

**METODOLOGIAS EXISTENTES PARA EL ANÁLISIS Y ESTABILIZACIÓN DE
TALUDES EN ROCA: ESTADO DEL ARTE**

**MÓNICA JOHANNA CASTRO IRREÑO
PEDRO JESUALDO BACCA SÁNCHEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

2013

**METODOLOGIAS EXISTENTES PARA EL ANÁLISIS Y ESTABILIZACIÓN DE
TALUDES EN ROCA: ESTADO DEL ARTE**

**MÓNICA JOHANNA CASTRO IRREÑO
PEDRO JESUALDO BACCA SÁNCHEZ**

**Trabajo de grado modalidad investigativa para optar el título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
ING. M.SC. LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

2013

DEDICATORIA

En primer lugar a **Dios** que me dio la fuerza necesaria para alcanzar mi sueño.

A mi mami **Elsa** por su esfuerzo, por creer en mis logros y por ser la persona
más maravillosa de este mundo.

A mi hermana **Chu**, que con su paciencia estuvo conmigo y aportó un granito de
arena para esta nueva etapa.

A mi tía **Miryam** y mis primos, **Erika, Silvia y Sebastián** que con su apoyo me
hicieron ver esto cada vez más cerca.

A mi **Mao** que con su gran consagración y dedicación, tuvo paciencia y juntos
obtener esta nueva meta en nuestras vidas.

A todos mis compañeros de Universidad, que al final terminaron siendo mis
amigos (**Efra, Oso, Caro, Cris, Yenny, la Gorda, Pedro**), gracias por estar
siempre presentes.

Mónica Johanna Castro Irreño

Dios padre todo poderoso, te doy gracias por haberme brindado la posibilidad de culminar mis estudios universitarios con total conformidad.

Primordialmente agradezco a todas las personas que de alguna u otra manera estuvieron presente en esta etapa tan importante de mi vida, en especial a mis padres Hilda y Pedro Emilio, que con su constancia y perseverancia han hecho de nuestra familia un hogar lleno de amor, respeto y comprensión.

Diego, Erica, Anyi, Kelly y Vickycita hermosa, doy gracias a todos ustedes por su acompañamiento y su disposición, siempre han estado a mi lado y en los momentos más críticos han actuado sin condicionamientos y sin reproches ofreciéndome toda su ayuda.

Agradezco a mis compañeros de universidad y colegas del trabajo por su preocupación e interés, a la escuela de ingeniería civil y en especial a los profesores Luis Alberto Capacho, Wilfredo del Toro y Mario Ramírez por la orientación y acompañamiento en el desarrollo de este proyecto.

Pedro Jesualdo Bacca Sanchez.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a **Dios**, que nos dio las fuerzas suficientes para alcanzar esta nueva meta.

A la **Universidad Industrial de Santander**, por darnos la oportunidad de hacernos profesionales, aportándonos saber y formación integral.

A la **Escuela de Ingeniería Civil**, que junto a sus docentes aportaron todo su conocimiento para nuestra formación.

Al **Ingeniero Luis Alberto Capacho** por su dedicación y colaboración.

Al **Ingeniero Wilfredo del Toro** por todos sus aportes.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
2. GENERALIDADES.....	23
2.1 MECÁNICA DE ROCAS.....	23
2.2 ORIGEN Y CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS.....	24
2.2.1 Rocas Igneas.	24
2.2.2 Rocas metamórficas.....	24
2.2.3 Rocas Sedimentarias	25
2.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES ROCOSOS.....	26
2.3.1 Propiedades Físicas.....	27
2.3.1.1 Porosidad.	27
2.3.1.2 Peso Unitario.....	27
2.3.1.3 Permeabilidad	28
2.3.1.4 Durabilidad.	28
2.3.1.5 Alterabilidad.	29
2.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	29
2.3.2.1 Resistencia a la compresión uniaxial	29
2.3.2.2 Resistencia a tracción.	29
2.3.2.3 Velocidad de propagación de las ondas elásticas.....	29
2.4 TENSIONES Y DEFORMACIONES EN LA ROCAS.....	30
2.4.1 Fuerzas y tensiones.	30
2.4.2 Tensiones sobre un plano.	31
2.4.3 Tensiones en tres dimensiones.....	32
2.4.4 Resistencia y rotura.....	33

2.5	MECANISMOS DE ROTURA.....	34
2.5.1	Rotura por esfuerzo cortante.....	34
2.5.2	Rotura por compresión.....	35
2.5.3	Rotura por flexión.....	35
2.5.4	Rotura por tracción.....	36
2.5.5	Rotura por colapso.....	37
2.6	CRITERIOS DE ROTURA.....	37
2.6.1	Criterio de Mohr Coulomb.....	37
2.6.2	Criterio de Hoek y Brown Generalizado.....	39
2.6.3	Criterio de Hoek y Brown.....	40
2.6.4	Criterio de Rotura de Barton & Choubey.....	42
2.6.5	Estimación Del Ángulo De Rozamiento Residual.....	42
2.7	MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	43
2.7.1	Métodos de superficie.....	43
2.7.1.1	Métodos eléctricos.....	43
2.7.1.2	Métodos sísmicos.....	45
2.7.1.3	Métodos electromagnéticos.....	45
2.7.1.4	Métodos gravimétricos.....	46
2.7.1.5	Métodos magnéticos.....	46
3.	MACIZO ROCOSO.....	48
3.1	CLASIFICACIÓN.....	48
3.2	METEORIZACIÓN DE LOS MATERIALES ROCOSOS.....	49
3.2.1	Meteorización de la matriz rocosa.....	50
3.2.2	Meteorización de macizos rocosos.....	51
3.3	EL AGUA SUBTERRÁNEA.....	53
3.3.1	Permeabilidad Y Flujo De Agua.....	53
3.3.2	Efectos Sobre Las Propiedades De Los Macizos Rocosos.....	55
3.4	ENSAYOS IN SITU.....	55
3.4.1	Ensayos de resistencia.....	55
3.4.1.1	Esclerómetro O Martillo De Schmidt.....	55

3.4.1.2	Carga puntual.....	56
3.4.2	Ensayos de deformabilidad.....	56
3.4.2.1	Dilatométrico.....	56
3.4.2.2	Placa de carga.....	56
3.4.2.3	Gato plano.....	56
3.4.3	Ensayos de permeabilidad.....	57
3.4.3.1	Lugeon.....	57
3.5	DISCONTINUIDADES.....	57
3.5.1	Tipos de discontinuidades.....	58
3.5.2	Características de las discontinuidades.....	58
3.5.3	Ensayos de laboratorio.....	68
3.5.3.1	Ensayo de corte directo.....	68
3.5.3.2	Ensayo de inclinación de laboratorio para obtener el ángulo de fricción básico.....	69
4.	TALUDES EN ROCA.....	71
4.1	MECANISMOS DE ROTURA.....	71
4.1.1	Rotura Plana.....	71
4.1.1.1	Análisis de estabilidad.....	73
4.1.2	Rotura por cuña.....	74
4.1.2.1	Análisis de estabilidad.....	75
4.1.3	Rotura Por Vuelco.....	76
4.1.3.1	Análisis de estabilidad.....	78
4.1.4	Rotura Por Pandeo.....	80
4.1.4.1	Análisis de estabilidad.....	81
4.1.5	Rotura circular.....	82
4.1.5.1	Análisis de estabilidad.....	84
	CONCLUSIONES.....	85
	BIBLIOGRAFIA.....	86
	RECURSOS ELECTRONICOS.....	88
	ANEXOS.....	89

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Macizos rocosos mostrando sus planos de discontinuidades, conformados por fracturas y capas de rocas. Izq: la Sultana. Der. Cajamarca. ..	23
Fotografía 2. Muestras de roca ígnea.	24
Fotografía 3. Rocas Metamórficas.	25
Fotografía 4. Rocas estratificadas: sedimentos dolomíticos de plataforma continental. Cretácico de Cuenca, España.	26
Fotografía 5. Rotura a compresión de un pilar en una iglesia paleocristiana excavada en tobas volcánicas. Capadocia. Turquía (Foto M. Ferrer).	35
Fotografía 6. Medida de la dirección de buzamiento de una discontinuidad.	59
Fotografía 7. Tamaño relativo de las familias de las discontinuidades.	61
Fotografía 8. Alteración por oxidación en las superficies de discontinuidad de un macizo rocoso de cuarcitas, mientras que la matriz rocosa permanece fresca.	64
Fotografía 9. Discontinuidad de abertura “muy ancha” sin relleno, en areniscas.	65
Fotografía 10. Discontinuidad “ondulada-rugosa” en calizas con abertura “muy ancha” y relleno arcillosos	67
Fotografía 11. Rotura Planar.....	72
Fotografía 12. Rotura por cuña de un talud rocoso.....	75
Fotografía 13. Rotura por Volcamiento	77
Fotografía 14. Rotura Circular.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del estado de esfuerzos en dos dimensiones	31
Figura 2. Tensiones en tres dimensiones	32
Figura 3. Rotura por esfuerzo cortante de un talud	34
Figura 4. Rotura por flexión de la clave de una galería.	36
Figura 5. Tramos de las superficies de discontinuidad sometidos a tracción simple.	36
Figura 6. Relación entre tensiones principales y cortantes en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.	38
Figura 7. Envolturas de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales. (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b). Representación de las diferentes condiciones de esfuerzos para rotura de la matriz rocosa	41
Figura 8. Ejemplo de Sondeo eléctrico vertical (SEV)	44
Figura 9. Calicata eléctrica	44
Figura 10. Esquema de adquisición de datos sísmicos y de los principales tipos de ondas según sus características de propagación	45
Figura 11. Modelización de un Perfil gravimétrico.....	46
Figura 12. Perfiles típicos de meteorización a suelos residuales en rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas.....	52
Figura 13. Valores de permeabilidad primaria y secundaria para rocas y macizos rocosos (modificado de Isherwood, 1979; en Hudson y Harrison, 2000).	54
Figura 14. Medida del espacio en una cara expuesta del afloramiento.	60
Figura 15. Ondulación de una discontinuidad.	62
Figura 16. Escala intermedia, para observaciones de hasta un metro de longitud (Barton, 1987).	63
Figura 17. Máquina de Corte directo utilizada para la medida de resistencia al corte de juntas de granito.	69

Figura 18. Realización en laboratorio de un ensayo de inclinación con probetas para obtener el ángulo de fricción básico.	70
Figura 19. Rotura Plana	72
Figura 20. Análisis cinemático de la falla en cuña (Hoek y Bray, 1981)	74
Figura 21. Rotura por Vuelco	77
Figura 22. Rotura por Pandeo	80
Figura 23. Rotura Circular	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Índice de velocidad relativa y calidad del macizo rocoso	49
Tabla 2. Índice RQD.....	53
Tabla 3. Clasificación de Macizos rocosos en función de la permeabilidad	57
Tabla 4. Terminología de continuidad o persistencia recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas SIMR (Brown, 1981).....	61
Tabla 5. Descripción del grado de meteorización.....	65
Tabla 6. Descripción de la Abertura	66
Tabla 7. Descripción de las filtraciones en las discontinuidades	68

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	Análisis de proyección estereográfica.	89
Anexo B.	Software En El Análisis De Estabilidad De Taludes En Roca.	94
Anexo C.	Estabilización y protección de taludes en roca.	100

RESUMEN.

