un valor del 1 a 100, a otros donde se evalúan una serie de parámetros principalmente relacionados con la resistencia de la roca intacta y el fracturamiento, todos ellos con el mejor criterio del especialista. Durante la recolección de información geológica de campo es importante ir colocando en borrador sobre los planos topográficos base, dicha información de forma tal de detallar cualquier cambio, ya sea litológico o estructural, que pueda ser complementado con información adicional.

La obtención de los datos geológicos debe de estar relacionada con la obra en investigación, en el caso de una obra de embalse, la estanquidad del vaso de almacenamiento controlado por la presencia de calizas y fenómenos de disolución deben ser investigado, pudiendo la magnitud de los problemas descartar la factibilidad de la obra.

En caso de túneles con grandes coberturas la investigación geológica requiere de amplias áreas en superficie hacia ambos lados del eje, donde las condiciones a profundidad puedan ser interpretadas a partir de modelos geológicos que correlacionen dichos datos.

10.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA

La información geológica puede ser obtenida mediante la identificación de distintos puntos de observación localizados en la base topográfica y descritos mediante planillas donde se involucre la información geológica tabuladas para la cuantificación de modelos geológico- geotécnico, lo cual permita al proyectista la evaluación de estabilidad y obras de confinamiento requeridas.

La toma de información geológica debe ser planificada de acuerdo a la obra y a la etapa del proyecto, lo cual dependerá de la escala de los planos. En planos a escala 1:100.000 donde un (1) centímetro en el papel representa un (1) kilometro, la información geológica debe ser representativa del área y la litología debe ser asociada con el nombre de formaciones geológicas. Cuando la escala topográfica es más detallada, la información geológica abarca detalles litológicos y estructurales que requieren un orden en la toma de información.

En general la información geológica de los distintos puntos de observación, requieren de un orden en la descripción, lo cual dependerá de los aspectos litológicos y estructurales. Como modo de ejemplo se muestra la Planilla Integral en la **Figura N° 1-10**, que se identifica lo siguiente:

- Obra y localización. Nombre de la obra y su localidad
- Punto de observación. Identificación del punto y fecha. Coordenadas GPS.
- Ubicación. Pudiendo estar localizado en un talud de corte, cauce de quebrada o cualquier sitio que requiera ser identificado.
- Esquema. Donde se muestra en forma esquemática la localización del punto de observación.
- Descripción. Se describe el afloramiento, en donde se resume las características de las rocas, la presencia de planos de debilidad, composición, así como cualquier aspecto de interés.

INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE CAMPO																																																																																																	
OBRA: _____						PUNTO DE OBSERVACIÓN Nº _____			FECHA: _____																																																																																								
COORDENADAS (GPS) N: _____ E: _____			UBICACIÓN TALUD CORTE _____ CAUCE QDA. _____ OTROS _____			DESCRIPCIÓN: _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____																																																																																											
A LITOLOGÍA TPO DE ROCA _____			B ESPESOR DE CAPA (cm) < 5 5-10 10-20 20-50 50-100 >100 <table border="1" style="width: 100%; height: 40px; border-collapse: collapse;"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>																																																																																														
C METEORIZACIÓN Fresco _____ METEORIZADO _____ DESCOMPUESTO _____			D PLANOS PRINCIPALES ESTRATIFICACIÓN O FOLIACIÓN _____ RUMBO _____ BUZAMIENTO _____																																																																																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th rowspan="2">RUMBO</th> <th rowspan="2">BUZAMIENTO</th> <th colspan="2">PERSISTENCIA (m)</th> <th colspan="3">FRECUENCIA</th> <th rowspan="2">ABERTURA (mm)</th> <th colspan="3">RELLENO</th> <th colspan="3">RUGOSIDAD</th> </tr> <tr> <th>ANCHO</th> <th>LONG.</th> <th>X</th> <th>Y</th> <th>Z</th> <th>S/R</th> <th>S</th> <th>C</th> <th>A</th> <th>M</th> <th>L</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>													RUMBO	BUZAMIENTO	PERSISTENCIA (m)		FRECUENCIA			ABERTURA (mm)	RELLENO			RUGOSIDAD			ANCHO	LONG.	X	Y	Z	S/R	S	C	A	M	L	1															2															3															4														
	RUMBO	BUZAMIENTO	PERSISTENCIA (m)		FRECUENCIA			ABERTURA (mm)	RELLENO						RUGOSIDAD																																																																																		
			ANCHO	LONG.	X	Y	Z		S/R	S	C	A	M	L																																																																																			
1																																																																																																	
2																																																																																																	
3																																																																																																	
4																																																																																																	
F RESISTENCIA DE ROCA INTACTA RESISTENCIA AL MARTILLO (Nº GOLPES): <input type="checkbox"/> 1-2 BLANDA <input type="checkbox"/> 3-5 MEDIANAMENTE DURA <input type="checkbox"/> 6-8 DURA <input type="checkbox"/> >10 MUY DURA									VALOR DEL ESCLERÓMETRO (Kg/cm²) 			OBSERVACIONES: _____ _____ _____ _____ _____																																																																																					
G AGUA SUBTERRÁNEA MANANTIALES: SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>									H CALIDAD DEL AFLORAMIENTO (1 A 10) <table border="1" style="width: 100%; height: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: red;">1</td> <td style="background-color: red;">2</td> <td style="background-color: red;">3</td> <td style="background-color: orange;">4</td> <td style="background-color: orange;">5</td> <td style="background-color: yellow;">6</td> <td style="background-color: yellow;">7</td> <td style="background-color: green;">8</td> <td style="background-color: green;">9</td> <td style="background-color: green;">10</td> </tr> </table>						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																								
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>S/R SIN RELLENO</td> <td>A RUGOSO</td> <td>F FRESCA</td> </tr> <tr> <td>S ARENOSO</td> <td>M RUG. MEDIA</td> <td>M METEORIZADA</td> </tr> <tr> <td>C ARCILLOSO</td> <td>L LISA</td> <td>D DESCOMPUESTA</td> </tr> </table>									S/R SIN RELLENO	A RUGOSO	F FRESCA	S ARENOSO	M RUG. MEDIA	M METEORIZADA	C ARCILLOSO	L LISA	D DESCOMPUESTA	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #f0f0f0;">DESCOMPUESTO MUY FRACTURADO</td> <td style="background-color: #f0f0f0;">METEORIZADO FRACTURADO</td> <td style="background-color: #f0f0f0;">FRESCO FRACTURADO</td> <td style="background-color: #f0f0f0;">ROCA SANA</td> </tr> </table>			DESCOMPUESTO MUY FRACTURADO	METEORIZADO FRACTURADO	FRESCO FRACTURADO	ROCA SANA	FOTOGRAFÍAS Nº FOTO: _____ _____ _____ _____ _____																																																																								
S/R SIN RELLENO	A RUGOSO	F FRESCA																																																																																															
S ARENOSO	M RUG. MEDIA	M METEORIZADA																																																																																															
C ARCILLOSO	L LISA	D DESCOMPUESTA																																																																																															
DESCOMPUESTO MUY FRACTURADO	METEORIZADO FRACTURADO	FRESCO FRACTURADO	ROCA SANA																																																																																														

FIGURA Nº 1-10

Posteriormente se identifican seis (6) casillas designadas con las letras desde la A hasta la F, en las cuales se abarcan los aspectos: litológicos, Meteorización, Foliación o Estratificación, Diaclasas, Resistencia al Martillo y Agua Subterránea.

En cada una de las casillas se abarcaría lo siguiente:

A.- **Litología.** Abarca las distintas litologías que conforman el afloramiento, debiendo ser cuantificado los porcentajes del tipo de roca, los cuales pueden ser identificadas con una designación A1, A2, A3, A4.....etc, así como el porcentaje de cada una de las litologías en el punto de observación. Las distintas litologías aflorante dependen del tipo de roca, las cuales se muestran como modelo en la Figura N° 2-10.

Rocas sedimentarias			Rocas metamórficas			Rocas ígneas		
A	LITOLOGIA	%	A	LITOLOGIA	%	A	LITOLOGIA	%
	ARENISCAS			GNEIS			GRANITO	
	LIMOLITAS			ESQUISTOS			GRANODIORITA	
	LUTITAS			FILITAS				
	OTROS							

FIGURA N° 2-10

B.- **Espesor de Capa.** Constituye un factor de control del afloramiento en rocas sedimentarias y metamórficas el cual corresponde respectivamente al espesor predominante de capa o paquetes de foliación, donde los planos continuos que los limitan poseen un carácter friccionante, sin cohesión. En una secuencia sedimentaria las capas de areniscas pueden poseer espesores de 1,0 m, o de 10 centímetros con intercalaciones de lutitas de 10 centímetros, donde el comportamiento a flexión dependerá de la disposición de dicha secuencia a las solicitaciones, tal como se muestra en la **Figura N° 3-10**.

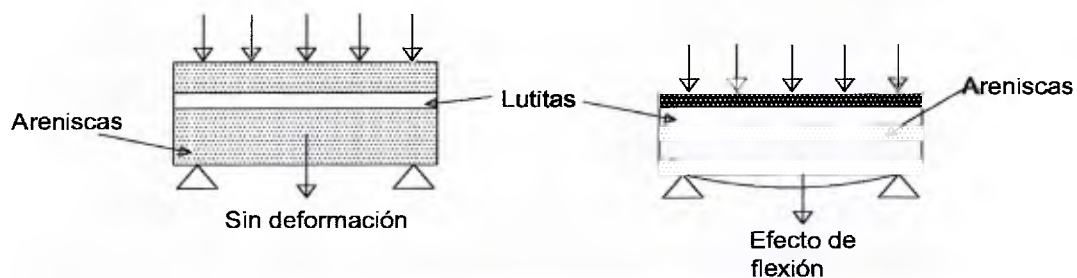


FIGURA N° 3-10

El espesor de capa se presenta a continuación del cuadro de la litología, donde se subdividen dicho espesor en seis (6) intervalos. Véase Figura N° 4-10.

B	ESPESOR DE CAPA (cms)					
	< 5	5-10	10-20	20-50	50-100	>100

FIGURA N° 4-10

C.- **Rumbo y Buzamiento de Estratificación o Foliación.** Se señala el rumbo y buzamiento de las capas de la secuencia de rocas sedimentarias. En el caso de rocas metamórficas debido, en general, a la forma ondulante de los planos de esquistosidad, es importante tomar el rumbo predominante así como su buzamiento medio, pudiendo señalar las variaciones locales.

D.- **Meteorización.** La condición de meteorización en el afloramiento se encuentra señalada en una escala indicativa en base a diez (10) puntos la cual se muestra en forma gráfica en una banda de colores, y de acuerdo a un puntaje en cinco (5) categoría. Véase Figura N° 5-10.

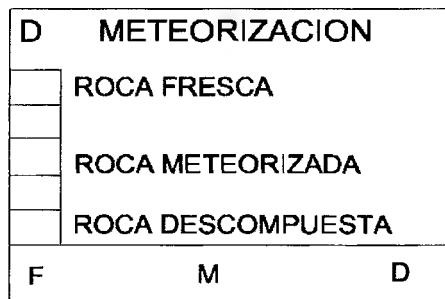


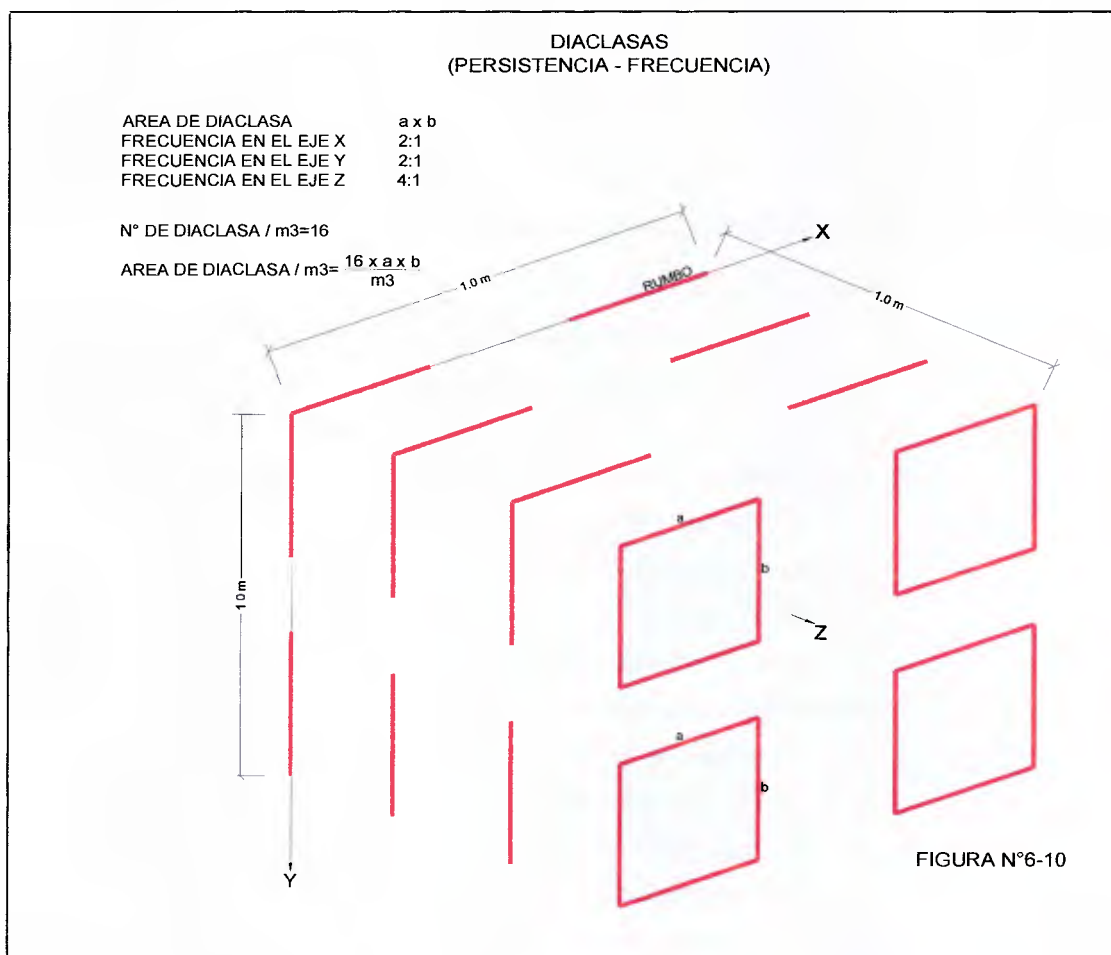
FIGURA N° 5-10

E.- **Diaclasas.** El fracturamiento en macizos rocosos constituye el factor más importante en la clasificación del macizo rocoso, por lo cual la toma de datos debe ser realizada en forma detallada, planteándose que cada uno de los sistemas de diaclasas sea identificada en la forma siguiente:

- 1) Rumbo y buzamiento
- 2) Desarrollo o persistencia, cuya medida se relaciona con la longitud del plano de diaclasa, no tomándose en cuenta el área, para lo cual se requiere de la medida de su longitud en el plano horizontal y su altura en el plano vertical.
- 3) Frecuencia de cada diaclasas debe ser relacionada con la cantidad de veces que se repitan las diaclasas en una unidad de volumen, pudiendo tomarse como ejemplo (1) metro cúbico (m^3) de macizo rocoso. En la Figura N° 6-10, se muestra un modelo tridimensional de acuerdo a los ejes **X, Y y Z**, en donde la medida según el eje **X** coincide con el rumbo de las diaclasas. El área de la diaclasa es axb , la cual se repite a lo largo del eje **X** dos (2) veces, al igual que en el eje **Z**, y en el eje **Y** cuatro (4) veces, por lo tanto el numero de diaclasa por m^3 será de 16, cuyo numero multiplicado por el área nos daría el área de diaclasa por m^3 . En caso de diaclasas con frecuencia a más de 1 m se colocará en forma de fracción $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, lo cual indica una cada 2,0 m o una cada 4 m, respectivamente.
- 4) Abertura, se medirá la separación entre los planos que limitan las diaclasas expresadas en milímetros. Es importante destacar que la mayor parte de afloramientos en taludes de excavaciones, las diaclasas se abren ya que el

macizo puede estar sometido a fenómenos de descompresión, lo cual no es representativo del estado de tensión.