TÍTULO: METODOLOGIAS EXISTENTES PARA EL ANÁLISIS Y ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN ROCA: ESTADO DEL ARTE*

**AUTORES: MÓNICA JOHANNA CASTRO IRREÑO
PEDRO JESUALDO BACCA SÁNCHEZ****

PALABRAS CLAVE: Taludes en roca, Estabilización y análisis de taludes en roca, Mecánica de rocas, Estado del arte.

DESCRIPCIÓN:

Los taludes en roca son obras geotécnicas muy comunes en el campo de la ingeniería civil. La aplicación de los diversos métodos de estudio, de análisis y estabilización de los mismos para dar solución a problemas inherentes a la misma, fundamentan entonces la necesidad de exponer de forma amplia las diversas teorías y metodologías existentes para llevar a cabo dichas obras.

El siguiente documento es el resultado de una investigación exhaustiva con respecto al análisis y estabilización de taludes en roca, en el cual inicialmente se abarcan temas que tienen que ver con las ciencias básicas que dan forma a teorías sobre el comportamiento de las rocas, los macizos rocosos y posteriormente los taludes.

Es importante abarcar el análisis y estabilización de taludes pensando en que la roca que lo constituye es un material, y que por tanto tiene un comportamiento y unas propiedades ingenieriles que pueden ser definidas o determinadas con un grado de exactitud confiable por métodos implementados en campo o en laboratorio.

También se hace una introducción breve al uso y a las posibilidades que brinda la utilización de los diversos tipos de Software existentes en el mercado para llevar a cabo los estudios de modelado y posteriormente a la interpretación y predicción del comportamiento de los taludes en roca.

* Proyecto de grado

** Facultad de ciencias físico- mecánicas. Escuela ingeniería civil. Director ING. M.SC. Luis Alberto Capacho Silva

ABSTRACT.

TITLE: EXISTING METHODS TO ANALYZE AND STABILIZE ROCK SLOPES: STATE OF THE ART*

**BY: MÓNICA JOHANNA CASTRO IRREÑO
PEDRO JESUALDO BACCA SÁNCHEZ****

KEY WORDS: rock slopes, stabilization and analysis of rock slopes, state of the art.

DESCRIPTION:

Rock slopes are common geotechnical designs in the area of civil engineering. The application of many methods of studying rock slopes can be useful when finding solutions to problems encountered while analyzing slopes. For this purpose, it is necessary to explore in detail the existing theories and methods when it comes to making such slopes.

The following document is the result of an exhaustive research with regards to the analysis and stabilization of rock slopes. Prior to covering slopes, general subjects related to basic sciences illustrating theories on rock behavior and rocky massifs will be presented throughout this text.

It is important to address the analysis and stabilization of slopes by knowing that the rock that constitutes the slope is material and, as such, it has an engineering behavior and properties that can be established with high-accuracy methods either in a lab or on the field.

Besides, we will briefly introduce the use and advantages of some existing software to carry out studies and subsequently interpretation of results and predictions of rock slopes behavior.

* Grade Project

** Faculty of physical and mechanical sciences. School civil engineering. Manager ING. M.SC. Luis Alberto Silva Capacho

INTRODUCCIÓN

La intervención en la naturaleza con el fin de generar obras geotécnicas en el ámbito de la ingeniería, constituye uno de los grandes problemas que debe afrontar la ciencia para generar soluciones rápidas, de bajo presupuesto y que tengan el menor impacto negativo en el ambiente.

En el caso particular de la construcción de vías, canteras y demás obras Civiles en donde se deben conformar laderas o taludes los avances en la investigación presentan soluciones a casi todas las situaciones sin importar su complejidad.

En los últimos años se vienen adelantado estudios que están en un proceso continuo de retroalimentación y reestructuración para mitigar los inconvenientes que acarrea la intervención de zonas altamente quebradas, para el caso de las vías, o para zonas de gran pendiente de modulación o conformación, como en el corte de laderas para canteras, canales o túneles, los resultados son altamente favorables y presentan diversas soluciones a dichos inconvenientes.

Se pretende mostrar en el presente documento el resultado de la búsqueda exhausta, clasificación y jerarquización de información recolectada y organizada cronológicamente con respecto al análisis y estabilización de taludes en roca, esto con el fin de generar una base de consulta y además con el propósito de incentivar futuros estudios o investigaciones al respecto. Otro motivo importante a tener en cuenta al emprender esta investigación está representado en la situación geomorfológica predominante en las regiones que son eje central de la economía colombiana, que presentan en su mayoría zonas quebradas que tienen que ser salvadas para dar paso a corredores viales y así poder comunicar las centrales de producción y consumo. Entonces es de vital importancia y tiene gran demanda en el campo de la ingeniería la implementación de obras de estabilización de taludes

en roca, que por principio fundamental deben ofrecer condiciones de confort y sobre todo, de seguridad para las personas que las utilizan.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el estado del arte sobre información existente para el análisis y estabilización de taludes en roca.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Hacer una búsqueda y compilación bibliográfica de carácter científico con respecto al análisis y estabilización de taludes en roca.
- Analizar y clasificar según su importancia los resultados de investigaciones de ámbito nacional e internacional sobre el análisis y estabilización de taludes en roca.
- Compilar los métodos matemáticos existentes o los más utilizados para el estudio y análisis en la estabilización de taludes en rocas.
- Investigar e introducir los métodos existentes para la caracterización en laboratorio y campo más utilizados en la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas como elementos constitutivos para el modelado de un talud.
- Recopilar e introducir el uso de las herramientas informáticas existentes más utilizadas en el estudio y análisis de estabilización de taludes en roca de una forma básica.

2. GENERALIDADES

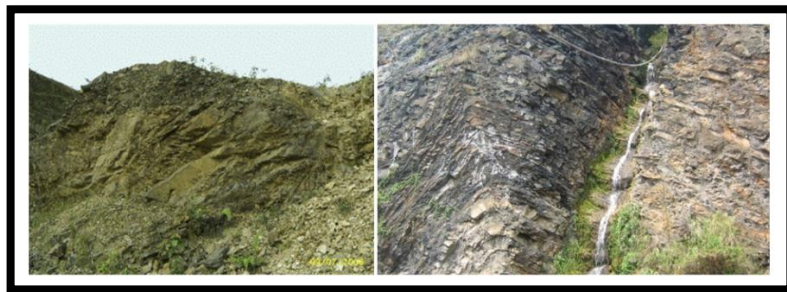
2.1 MECÁNICA DE ROCAS

La mecánica de rocas se encarga del estudio tanto teórico como práctico de las propiedades mecánicas de los materiales rocosos. El crecimiento de la mecánica de rocas empieza como consecuencia de la utilización del medio geológico para obras superficiales, subterráneas y exploración de recursos mineros.

La mecánica de rocas posee pequeñas relaciones con otras especialidades como la mecánica de suelos, que aborda el estudio de rocas alteradas y meteorizadas en superficie y la geología estructural para el estudio de los procesos y estructuras tectónicas que las afectan.

Las masas rocosas se muestran en la mayoría de los casos afectadas por discontinuidades o superficies de debilidad que separan bloques de matriz rocosa o roca intacta constituyendo un conjunto de macizos rocosos. Los dos ámbitos son objeto de estudio de la mecánica de rocas, pero principalmente los planos de discontinuidad son los que determinan el aspecto diferencial de esta disciplina con respecto al estudio de suelos y también hacen que la mecánica del medio rocoso presente un carácter discontinuo y anisótropo.

Fotografía 1. Macizos rocosos mostrando sus planos de discontinuidades, conformados por fracturas y capas de rocas. Izq: la Sultana. Der. Cajamarca.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, construcción del aeropuerto del café.

2.2 ORIGEN Y CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS

La roca es un material natural duro y compacto de minerales que por la definición y forma de los mismos, se puede clasificar en sueltas y masivas. De acuerdo a su origen también se puede clasificar en Ígneas, Metamórficas y Sedimentarias.

2.2.1 Rocas Igneas.

Se forman por el enfriamiento del magma. Si el enfriamiento ocurre sobre la corteza terrestre se forman rocas volcánicas, cuando éste penetra en rocas existentes y se solidifica, forma rocas intrusivas, si el enfriamiento se presenta en lugares profundos de la corteza terrestre genera rocas plutónicas.

Fotografía 2. Muestras de roca ígnea.



Fuente: <http://www.geoprime.com/>

2.2.2 Rocas metamórficas.

Comprenden los conjuntos minerales que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos a ciertas condiciones químicas o físicas exigidas por la profundidad. Diferentes factores intervienen en el cambio de una roca metamórfica como el calor, la presión y los fluidos químicamente activos. Conforme sean las causas

predominantes del metamorfismo las rocas pueden ser: Pirometamórficas, Dinamometamórficas, hidrotermales o de contacto¹.

Fotografía 3. Rocas Metamórficas.



Fuente: <http://caraboboaventura.blogspot.com>

2.2.3 Rocas Sedimentarias

Rocas formadas por la acumulación de sedimentos que se consolidaron por la acción de un cementante. Si los sedimentos están constituidos por fragmentos de roca, minerales resistentes, restos de plantas y animales, se clasifican como rocas sedimentarias clásticas; mientras que las rocas sedimentarias no clásticas, son producto de la acción química, la evaporación o la mezcla de estos dos.

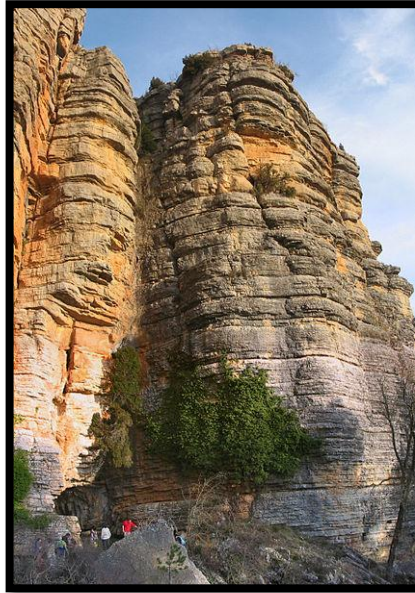
Se pueden distinguir básicamente dos tipos:

- Rocas Detríticas: Formadas por partículas de otras rocas, como son las areniscas y las arcillosas.
- Físico-químicas y de origen biológico: Proviene de la acción de los seres vivos, como son las rocas carbonatadas y las rocas salinas².

¹ Carrillo C. Josué., "Nociones de mecánica de rocas: primera parte", Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 1997.

² Ramirez Oyanguren Pedro, Alejandro Monge Leandro., "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes", España.

Fotografía 4. Rocas estratificadas: sedimentos dolomíticos de plataforma continental. Cretácico de Cuenca, España.



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Roca_sedimentaria

2.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MATERIALES ROCOSOS.

El cambio de las características y propiedades mecánicas y físicas de los materiales rocosos se refleja tanto en la matriz rocosa como en el macizo rocoso. La diferencia en la composición química y las partículas amorfas que forman las rocas representan la escala más pequeña en el estudio de la variabilidad de las propiedades. La fábrica o petrofábrica de las rocas, consecuencia de su génesis y historia geológica, presenta direcciones preferenciales de anisotropía por orientación de cristales y granos, o planos de foliación o esquistosidad; los poros, microfisuras, recristalizaciones, etc., imprimen un carácter discontinuo, no lineal, y la desigualdad de distribución de los minerales y componentes rocosos forman un medio heterogéneo. La alteración y meteorización por procesos físicos y

químicos también modifican la composición de la roca, apareciendo nuevos minerales con diferentes propiedades³.

2.3.1 Propiedades Físicas

Existen propiedades de las rocas de fácil determinación que evidencian la apariencia general de una roca dada, y que ayudan a describirla adecuadamente indicando hasta qué punto, rocas de diferentes lugares pueden o no ser similares. Las propiedades físicas o propiedades de índice se determinan en laboratorio, estas son:

2.3.1.1 Porosidad. Es la relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total de la roca, este se representa por la letra η :

$$\eta = \frac{V_p}{V_t} \quad \text{Dónde: } V_p = \text{volumen de vacíos}$$

$V_t = \text{volumen de la roca}$

La porosidad tiene valores muy diferentes en las rocas sedimentarias; por ejemplo en una caliza puede llegar al 50%, mientras que en una arenisca puede alcanzar hasta un 15%, entretanto en la mayoría de las rocas ígneas y metamórficas gran parte de los vacíos son espacios laminares formados por grietas donde la porosidad suele ser del orden del 1 o 2%.

2.3.1.2 Peso Unitario. Se calcula a partir de los pesos unitarios de cada mineral, expresado en t/m^3 o en kN/m^3 , y se representa por la letra γ :

³ Carrillo C. Josué., "Nociones de mecánica de rocas: primera parte", Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 1997

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \left(\gamma_i * \frac{V_i}{V} \right)$$

Dónde:

V_i= volumen de cada mineral.

V= volumen de la roca.

γ_i = peso específico de cada mineral.

2.3.1.3 Permeabilidad. Es la capacidad de un material en permitir que un flujo lo atraviese sin alterar su estructura interna. La permeabilidad de una muestra de roca puede tener aplicación en el análisis de muchos problemas prácticos, como puede ser la explotación de aguas subterráneas, explotación de hidrocarburos, y el almacenamiento subterráneo de líquidos. En la mayoría de los casos, las discontinuidades existentes en la roca afectan radicalmente la permeabilidad medida en el laboratorio, así entonces se distinguen dos tipos:

Permeabilidad Primaria, donde se analiza el material que constituye la roca y la **Permeabilidad Secundaria**, que analiza fracturas y diaclasas presentes en la roca.

En el momento que se trata de permeabilidad primaria el flujo de la mayoría de las rocas se somete a la ley de Darcy:

$$q_x = k * \frac{dh}{dx} * A$$

A= Área transversal normal a la dirección del flujo. [m²]

h= Cabeza hidráulica. [m]

q_x= Caudal en la dirección X. [m³/s]

2.3.1.4 Durabilidad. Es la resistencia que la roca presenta ante los procesos de alteración y desintegración, aumenta con la densidad y se reduce con el contenido de agua. La durabilidad se evalúa mediante el ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento, o slake durability test (SDT, que consiste en someter

al material previamente fragmentado, a ciclos estándar de humedad, sequedad y desmoronamiento de 10 minutos de duración en el laboratorio.

2.3.1.5 Alterabilidad. Tendencia a la rotura de los componentes o de las estructuras de la roca.

2.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.

2.3.2.1 Resistencia a la compresión uniaxial. Es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio. Está dada por:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} = \frac{\text{Fuerza compresiva aplicada}}{\text{Área de aplicación}}$$

El valor de la resistencia aporta información sobre las propiedades ingenieriles de las rocas, se expresa en N/m^2

2.3.2.2 Resistencia a tracción. Es el máximo esfuerzo que soporta el material ante la rotura por tracción. Se obtiene aplicando fuerzas traccionales o distensivas a una probeta cilíndrica de roca en el laboratorio⁴. Se expresa en N/m^2

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} = \frac{\text{Fuerza de tracción aplicada}}{\text{Área – sección de la probeta}}$$

2.3.2.3 Velocidad de propagación de las ondas elásticas. Esta propiedad depende de la densidad y de las propiedades elásticas del material, su medida aporta información sobre algunas características como la porosidad. La velocidad

⁴ Carrillo C. Josué., "Nociones de mecánica de rocas: primera parte", Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 1997.

de las ondas o de compresión, V_p , se utiliza como índice de clasificación, y su valor es indicativo de la calidad de la roca, correlacionándose linealmente con la resistencia a la compresión simple σ_c ⁵.

2.4 TENSIONES Y DEFORMACIONES EN LA ROCAS.

2.4.1 Fuerzas y tensiones.

Las rocas presentan defectos estructurales debido a la variación en la composición mineralógica, orientación de minerales, porosidad, microfisuración, y grado de alteración, entre otras, mientras que los macizos rocosos, además contienen discontinuidades de muy diverso tipo y zonas meteorizadas o tectonizadas.

La aplicación de nuevas fuerzas, o la modificación de la magnitud o distribución de las preexistentes, da lugar a cambios en el estado mecánico de los sistemas rocosos, produciéndose una serie de efectos internos, como desplazamientos, deformaciones y modificación del estado tensional o de esfuerzos. En el laboratorio se utilizan ensayos en los cuales se aplican fuerzas para producir rotura del material y de esta forma conocer su resistencia y deformación. La caracterización del estado mecánico de un sistema está dado por:

- Posición de cada una de sus partes, definida por sus coordenadas.
- Fuerzas que actúan entre y sobre partes del sistema.
- Velocidad con que las partes cambian de posición.

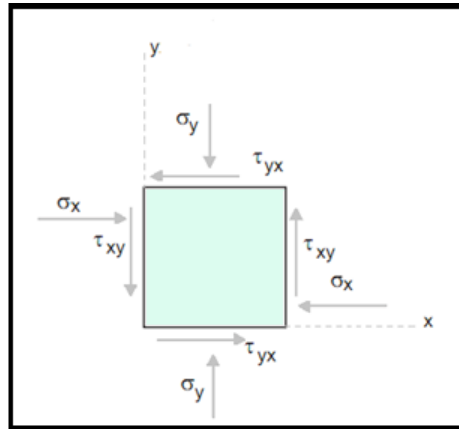
La diferencia entre dos estados mecánicos está definida por los desplazamientos, deformaciones y cambios en el estado tensional o de esfuerzos⁶.

⁵ Carrillo C. Josué., "Nociones de mecánica de rocas: primera parte", Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 1997.

2.4.2 Tensiones sobre un plano.

El estado de tensiones o esfuerzos en un punto están definidas por las fuerzas por unidad de área referidas a los planos perpendiculares x , y , a través del punto. Si se asume un material homogéneo y continuo sometido a un campo de fuerzas uniforme y se considera un cuadrado de área infinitesimal en reposo, los esfuerzos resultantes sobre las caras del cuadrado deben estar en equilibrio.

Figura 1. Componentes del estado de esfuerzos en dos dimensiones



Fuente: Mecánica de Materiales. Oswaldo Torres

En cada cara actúa una componente normal y tangencial. El estado de esfuerzos en dos dimensiones viene determinando tres componentes: σ_x , σ_y , τ_{xy} . El estado de esfuerzos no depende de la orientación del sistema de ejes elegido, pero si de sus componentes. Ya conocido el estado de esfuerzo mediante las componentes nombradas anteriormente, pueden calcularse los esfuerzos sobre cualquier plano de orientación conocida que pase por el punto. Si el estado de esfuerzos del plano se determina con referencia a un sistema de ejes elegido arbitrariamente, los valores las componentes normal y tangencial dependerán de los ejes elegidos⁷.

⁶ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

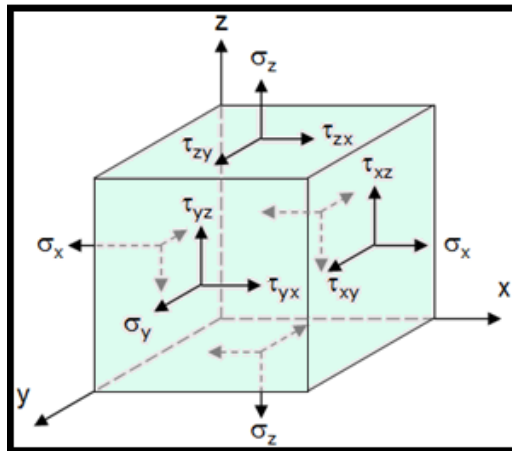
⁷ Ramirez Oyanguren Pedro, Alejano Monge Leandro., "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes", España.

2.4.3 Tensiones en tres dimensiones.

La cuantificación del estado de esfuerzos en un punto se lleva a cabo definiendo su estado de esfuerzos, es decir definiendo las fuerzas por unidad de área que actúan sobre tres planos ortogonales a través del punto. El estado de esfuerzos no se ve alterado por la elección del sistema de ejes de referencia, pero sí por sus componentes⁸.

El esfuerzo sobre el plano considerado viene dado por tres componentes: σ_{xx} , τ_{xy} , τ_{xz} , indicando el primer subíndice la dirección de la normal al plano (o el plano sobre el que actúa la componente), y el segundo la actuación de la componente de esfuerzo. Es similar, para las otras dos direcciones y, z, las componentes del esfuerzo actuando sobre los planos normales σ_{yy} , τ_{yx} , τ_{yz} y σ_{zz} , τ_{zx} , τ_{zy} .

Figura 2. Tensiones en tres dimensiones



Fuente: http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/10652/mod_resource/content/4/elasticidad/10-Tensiones.png

⁸ Beer Ferdinand P., "Mecánica de Materiales", Mc Graw Hill, Tercera edición, Mexico 2001.

2.4.4 Resistencia y rotura.

La aplicación de fuerzas que provocan tensiones o esfuerzos pueden producir deformaciones y roturas en las rocas dependiendo de la resistencia de estas y de otras condiciones del propio material rocoso.

La **resistencia** se define como el esfuerzo que la roca puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación. La resistencia de pico (σ_p), es el esfuerzo máximo que se puede alcanzar. La resistencia residual (σ_r), es el valor al que cae la resistencia de algunas rocas para deformaciones elevadas, este se produce después de sobrepasar la resistencia de pico⁹.

En condiciones naturales, la resistencia depende de las propiedades intrínsecas de la roca, es decir, cohesión, ángulo de fricción, y de factores externos como la magnitud de los esfuerzos que se ejercen, los ciclos de carga y descarga o la presencia de agua.

La **rotura** es un fenómeno que se obtiene cuando la roca no puede resistir las fuerzas aplicadas, alcanzando el esfuerzo un valor máximo correspondiente a la resistencia de pico del material. En función de la resistencia de la roca, las relaciones entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas, la rotura puede responder a diferentes modelos, como lo son la rotura frágil o rotura dúctil¹⁰.

⁹ Rodríguez Juan Carlos., "Diseño de Taludes en roca para la contrapresa del P.H. Pirrís. Costa Rica, Mayo 2008.

¹⁰ Ramírez Oyanguren Pedro, Alejano Monge Leandro., "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes", España.

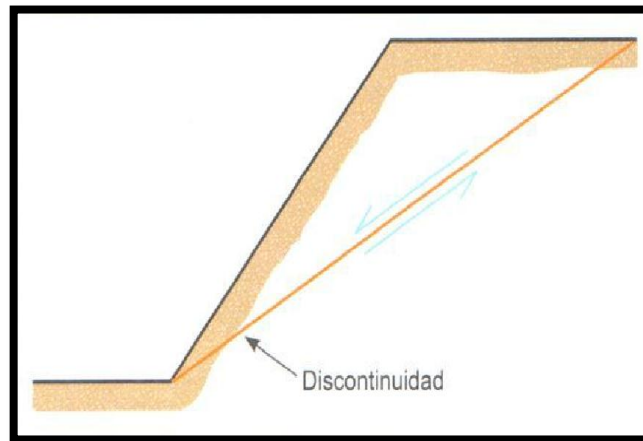
2.5 MECANISMOS DE ROTURA.