- 5) Relleno, en el caso que exista, será identificado su carácter sea arcilloso o arenoso, así mismo si no estar rellena será señalada en la casilla S/R.
- 6) Rugosidad, en donde se indicarán en la casilla correspondiente si la superficie de las diaclasas se presenta lisa, con una rugosidad media o rugosa.



F.- Resistencia al Martillo. Una forma de determinar la resistencia en campo de la roca intacta en un afloramiento es mediante el golpeteo de un martillo de geólogo, así como su sonido al impacto, estando clasificada en cinco valores: 1 a 2 golpes blanda, 3 a 5 golpes mediante dura, de 6 a 8 golpes dura y más de 10 golpes muy

dura, esta última con un sonido agudo al impacto. Es importante que el impacto sea frontal a la superficie del afloramiento y su medición en función de la profundidad destruida.

En campo también se puede obtener fácilmente el valor de resistencia con el Esclerómetro, realizando un promedio de medida en un área de unos 10 x 10 centímetros, debiendo ser realizado el ensayo en superficies limpias de la roca.

G.- Agua Subterránea. En algunos sitios se pueden observar manantiales así como flujo de agua en la superficie de taludes de corte, los cuales deben ser indicado en el plano geológico, poniendo en evidencia la presencia de una mesa de agua o flujo por control estructural o litológico.

10.3 EFECTO DE SOLICITACION EN EL MACIZO

En la evaluación de las condiciones geológicas del macizo rocoso, se debe tener muy en cuenta las solicitaciones o esfuerzos que será sometido el macizo rocoso. A continuación algunos ejemplos para visualizar la importancia de la solicitación.

Ejemplo N° 1. Se proyecta un corte en trinchera, controlado por una secuencia de areniscas duras, en capas de 1 a 2 m de espesor, con intervalos delgados de lutitas de 5 centímetros con un perfil de meteorización de poco desarrollo. Fracturamiento moderado con 2 a 3 sistemas de diaclasas sub-verticales.

El diseño de talud de corte en las condiciones geológicas anteriores, donde los planos continuos de estratificación controlan la resistencia del macizo rocoso, se puede presentar en general bajo dos condiciones siempre que el rumbo sea paralelo al eje de la vía, tal como se evidencia en la Figura N° 7-10.

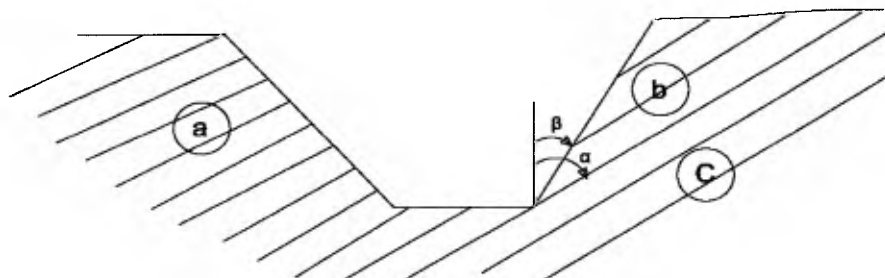


FIGURA N° 7-10

En el lado izquierdo de la figura, se destaca una condición geológica de alta resistencia a la sollicitación, en cambio en el talud del lado B, el macizo rocoso por encima del ángulo α posee baja resistencia al corte. Si en el mismo lado consideramos un talud de corte con pendiente igual α el macizo rocoso tendrá una resistencia mayor tal que garantiza su estabilidad.

Ejemplo N° 2. Excavación de un túnel en una secuencia de capas de areniscas de 15 a 20 centímetros de espesor, fracturamiento moderado sub-vertical, donde el rumbo las capas se encuentra perpendicular al alineamiento de túnel. Se requiere construir un túnel de 15 m de diámetro y su exploración se plantea con un túnel piloto de tres (3) metros de diámetro.

En la Figura N° 8-10 se muestra la relación entre el diámetro del túnel de exploración y el definitivo con respecto al espesor de capa resultando valores de 1 a 5, donde los problemas de excavación y sostenimiento se puede considerar como exponenciales en el túnel de mayor diámetro en comparación al de exploración, donde el comportamiento de deformación del macizo rocoso depende de la magnitud de la sollicitación relacionado con el ancho del túnel.

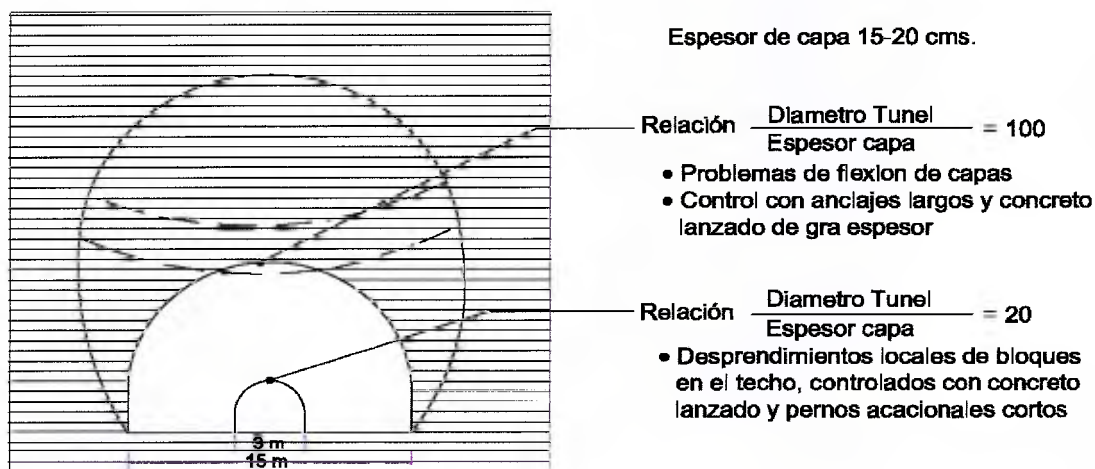


FIGURA N° 8-10

10.4 INFLUENCIA DE LAS DIACLASAS

Las diaclasas se pueden considerar como planos que afectan o debilitan el macizo rocoso, cuya única fuerza se debe a la presión de confinamiento y a la fricción entre los planos que se generan por dicha presión. Las diaclasas pueden presentar alta frecuencia, pero con discontinuidad tanto vertical como horizontal de dichos planos, donde los puentes de roca le infieren mayor resistencia al macizo que en el caso que los planos de diaclasas sean continuos. Es importante destacar que cualquier sistema de diaclasa debe ser visualizado en forma espacial en tres dimensiones, tal como se muestra en la Figura N° 9-10, lo cual puede ser una tarea muy difícil de inferir y estimar, dada la dificultad de apreciar todas las caras del macizo.

Una forma de cuantificar el área de planos de diaclasas en un volumen determinado de masa de roca, puede ser relacionado con plano continuos que cortan un bloque de un (1) m³, donde la relación sería metros cuadrados de planos de diaclasas / un metro cúbico, lo cual se esquematiza en la Figura N° 8-10.

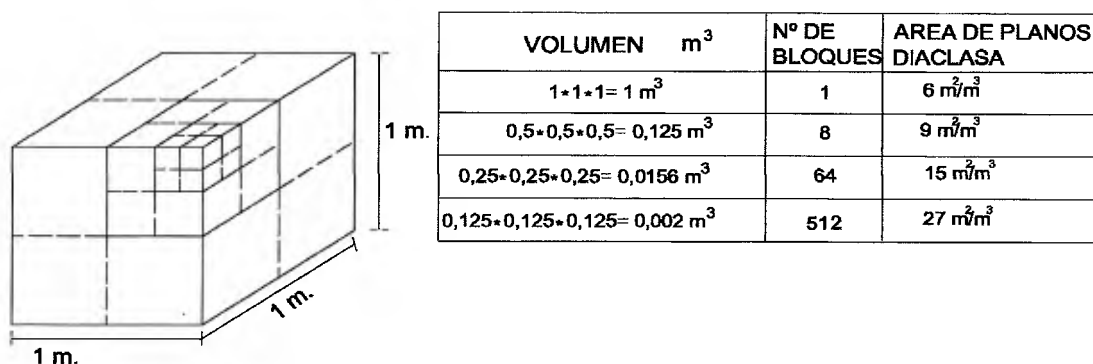


FIGURA N° 9-10

En general podemos indicar que un bloque de roca de 1 m³ debe estar limitado por 6 m² de área de diaclasas, así mismo 64 bloques de 0,25 x 0,25 x 0,25 m. están divididos por 15 m² de área de diaclasas. Así mismo para dimensiones mayores de bloque se puede tener la relación del área de diaclasas en un (1) metro cúbico, con lo cual se obtendría una clasificación Área/ m³ que define el estado del fracturamiento del macizo rocoso, obteniendo lo siguiente en la **TABLA N°1-10**:

**CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO DE ACUERDO AL
ÁREA DE FRACTURA /m³**

Fracturamiento Del Macizo Rocoso	Dimensiones de Bloques (m)	Volumen de bloque(m ³)	Nº de Bloques /m ³	Área que delimita la dimensión del bloque \geq al m ³	Área que delimita los bloques contenidos en un volumen \leq 1m ³	Área/m ³
Sano	8 x 8 x 8	512	1/512	384m ²		0,75
Escaso Fracturamiento	4 x 4 x 4	64	1/64	96 m ²		1,5
Poco Fracturado	2 x 2 x 2	8	1/8	24 m ²		3
Fracturamiento Medio	1 x 1 x 1	1	1	6 m ²	6 m ²	6
Fracturado	0,5x 0,5 x 0,5	0,13	8		9 m ²	9
Muy Fracturado	0,25x0,25x0,25	0,02	64		15 m ²	15
Triturado	0,125x0,125x0,125	0,002	512		27 m ²	27

TABLA Nº1-10

Es importante destacar que la subdivisión anterior corresponde a bloques independientes delimitados con planos continuos, pero en la naturaleza el área de diaclasas no es continua, existiendo puentes en roca que interrumpen la continuidad del plano y cuya resistencia a la compresión depende de la roca intacta.

Un ejemplo de lo anterior lo podemos aplicar a cualquier afloramiento, en el cual los sistemas de diaclasas medidas de acuerdo a la obtención de información geológica resulta lo siguiente:

Diaclasas	Desarrollo		Frecuencia (m)			<u>*Área (m²/m³)</u>
	Long. (1)	Ancho (m) (2)	X (3)	Y (4)	Z (5)	
D-1	0.15	0.10	5	10	6	4.5
D-2	0.80	0.50	1	3	1	1.2
D-3	0.30	0.40	2	6	3	<u>4.32</u>
						10,02

*Producto (1) x (2) x (3) x (4) x (5)

El sistema X, Y, Z es independiente para cada sistema de diaclasas, donde el eje X corresponde al rumbo de dicha diaclasas. El macizo en el ejemplo anterior, puede considerarse como fracturado.

10.5 COMENTARIOS

La información geológica de superficie obtenida mediante el denominado **LEVANTAMIENTO GEOLOGICO**, se considera la base para el entendimiento adecuado de las condiciones geotécnicas de una obra y el sustento de las siguientes etapas de la Ingeniería. Aunque se separa en especialidades: Geología y Geotecnia, la interrelación entre ambas constituye la mejor solución para las obras de ingeniería civiles.

El área del Levantamiento Geológico, puede abarcar zona de poca extensión como es el caso de una obra vial, donde estén contempladas excavaciones a cielo abierto y terraplenes, debiendo abarcar un perímetro mayor a las cresta de los taludes de corte y/o pie de terraplenes. En el caso de obras subterráneas pueden requerirse un área proporcional a la profundidad y complejidad geológica, por ejemplo para un túnel a 500 metros de profundidad la superficie podría variar entre 2 a 4 veces dicha profundidad y hacia ambos lados del eje.

La interpretación de las condiciones geológicas de las obras dependerán de la profundidad de ubicación, las cuales tendrán una gran precisión cuando se encuentran cercana a la superficie, pudiendo ser su acierto no mayor al 30% a profundidades mayores a los 500 metros, principalmente relacionados con el caso de túneles. Durante el proceso de excavación en túneles se requiere de la alimentación continua de la información geológica en el avance y su correlación con los datos obtenidos de superficie, debiendo ser adaptada la interpretación de las condiciones a encontrar en la excavación en forma permanente.

CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO

La Clasificación Geotécnica del Macizo Rocos, donde se involucran distintos factores de resistencia y fracturamiento, puede estar muy lejos de las condiciones reales de un Modelo Geotécnico, donde la resistencia y deformación del macizo rocoso depende principalmente de la orientación de las distintas estructuras geológicas con respecto a la sollicitación.

11.1 INTRODUCCIÓN

Los aspectos geológicos para el diseño de una obra de ingeniería han sido simplificados en distintas bibliografías mediante clasificaciones empíricas que facilitan al ingeniero cuantificar la resistencia del macizo rocoso. Dichas clasificaciones valoran en forma numérica a distintas propiedades geológicas, relacionadas principalmente con la resistencia de la roca intacta y las condiciones del fracturamiento, asociadas con la presencia del agua. Lo anterior permite obtener un número con el cual se clasifica el macizo como bueno, regular y malo, obteniendo valores para los cálculos requeridos. Aunque se considera con éxito en macizos rocosos similares a los modelos originales, ha sido utilizado en otros tipos de rocas distintas, principalmente en rocas sedimentarias y metamórficas, donde los planos de estratificación ó foliación constituyen características estructurales de origen, en donde la resistencia del macizo depende de la sollicitación del esfuerzo con respecto a dichos planos.

En general estas clasificaciones han sido utilizadas para túneles, pudiendo mencionar las siguientes: a) Wickham 1972, denominada RSR, b) Barton 1974, índice Q, c) Bieniawski, RMR, 1979. Otro método de clasificación publicado por Hoek (1994), es el denominado GSI de acuerdo a la definición "Geological Stregch Index", con rango numérico del 0 al 100. La valoración en los distintos parámetros fueron los resultados de mediciones geológicas, principalmente en macizos fracturados homogéneos, cuyo uso común en la actualidad se ha extendido en todo tipo de roca. A continuación se describen brevemente cada una de las clasificaciones anteriores, acompañadas de las tablas originales para su uso.

11.2 RSR (Wickham et al 1972)

Fue uno de los primeros métodos para la clasificación de macizo rocos en túneles, basado en tres términos, denominados A, B y C, con cuya suma se obtiene un valor máximo de 100, indicativo de un macizo de alta calidad.

$$RSR = A+B+C$$

El parámetro “A” corresponde a la geología del área, donde se consideran los tres tipos de roca: ígneas, sedimentarias y metamórficas, con un valor máximo de 30 para rocas masivas ígneas, disminuyendo de acuerdo a la intensidad de las estructuras de plegamientos o fallas.

El parámetro “B” depende de la influencia del diaclasado tomando en cuenta la separación media y la posición del rumbo según la dirección del eje del túnel, como la del buzamiento de acuerdo al avance, dando un valor máximo de 50.

El parámetro “C” toma en cuenta el efecto del agua, de acuerdo al caudal por metro lineal de túnel y el estado de las diaclasas, con un valor máximo de 20.

11.3- ÍNDICE Q (Barton et al 1974)

Se basa en un formula con seis (6) valores o índices, en cuya Tabla Anexa se muestra para cada uno un gran número de opciones, no fáciles de cuantificar. La formula es la siguiente:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

donde:

- | | |
|-----|--|
| RQD | Valor del “Rock Quality Designation” basado en el porcentaje de fragmentos mayores de 10 centímetros en la recuperación de núcleos. |
| Jn | Constituye el Índice de diaclasado, basado en la presencia de familias de diaclasas, con valores de 0,5 – 1 para roca masiva y de 20 para triturada. |

Jr	Índice de rugosidad con valores para diaclasas limpias discontinuas de 4 y de 0,5 para espejos de fallas o diaclasas lisas.
Ja	Índice de alteración en las paredes de las diaclasas, con valores de 0,75 – 1 en paredes sanas y 10 – 20 en milonitas arcillosas gruesas
Jw	Es un coeficiente reductos por la presencia del agua, el cual, dependiendo del flujo del agua varía entre 1 y 0.05.
SRF	Es un parámetro que depende de cuatro (4) condiciones, en las cuales se han asignado valores que deben ser analizados por el proyectista la importancia de cada uno en el macizo. Estas condiciones son las siguientes: a) presencia de zonas débiles, varía entre 2,5 y 10, b) si es roca competente de acuerdo a problemas tensionales en la roca, los valores varían entre 0,5 a 400, c) si son rocas deformables de acuerdo al flujo plástico de roca incompetente sometida a alta presión litostática, el valor varía entre 5 y 20 d) en rocas expansivas entre 5 y 15.