El análisis de la rotura en rocas es más complejo que en suelo, debido que el proceso de rotura en estas es muy variado, englobando varios tipos de fenómenos de manera conjunta e interviniendo múltiples factores. A continuación se presenta algunos de estos procesos:

2.5.1 Rotura por esfuerzo cortante.

Se crea cuando una determinada superficie de roca es sometida a esfuerzos de corte suficientemente altos como para que una cara de la superficie deslice con respecto a la otra¹¹.

Figura 3. Rotura por esfuerzo cortante de un talud



Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004.

¹¹ Rodríguez Juan Carlos., "Diseño de Taludes en roca para la contrapresa del P.H. Pirrís. Costa Rica, Mayo 2008.

2.5.2 Rotura por compresión.

Esta fractura ocurre cuando la roca sufre esfuerzos a compresión. Microscópicamente se producen grietas de tracción y planos de corte que progresan en el interior de la roca¹².

Fotografía 5. Rotura a compresión de un pilar en una iglesia paleocristiana excavada en tobas volcánicas. Capadoccia. Turquía (Foto M. Ferrer).



Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004

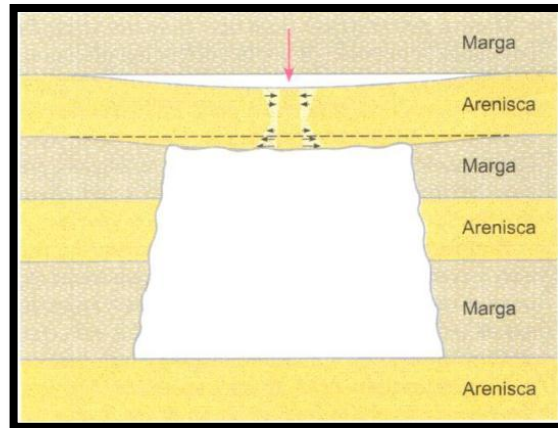
2.5.3 Rotura por flexión.

Resulta al ser sometida una sección de roca a momentos flectores, es decir cuando está sección está sometida a unas tensiones normales variables, rompiéndose por la zona donde se acumulan las tracciones¹³.

¹² Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

¹³ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004

Figura 4. Rotura por flexión de la clave de una galería.

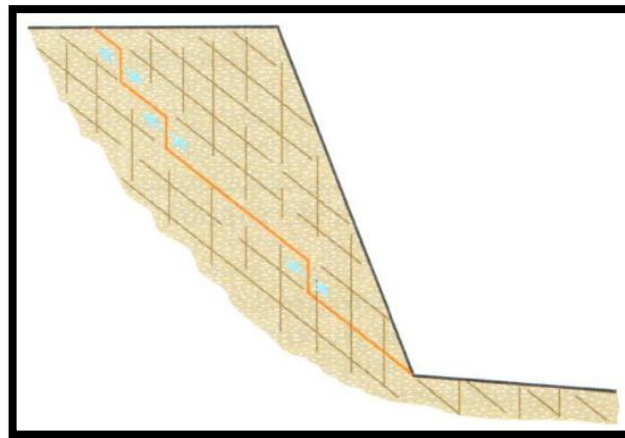


Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004.

2.5.4 Rotura por tracción.

Ocurre cuando la disposición y/o estructura del macizo rocoso hace que una cierta sección de la roca esté sometida a una tracción pura o casi pura¹⁴.

Figura 5. Tramos de las superficies de discontinuidad sometidos a tracción simple.



Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004.

¹⁴ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

2.5.5 Rotura por colapso.

Se produce cuando el material recibe compresiones en todas las direcciones del espacio. La estructura de la roca se rompe y se transforma en un material suelto, tipo suelo.¹⁵.

2.6 CRITERIOS DE ROTURA.

El criterio de rotura es la relación entre tensiones que permiten predecir la resistencia de una roca sometida a un campo tensional. En general se refieren a la resistencia de pico aunque también se puede emplear la resistencia residual, los criterios de rotura más utilizados son los siguientes:

2.6.1 Criterio de Mohr Coulomb.

Este criterio revela que la resistencia al corte de las rocas tiene dos componentes: cohesión y fricción, siendo esta última dependiente de la tensión efectiva normal sobre el plano de rotura.

Según esta teoría la resistencia al corte que puede desarrollar una roca en un plano que forma un ángulo β con la tensión principal menor, se puede expresar mediante la fórmula:

$$\tau = c + \sigma'_n \tan \phi$$

Donde,

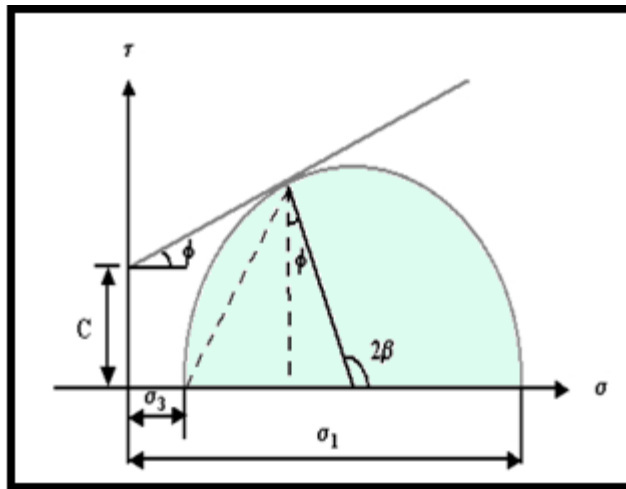
τ	Resistencia al corte
c	Cohesión
σ'_n	Tensión efectiva normal
ϕ	Angulo de fricción

¹⁵ Ramirez Oyanguren Pedro, Alejandro Monge Leandro., "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes", España.

El criterio puede expresarse igualmente en función de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 .

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3[\text{sen } 2\beta + \text{tag } \phi(1 - \cos 2\beta)]}{\text{sen } 2\beta - \text{tag } \phi(1 + \cos 2\beta)}$$

Figura 6. Relación entre tensiones principales y cortantes en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.



Fuente: Autores

Permitiendo obtener la resistencia en cualquier plano definido por β . Para el plano crítico de rotura $\beta=45^\circ + \phi/2$, la expresión anterior tomará la forma:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi + \sigma_3(1 + \text{sen } \phi)}{(1 - \text{sen } \phi)}$$

Si se da la condición $\sigma_3=0$, σ_1 será la resistencia a compresión simple de la roca:

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \text{sen } \phi}$$

El criterio también proporciona el valor de la resistencia a tracción:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \text{sen } \phi}$$

El criterio de Mohr-Coulomb supone que la envolvente de los círculos de Mohr correspondientes a las combinaciones críticas de las tensiones principales es decir

las que dan lugar a la rotura, es lineal. El criterio puede ser utilizado para definir tanto la resistencia pico como la residual, la rotura se produce cuando, la tensión cortante aplicada a la roca iguala la resistencia friccional de la misma, asociada con la tensión normal en el plano de rotura, más cohesión.

2.6.2 Criterio de Hoek y Brown Generalizado.

Este criterio ha variado desde su primera publicación en 1980, especialmente en lo relacionado a la incorporación del GSI (Índice de Resistencia Geológica), sustituyendo el criterio de RMR de Bieniawski. Esta nueva interpretación se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde,

m_b Valor reducido de la constante del material m_i .

m_i está dada por:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

a y s Constantes del macizo rocoso

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

D es un factor que depende del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por efecto de excavaciones (voladuras o mecánicas) o relajación de esfuerzos. Varía de 0 para macizos rocosos inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene haciendo $\sigma_3 = 0$, en la expresión generalizada así:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} * s^a$$

Y siendo la resistencia a tracción:

$$\sigma_t = -\frac{s * \sigma_{ci}}{m_b}$$

2.6.3 Criterio de Hoek y Brown.

Es más adecuado un criterio no lineal para evaluar la resistencia de la matriz rocosa, donde la figura gráfica de la rotura es una curva de tipo cóncavo. Este es un proceso empírico de rotura no lineal válido para evaluar la resistencia de la matriz rocosa isótropa en condiciones triaxiales:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_{ci} + \sigma_{ci}^2}$$

Donde,

- σ_1 y σ_3 Esfuerzos principales mayor y menor en rotura
- σ_{ci} Resistencia a compresión simple de la matriz rocosa
- m_i Constante que depende de la propiedad de la matriz rocosa

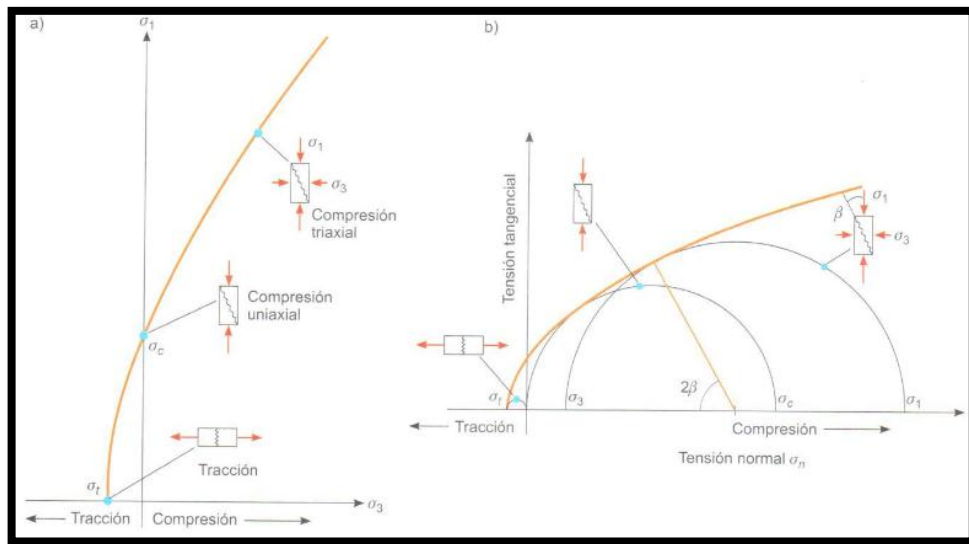
El criterio expresado adimensionalmente, en términos de esfuerzos normalizados con respecto a σ_{ci} , tiene la forma:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

La resistencia de la roca a compresión simple bien dada por la expresión anterior sustituyendo $\sigma_3=0$, y la resistencia a la tracción se obtiene resolviendo para $\sigma_1=0$ y $\sigma_3 = \sigma_t$:

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_{ci} \left(m_i - \sqrt{m_i^2 + 4} \right)$$

Figura 7. Envoltentes de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales. (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b). Representación de las diferentes condiciones de esfuerzos para rotura de la matriz rocosa



Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004.

La expresión del criterio de rotura en función de los esfuerzos tangenciales y normales es:

$$\tau = A \sigma_{ci} \left(\frac{\sigma_n - \sigma_t}{\sigma_{ci}} \right)^B$$

Donde,

σ_t = Resistencia a tracción

A y B = Constantes dependientes del valor de m_i ¹⁶.

¹⁶ Serrano Efrain, Prada Oscar., "Análisis y determinación de la amenaza de los taludes, generado por su saturación y desembalse, en el proyecto de regulación del río Tona, Bucaramanga, 2009.

2.6.4 Criterio de Rotura de Barton & Choubey.

Se deduce a partir del análisis de comportamiento de las discontinuidades en ensayos en laboratorio, permite dar una estimación de la resistencia al corte en discontinuidades rocosas y es empírico. Dado de la siguiente forma:

$$\tau = \sigma'_n * \tan \left(JRC * \log \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi_r \right)$$

Donde,

JCS Resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (Joint wall compression strenght).

JRC Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (Joint roughness coefficient).

Φ Ángulo de rozamiento residual.

τ y σ'_n Esfuerzos tangencial y normal efectivo sobre el plano de discontinuidad.

Con el criterio de Barton & Choubey resultan ángulos de rozamiento muy altos para tensiones de compresión muy bajas sobre la discontinuidad. Por este motivo no debe usarse para tensiones σ_n tales que $JCS / \sigma_n > 50$, debiendo tomarse en estos casos un ángulo de rozamiento constante independiente de la carga, con un valor ϕ_p igual a¹⁷:

$$\phi_p = \phi_r + 1.7JRC$$

2.6.5 Estimación Del Ángulo De Rozamiento Residual ϕ_r .

Debido a que la pared de la junta está alterada, el ángulo de rozamiento residual será inferior al ángulo de roca sana ϕ_b . Se expresa de la siguiente manera:

¹⁷ Rodríguez Juan Carlos., "Diseño de Taludes en roca para la contrapresa del P.H. Pirrís. Costa Rica, Mayo 2008

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R}$$

Donde,

R Valor del rebote del esclerómetro o martillo Schmidt sobre una superficie de material sano y seco

r Valor del rebote del esclerómetro sobre la superficie de la pared de la junta en estado natural, húmedo o seco

ϕ_b Ángulo de resistencia básico de la roca.

Si las paredes de la discontinuidad están sanas, $\phi_r = \phi_b$. Los valores típicos de ϕ_b en discontinuidades planas son del orden de 25° a 37° para rocas sedimentarias, de 29° a 38° en rocas ígneas y de 21° a 30° en rocas metamórficas¹⁸.

2.7 MÉTODOS GEOFÍSICOS.

Primordialmente los ensayos geofísicos se basan en producir, por medio de impactos o explosiones, ondas que se propagan en el medio rocoso, para el reconocimiento del subsuelo, estos se dividen según el parámetro físico.

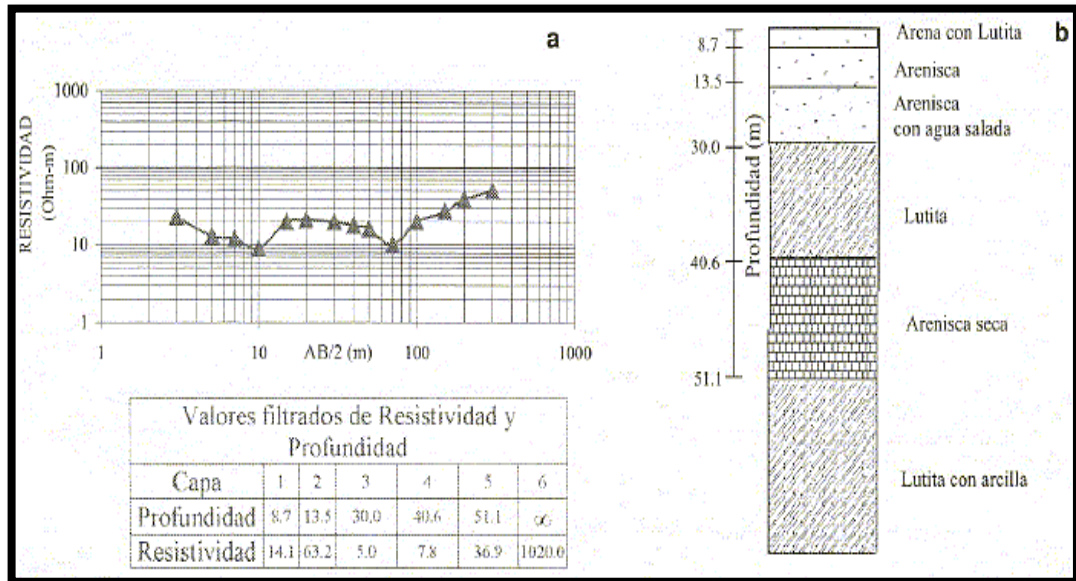
2.7.1 Métodos de superficie.

2.7.1.1 Métodos eléctricos. Estudian la respuesta del terreno cuando se propagan a través del él corrientes eléctricas continuas (DC), el parámetro físico que se controla es la resistividad (ρ) y la interpretación final se hace en función de las características geológicas de la zona en que se aplican. La resistividad depende de la estructura interna, litología y especialmente de su contenido de agua, no siendo una propiedad isótropa en la masa rocosa pero si una propiedad

¹⁸ Serrano Efrain, Prada Oscar., "Análisis y determinación de la amenaza de los taludes, generado por su saturación y desembalse, en el proyecto de regulación del río Tona, Bucaramanga, 2009.

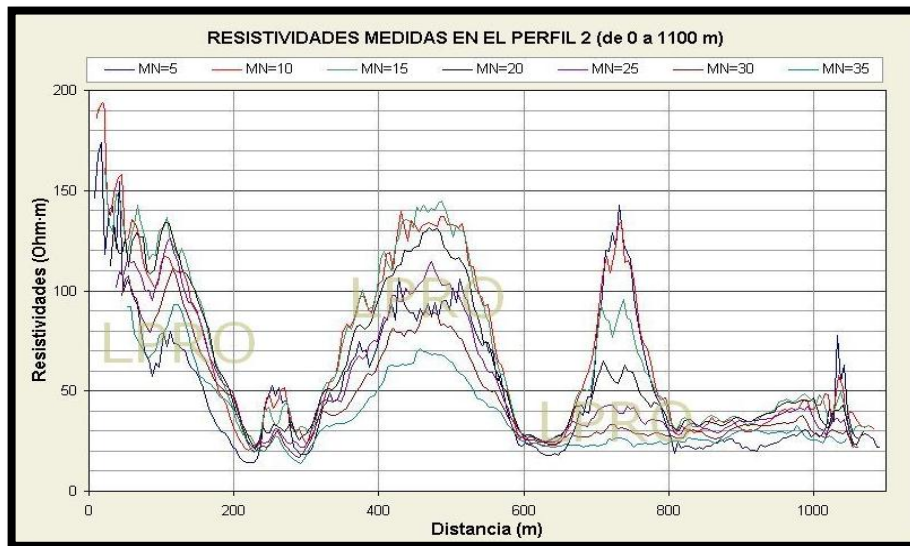
intrínseca de las rocas. Los métodos más comunes son los **Sondeos eléctricos verticales** y las **Calicatas eléctricas**.

Figura 8. Ejemplo de Sondeo eléctrico vertical (SEV)



Fuente: Revista técnica de la facultad de ingeniería de la Universidad de Zulia, Maracaibo (Venezuela), 2003

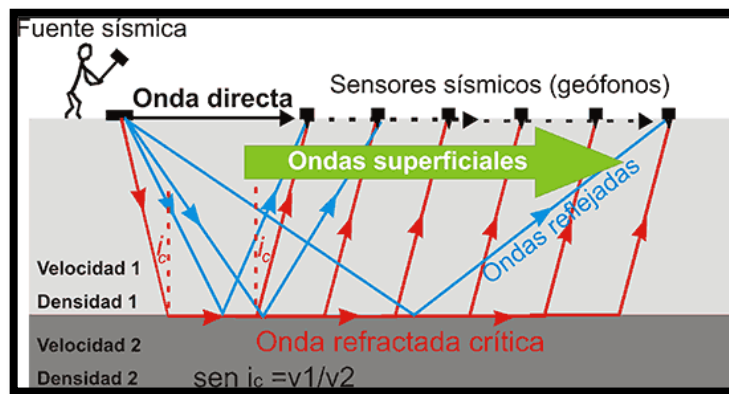
Figura 9. Calicata eléctrica



Fuente: Laboratorio de prospección, Universidad Politécnica de Madrid.

2.7.1.2 Métodos sísmicos. Son aquellos que estudian la propagación en el terreno de ondas sísmicas producidas artificialmente, estableciendo su relación con la configuración geológica del subsuelo. La velocidad de propagación depende principalmente de la densidad del medio y de las constantes elásticas. Básicamente en Ingeniería geológica se utiliza la sísmica de refracción, que estudia la energía que vuelve a la superficie tras sufrir refracción total en superficies límite de subsuelo.

Figura 10. Esquema de adquisición de datos sísmicos y de los principales tipos de ondas según sus características de propagación

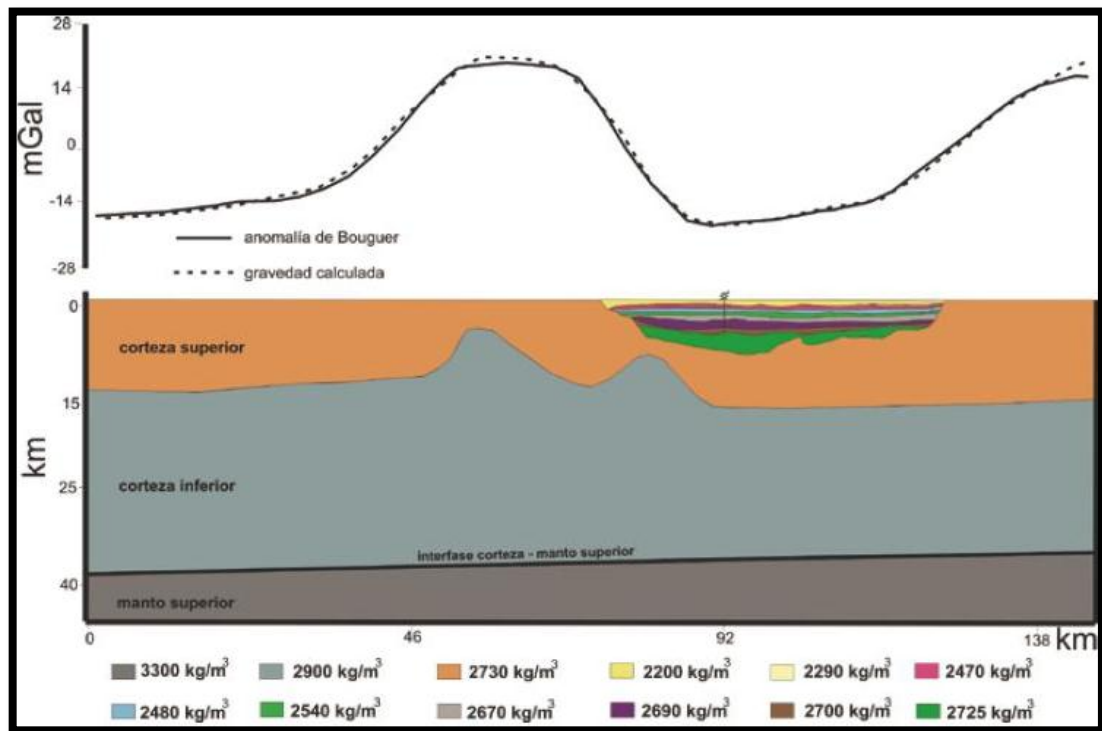


Fuente: Institut Geologic de Catalunya (IGC), 2011

2.7.1.3 Métodos electromagnéticos. Estudian la respuesta del terreno cuando se propagan a través de él, campos electromagnéticos (EM). La variedad de estructuras de generación o detección de estos campos EM, como la diversidad de sus características, dan lugar a un mayor número de técnicas de aplicación. Pueden clasificarse en dos grupos: De fuente de **Inducción Próxima** que se subdividen en FDEM (Prospección electromagnética en dominio de frecuencias) Y TDEM (Prospección electromagnética en dominio de tiempos), y de fuente de **Inducción Lejana** VLF (Very Low Frequency).