Los valores de Q pueden variar entre 0,001 (macizos fluyentes o inestables) y 1000 (macizos sanos).

11.4 BIENAWSKI (RMR 1979)

Toma en cuenta los siguientes parámetros.

1. Resistencia de la roca intacta, donde los valores de resistencia a la compresión simple, puede variar de 2.500 Kg/cm² a < 10 Kg/cm², con valoraciones respectivamente de 15 a 0.
2. RQD, donde entre 100 a 90% de RQD la valoración es de 20 y para valores <25% RQD la valoración es de 3.
3. Separación entre diaclasas, donde para distancia >2m la valoración es 30 y para distancia < 0,06 m la valoración es 5.
4. Condiciones de las juntas desde muy rugosas, cerradas con valores de 25, pasando a ligeramente rugosa, con abertura de 1mm, dando un valor de 12 y hasta relleno blandos y 5 mm de abertura, con valores de 0.
5. Presencia de agua, con valores de 15 para macizos secos a 0 con flujo > 125 litro/min por 10 m de túnel.

La suma de los parámetros obtiene un valor máximo de 100 y mínimo de 5. Dichos valores son corregidos de acuerdo a la orientación de diaclasas, tomando en cuenta la dirección y el buzamiento, con las asignaciones muy favorables, favorables, medias, desfavorable y muy desfavorable. Para túneles los valores de corrección varían respectivamente entre 0 a – 12 y para cimentación y taludes, respectivamente de 0 a – 25 y 0 a – 60.

Con los valores finales obtenidos, se encuentra una tabla de clasificación de cinco (5) rango de macizo rocoso, desde muy bueno (100-81) a muy malo (<20). Así mismo, se le asignan parámetros de cohesión y ángulo de rozamiento de acuerdo a la clase.

11.5 GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI)

El GSI constituye un índice de calidad del macizo rocoso, cuyo rango numérico está comprendido entre 0 y 100, fue publicado por el Dr Evert Hock en 1994. El método se basa en la clasificación a base del aspecto visual del macizo y las condiciones de la superficie de las discontinuidades. Con respecto al aspecto visual del macizo se utiliza seis (6) rangos: masivo o intacto, fracturado, muy fracturado, fracturado disturbado, desintegrado y foliado o laminado por efecto tectónico de corte. En la superficie de las discontinuidades, utiliza cinco (5) rangos, muy bueno, bueno, media, pobre y muy pobre, relacionada con la meteorización en la superficie y la presencia de relleno en los planos de fracturas.

Los distintos valores de GSI se relacionan con los parámetros de resistencia del macizo rocoso de acuerdo a los criterios de rotura introducidos por Hock – Brown (1980) para macizos rocosos fracturados.

11.6 LIMITACIONES GEOLÓGICAS PARA EL USO DE LOS METODOS EMPIRICOS.

Los distintos métodos empíricos indicados anteriormente han sido el resultado de investigaciones en general en macizos rocosos homogéneos, afectados por

fracturamiento, donde su resistencia depende de los planos de las diaclasas y la característica de dichos planos.

Para su aplicación en macizos de rocas sedimentarias o metamórficas, requieren de consideraciones particulares en los aspectos geológicos, no debiendo considerar el plano de estratificación o foliación, como diaclasas, sino que constituyen planos continuos que controlan la resistencia del macizo dependiendo de la sollicitación.

En la clasificación **RSR**, toma en cuenta en forma muy aceptada el tipo de roca de acuerdo a la clasificación según su origen, en el parámetro "A". En el parámetro B "influencia del diaclasado", considera la posición de dichos planos con respecto a la orientación del eje del túnel, lo cual se pueden relacionar con la presencia de planos continuos como los de foliación y estratificación. Es importante destacar que los distintos sistemas de diaclasas, tanto en rocas sedimentarias como metamórficas, en general forman patrones limitados su continuidad entre capas o secuencias litológicas de similar resistencia.

La clasificación de **Barton**, en rocas estratificadas o foliadas, se considera limitada, donde los planos continuos constituyen condiciones particulares en la resistencia del macizo rocoso. El parámetro SRF podría constituir el valor para cuantificar la calidad en dichos macizos estratificados o foliados, donde la presencia de capas o intervalos de roca blanda, puede ser asimilado a la presencia de zonas débiles.

En la clasificación de **Bieniawski** (1979) se puede corregir en la parte B, "ajuste de valores por la orientación de las juntas" para considerar el efecto de los planos continuos en rocas sedimentarias o metamórficas.

En la clasificación **GSI**, los esquemas originales de clasificación visual en rocas macizas de Hoek han sido mal adaptados a secuencias metamórficas foliadas, donde no es considerado la variación de resistencia del macizo de acuerdo a la sollicitación.

Los resultados de ensayos de compresión simple, en rocas metamórficas, dependerán de la posición de los planos de foliación con respecto al esfuerzo presentando una variación similar a la que se muestra en la Figura N° 1-11, donde la resistencia mayor será cuando la foliación se encuentre horizontal, menor cuando

los planos de foliación se encuentran inclinados, e intermedia cuando los planos estén verticales. Si consideramos el confinamiento lateral a los planos inclinados, teóricamente la resistencia presentará variaciones menores. Lo anterior se puede asimilar tanto en taludes de corte como en túneles donde la resistencia de la roca depende del confinamiento a la sollicitación, tal como se muestra en la Figura N° 2-11.

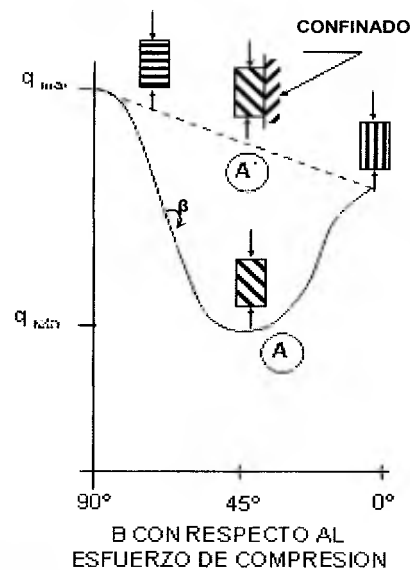


FIGURA N° 1-11

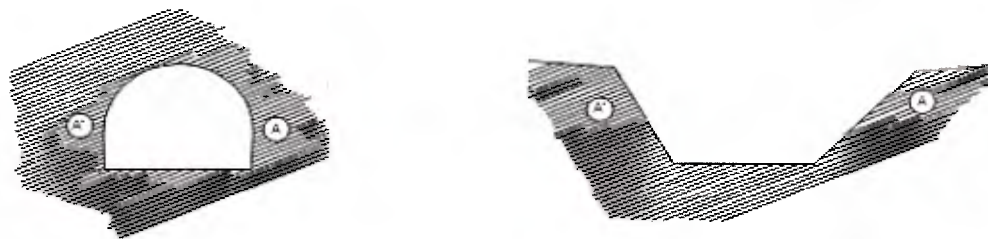


FIGURA N° 2-11

- A' planos continuos confinado
- A planos libres

11.7 FRACTURAMIENTO EN MACIZOS ROCOSOS

Tal como se ha indicado en el Capítulo 4 de Estructuras Geológicas y el Capítulo 7 de Diaclasas, Su Origen y Características, las diaclasas son defecto en el macizo debido al estado original de esfuerzos, presentando patrones bien desarrollados hacia la superficie del terreno pudiendo estar relacionadas con los procesos de meteorización, erosión y/o excavaciones. En perforaciones profundas para investigaciones de presas (50 a 200 m), se puede observar que la roca mejora con la profundidad, destacándose un menor fracturamiento, así como el cierre de las diaclasas, donde las pruebas de permeabilidad tienden a tener caudales nulos.

En una obra subterránea como lo constituye la excavación de un túnel, en su estado original el macizo rocoso se encuentra confinado, la abertura permite una liberación de esfuerzo, lo cual trae como consecuencia el desarrollo del fracturamiento en el macizo, que tenderá a disminuir rápidamente a medida que nos alejamos de ella. El efecto de tensión en el macizo con la abertura origina una liberación del confinamiento de la roca, donde el área de los planos de fisuras y diaclasas, tenderán a desarrollarse por el cambio de volumen del macizo que tiende hacia la cavidad.

Es importante tener en cuenta que los sistemas de diaclasas en superficie, formarán patrones similares en el subsuelo, con un mayor desarrollo de los planos que estén orientados paralelo o perpendicular a la cavidad o excavación. En la Figura N° 3-11 se muestra un sector en planta con distintos sistemas de diaclasas medidos en superficie, donde de acuerdo a la orientación de la excavación tenderían a mayor desarrollo unos sistemas de diaclasas que otros. Un alineamiento con dirección NE, los sistemas a y e tendrán mayor desarrollo, seguidos por b y d y sin efecto en c. Para un alineamiento con dirección NO, el mayor desarrollo será para c, seguido de b y d y con poco efecto en los sistemas a y e.

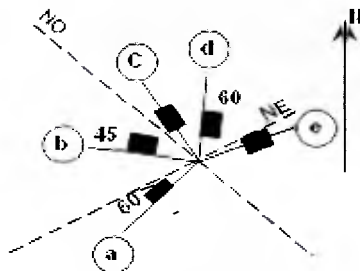


FIGURA N° 3-11

11.8 VARIACIÓN EN LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO

La calidad del macizo rocoso depende del tipo de roca y del fracturamiento. En rocas estratificadas o foliadas, la relación entre el Diámetro del Túnel y el Espesor de Capa, constituye un primer control de deformación hacia la cavidad, de acuerdo a la relación entre el Diámetro del túnel / Espesor de capa, con valores de 5, 10, 20, 50, 100, etc. Cuando la relación es 5, no debe esperarse ninguna deformación por la orientación de los planos de estratificación y/o foliación, dependiendo de los sistemas de diaclasas. Para valores mayores la deformación dependerá de la orientación de las capas (rumbo y buzamiento). Si consideramos que hacia la periferia de un túnel, los sistemas de diaclasas se encuentran abundantes debido a la abertura, dichos sistemas deben presentar menor desarrollo con el confinamiento aumentando la resistencia del macizo a medida que nos alejamos de la abertura. Dichas condiciones pueden ser verificadas fácilmente mediante investigaciones de micro-sísmica, lo cual da como resultados una zonificación en la calidad del macizo rocoso cuya aplicación en cualquier modelo de cálculo permitirá obtener un revestimiento óptimo, sin sobrediseños. En el caso de cálculo de convergencia con el programa del uso PHASES 2, si consideramos que los valores asignados para el macizo rocoso de calidad regular a malo con base a la observaciones en la periferia de la excavación, mejoran a partir de un diámetro a un macizo regular a bueno las deformaciones se reducen tal como se observa en la **Figura N°4-11**, por lo tanto disminuirán los espesores de revestimiento.

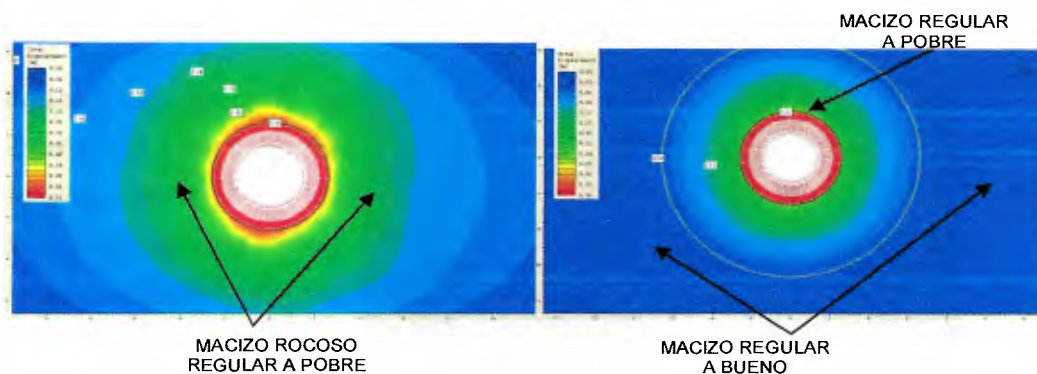


FIGURA N°4-11

La estimación de la resistencia del macizo rocoso en secuencias sedimentarias y/o metamórficas, dependerá del espesor de capa y su posición de las capas con respecto al eje del túnel, donde la resistencia del macizo varía de acuerdo a la dirección de la sollicitación de acuerdo a la abertura y/o excavación, de acuerdo a la limitación del desplazamiento de dichos planos. Así mismo, las diaclasas en general son un fenómeno que depende de la relevación de esfuerzos y cuya frecuencia y desarrollo debe variar con el confinamiento.

11.9 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN GEOTECNICO

Un sistema de clasificación geotécnico sería el resultado del análisis de las condiciones geológicas, tanto de superficie como del subsuelo, para la obra en proyecto, de forma de proporcionar una base de parámetros de acuerdo a los criterios de ruptura en un macizo rocoso para el diseño de dichas obras.

Para una obra superficial, correspondiente a la excavación de una talud de corte, es importante el perfil de meteorización, la variación de la resistencia de la roca intacta de acuerdo al grado de meteorización, la posición de los planos de estructuras geológicas con respecto a la excavación planteada, tipo de falla o

plano de deslizamiento a esperar, así como los parámetros de corte de la roca en las distintas zonas de meteorización. En el talud de corte que se muestra en la foto,



se destaca una secuencia de capas gruesas de areniscas con intervalos de lutitas y limolitas, donde el rumbo se encuentra en general paralelo al eje de la vía y buzamiento en sentido contrario a la pendiente, lo cual garantiza la estabilidad del alto talud. En la misma vía cuando el buzamiento se encuentra en el mismo sentido de la pendiente los

problemas de estabilidad tanto en las laderas como en los cortes son de grandes proporciones.



En un túnel con cobertura de más de 100 metros, no deben existir efectos de meteorización en el macizo rocoso, donde las condiciones de estabilidad para el revestimiento dependerán de la resistencia de la roca intacta, así como la posición y características de los distintos planos de estructuras geológicas con respecto al alineamiento. En el túnel Turimiquire, en la sección que se muestra en la foto, la secuencia de capas son similares a las que controlan el talud de corte de la foto anterior, en la carretera Cumana- Puerto La Cruz, pero a una profundidad de 500 metros, donde las capas se encuentran en posición casi horizontales, las cuales controlan la forma recta de la bóveda, con desprendimientos por efectos de flexión.

De acuerdo a la posición de las estructuras geológicas, con respecto a las superficies libres de excavación, debe ser evaluado el confinamiento con elementos de sostenimiento. La presencia de capas blandas dentro de la secuencia, principalmente en rocas sedimentarias, deben tenerse en cuenta, cuya resistencia rápidamente disminuye con la relevación de esfuerzos del macizo hacia la abertura. En rocas sedimentarias y metamórficas la posición de los planos de origen permite plantear un patrón de deformación, como el que ocurre en el ejemplo anterior descrito del Túnel de Turimiquire.

El sistema de clasificación geomecánica del macizo rocoso debe considerar los siguientes parámetros:

Tipo de roca, partiendo del principio básico de clasificación de las rocas según su origen en ígneas, sedimentarias y metamórficas, a las cuales deben complementarse los términos de masiva, estratificada o foliadas, destacándose espesores de capas, así como la presencia de capas o intervalos de baja resistencia como lutitas o filitas.

Estructuras geológicas, debe de estar determinada la posición de las distintas estructuras geológicas, siendo importante diferenciar los planos continuos de estratificación o foliación, de los sistemas de fracturas o diaclasas. En dichos sistemas debe ser cuantificada las propiedades de los planos tomando en cuenta su rugosidad o relleno. Así mismo el fracturamiento de una masa rocosa puede ser evaluada mediante la relación del aérea de diaclasa presente en un (1) metro cubico.

Nivel de agua subterránea, se debe determinar la presencia del nivel de agua subterránea, así mismo los efectos de subpresión que puedan originar la presencia de intervalos o capas impermeables dentro de la secuencia.