2.7.1.4 Métodos gravimétricos. Estudia la diferencia entre los valores medidos del campo gravitatorio terrestre en un lugar y el valor que teóricamente debía tener ese lugar. Estos métodos son útiles para ubicar cualquier fenómeno en el que el cambio de la densidad sea su característica más importante, en la ingeniería se utilizan para la detección de huecos y su cubicación, zonas con tratamientos del terreno con aumento de densidad, localización de galerías, zonas con importantes pérdidas de finos, etc.

Figura 11. Modelización de un Perfil gravimétrico



Fuente: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2011

2.7.1.5 Métodos magnéticos. Se refiere al estudio de los cambios locales del campo magnético terrestre, dando como resultado medidas absolutas de la componente vertical del campo magnético. Las anomalías son debidas a diferencias en la susceptibilidad magnética de los suelos, rocas, y a la presencia de minerales permanentemente magnetizados. En la Ingeniería las principales

aplicaciones son contactos litológicos, masas mineralizadas, fallas, localización de conducciones metálicas enterradas, diques, etc. Los equipos más usados son los magnetómetros de protones. Los trabajos de campo pueden verse afectados por la presencia de tendidos eléctricos, vehículos en movimiento, terrenos heterogéneos, vías férreas.

3. MACIZO ROCOSO.

Un macizo rocoso se encuentra formado por una gran masa de roca que naturalmente presenta discontinuidades por diaclasas u otras formas de superficies de debilidad. Para emprender el análisis del comportamiento de estos elementos en el ámbito Ingenieril, es importante tener en cuenta que esta situación hace que no se pueda hablar de un conjunto homogéneo como si lo es el caso de los suelos.

3.1 CLASIFICACIÓN.

Se basa en algunos o varios factores que determinan su comportamiento mecánico:

- Propiedades de la matriz rocosa
- Frecuencia y tipo de las discontinuidades, que definen el grado de fracturación, tamaño, forma de los bloques del macizo, propiedades hidrogeológicas, etc.
- Grado de meteorización o alteración
- Presencia de agua

Las clasificaciones más útiles en mecánica de rocas son las denominadas Geomecánicas, de las cuales la RMR de Bieniawski y la Q de Barton son las más utilizadas ya que establecen diferentes grados de calidad del macizo en función de las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades. También existen otras clasificaciones basadas en diferentes parámetros que no son tan importantes en las propiedades del conjunto del macizo rocoso. El grado de fracturación, medido mediante el índice RQD, clasifica al macizo en diferentes grados de calidad. El número de familias de discontinuidades, el tamaño y la forma de los bloques de matriz rocosa igualmente son parámetros que se emplean para

establecer clasificaciones que aportan información sobre su configuración y grado de fracturación. Otro parámetro de clasificación es el índice de velocidad relativa el cual relaciona la velocidad de las ondas longitudinales medida in situ en el macizo rocoso con la velocidad medida en probetas de matriz rocosa en el laboratorio y se utiliza con criterio de calidad en el siguiente cuadro¹⁹:

Tabla 1. Índice de velocidad relativa y calidad del macizo rocoso

Índice de Velocidad Relativa (V_f/V_L) 2	Calidad del Macizo Rocosos
< 0,2	Muy mala
0,2-0,4	Mala
0,4-0,6	Media
0,6-0,8	Buena
>0,8	Muy buena

Fuente: Autores

Para la clasificación cualitativa se los macizos rocosos se emplea el grado de meteorización o alteración debido a que este influye en la resistencia y las propiedades mecánicas del mismo.

3.2 METEORIZACIÓN DE LOS MATERIALES ROCOSOS.

A la descomposición y desintegración de los materiales geológicos en superficie se le denomina meteorización. Esto incluye aquellos cambios de carácter químico o físico que alteran las características y propiedades de los materiales. Estos proceso de meteorización dan paso a los suelos, que pueden permanecer en su lugar de origen (Suelos residuales), o se pueden transportar y litificarse (Conversión de los sedimentos en rocas sedimentarias) formando nuevamente rocas o permanecer como suelos (Suelos transportados).

Los procesos de meteorización están controlados por las condiciones climáticas y sus variables de precipitación, temperatura, régimen de vientos, humedad, etc.,

¹⁹ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004

que definen el tipo y la intensidad de las transformaciones química y físicas que afectan los materiales rocosos de la superficie.

3.2.1 Meteorización de la matriz rocosa.

La meteorización química de la matriz rocosa provoca la formación de nuevos minerales por medio de procesos de hidratación, reducción, oxidación, etc., y la disolución de minerales solubles. La meteorización física da lugar a exfoliación por planos de direcciones preferentes, apertura de microdiscontinuidades por hielo o crecimiento de sales, cambios de volumen por cambios de humedad o temperatura, etc. Los resultados de la alteración química van desde la decoloración de la matriz rocosa a la descomposición de los silicatos y otros minerales, aunque alguno de ellos como el cuarzo, resisten estas acciones.

Los efectos y acción de la meteorización serán distintos dependiendo del tipo de roca, estando directamente relacionados con su composición mineralógica y propiedades estructurales.

La meteorización física en las rocas rompe y disgrega la roca, debilitando la estructura rocosa al romperse los minerales y los contactos entre partículas, aumentando la superficie expuesta a la atmósfera y permitiendo la entrada de agua, la química es más intensa y produce su descomposición y cambios mineralógicos.

En general cuanto mayor sea la diferencia entre condiciones de presión y temperatura a las que se forman las rocas y las condiciones ambientales, mayor es la facilidad de meteorización.

Las rocas arcillosas son las más afectadas por los procesos de meteorización física y las que más sufren su influencia en las propiedades físicas y mecánicas, pero es frecuente que estas rocas permanezcan mineralógicamente estables, no

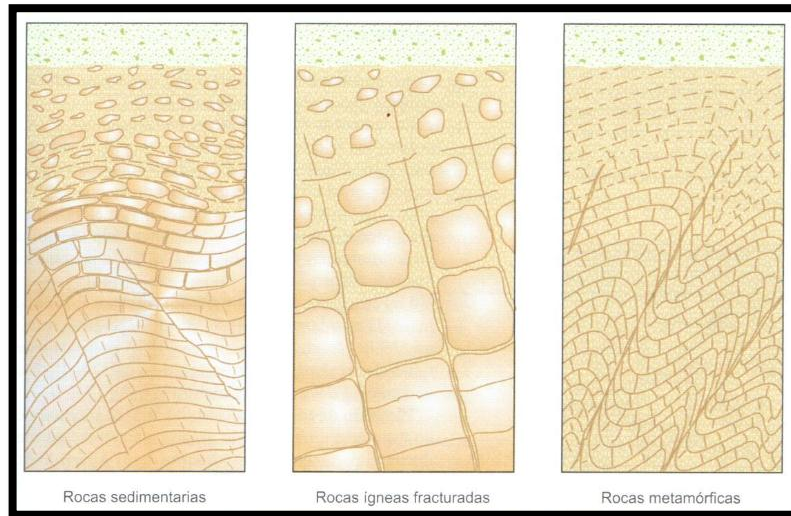
sufriendo meteorización química, temperaturas y presiones cercas a la superficie. En las rocas ígneas metamórficas su meteorización física es más resistible que en las sedimentarias, mientras que su meteorización química es inestable en superficie debido a que se forma en condiciones de presión y temperatura muy diferente sufriendo cambios mineralógicos. La disminución de la resistencia es la consecuencia principal causada por la descomposición de la roca por meteorización química, ya que aumentando la humedad o porosidad de la roca puede causar una reducción considerable de la resistencia y módulo de deformación²⁰.

3.2.2 Meteorización de macizos rocosos.

En los macizos rocosos actúan procesos de meteorización que afectan los bloques de matriz como a los planos de debilidad o discontinuidad existente. A manera de resultado de la meteorización física o mecánica se pueden abrir discontinuidades existentes o crearse nuevas por fractura de roca, al producirse la rotura de los minerales de la matriz rocosa o al romperse los contactos entre granos. Se pueden conservar los bloques de matriz rocosa o presentar un comportamiento de suelos según el grado de meteorización. Cuando mayor es el tiempo de exposición a los agentes atmosféricos, las diferentes litologías son afectadas en forma desigual por los procesos de meteorización.

²⁰ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

Figura 12. Perfiles típicos de meteorización a suelos residuales en rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas



Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004.

Los procesos de descarga por erosión son parte importante en la meteorización de los macizos rocosos debido a la consecuencia que produce la disminución de presión litostática (presión de las rocas), las masas rocosas se expanden a favor de planos de fractura que se generan paralelos a la superficie del terreno, dando lugar a una estructura en capas. La profundidad de la meteorización depende del tipo de roca, tipo de clima y del tipo de actuación de los procesos²¹.

Por medio del RQD (Rock Quality Designation) puede estimarse el grado de meteorización a partir de su grado de fracturación. Este índice representa la relación entre la suma de longitudes de los fragmentos de muestra mayores de 10 cm y la longitud del tramo considerado:

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de los trozos de muestra} > 10 \text{ cm}}{\text{longitud total}} * 100$$

²¹ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

Para evaluar el RQD se toman solo los fragmentos o muestras de material fresco, sin tomar en cuenta los que presentan un grado de alteración importante. En la siguiente tabla se da a conocer el procedimiento de medida del RQD y se detalla la calidad de la roca en función de este índice:

Tabla 2. Índice RQD

RQD %	Calidad
<25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Muy buena

Fuente: Autores

3.3 EL AGUA SUBTERRÁNEA.

Las corrientes de agua freática desempeñan un papel importante e intervienen de una forma fundamental en el comportamiento de las masas de roca. El flujo del agua en los macizos rocosos se presenta a través de las juntas, diaclasas o discontinuidades y a través de la matriz rocosa por medio de los poros. La presencia de agua y el flujo de la misma en el material rocoso hacen que este tenga un comportamiento mecánico bien definido.