Otros, la presencia de estructuras geológicas mayores: fallas, pliegues, etc y los efectos que dichas estructuras puedan originar en las secuencias litológicas, como efectos de esfuerzos residuales.

Todo lo anterior debe ser integrado a los efecto de la sollicitación del macizo rocoso, de forma tal de cuantificar la resistencia y deformaciones a esperar. Es importante tener en cuenta los efectos de meteorización en las rocas, delimitadas según el perfil de meteorización, donde se diferencien las zonas de roca descompuesta, meteorizada y fresca, así como a variación de la resistencia de la roca intacta en las distintas zonas.

11.9.1 Valoración en Macizos Rocosos

Los parámetros anteriores pueden ser cuantificados en forma tabulada, con valoración de acuerdo a la sollicitación sobre el macizo. Como ejemplo se diseña la Tabla N° 1-11 denominada Valoración del Macizo Rcoso (VMR), donde se indican siete (7) factores, cuya suma tendrán un máximo de 100 puntos. Aunque los factores pueden variar dependiendo de la obra y de las condiciones geológicas, para el ejemplo que será aplicado en taludes de corte se describen a continuación los alcances de la valoración en cada factor como sigue:

1) Tipo de Roca

El valor máximo se considera de 20, basado en la clasificación de las rocas según su origen: ígneas, sedimentarias y metamórficas, designada respectivamente con los términos: masiva, estratificada y foliada. En las dos últimas, debido a la presencia de planos continuos se toma en cuenta el espesor de la capa, y la cementación entre dichos planos. Si se tiene un esquisto con planos de foliación de 1 centímetro, pero fuertemente cementados formando paquetes de 1 o más metro, el valor puede llegar a 20. En cambio si la cementación entre los planos es muy baja, donde predominan minerales micáceos, el valor puede ser 5 a 1. En caso de brechas de fallas, donde predominen materiales sin cementación y planos con carácter arcillosos, el valor asignado puede ser igual a 1.

2) Fracturamiento

Se plantea que el fracturamiento sea evaluado mediante una estimación del área de fractura en un metro cubico, tal como se indica en la Tabla N° 1-10 del CAPITULO 10, lo cual mediante suficiente experticia podría ser evaluado visualmente. Un macizo con 24 m² o mas de área de fractura por metro cubico, se considera medio a alto, donde predominan bloques con volumen no menor a 0,25x0,25x0,25 m. Se debe tener en cuenta que la frecuencia de diaclasa puede ser muy alta pero su importancia depende de extensión y ocupación en un (1) metro cubico. Podemos tener un sistema de diaclasa de área 10 cm x 10 cm, con frecuencia de 10:1m, pero se repite según ejes ortogonales 1 a 2 veces, por lo cual el área que ocupa por metro cubico es muy baja, donde los puentes de roca controlan la resistencia del macizo.

3) Estado de los planos de diaclasas

De la rugosidad de las paredes que limitan las diaclasas depende la fricción, lo cual se ha considerado en una escala de cinco (5), desde muy rugosa hasta lisa con espejos de fallas. La presencia de diaclasas abiertas, rellenas o no, deben ser considerados casos especiales, donde su valoración e importancia debe ser analizada en forma separadas, debiendo tener en cuenta que en su formación el macizo debió estar sometido a efectos de tensión.

4) Posición de planos continuos con respecto a la sollicitación.

La posición de los planos continuos, ya sean foliación, estratificación o diaclasas de gran desarrollo, se cuantifican en tres escalas: a) cuando los planos se encuentran favoreciendo a la estabilidad, en general con la inclinación en sentido contrario a la pendiente, b) una intermedia donde el rumbo se encuentra oblicuo al talud, y c) inestable cuando los planos se encuentran en el mismo sentido de la pendiente, no confinado por la inclinación del talud. El puntaje máximo es de 20, donde la valoración dentro del rango queda a criterio del proyectista. Para lo anterior se podrán realizar análisis previo mediante proyección estereográfica de las componentes resultantes de cuñas con respecto a la sollicitación.

5) Resistencia más baja del macizo respecto a la sollicitación.

La resistencia del macizo debe ser evaluada de acuerdo a la sollicitación, teniendo en cuenta el confinamiento y la litología. Una secuencia con predominio de lutitas y el buzamiento en sentido contrario a la pendiente del talud, tendrá una resistencia baja, que contrasta cuando aumenta en la secuencia las intercalaciones de capas de areniscas, de mayor resistencia.

En una secuencia de areniscas predominantes, con buzamiento en sentido contrario a la pendiente del talud, la resistencia global será muy alta, pero cuando el buzamiento esta en el mismo sentido de la pendiente, no confinado, la resistencia será muy baja. En caso que la pendiente del talud confine el buzamiento la resistencia aumenta. Es importante tener en cuenta los efectos de meteorización, donde se puede plantear un factor multiplicador que podría variar de acuerdo a la condición física de macizo: fresco, meteorizado y descompuesto, respectivamente de 1, 0.1, 0.01.

6) Agua Subterránea

Se cuantifica el efecto del agua subterránea con una valoración de 1 a 5, donde 1 representaría abundancia de flujo de agua y 5 presencia de goteo a seco.

7) Efecto Tectónico.

La presencia de fallas geológicas y pliegues cercanos a las obras pueden tener efecto de esfuerzos residuales o aumento local en sistemas de fracturas, lo que debe ser evaluado por especialista. La valoración tiene un puntaje máximo de 5, disminuyendo de acuerdo a la importancia de fallas y/o pliegues.

De los factores anteriores podemos resumir la siguiente influencia:

Tipo de roca.....	20 puntos
Diaclasas.....	30 puntos
Planos continuos y solitación.....	40 puntos
Aguas subterráneas y efecto tectónico...	10 puntos

Los valores de la Tabla 1-11, debe ser tomado como un ejemplo, lo cual debe ser adaptado de acuerdo a las condiciones geológicas de la obra en proyecto.

De la tabla de valorización VMR del macizo rocoso de acuerdo a la solitación se obtiene un valor con rango entre 7 y 100, pudiendo clasificarse la resistencia del macizo a la solitación y las condiciones de estabilidad en taludes de corte, de acuerdo a los siguientes rangos:

VMR (Taludes de Corte)	60-100	40-60	20-40	>20
Resistencia	Alta	Media	Baja	Muy baja
Estabilidad	Alta	Cuñas Superficiales	Deslizamientos	Flujo

Ejemplo. Un corte en trinchera, en una secuencia de areniscas y lutitas con el rumbo paralelo al eje de la vía y buzamiento de 30° hacia la izquierda de la sección, tal como se muestra en la siguiente figura. El Fracturamiento se considera medio y el estado de los planos de diaclasas con respecto a la rugosidad se considera de rugoso a liso. No hay agua en el subsuelo y está alejado de efectos tectónicos.



	(a)	(b)	(c)
1) Tipo de roca	5	5	5
2) Fracturamiento	7	7	7
3) Estado de los planos de diaclasas	7	7	7
4) Posición del plano continuo con respecto la sollicitación	20	1	10
5) Resistencia más baja a la sollicitación	15	1	10
6) Agua subterránea	5	5	5
7) Efecto tectónico	5	5	5
	64	31	49

Si la posición del plano continuo con respecto a la sollicitación se confina con la inclinación del talud sección (C), dichos valor original de 1 inestable, cambia a 20 estable, así mismo la resistencia de la roca paralela al plano estratificación aumenta, por lo cual la valoración geomecánica resulta similar (a) y (b).

11.10 MODELO GEOTÉCNICO

Una masa rocosa posee propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia y deformación que varían de acuerdo a la sollicitación, por lo tanto su análisis y entendimiento lo diferencia de los principios de mecánica de suelo donde la masa mantiene un comportamiento uniforme a distintas orientaciones de los esfuerzos.

La valoración del macizo rocoso de acuerdo a la sollicitación, debe ser claramente entendida por el Ingeniero Proyectista, de forma tal que las obras de estabilización y sostenimiento requeridos estén cónsonos con el mejoramiento que plantee a base de elementos de anclaje y/o concreto lanzado, de forma tal de obtener estabilidad a corto como a largo plazo.

Los parámetros de corte y deformación que se requieren para los cálculos de estabilidad y diseño de una obra, depende de una valoración adecuada del

macizo rocoso de acuerdo a la sollicitación, tomando en cuenta la resistencia de roca intacta y la posición de las estructuras geológicas o los componentes de acuerdo a proyección estereográfica.

La resistencia de la roca intacta debe ser considerada como una guía, lo cual en un macizo homogéneo tipo roca ígnea no depende de la orientación de la muestra al esfuerzo aplicado. En cambio en rocas sedimentarias y metamórficas, su textura de origen, con planos de capas y de foliación, respectivamente, la resistencia depende de la posición de dichos planos con respecto al esfuerzo. El efecto a mayor escala o volumen origina condiciones de esfuerzo/deformación que dependerán de la **SOLICITACIÓN** del macizo rocoso, lo cual fue planteado como criterio general de entendimiento en el **CAPITULO N°1**.

En un macizo rocoso los parámetros de diseño no pueden ser constantes, los cuales deben variar con el confinamiento. Usualmente en la determinación de dichos parámetros se le estima o calcula un número, que puede estar cuantificado de muy alto con valor 100 a muy bajo con valor 20 o menos, representando macizos cuya calidad se clasifica como muy buena o mala, respectivamente. Dicho valor permite la obtención de los parámetros para el diseño, como son fricción, cohesión y modulo de deformación. Lo anterior en la mayor parte de los casos no es representativo de las sollicitaciones, aunque resultan en general conservadores para los cálculos requeridos. En el Modelo Geotécnico, para cualquier obra es importante visualizar la deformación a esperar del macizo de acuerdo a la sollicitación inducida por la modificación del terreno requerida. Los parámetros de diseño dependerán del confinamiento de las estructuras geológicas al estado de esfuerzo inducido por dicha modificación, destacándose la variación del desarrollo y frecuencia de diaclasas con el confinamiento, lo cual involucra un aumento en su resistencia.

TABLA N° 1-11

1) TIPO DE ROCA

<u>PLANOS CONTINUOS</u>					
MASIVA	ESTRATIFICADA		FOLIADA		BRECHAS
	Espesor de Capa				
	< 1 cm	5-10 cm	20-50 cm	>1 m	
20	1	5	10	15	1

2) FRACTURAMIENTO 3) ESTADO DE LOS PLANOS DE DIACLASAS

Muy alto	1	Muy Rugoso	15
Alto	3	Rugoso	10
Medio	7	Medio	7
Bajo	10	Liso	3
Sano	15	Espejos de Fallas	1

4) POSICIÓN DE PLANOS CONTINUOS CON RESPECTO A LA SOLICITACIÓN

Favorable	20
Estabilidad Media	8
Inestable	1

5) RESISTENCIA MAS BAJA DENTRO DEL MACIZO RESPECTO A SOLICITACIÓN

> 1500 Kg/cm ²	20	
700-1200 Kg/cm ²	15	5)xF F: 1 roca fresca
200 – 600 Kg/cm ²	10	0,1 roca meteorizada
50 – 100 Kg/cm ²	5	0,01 roca descompuesta
< 10 Kg/cm ²	1	

6) AGUA SUBTERRÁNEA

Abundante	1
Media	3
Baja a media	5

7) EFFECTO TECTÓNICO

Cercana a fallas geológica	1
Presencia de pliegues	3
Sin estructuras mayores	5

**VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (VMR)
TOMANDO EN CUENTA LA SOLICITACIÓN**

Parámetros para la obtención del RSR (Wickham et al. 1972)

$$RSR = A + B + C$$

Parámetro A: Geología de la zona

Tipo de terreno	Masiva	Estructura		
		Ligeramente plegada o fallada	Moderadamente plegada o fallada	Intensamente plegada o fallada
Igneo	30	26	15	10
Sedimentario	24	20	12	8
Metamórfico	27	22	14	9

Parámetro B: Influencia del diaclasado

Separación media entre diaclasas (m.)	Dirección \perp al eje			Dirección \parallel al eje					
	Dirección de avance								
	Ambas	Según buzamiento		Contra el buzam.		Ambas			
	Buzamiento de las diaclasas principales*								
	1	2	3	2	3	1	2	3	
< 0,15	14	17	20	16	18	14	15	12	
0,15-0,30	24	26	30	20	24	24	24	20	
0,30-0,60	32	34	38	27	30	32	30	25	
0,60-1,20	40	42	44	36	39	40	37	30	
> 1,20	45	48	50	42	45	45	42	36	

- * 1 = < 20°
 2 = 20°-50°
 3 = 50°-90°

Parámetro C: Efecto del agua

Afluencia de agua prevista l/min;m.	Suma A + B					
	20-45			46-80		
	Estado de las diaclasas*					
	1	2	3	1	2	3
Nula.....	18	15	10	20	18	14
Ligera (<2,5 l/min/m).....	17	12	7	19	15	10
Media (2,5-12,5 l/min/m).....	12	9	6	18	12	8
Alta (> 12,5 l/min/m).....	8	6	5	14	10	6

- * 1 = cerradas o cementadas
 2 = ligeramente alteradas
 3 = abiertas o muy alteradas

**CLASIFICACION GEOMECANICA DE LOS MACISOS ROCOSOS DIACLASADOS
SEGUN BIENIAWSKI**

A. Parámetros de clasificación y sus valores.

1	Resistencia a la compresión σ_c	Bajo carga puntual	> 80 Kg /cm ²	40 - 80 Kg /cm ²	20 - 40 Kg /cm ²	10 - 20 Kg /cm ²	< 10 Kg /cm ²		
		A compresión simple en Kg /cm ²	> 2.000,00 Kg / cm ²	1.000,00 - 2.000,00 Kg /cm ²	500,00 - 1.000,00 Kg /cm ²	100,00 - 250,00 Kg /cm ²	100 - 250	30 - 100	10 - 30
	VALOR		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.		90 - 100 %	75 - 90 %	950 - 75 %	25 - 20 %	> 25 %		
	VALOR		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las Juntas		> 3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	50 - 300 mm	> 50 mm		
	VALOR		30	25	20	10	5		
4	CONDICION DE LAS JUNTAS		Muy rugosas sin continuidad Cerradas, roca labios dura	Ligeramente rugosa. Separación < 1mm. Roca labios dura	Ligeramente rugosa. Separación < 1mm. Roca labios blanda	Espejo de falla o relleno de espesor < 5mm, o abierta 1-5 mm continuas	Relleno blando de espesor > 5mm o abiertas > 5 mm continuas		
	VALOR		25	20	12	6	0		
5	FLUJO EN CADA 10 m DE TUNEL		NINGUNO		< 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min		
	RELACION PRESION DEL AGUA TENSION PRINCIPAL MAYOR		0		0 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	CONDICIONES MAYOR TENSION PRAL		Completamente seco		Húmedo agua intersticial	Agua a presión moderada	Agua a presión fuerte		
	VALOR		10		7	4	0		

B. Ajuste de valores por las orientaciones de las juntas.

Orientaciones del rumbo y buzamiento de las juntas	Muy favorables	favorables	regular	desfavorable	Muy desfavorables
VALOR	0	-2	-5	-10	-12

C. Determinación de la clase de macizo rocoso.

VALOR TOTAL R.M.R.	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	< 20
CLASE NUMERO	I	II	III	VI	V
DESCRIPCION	Muy bueno	bueno	Medio	Malo	Muy malo

D. Significado de las clases de macizos rocosos.

CLASE NUMERO	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento	10 años 5 m de luz	6 meses 4 m de luz	1 semana 3 m de luz	5 horas 1,5 m de luz	10 minutos para 0,5 m de luz
COHESION	> 0.30 MPa	0.20 - 0.30 MPa	0.15 - 0.20 MPa	0.10 - 0.15 MPa	10 minutos para 0.5 m de luz
ANGULO DE FRICCION	> 45°	40° - 45°	35° - 40°	30° - 35°	< 30°