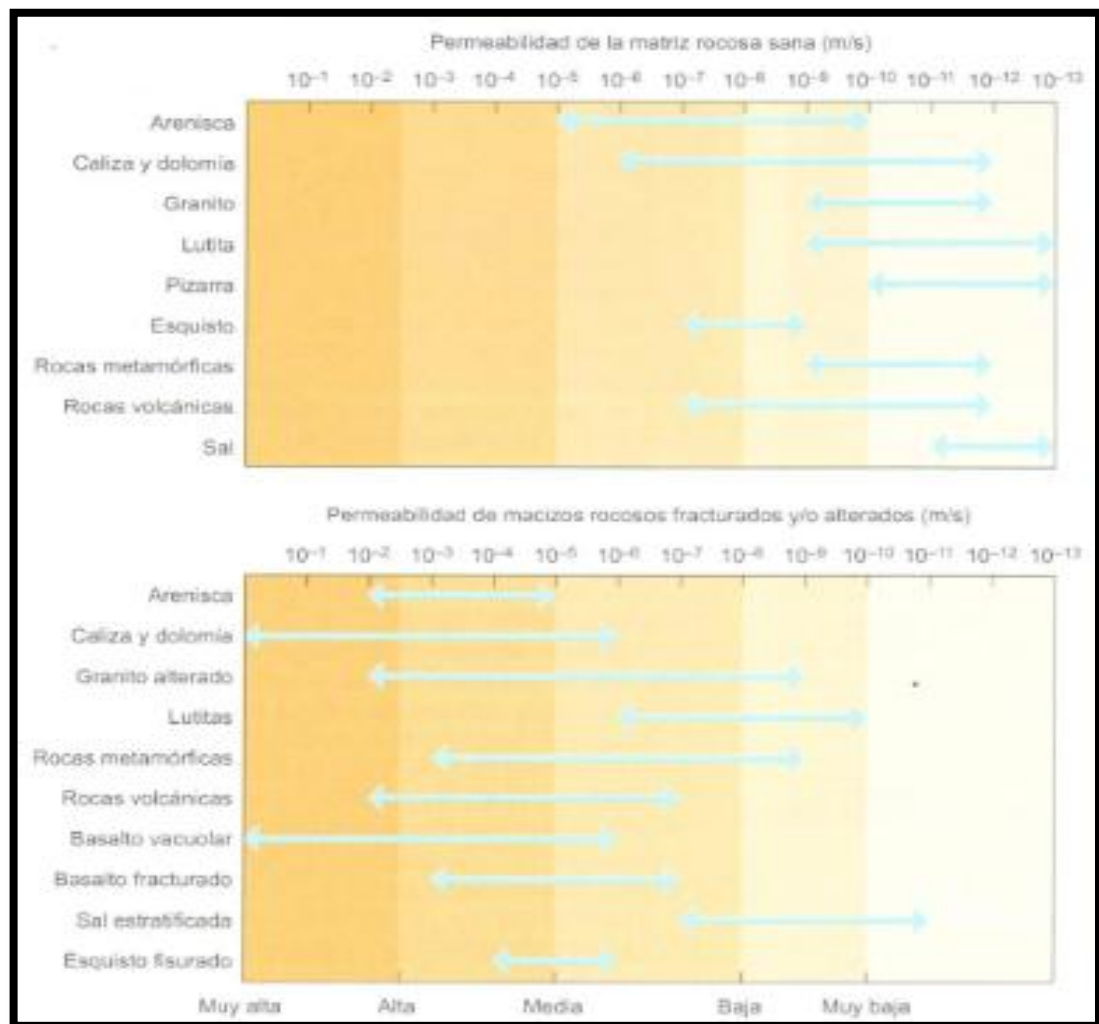
3.3.1 Permeabilidad Y Flujo De Agua.

Los tres elementos que constituyen el medio geológico son el agua, las rocas y el suelo. El agua corre a través de las rocas y suelos con mayor o menor velocidad. El hecho de que la roca pueda o no permitir el paso de agua se denomina permeabilidad. Esta depende de su porosidad y de la interacción entre los poros. Aparte se definen dos tipos de permeabilidad: la primaria y la secundaria.

La permeabilidad primaria es refiere al flujo de agua a través de la matriz rocosa.

Este tipo de flujo es intergranular y el agua se transmite a través de los poros y microfisuras interconectadas de la roca. La permeabilidad ocurre cuando en los macizos rocosos el agua fluye a favor de las superficies de discontinuidad. En general, la permeabilidad de la matriz rocosa es despreciable con respecto a la del macizo rocoso fracturado. En los macizos rocosos permeables se establece un nivel de agua en el cual los poros o discontinuidades interconectados aparecen llenos de agua.

Figura 13. Valores de permeabilidad primaria y secundaria para rocas y macizos rocosos (modificado de Isherwood, 1979; en Hudson y Harrison, 2000).



Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004.

3.3.2 Efectos Sobre Las Propiedades De Los Macizos Rocosos.

“Los efectos más importantes son:

- *Juega un papel importante en la resistencia de las rocas blandas y de los materiales meteorizados.*
- *Reduce la resistencia de la matriz rocosa en rocas porosas.*
- *Rellena las discontinuidades de los macizos rocosos e influye en su resistencia.*
- *Las zonas alteradas y meteorizadas superficialmente, las discontinuidades importantes y las fallas son caminos preferentes para el flujo de agua.*
- *Produce meteorización química y física en la matriz rocosa y en los macizos porosos.*
- *Es un agente erosivo.*
- *Produce reacciones químicas que pueden dar lugar a cambios en la composición del agua²²”*

La presencia de agua subterránea da lugar a una tensión o presión hidrostática que se ejerce sobre las rocas con una magnitud a todas las direcciones.

3.4 ENSAYOS IN SITU.

3.4.1 Ensayos de resistencia.

3.4.1.1 Esclerómetro O Martillo De Schmidt. Estima de forma aproximada la resistencia a compresión simple mediante una simple correlación, siendo aplicable principalmente a la matriz rocosa, pero también a discontinuidades. El esclerómetro consta de un pequeño aparato metálico de geometría cilíndrica que dispone de un muelle en su interior y de una punta retráctil, la cual, al ser presionada contra la roca hace que el muelle se dispare.

²² Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., “Ingeniería Geológica”, Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

3.4.1.2 Carga puntual. Ensayo de Franklin o PLT (point load test). Se emplea para determinar la resistencia a compresión simple de fragmentos irregulares de roca o probetas de sondeos, a partir del índice I_s , adquirido en el ensayo. Los resultados son más fiables si se ensayan con probetas. Este ensayo no es indicado para rocas blandas o con anisotropía muy marcada²³.

3.4.2 Ensayos de deformabilidad.

3.4.2.1 Dilatómetro. Comprende una adaptación del presiómetro para su aplicación en rocas y, en consecuencia, funciona bajo su mismo principio. Se obtienen unas curvas carga-desplazamiento como resultado del ensayo, a partir de las cuales se determina el módulo de deformación dilatómetro en seis direcciones a lo largo de tres diámetros. Este ensayo es muy favorable en macizos rocosos muy fracturados, rocas blandas o deformables y, en general, donde la obtención de muestras es difícil o imposible y se precise obtener las propiedades elásticas de la roca in situ²⁴.

3.4.2.2 Placa de carga. Suele hacerse en el interior de galerías excavadas en roca. Los parámetros que se miden son la carga, desplazamientos y tiempo que permiten obtener el módulo de Young E. Este ensayo se utiliza para el estudio de cimentaciones en roca en casos muy definidos como presas de hormigón.

3.4.2.3 Gato plano. Se realiza en las paredes de túneles y excavaciones, permite evaluar el módulo de deformación en macizos rocosos duros y continuos, y medir el estado tensional de la roca. Sus resultados pueden considerarse

²³ Carrillo C. Josué., "Nociones de mecánica de rocas: primera parte", Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 1997.

²⁴ Carrillo C. Josué., "Nociones de mecánica de rocas: primera parte", Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 1997.

representativos hasta una distancia de unos pocos metros hacia el interior del macizo rocoso a partir de la superficie en la que se realice el ensayo²⁵.

3.4.3 Ensayos de permeabilidad.

3.4.3.1 Lugeon. Se ejecuta en el interior de sondeos y permite calcular semicuantitativamente la permeabilidad de los macizos rocosos, en cualquier tipo de litología y estado de fracturación. Los resultados de esta prueba se presentan en función de la profundidad, en unidades de lugeon. A continuación se muestra una tabla donde se encuentra los tipos de macizos rocosos según su permeabilidad.

Tabla 3. Clasificación de Macizos rocosos en función de la permeabilidad

Tipo de Macizo	Unidades de Lugeon	Presión(kp/cm^2)
Muy impermeable	0-1	10
Prácticamente impermeable	1-3	10
Permeable	>3	10
	1,5-6	5
Muy permeable	>3	10
	>6	5

Fuente: Olalla y Sopeña, 1991

3.5 DISCONTINUIDADES.

En los macizos rocosos las superficies o planos de discontinuidad condicionan de forma definitiva su comportamiento resistente y sus propiedades, deformacional es hidráulico. Las discontinuidades representan planos preferentes de alteración, meteorización y fractura, permitiendo el flujo de agua.

²⁵ Carrillo C. Josué., "Nociones de mecánica de rocas: primera parte", Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 1997.

3.5.1 Tipos de discontinuidades.

- Estrato: Nivel sencillo de litología gradacional u homogénea, depositado de forma paralela a la inclinación de la formación. Suele estar separado de los estratos colindantes por superficies de erosión. Los estratos pueden ser difíciles de reconocer, cuando el macizo rocoso está constituido por un solo tipo litológico.
- Laminación: Superficie de discontinuidad que da a la roca un aspecto laminar de lechos muy delgados. Puede ser de origen sedimentario.
- Esquistosidad: Se presenta cuando el macizo rocoso tiene una estructura de origen metamórfico o tectónico, en láminas u hojas paralelas.
- Pizarrosidad: Es la propiedad de las rocas de aspecto laminar de poder dividirse en hojas delgadas. Implica metamorfismo.
- Fallas y Juntas: Son planos de discontinuidad que se producen cuando el macizo rocoso ha estado sometido a un esfuerzo tectónico que ha sobrepasado su límite de rotura. Cuando las dos secciones separadas por la fractura han sufrido desplazamientos relativos por efecto de tensiones cortantes, ésta se denomina falla. En el caso contrario se denomina junta. *“Las fallas y juntas se pueden formar también a consecuencia de la disminución de compresión vertical que se produce debido a la erosión o por los cambios de volumen diferenciales que tiene lugar en ciertos macizos rocosos”*²⁶.

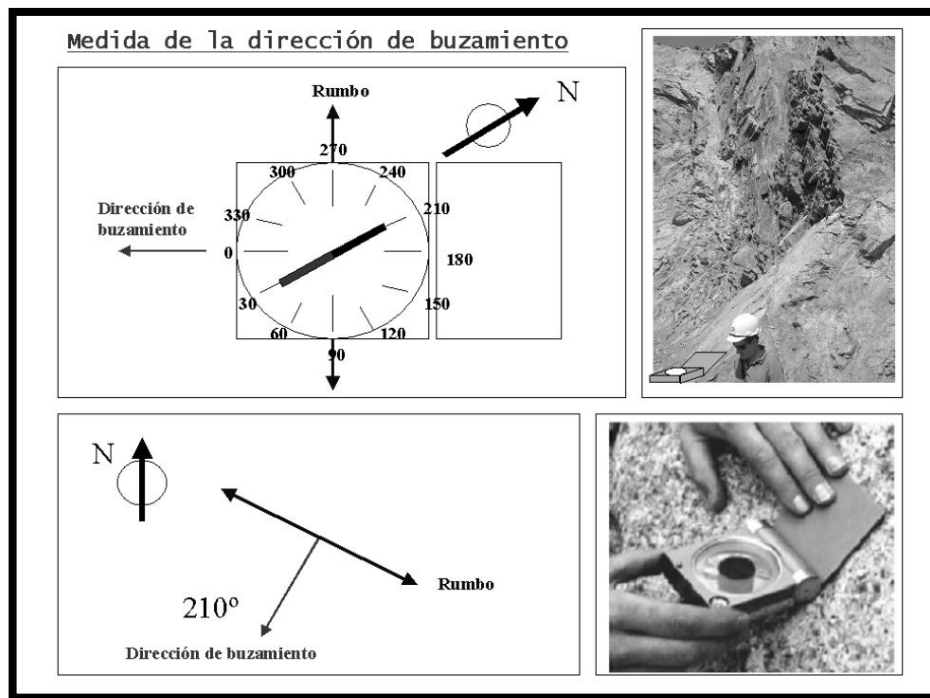
3.5.2 Características de las discontinuidades.