Índice RMR de Bieniawski

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Geological Strength Index (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown <i>debería</i> ser aplicada solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado		CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE				
EXTRUCTURA		MUY BUENA Muy rugosa, superficies sin meteorización	BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, superficies teñidas de óxido	MEDIA Plana, moderadamente meteorizada, superficie alteradas	MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con rellenos duros o de fragmentos angulares	MUY MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con rellenos de arcilla blanca
		DISMINUCIÓN EN CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	INTACTAS O MASIVAS - rocas intactas o rocas masiva in situ con pocas discontinuidades separadas ampliamente.	90 80		N/A	N/A	N/A
	FRACTURADA.- Macizo rocoso poco perturbado consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas ortogonales de discontinuidades, muy bien unidos entre sí.		70 60			
	MUY FRACTURADA.- Macizo rocoso parcialmente Perturbado consistente de bloques angulares unidos entre sí, formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades			50		
	FRACTURADA / PERTURBADA - macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de varios sistemas de discontinuidades			40 30		
	DESINTEGRADA - macizo rocoso alternante Fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente unidos entre sí				20	
	FOLIADA/LAMINADA - macizo rocoso foliado, plegado y cizallado tectónicamente. La esquistosidad prevalece Discontinuidades, completamente carente de bloques.	N/A	N/A			10 5

GSI

Q BARTON

1. Calidad del testigo RQD (Rock Quality Designation)			RQD (%)
A	Calidad muy mala		0-25
B	Calidad mala		25-50
C	Calidad media		50-75
D	Calidad buena		75-90
E	Calidad excelente		90-100
Notas: i) Cuando se obtienen valores del RQD inferiores a 10 (incluyendo el 0), se toma un valor nominal de 10 para calcular el índice Q. ii) Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.			
2. Índice de diaclasado			J _n
A	Roca masiva, sin diaclasas o con fisuración escasa		0,5-1,0
B	Una familia de diaclasas		2
C	Una familia y algunas aleatorias		3
D	Dos familias de diaclasas		4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias		6
F	Tres familias de diaclasas		9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias		12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.		15
J	Roca triturada, terrosa		20
Notas: i) En intersecciones de túneles, se utiliza la expresión (3. J _n) ii) En las bocas de los túneles, se utiliza la expresión (2. J _n)			
3. Índice de rugosidad de las Discontinuidades			J _r
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante.			
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm			
A	Diaclasas discontinuas		4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares		3
C	Diaclasas onduladas, lisas		2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas		1,5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares		1,5
F	Diaclasas planas, lisas		1,0
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas		0,5
Notas: i) Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden.			
c) No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante.			
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad.		1,0
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad		1,0
Notas: i) Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m, se debe aumentar el índice J _r en una unidad. ii) En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor J _r = 0,5.			
4. Índice de alteración de las discontinuidades			J _a
			φ _r aprox.
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios)			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo		0,75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas.	25°-35°	1,0
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, rocas desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	2,0
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	20°-25°	3,0
E	Recubrimientos de arcillas blandas de baja fricción	8°-16°	4,0
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm (Minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, rocas desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	4,0
G	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm)	16°-24°	6,0
H	Sobreconsolidación media o baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5 mm).	12°-16°	8,0
I	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm). El valor de J _a depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas.	6°-12°	8-12

c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (Rellenos de mineral de gran espesor)

J K L	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver clases G, H y I para la descripción de las condiciones de las arcillas)	60-240	6,8, ó 8-12
M	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles.	-	5,0
N O P	Zonas o bandas continuas de arcillas, de espesor grueso (ver clases G,H e I, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	60-240	10,13 ó 13-20

Nota: Los valores expresados para los parámetros J_r y J_a se aplican a las familias de diaclasas o discontinuidades que son menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al corte (esta resistencia puede evaluarse mediante la expresión: $\tau \approx \sigma_n \cdot \tan^{-1}(J_r/J_a)$)

5. Factor de reducción por la presencia de agua		Presión de agua (kg/cm²)	J_w
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 l/min de forma localizada	< 1	1,0
B	Afluencia o presión medias, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades	1-2,5	0,66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno.	2,5-10	0,5
D	Afluencia, importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas.	2,5-10	0,33
E	Afluencia, excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo.	> 10	0,2-0,1
F	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable.	> 10	0,1-0,05

Nota: i) Los valores de las clases C, D, E y F son meramente estimativos. Si se acometen medidas de drenaje, puede incrementarse el valor de J_w .
ii) No se han considerado los problemas especiales derivados de la formación de hielo. (aplicados en otras latitudes)

6. Condiciones tensionales de la roca (Stress Reduction Factor)		SRF	
a) Las zonas débiles intersecan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando.			
A	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente	10	
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación \leq 50 m).	5	
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50 m).	2,5	
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad).	7,5	
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación \leq 50 m)	5,0	
F	Zonas de fracturas aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación > 50 m)	2,5	
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad)	5,0	

Notas: Se reducen los valores expresados del SRF entre un 25-50% si las zonas de fracturas sólo ejercen cierta influencia pero no intersecan a la excavación.

b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas		σ_2/σ_1	σ_2/σ_c	SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	> 200	< 0,01	2,5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	0,01-0,3	1
K	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales.	10-5	0,3-0,4	0,5-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas.	5-3	0,5-0,65	5-50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas.	3-2	0,65-1	50-200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas.	< 2	> 1	200-400

Notas: i) Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisotrópicos: cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 > 10$, se tomará en vez de σ_c el valor $0,5 \cdot \sigma_c$, donde σ_c es la resistencia a compresión simple, σ_1 y σ_3 son las tensiones principales mayor y menor, respectivamente y σ_2 es la tensión tangencial máxima (estimada a partir de la teoría de la elasticidad).
ii) En aquellos casos en los que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación, se sugiere aumentar el valor del factor SRF entre 2,5 y 5 unidades (véase clase H).

c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas.		σ_2/σ_c	SRF
O	Presión de deformación suave.	1-5	5-10
P	Presión de deformación intensa	> 5	10-20
v) Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades: $H > 350 \cdot Q^{1/3}$, donde γ es la densidad de la roca en g/cm³ (Singh, 1993).			

d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.			
R	Presión de expansión suave.		5-10
P	Presión de expansión intensa		10-15

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

ASPECTOS GEOLÓGICOS EN OBRAS DE INGENIERÍA

El mejor diseño geotécnico para una obra de ingeniería no es solo contar con los métodos más sofisticados de cálculo, si no con los criterios y la experiencia del especialista en el entendimiento de las condiciones geológicas que controlan la distribución de esfuerzos y de deformaciones, lo cual principalmente está relacionado con la orientación de los planos estructurales y la sollicitación del macizo rocoso.

Las obras de Ingeniería, tanto de vialidad como de embalse están relacionadas con la geología desde el planteamiento preliminar, donde los aspectos de estabilidad de laderas naturales pueden evidenciar comportamientos similares en taludes de cortes que limitaran la calzada de la vía, o problemas de estabilidad en las laderas en el perímetro al vaso de almacenamiento de una presa. El alineamiento de un túnel aunque en la mayor parte de los proyectos está obligado por los portales de salida y entrada, requiere de evaluaciones geológicas preliminares de la litología que se atravesará en la excavación y la posición de las estructuras geológicas con respecto al alineamiento. En general aunque la solución a los problemas sea un diseño de Ingeniería, sus costos y su confiabilidad en el tiempo dependen de las condiciones geológicas, siendo primordial el análisis y comparación con otras alternativas. A continuación se indica para cada una de las obras anteriores, vialidad, represas y túneles, las preguntas que debe plantearse al proyectista en conjunto con el especialista en Geología Aplicada.

12.1 VIALIDAD

En una obra vial se deben plantear las siguientes preguntas:

- El trazado escogido es el óptimo cumpliendo con las normativas de diseño vial y con condiciones geológicas de estabilidad de fácil control, o por el contrario el diseño obliga al cruce de sectores críticos de estabilidad donde se requieren obras especiales no existiendo otras alternativas.
- El producto de la excavación de los cortes pueden ser utilizados para los rellenos, sub-base y base, o se debe recurrir a sitios de préstamos, donde se encuentren.

- El diseño de los taludes de corte garantizan a mediano y largo plazo su estabilidad, o se requieran su estabilización.
- La excavación se puede realizar por medios mecánicos o requieren el uso de escarificador o explosivos.

Aunque cada obra vial está controlada por diversas condiciones geológicas, podemos resaltar algunas particulares como guía en obras futuras:

12.1.1 Caso 1. Control topográfico de diseño.

Cuando se diseña un talud de corte, las condiciones topográficas pueden facilitar su análisis de estabilidad y diseño. Un talud de corte en una ladera prolongada, debe ser objeto de evaluación detallada, pudiendo existir en el macizo rocoso fenómenos de esfuerzos residuales debido a efecto de la gravedad sobre las estructuras geológicas. Dichos esfuerzos serán menores a medida que la ladera se encuentra bisectada por cauces de quebradas, tal como se muestra en la **Figura N° 1-12**, a, b y c.

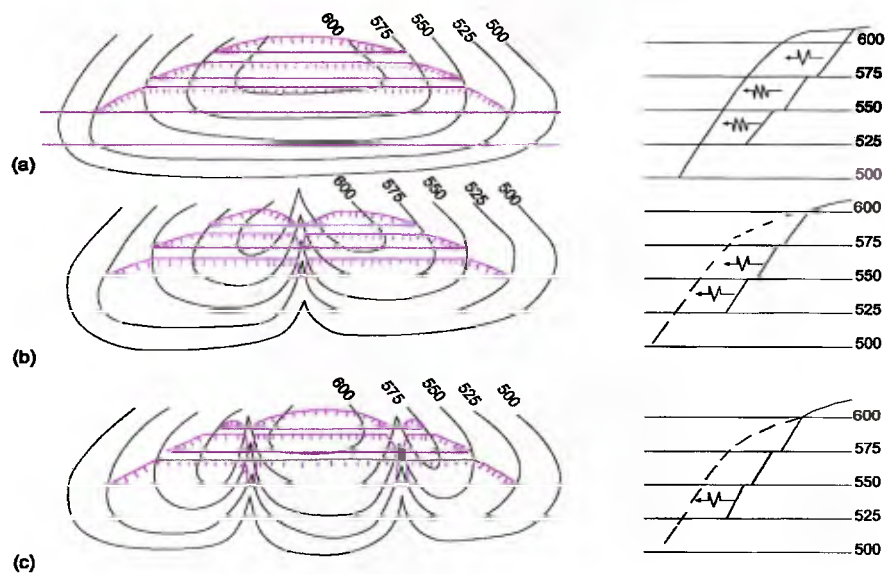


FIGURA N° 1-12

Así mismo en caso de problemas de estabilidad en el talud se tendrá mejor control en un relieve bisectado por cauces de quebradas.

12.1.2 Caso 2. Posición de planos continuos.

En un talud de corte controlado por secuencia de areniscas y lutitas, con la posición del buzamiento de las capas en el mismo sentido del corte, constituye la condición más crítica, tal como se muestra en la parte (a) de la **Figura N° 2-12**

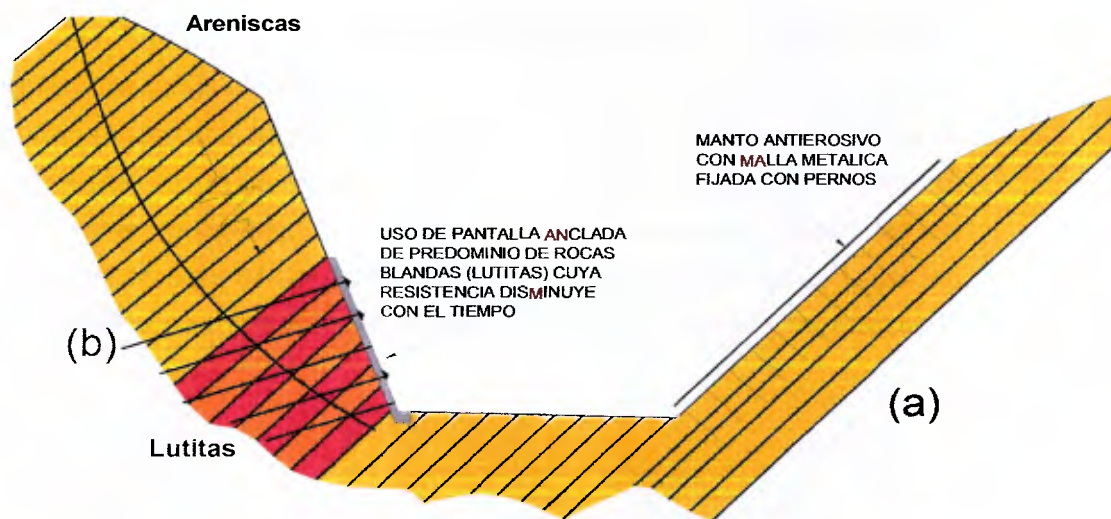


FIGURA N° 2-12



Talud de corte en la Autopista Antonio José de Sucre. Edo Sucre. Venezuela

La solución de diseño en dichas condiciones requieren de pendientes que confinen el buzamiento, tal como se observa en la foto de un talud de corte en la autopista en construcción Antonio José de Sucre en Cumana, Venezuela.

En la parte (b) de la **Figura N° 2-12** se muestra un talud de corte controlado por la misma secuencia de capas de areniscas y lutitas, pero con el buzamiento en sentido contrario a la pendiente. La presencia de lutitas hacia el pie

del talud, en las cuales el efecto de cambio de humedad puede originar la pérdida de resistencia con el tiempo así como mayor deformabilidad a los esfuerzos. Lo anterior puede originar tensión en el macizo rocoso superior de condición más rígida, originando problemas de estabilidad. Por lo cual es importante contar con pantallas de estabilización en dichas secuencias que garanticen el confinamiento de las capas e impide que avance de la meteorización. En diseño de excavaciones en rocas blandas deben tomar en cuenta en el tiempo la pérdida de resistencia de los



Talud en arcilla dura en la Autopista de Oriente, ramal Higuero, Edo Miranda, Venezuela.

materiales expuestos a las condiciones ambientales, tal como sucede en las secuencias de arcillas y arena limosas con baja litificación cuyos efectos se muestra en la foto de la Autopista de Oriente, Ramal Higuero, inaugurada el año 2007.

12.1.3 Caso 3. Fracturamiento del Macizo Rcoso.



Talud en rocas graníticas. Canal de descarga de la presa Tocomá, Edo Bolívar, Venezuela.

El uso de la proyección estereográfica es muy común en el análisis del fracturamiento en macizo rocoso, así como sus componentes hacia la superficie de taludes de corte. En las rocas sedimentarias y metamórficas, controladas por planos continuos, la posición de dichos planos puede desarrollarse superficies potenciales de deslizamiento. En rocas macizas, ígneas, los sistemas de diaclasas se pueden presentar con escasa frecuencia o con

alta densidad tal como se observa en la fotografía del canal de descarga de la presa Tocomá. En un análisis por medio de proyección estereográfica en el que se identifiquen los distintos sistemas de diaclasas, es muy importante tener en cuenta los puentes de roca, los cuales representan la cohesión del macizo, pudiendo garantizarla a profundidad con el confinamiento de la superficie del talud y alta resistencia al corte en potenciales superficie de falla. Los problemas de inestabilidad por cuña de diaclasas en un talud de corte rocoso, puede tener un efecto en el tiempo tal como se muestra en la **Figura N° 3-12**.

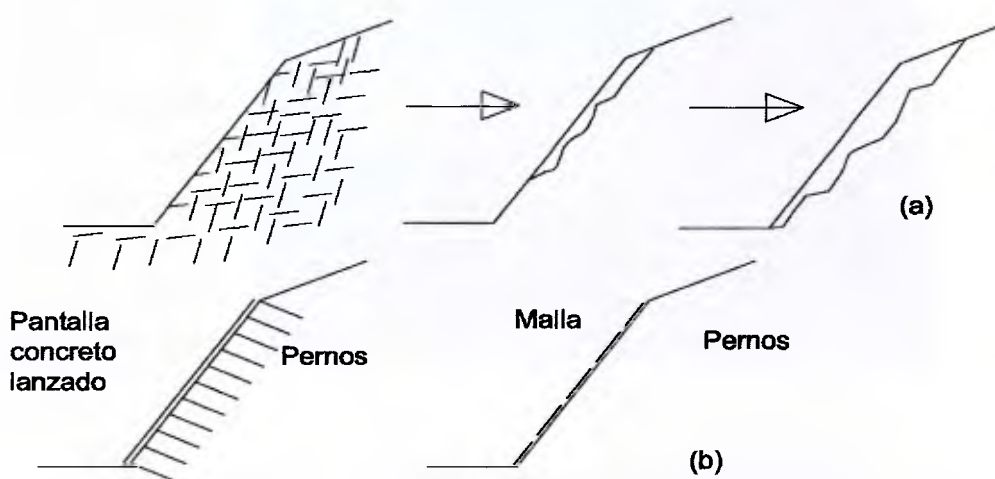


FIGURA N° 3-12

En la **Figura N° 3-12 (b)** se muestran dos alternativas para garantizar el confinamiento de los bloques de diaclasas, ya sea con pantalla de concreto lanzado o malla de alta tensión, ambas con el uso de pernos de anclajes.

12.1.4 Caso 4. Obras de Estabilización

El uso de pantallas para garantizar la estabilidad de taludes de corte, aunque aparenta un diseño sencillo donde se confina la masa a deslizarse con fuerzas externas sobre la cara del talud transmitida por anclajes con su bulbo por debajo del plano de deslizamiento, requieren de atención especial. Los parámetros de corte de los materiales involucrados en un deslizamiento están determinados por la fricción y la cohesión obtenida con ensayos hasta la falla, con deformación total.



condiciones geológico-geotécnicas, los parámetros de diseño podrían ser incrementados acorde con la deformación permitida por la obra de estabilización.

Otro factor importante en una pantalla, es el elemento de anclaje, cuya resistencia depende de la fricción, entre el bulbo de concreto y el perímetro de la perforación, de acuerdo al macizo de fijación se pueden presentar dos situaciones:

- 1) En roca muy dura, fresca, la perforación de anclajes por medios rotativos crea una superficie pulida, de baja fricción. Mediante experimentos en bulbo de 0,5 a 1,0 metros de longitud, fueron extraído cilindros de fijación de concreto a carga menores que la de diseño, por lo cual recomienda el uso de métodos de rotoperusión en rocas duras que permita una superficie de fijación rugosa
- 2) En rocas blandas arcillosas, el hueco de fijación, puede generar superficie en el perímetro de una película arcillosa, de muy baja fricción, por lo cual se puede requerir de bulbos de longitud mayor. En experiencia en lutitas anclajes de 4 a 6 m de bulbo, las pruebas de tensión no alcanzaron las cargas de trabajo de 30 Ton. En lutitas meteorizadas blandas sometidas a efectos de saturación por intercalaciones con capas de areniscas de mayor permeabilidad, originan aumento de humedad en el perímetro, ocasionando a muy corto plazo pérdida de resistencia y su falla. Las obras de estabilización son diseñadas bajo ciertas condiciones de resistencia del macizo rocoso, donde un cambio en dichas condiciones puede traer consecuencias deformaciones que afecten la obra.



12.2 OBRA DE EMBALSE

Una obra de embalse está constituida por tres (3) partes principales, que son: a) Cuenca, b) Vaso de almacenamiento y c) Sitio de presa o cierre. En la **Figura N° 4-12**, se muestra en una planta las distintas parte de una obra de embalse.

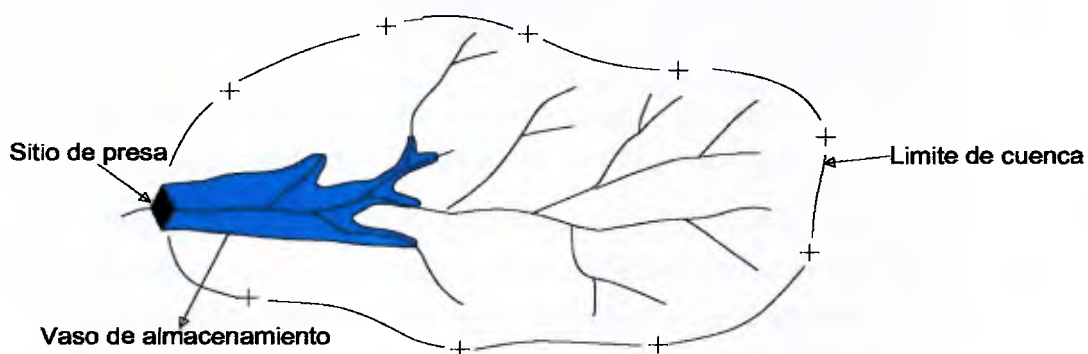


FIGURA N° 4-12

Cada una de las partes de una obra de embalse debe garantizar una serie de condiciones geológicas para el buen funcionamiento del sistema, las cuales se describen a continuación, con una serie de ejemplos.

12.2.1 Cuenca

El aspecto geológico más importante de una cuenca lo constituye la estabilidad de las laderas. En el área de la cuenca debe ser indicado los problemas de estabilidad en las laderas, su magnitud y la posibilidad de ampliarse, control, etc. Todo lo anterior está relacionado con el aporte de sedimento, de lo cual dependerá la altura de presa y de su posibilidad de almacenaje de acuerdo al llamado nivel muerto o de sedimentos en el embalse, estimado para periodos de diseños de 50 años.

Caso 1.

Un ejemplo relacionado con problemas de estabilidad geológica en la cuenca, lo constituye el embalse de Pedregal en Venezuela con una presa de 40 m de alto y 250 m de cresta, la cual para el año 1988, después de 10 años de su inauguración el vaso de almacenamientos se llenó de sedimentos quedando fuera de servicio. Parte del problema se debió a funciones operativas de limpieza por la descarga de fondo, indicado en el proyecto, con lo cual aminoraría la acumulación de sedimentos en el vaso. Aunque dichas funciones no fueron realizadas, el problema principal se relaciona con las condiciones geológicas en la cuenca.

Caso 2.

El aprovechamiento hidroeléctrico del río Santo Domingo en Venezuela, está constituido por una presa en bóveda de 70 m, cuya cuenca se encuentra limitada por un relieve abrupto montañoso. Para el control de sedimento se construyeron



posteriormente a la puerta en servicio del aprovechamiento (1973) presas de retenciones de sedimentos. Dichas presas se colmataron o fallaron, pudiendo destacar la presa sobre el río

Aracay de 14 m de alta, puesta en servicio en 1983 y que falló por desbordamiento en 1986.

Periódicamente el embalse de la presa Santo Domingo debe ser purgado mediante una descarga frontal en la bóveda de la presa cuando el sedimento se encuentra a cota de dicha descarga. Los sedimentos hacia la cola del embalse en algunas ocasiones han sido retirados con camiones. Un problema que se presenta en el trasvase de agua hacia las turbinas, es el arrastre de sedimento arenoso el cual después de la caída de 600 metros, impacta contra las aspas de las turbinas, siendo un factor importante en el desgaste de los equipos generadores.

12.2.2 Vaso de Almacenamiento



Presa de Clavellino. Edo Sucre. Venezuela

El vaso de almacenamiento debe garantizar la estanquidad del área inundable y para el caso de valles angostos debe ser evaluada la estabilidad de las laderas. La estanquidad garantiza el volumen de almacenamiento del agua, cuyas

pérdidas, están principalmente relacionadas con la presencia de calizas afectadas por fenómenos de disolución. La presa Clavellino en Venezuela, que entro en funcionamiento en 1967, requirió de un gran número de inyecciones de cemento, realizadas hasta el año 1970, para corregir fugas por la presencia de calizas con disolución en el estribo derecho.

En general la mayor parte de los problemas de estanquidad se han detectado durante las investigaciones geológicas, pero en algunos casos se presentaron sus efectos una vez construida la presa, pudiendo destacar en Venezuela, la presa de



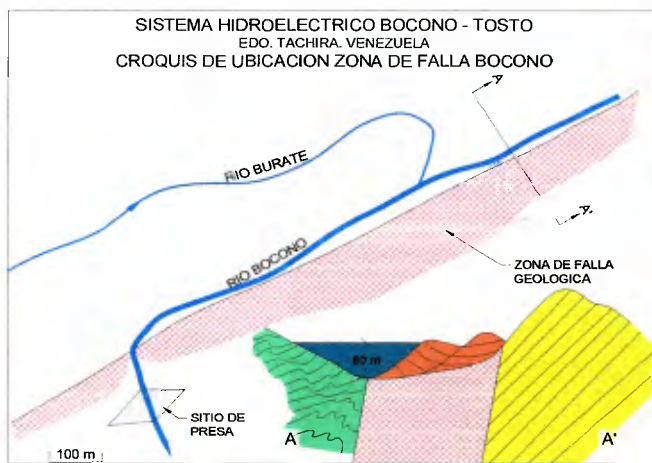
Presa de Guatamare, Isla de Margarita, Venezuela. MARN.

Guatamare en la Isla de Margarita (1955). Este embalse una vez llenado perdió bruscamente la totalidad del agua, requiriendo para el control de la fuga una pantalla de concreto tipo ICOS y el solape de la ladera con un relleno arcilloso compactado,

funcionando en la actualidad con normalidad. Otros embalse como El Zamuro en el Edo. Lara y San Francisco de Macanao en Margarita, Edo Nueva Esparta, el vaso de almacenamiento está controlado por calizas con fenómenos kársticos, lo que no ha permitido su llenado.

Los problemas de estabilidad en las laderas que limitan el vaso requieren gran importancia, principalmente a lo largo de valles estrechos y laderas de fuerte pendientes. Durante los estudios de factibilidad para el año 1972-73 en el sistema hidroeléctrico Uribante – Caparo (Edo. Táchira, Venezuela) el sitio original de la

presa principal sobre el río Uribante, la ladera izquierda del vaso de almacenamiento de más de 200 m de diferencia de cota con las divisorias, se caracteriza por una pendiente moderada, destacándose un relieve con descansos en forma escalonada y la presencia de lagunas. La interpretación de fotos aéreas evidenciaban amplios deslizamientos, lo que se corroboró en los reconocimientos de campo, donde se asociaban bloques y peñones de areniscas con gruesos intervalos de arcilla, con agrietamiento en las viviendas dispersas ubicada en la ladera. El área afectada se extiende desde el sitio de presa y hasta unos 8 kilómetros aguas arriba,



concluyendo que el llenado del embalse y la saturación de las masas deslizadas, con posible deslizamiento masivo hacia el vaso, originaría la disminución del volumen de almacenamiento o la división del vaso y/o fuerte oleaje por encima de la presa.

Otro caso interesante lo constituye el aprovechamiento hidroeléctrico Bocono-Tostós, sobre río Bocono. (Edo. Trujillo, Venezuela) donde se plantea una presa de unos 100 m de alto, la conducción del agua por túneles y una caída de unos 600 m. Durante los Estudios de Factibilidad en el año 1989 el problema se identifica en la ladera izquierda a lo largo de todo el vaso de almacenamiento, controlada por la denominada falla de Bocono, destacándose espesores de roca triturada de unos 500 m, asociada con un relieve ondulado de pendiente moderada, controlado por secuencia de areniscas y lutitas, con cabalgamiento de masas rocosas encima de la brecha de falla. La altura de la presa de unos 100 metros, generaría un área de inundación de unos 10 Kilómetros de longitud y con un ancho máximo de unos 1000 metros. La actividad sísmica del área asociada con los problemas de estabilidad, descartan la presa alta. Un nuevo planteamiento del proyecto implica el aprovechamiento del caudal existente y la caída del orden de los 600 metros, por medio de una derivación o toma para el paso de agua a través de los túneles.

12.2.3 Presa

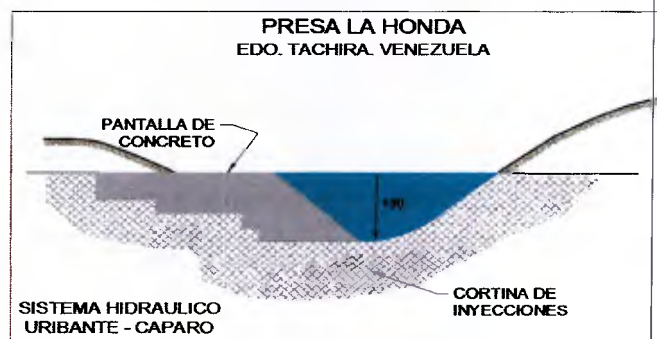
La presa constituye la obra principal de embalse, en donde se realizan la mayor investigación del subsuelo, a base de perforaciones y socavones o túneles exploratorios. El sitio de presa están relacionadas una serie de obras conexas como son: túnel de desvío, toma, descarga de fondo, aliviadero, etc. cuyo detalle de estudio se abarca con el proyecto de la presa.

El área de presa así como sus obras conexas, son objeto de un reconocimiento detallado geológico de superficie, en general con planos a escala 1:500 a 1:250, de forma tal de identificar lo siguiente: a) Litología b) Estructuras Geológicas y c) Problemas de estabilidad. Una vez obtenido un detallado panorama geológico se procede a la investigación del subsuelo combinando método geofísico de refracción y perforaciones, las cuales se planifican mediante varias etapas.



En general los problemas de un sitio de presa son evaluados en forma detallada en la etapa de proyectos y su solución es objeto de análisis detallados. Se requiere de gran control durante su construcción.

La mayor parte de los problemas en un sitio de presa y su relación con obras anexas, requieren de un asesoramiento y evaluación durante la ejecución de la obra, pudiendo presentarse problemas no previstos de difícil solución y alto costo. Ejemplo de lo anterior lo tenemos durante la construcción de la presa La Honda de 130 m de alto, de sistema Hidroeléctrico Uribante-Caparo. Durante la ejecución de la obra, se amplió la investigación del estribo izquierdo constituido por una



secuencia de areniscas, con abundante sistemas de diaclasas, frecuentemente abiertas y rellenas principalmente de arena, donde en dicho estribo se determinó su alta permeabilidad y erosionabilidad. Los ensayos con inyecciones tanto con cemento como químicas, no mostraron ningún efecto en la alta permeabilidad de la roca, lo cual obligó al diseño de una pantalla de concreto.

Generalmente en un sitio de presa la investigación continua durante la construcción, lo cual asegura que cualquier problema será detectado y solucionado, de forma tal de garantizar la estabilidad de la obra.

12.3 TÚNELES

Los túneles constituyen obras subterráneas, en las cuales se deben diferenciar dos condiciones geológicas, los ubicados en suelos constituidos por secuencias aluviales donde en general su resistencia depende del carácter friccionante o cohesivos de los materiales y los excavados en rocas, donde la litología, posición de las estructuras geológicas y la meteorización, determinan la calidad del macizo rocoso.

Por lo general los túneles en suelo se encuentran a poca profundidad, cuya investigación fácilmente se puede realizar desde la superficie con perforaciones, pudiendo densificar la información según requerimientos, para obtener la mayor confiabilidad del perfil geológico y las condiciones geomecánicas de los materiales. La tecnología actual permite el uso de tuneladores o topas (TBM) que permitan rápidamente el confinamiento definitivo de la sección excavada, lo cual aminora los efectos de deformación hacia la superficie, evitando afectar sectores poblados por el que atraviesa.

Las condiciones geológicas en los túneles pueden ser muy variable, de las cuales dependerán el diseño de los tuneladoras (TBM), debiendo ser previsto la dureza de la roca y las estructuras geológicas, así mismo la uniformidad litológica.

En túnel corto con dificultades de acceso, de longitudes menores a los 3000 metros, puede ser más rápido y económico, los métodos convencionales de excavaciones, avanzando con explosivos, que el TBM



Túnel en la Autopista Millau- Perpignan. Francia

Los túneles a través de montaña han alcanzado longitudes cada vez mayores, 5, 10, 15, 20, 30, 40 y más de 50 Kilómetros, dejando los métodos convencionales de excavación con explosivos y sostenimiento con pernos y concreto lanzado, a equipo sofisticado de tuneladoras denominadas TBM.



En general la investigación geológica está limitada en la mayor parte de los túneles a un buen levantamiento geológico de superficie, donde geólogos de alta experiencia, deben interpretar las condiciones de excavación desde 100 metros a más de 1000 bajo la superficie. La investigación del subsuelo se basa en

algunas perforaciones realizadas a grandes distancias, siendo más densa la investigación hacia los portales, donde se combinan con los métodos geofísicos de refracción.

12.3.1 Deformación según el tipo de roca

La deformación de un macizo rocoso en un túnel depende principalmente del tipo de



Caverna en una de las estaciones del viacrucis. Mina Zipaquira. Colombia

roca, las estructuras geológicas y la cobertura. Un ejemplo de macizos uniforme sin defectos geológicos es el caso de las minas de sal de Zipaquira en Colombia, explotadas desde antes del descubrimiento de los españoles del continente americano. El sistema de explotación constituye un ejemplo de optimización a base de numerosas

galerías paralelas sin ningún tipo de sostenimiento, donde la calidad del macizo se aprecia en el monumento turístico subterráneo denominado Iglesia de Zipaquira, pudiendo considerarse dentro de las 10 maravillas del mundo y decretado por la UNESCO como Patrimonio Histórico, Cultural y Religioso. El paseo turístico comienza desde la superficie descendiendo a través de una galería principal, a lo largo de la cual se encuentra representadas mediante cavernas de grandes dimensiones un viacrucis, donde se destacan excavaciones de forma rectas, terminando el recorrido en una gran catedral donde la cruz tiene 17 metros de alto.



Caverna para la iglesia de sal. Mina Zipaquira. Colombia.

Las condiciones geológicas a través de rocas ígneas presenta poca variabilidad en el comportamiento del macizo rocoso de acuerdo al alineamiento, en cambio en rocas sedimentarias y metamórficas, la posición de los planos principales de estratificación (capas) y foliación o esquistosidad, respectivamente, tienen comportamiento geomecánico que depende de la orientación del rumbo de dichas estructuras con el eje del túnel. La deformación por flexión de los planos continuos de foliación y estratificación es un principio básico del comportamiento geomecánico. Un ejemplo fácil de entender es atravesar con una mecha de un

taladro una guía telefónica o un libro, haciendo la abertura paralela al plano de las hojas o perpendicular a dicho plano, tal como se muestra en la Figura N° 5-12.

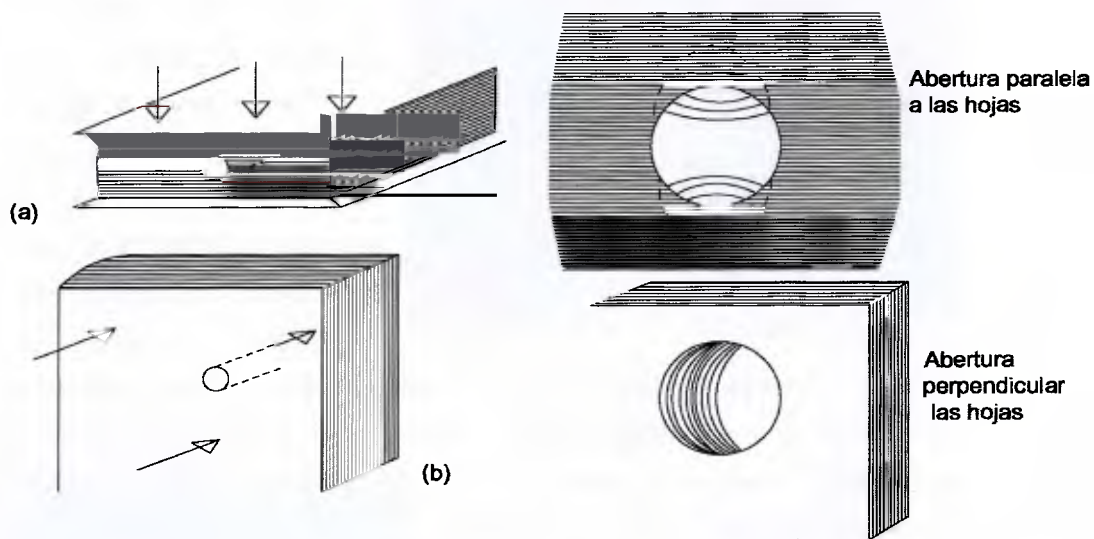
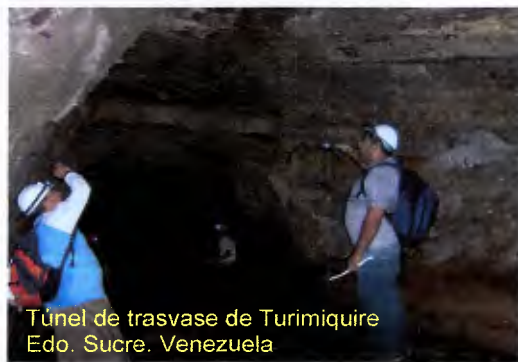


FIGURA N° 5-12

En (a) se presentaran deformaciones de acuerdo a la presión de confinamiento perpendicular al plano de la hoja, ocupando parte de la perforación realizada. En el

caso (b) la perforación perpendicular al plano de la hoja resulta en una abertura limpia, manteniendo el diámetro de la mecha. Si en el primer caso cementamos las hojas en paquetes de 20 hojas, obtenemos más resistencia a la flexión con una abertura limpia y circular.



Ejemplo del efecto de la posición de las estructuras geológicas principales como elementos de gran continuidad, lo constituye las rocas sedimentarias donde se alternan capas de areniscas, limolitas y lutitas, las cuales son causa de una serie de problemas en el túnel de trasvase de Turimiquire o Guayacán, (1983), localizado al norte de los estados Anzoátegui y Sucre, Venezuela. En su sección en forma de "U" invertida y de unos 4 metros de

ancho, el revestimiento de diseño fue a base de concreto lanzado, malla y pernos, con un canal inferior rectangular por donde circula el agua. En la sección se han presentado problemas de estabilidad hacia la bóveda con desprendimientos debido a la posición de las capas sub-horizontales, donde los problemas se relacionan a efectos de flexión con el tiempo sumado a la pérdida de resistencia de las capas de lutitas y limolitas. La solución del problema local se realiza removiendo las rocas sueltas, colocando un revestimiento liviano a base de pernos de mayor longitud, malla metálica y concreto lanzado con un espesor no menos de 10 centímetros. Es importante destacar que las bóvedas resultantes por problemas de estabilidad constituyen el resultado de un equilibrio adaptado a las condiciones geológicas con el tiempo, considerándose dichas superficies como estables a mediano plazo, y su estabilidad puede ser aumentada en general con un revestimiento liviano.

Una obra ya mencionada en los capítulos anteriores lo constituye el túnel de trasvase de Yacambu de 24 kilómetro de longitud y unos 4 a 5 metros de diámetro



(Edo. Lara, Venezuela), cuya excavación comenzó en la década de los setenta y terminó el año 2008, donde se suman una serie de problemas geológicos, entre ellos el atravesar la zona de falla geológica de Bocono en una longitud de 1500 metros, aparte de largo periodo de paralizaciones. El

túnel de Yacambu se excavó en su mayor longitud en un conjunto de rocas foliadas denominadas filitas, cuya estabilidad de la sección dependió principalmente de espesor de los planos de foliación y su cementación, los cuales se comportan como elementos cuya resistencia será mayor con el espesor de los intervalos cementados. Es primordial destacar que los últimos 14,8 kilómetros del túnel fueron excavado por la empresa Dell'Acqua C.A. entre los año 1997-2009, donde el espesor promedio del revestimiento a base de concreto lanzado fue de 40 centímetro.

En algunos sectores la filita se presentaba por espesores cementado mayores a 12 centímetro y la posición del rumbo perpendicular al eje del túnel y buzamiento de 30° en el avance, lo cual fue condición de estabilidad con convergencia del 5%, donde la cobertura era mayor a los 800 metros. En cambio en largo sectores donde los espesores de planos de foliación cementados eran menores a los cinco centímetros, asociados a planos en forma de láminas de 1 milímetro, y en algunos caso asociado a brechas de fallas arcillosas, las deformaciones alcanzaron valores de 20 a 40 cm o más, originando dobles en los elementos de acero IPN 16@60.



Las condiciones geológicas a lo largo del alineamiento de un túnel deben ser conocidas en forma detallada, donde la interpretación se complica con la cobertura y el tectonismo geológico, lo que determina que el modelo geológico debe ser complementado durante la excavación.

En caso de excavación con TBM, donde el frente solo permite ser conocido en forma esporádica, las condiciones geológicas deberán ser conocidas con un rango hacia las condiciones menos favorables.

El Modelo Geológico debe ser representativo tanto de las condiciones litológicas como estructurales, así como una visión del comportamiento del macizo a la abertura, tanto a corto como a largo plazo.

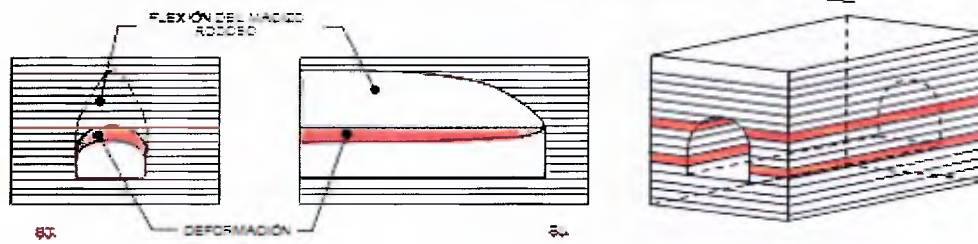
12.3.2 Esquema de deformación por flexión

La excavación de un túnel ocasiona un cambio en el estado de esfuerzo del macizo, que en el caso de roca estratificada o foliada, la posición respectivamente de las capas o planos de foliación, con respecto al eje del túnel, generará un efecto de flexión hacia la cavidad, cuya magnitud es variable, como se esquematiza en la Figura N° 6-12.

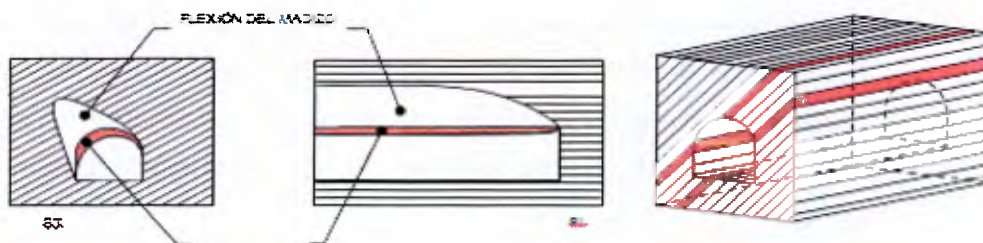
- a. Se simulan capas horizontales, el macizo se deforma hacia la bóveda con una convergencia acentuada, a medida que avanza la excavación la deformación hacia atrás se acentúa, disminuyendo hacia el frente donde el macizo se encuentra confinado.
- b. Los planos se encuentran con rumbo paralelo al eje del túnel y con buzamiento de 45° hacia la izquierda, donde la deformación se origina perpendicular a la inclinación de las capas, afectando el lado izquierdo de la bóveda, con una convergencia acentuada hacia dicho lado y menor a la derecha.
- c. Las capas se encuentran perpendicular al eje del túnel con buzamiento en el sentido del avance, donde la convergencia debe ser de poca magnitud y existe un confinamiento de las capas hacia los hastiales, debido a la posición del rumbo perpendicular al alineamiento del túnel, sin componentes estructurales hacia la cavidad.

Lo anterior son el resultados de interpretación a partir de las observaciones obtenidas de ensayos en modelos en dos dimensiones, descritos en el Capítulo N°5 correspondientes al Origen de la Diaclasas, donde la deformación de la bóveda hacia la cavidad, introduce un efecto de flexión en las capas, las cuales tienden a formar un triángulo invertido de desplazamiento. El área del desplazamiento anterior debe originar un cambio de tensiones laterales donde el macizo tenderá a equilibrarse a medida que nos alejamos de la cavidad, planteando lo que a continuación se describen como Óvalos Teóricos de Resistencia en secuencias estratificadas y/o foliadas.

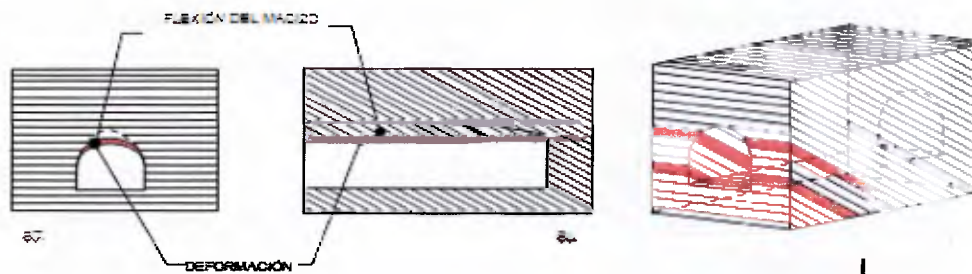
DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN DEL MACIZO ROCOSO DE ACUERDO A LA POSICIÓN DE LAS CAPAS



(a) CAPAS HORIZONTALES



(b) CAPAS INCLINADAS CON RUMBO PARALELO AL EJE DEL TÚNEL



(c) CAPAS INCLINADAS CON RUMBO PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL

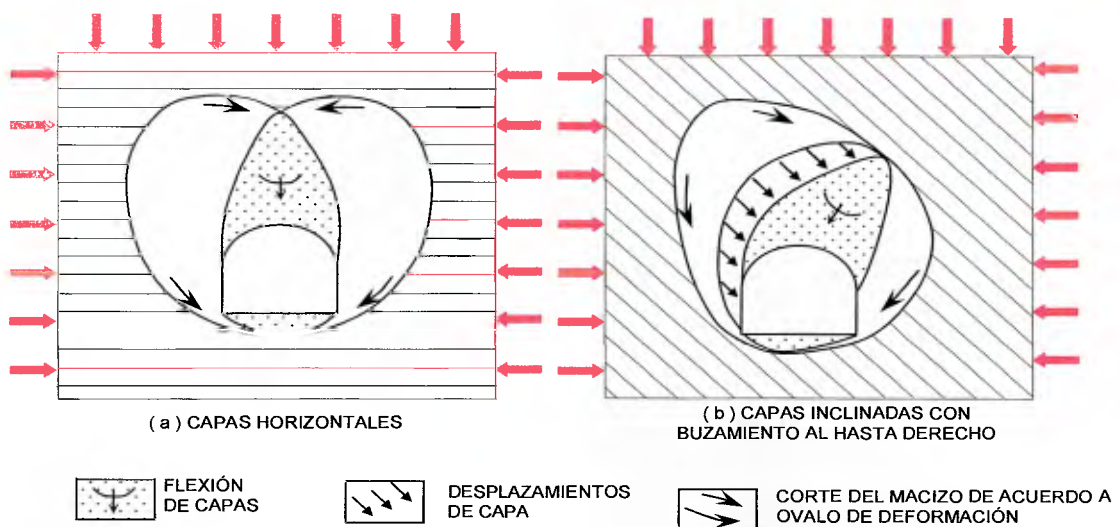
63. SECCIÓN TRANSVERSAL

64. SECCIÓN LONGITUDINAL

FIGURA N° 6-12

12.3.3 Óvalos Teóricos de Resistencia en secuencia estratificación o foliadas.

El efecto de carga geostática será transmitida hacia la excavación de acuerdo a la resistencia que ofrezca el macizo rocoso, el cual para el caso de macizos estratificados o foliados, origina un proceso de deformación hacia la cavidad del túnel, que en parte depende del efecto de flexión. En la **Figura N° 7-12**, se muestra en forma esquemática en dos dimensiones el tipo de deformación que estaría involucrado para una condición de capas sub-horizontales **(a)** y otra para capas inclinadas con buzamiento hacia el hastial derecho **(b)**. En ambos casos se ha considerado un efecto local de deformación del piso por presencia de capas de delgado espesor.



ÓVALOS DE RESISTENCIA DE ACUERDO A LA POSICIÓN DE LAS CAPAS

FIGURA N° 7-12

Para el caso de capas sub-horizontales, se desarrolla hacia la bóveda un efecto de flexión, cuya profundidad dependerá del espesor de dichas capas. En teoría dicha zona dejaría sin confinamiento un perímetro del macizo rocoso que a su vez origina unos óvalos simétricos de resistencia. La extensión de dichos óvalos debe depender de la resistencia a la compresión sin confinar de la roca.

Así mismo en capas delgadas se pueden desarrollar fenómenos de flexión en el piso. En el caso de capas inclinadas, el fenómeno de flexión se desarrolla perpendicular a la inclinación de dichas capas. La deformación por flexión teóricamente deja sin confinamiento una amplia área hacia la bóveda que en continuación con el hastial izquierdo limitaría una zona sometida a fenómenos de desplazamiento entre dichos planos y cuyo ancho dependerá de la inclinación de las capas y la fricción entre planos. También se genera un óvalo de resistencia cuya extensión debe estar relacionada con la resistencia de la roca. Hacia el hastial derecho los planos estarían inclinados en sentido contrario a la superficie liberada por flexión, destacándose que dichos planos están confinados lateralmente con alta resistencia de la roca. En cada uno de los casos anteriores los parámetros de resistencia deben estar representados de acuerdo a las condiciones de esfuerzo a que está sometida la roca.

En una excavación de un túnel se origina un estado de esfuerzo/deformación, que debe alcanzar un equilibrio de alta resistencia a medida que nos alejamos de dicha



Óvalos de deformación adaptado a la forma de un huevo

abertura. Aunque lo anterior debe formar un cilindro de deformación alrededor de la excavación, su mejor forma se puede visualizar en el huevo de la fotografía a la izquierda, donde se han dibujado la zona de deformación por flexión y las originadas por corte, donde en el perímetro la resistencia del macizo debido al confinamiento equilibra las tensiones. Es importante destacar la alta resistencia de la frágil cascara del huevo al ser sometido a esfuerzos uniformes de compresión aprisionado entre las manos. Lo anterior

nos indica que en una excavación subterránea lo importante es uniformizar los esfuerzos que se generen hacia la cavidad, lo que permitirá la formación de óvalos de equilibrio de mejor control con el sostenimiento. Debido a la liberación del confinamiento de las estructuras geológicas, se pueden generar deformaciones importante hacia la cavidad, donde su mejor control lo constituye el propio macizo, cuya resistencia aumenta a medida que nos alejamos del perímetro del túnel, y la estabilidad de la sección depende del confinamiento adecuado en dicho perímetro.

En la **Figura N° 8-12**, se muestra en forma esquemática la extensión de los óvalos de corte en el macizo rocoso, que estarían relacionados con el área de deformación por flexión, que dependerá del espesor de capa y de la posición de la estructura geológica con respecto al eje del túnel. En caso de capas con rumbo perpendicular al eje e inclinadas, los óvalos de resistencia se asemejan a los de capas horizontales pero de menor desarrollo.

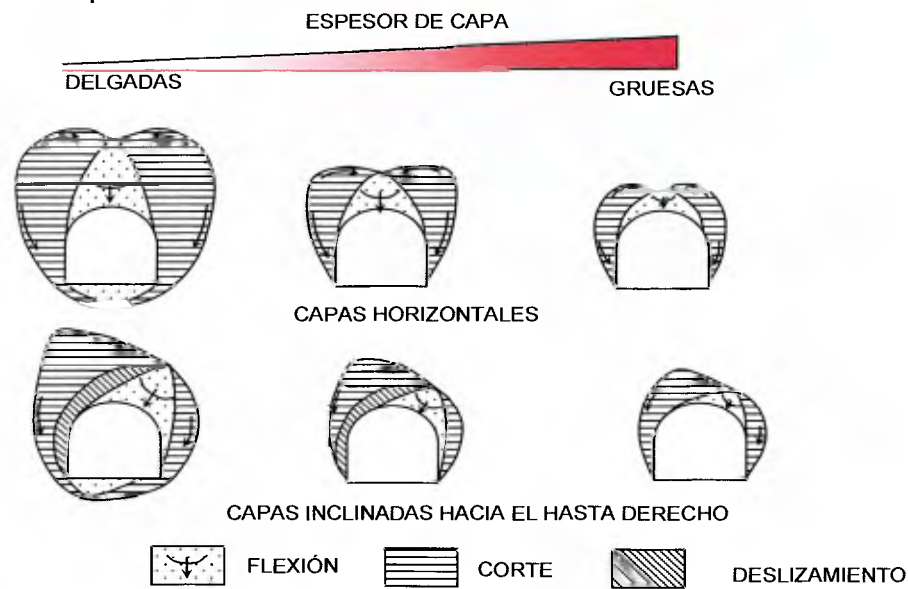


FIGURA N° 8-12

12.3.4 Portales

Los portales constituyen una parte muy importante de la obra de un túnel y



requiere de atención especial en su diseño, donde se deben equilibrar la altura de los taludes de corte con la condición geológica del frente de excavación.

Son numerosos los ejemplos de portales de túneles a nivel mundial constituyendo en algunos casos verdaderos monumentos arquitectónicos.

En Venezuela desde la entrada al país a través del Aeropuerto Simón Bolívar, el



acceso hacia la capital, Caracas, requiere cruzar el fuerte relieve montañoso para ascender desde el nivel del mar hasta la cota 900, existiendo dos (2) túneles denominados, Boquerón 1 y 2, construidos en los años 50, con longitudes de 1850 y 500 metros. La ciudad de Caracas esta cruzada hacia el Occidente del país por tres

túneles del orden de unos 1000 metros cada uno, construidos a finales de la década de los 60. Por la salida al Oriente del país se encuentra el Túnel de Turumo, construido en 1976 de unos 600 metros de longitud con portales para la época similares a diseño Europeo. En la carretera Mérida- Panamericana se construyeron en la década de los 80 el sector entre Estanques-El Vigía tres túneles donde las altas pendientes de las laderas así como las condiciones geológicas obligaron a diseño con pantallas fuertemente ancladas.



En la Figura N° 9-12, se muestra un perfil típico de meteorización en un relieve montañoso, donde dicho perfil se observa con gran desarrollo hacia cota superior, con 20 a 25 m de roca descompuesta, seguido por 15 m de roca meteorizada, cuyos espesores disminuyen a cota inferior. La rasante del túnel se encuentra a cota 50 y se plantea dos alternativas de ubicación del portal.

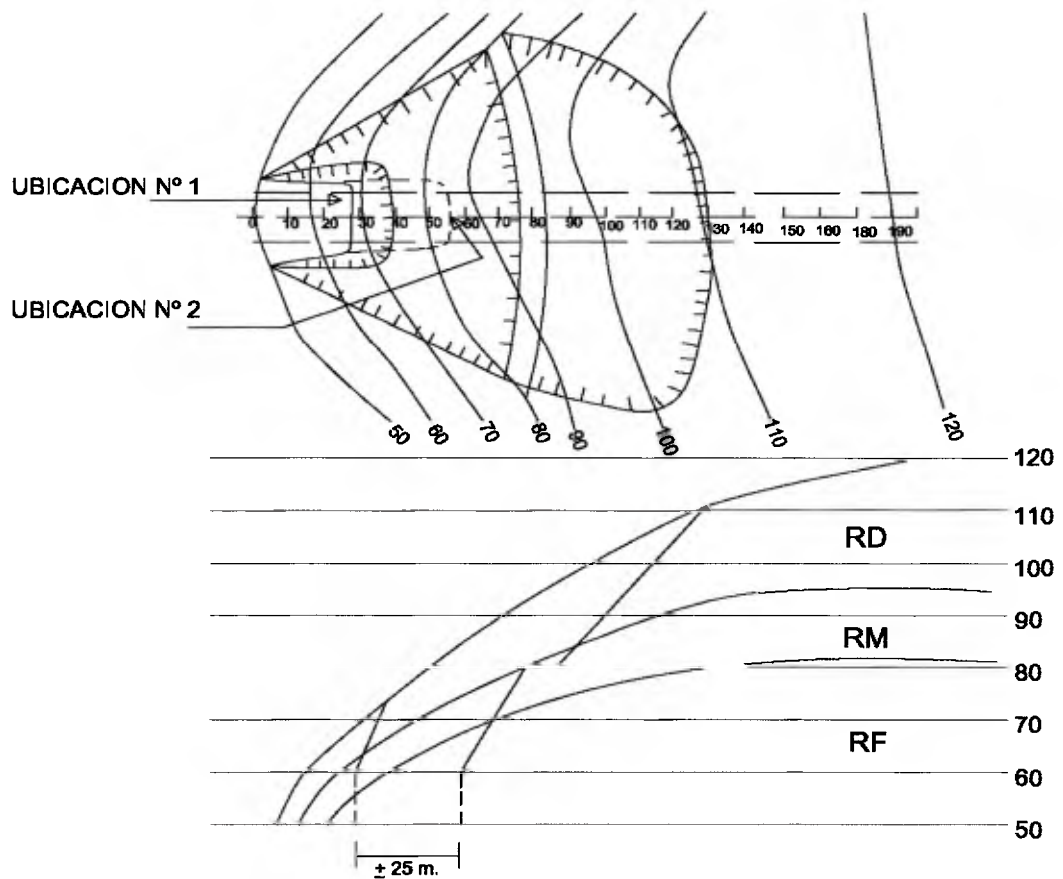


FIGURA N° 9-12

- a) N° 1 a unos 25 m del origen, donde se genera una excavación con altura máxima hasta nivel de rasante de 25 metros, estando en los últimos 10 m., planteados la conformación casi vertical del portal

- b) N° 2 avanzando en progresiva unos 25 metros de la alternativa N° 1, donde se genera un gran corte, que alcanza una altura de 60 metros, y las obras de estabilización requieren de diseño muy especial, con anclaje de alta tensión y longitudes muy superiores a la alternativa N° 1.

Para portales de un túnel en un macizo donde aflora la roca dura, su conformación debería estar adaptada al relieve topográfico, aminorando las excavaciones a cielo abierto con el uso de explosivos. Así mismo la excavación de un túnel en un macizo de roca blanda, su ejecución podría estar planteado mediante el avance con un falso túnel hacia la superficie del terreno, con un sostenimiento a base de micropilotes y perfiles de acero, confinado al pie por una contrabóveda.

12.4 CONSIDERACIONES FINALES

Las soluciones de problema geológico-geotécnico requieren del conocimiento adecuado de las condiciones tanto de superficie como del sub-suelo, principalmente relacionado con la repuesta del estado original de esfuerzos a las modificaciones de dichas condiciones, ya sea por excavaciones superficiales como subterráneas. Dichas modificaciones pueden ocurrir por cambio en los parámetros de deformación-resistencia de los materiales, pudiendo considerarse los efectos de meteorización con el tiempo así como la variación en el nivel de agua. En túneles, el cambio de humedad en el macizo rocoso debido al contacto con el ambiente exterior, debe ser objeto de investigación durante la excavación, principalmente en lutitas y filitas.

En una obra los parámetros de resistencia al corte y la respuesta de las deformaciones de acuerdo al estado de esfuerzo, ya sean para cálculos de estabilidad y diseño, requieren de una valoración del macizo de acuerdo a la sollicitación tomando en cuenta la posición de las estructuras geológicas y/o de sus componentes de acuerdo a proyecciones estereográficas. La resistencia de la roca intacta debe ser considerada una guía, la cual en macizo homogéneo tipo ígneo, con niveles de esfuerzos bajo, no depende de la orientación de la muestra. En cambio en rocas sedimentarias y metamórficas la variación en composición de las capas o planos de foliación, respectivamente, su resistencia depende de la posición de dichos planos al esfuerzo.

BIBLIOGRAFÍA

En la actualidad la red o autopista de la información existente vía INTERNET constituye una poderosa herramienta, pudiendo considerarse la mayor parte de la bibliografía que se indica en un libro como elementos básicos de aprendizaje de la materia por el autor, donde la ampliación del conocimiento adquirido con el tiempo permite la incorporación y divulgación de experiencias como evolución al conocimiento inicial.

Billings J. G. (1963), "Geología Estructural". Eudeba. Buenos Aires. Argentina.

Bureau of Reclamation, (1980), Manual de Tierras. U.S. Department of the Interior. Washington, D.C. Edición en Español. Editorial Técnica Bellisco. Madrid 20. España.

Fairhurst C. (1963), "Rock Mechanics". MacMillan, New York, EEUU.

De Sola O. (1978), "Posibilidades de Sismicidad Inducida por el Embalse de Gurí". Sociedad Venezolana de Mecánica de Suelo e Ingeniería de Fundación". Boletín N° 48.

Dunbar O.C. (1961), "Geología Histórica". Compañía Editorial Continental, S.A. México D.F. México.

García R. (1971), "Propiedades Mecánicas de los Esquistos Calcáreo-Grafitosos y Observaciones Geológico- Geotécnicas en la Autopista Coche-Tejerías, km 8+000 al km 22+000". Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Metalúrgica.

García R. (1989), "Problemas de Estabilidad en los túneles del Acueducto Regional del Estado Táchira". VII Congreso Geológico Venezolano.

García R. (1998), "Análisis de Deformación en Túneles a partir de Ensayos sobre Modelos en dos Dimensiones". Sociedad Venezolana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Boletín N°58.

García E., García R (2004), "El Origen de las Diaclasas en Macizos Rocosos y su Consideración en Obras de Ingeniería". Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG). XVIII Seminario.

García R. (2006), "El Ensayo de Compresión Simple en Rocas Metamórficas Foliadas". Sociedad Venezolana de Geotecnia. Boletín 85.

García R. (2006), "Consideraciones sobre Deformación en Túneles y los Parámetros de Resistencia en Macizos Rocosos estratificados y Foliados. Limitación en el uso

del Índice de Calidad Geomecanica GSI". Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG). Boletín 86.

Hoek E. Brown T.,(1998) "Practical Stimates of Rock Mass Strength, Int. J. Rock. Mech. Min. Sei, Vol 34, N°8, pp 1165-1186.

Krynine y Yudd (1961), "Principio de Geología y Geotecnia". Editorial Omega, Barcelona, España.

Legget R. (1965), "Geología para Ingeniero". Editorial Gustavo Gili, S.A.

Muguerza A. A. (2008), "Aguas Arriba del Flujo Torrencial". Un Análisis Geotécnico-Meteorológico de la Tragedia de Vargas. Estado Vargas. Venezuela. www.aguasarriba.com.

Obert-Duvall (1966), "Rock Mechanics and the Desing of Structures in Rock". Editorial Wiley, New York, EEUU.

Perri G. (1999), "Contribución a la Caracterización geomecanica de los Macizos Rocosos en base al GSI de Hoek y Brown. Sociedad Venezolana de Geotecnia. Boletín 79.

Salcedo D. (1983), "Macizos Rocosos: Caracterización, Resistencia al Corte y Mecanismo de Rotula". Sociedad Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones. 25 Aniversario.(Conferencia).

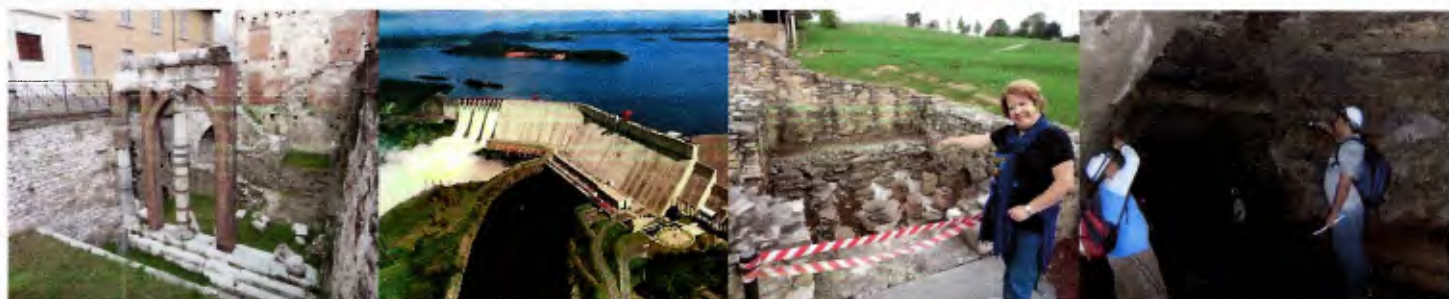
Suarez V. L.M. (2002), "Incidentes en las Presas de Venezuela". Editorial Arte. Venezuela.

Stagg-Zienkiewicz (1968), "Mecánica de las Rocas en la Ingeniería Practica" Editorial Blume. Madrid. España.

Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics" New York, John Wiley and Sons.

Ucar R. (2001), "Determinación de la Resistencia al Corte en Macizos Rocosos Aplicando el Criterio Empírico de Hoek y Brown. Sociedad Venezolana de Geotecnia. Boletín 79.

UCV (1967), "Desarrollo de Agua Subterránea. Curso para Graduados. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, en colaboración con las Escuelas de Civil y Geología, Minas y Metalúrgica. Con colaboración de la Organización Mundial de la Salud y de las Naciones Unidas.



TUNEL DE TRANSVASE SISTEMA HIDRAULICO YACAMBU-QUIBOR C.A.