Los caracteres geomecánicos de las discontinuidades que más influyen en su comportamiento son:

²⁶ Ramirez Oyanguren Pedro, Alejano Monge Leandro., “Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes”, España.

- Orientación: Espacio definido por la dirección de su rumbo (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte) y por su buzamiento (inclinación respecto a la horizontal de dicha línea). Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro o con el diaclasímetro. La orientación de unas discontinuidades con respecto a otras determina la forma de los bloques de roca existentes en el macizo rocoso y de su orientación con relación a los taludes depende el tipo de bloque que puede desprenderse en éstos.

Fotografía 6. Medida de la dirección de buzamiento de una discontinuidad.

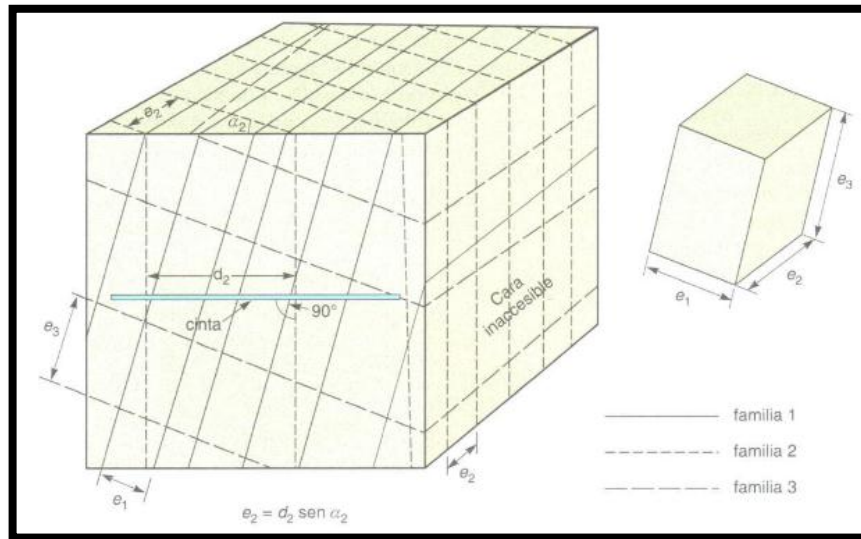


Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes.

- Espaciado: Conjunto de discontinuidades subparalelas, a la distancia media entre ellas. El espaciado de las discontinuidades es el factor que más influye en el tamaño de los bloques que componen el macizo rocoso. Este aspecto cobra máxima importancia cuando existen otros factores que

contribuyen a aumentar la deformabilidad del macizo rocoso. El espaciado se mide colocando una cinta métrica perpendicular a las discontinuidades en el afloramiento.

Figura 14. Medida del espacio en una cara expuesta del afloramiento.



Fuente: ISRM, 1981

- Dimensiones, Continuidad o Persistencia: Extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Parámetro de gran importancia pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que normalmente se ven las tranzas de los planos de discontinuidad según un buzamiento aparente. La medida de la continuidad se realiza con una cinta métrica. Si el afloramiento permite la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección del buzamiento²⁷.

²⁷ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004

Se pueden clasificar según la siguiente tabla:

Tabla 4. Terminología de continuidad o persistencia recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas SIMR (Brown, 1981).

Término	Continuidad en m
Muy pequeña	<1
Pequeña	1-3
Media	3-10
Grande	10-20
Muy grande	> 20

Fuente: Autores

Fotografía 7. Tamaño relativo de las familias de las discontinuidades.

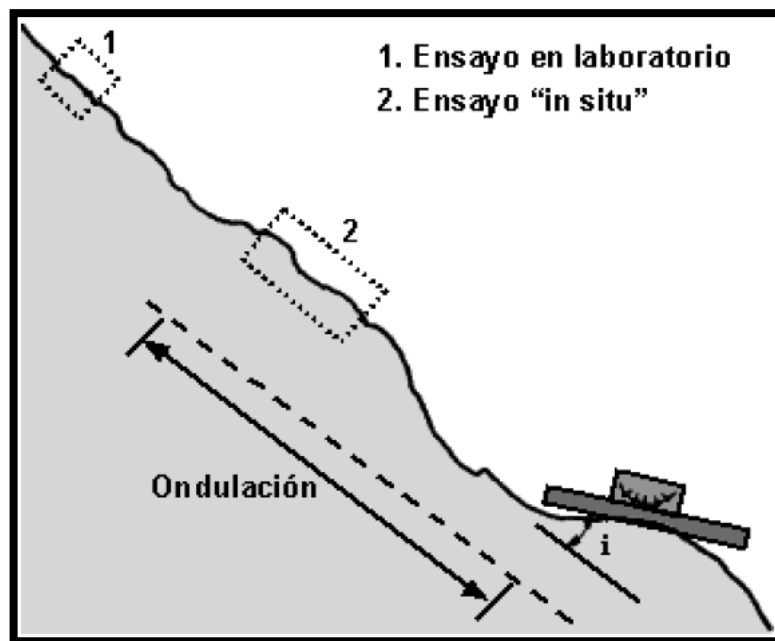


Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes.

- Rugosidad: Tienen una gran influencia sobre su resistencia al corte. Esta influencia es tanto menor cuanto mayor sea su apertura y el espesor de relleno. La rugosidad de una discontinuidad se puede caracterizar mediante dos factores: ondulación y aspereza. Las ondulaciones son rugosidades a gran escala que provocan una fuerte expansión o dilatación de la

discontinuidad al experimentar ésta un desplazamiento cortante, si ambos lados están en contacto. "Las asperezas son rugosidades a pequeña escala que pueden desaparecer en parte durante el desplazamiento cortante de la discontinuidad, si éste produce rotura de los pequeños picos de roca que constituyen la rugosidad. Si la resistencia de la roca de las paredes de la discontinuidad es elevada o la tensión normal aplicada es pequeña, esta rotura no tiene lugar. El valor de la resistencia al corte debida a las asperezas se puede obtener en el laboratorio ensayando una muestra de la discontinuidad o, a mayor escala, mediante un ensayo de corte directo "in Situ". La ondulación se puede medir mediante el ángulo i ²⁸.

Figura 15. Ondulación de una discontinuidad.












Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes.

Por consiguiente, una discontinuidad que se puede observar en suficiente longitud, se puede clasificar en nueve grados de rugosidad.

²⁸ Ramirez Oyanguren Pedro, Alejano Monge Leandro., "Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes", Madrid (España).

Figura 16. Escala intermedia, para observaciones de hasta un metro de longitud (Barton, 1987).

Descripción	Perfil	Jr	JRC 200mm	JRC 1m
Rugoso		4	20	11
Suave		3	14	9
Espejo de falla		2	11	8
Escalonado				
Rugoso		3	14	9
Suave		2	11	8
Espejo de falla		1,5	7	6
Ondulado				
Rugoso		1,5	2,5	2,3
Suave		1	1,5	0,9
Espejo de falla		0,5	0,5	0,4
Plano				

Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes.

- Resistencia de las paredes de la discontinuidad: Influye en su resistencia al corte y en su deformabilidad. Depende de la existencia o no de relleno, del grado de alteración y del tipo de matriz rocosa. En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma de la matriz rocosa, pero generalmente es menor debido a la meteorización de las paredes: los procesos de alteración afectan en mayor grado a los planos de discontinuidad que a la matriz rocosa. Se realiza por medio del ensayo de martillo de Schmidt²⁹.

²⁹ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

Fotografía 8. Alteración por oxidación en las superficies de discontinuidad de un macizo rocoso de cuarcitas, mientras que la matriz rocosa permanece fresca.



Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004.

Por este motivo, junto a la medida de la resistencia de las paredes de la discontinuidad debe ser estimado el grado de meteorización de la matriz rocosa, según la tabla 5.

- Abertura: Distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede ser muy variable en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso: mientras que en superficie la abertura puede ser alta, ésta se reduce con la profundidad, pudiendo llegar a cerrarse. *“La influencia de la abertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes.*

Los procesos de desplazamiento en la discontinuidad o de disolución pueden dar lugar a aberturas importantes”³⁰. Su medida se realiza directamente con una regla

³⁰ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., “Ingeniería Geológica”, Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

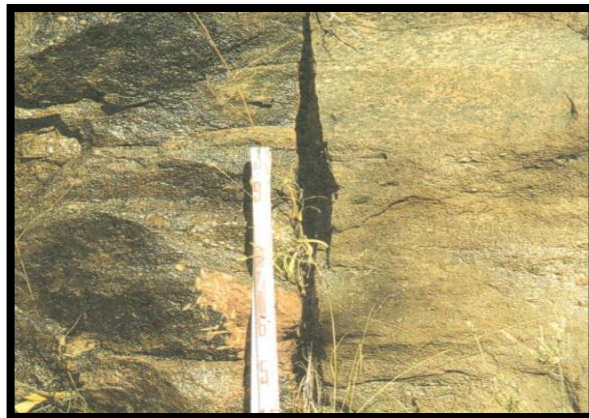
graduada en milímetros. Cuando la separación es muy pequeña se puede emplear un calibrador que se introduce en la abertura.

Tabla 5. **Descripción del grado de meteorización**

Término	Descripción
Fresca	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa.
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales se debe mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos.

Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004

Fotografía 9. Discontinuidad de abertura “muy ancha” sin relleno, en areniscas.



Fuente: Prospección y Geotecnia

Tabla 6. Descripción de la Abertura

Abertura	Descripción
<0,1 mm	Muy cerrada
0,1-0,25 mm	Cerrada
0,25-0,5 mm	Parcialmente abierta
0,5-2,5 mm	Abierta
2,5-10	Moderadamente ancha
>10 mm	Ancha
1-10 cm	Muy ancha
10-100 cm	Extremadamente ancha
> 1 m	Cavernosa

Fuente: ISRM, 1981

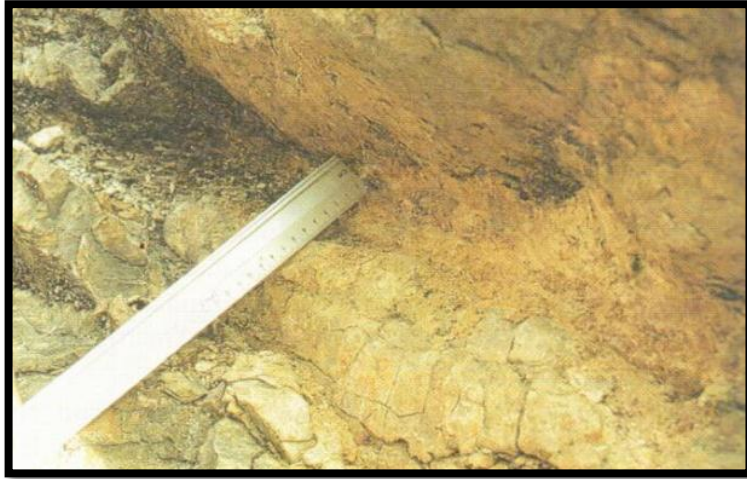
- Relleno: Es el material que ocupa el espacio entre sus paredes. Por lo general el espesor de relleno es igual a la distancia perpendicular entre las paredes. Es conveniente medir los espesores máximo, mínimo y estimar, a partir de ellos, el espesor medio. Si la diferencia entre los espesores máximo y mínimo es grande, puede ser debido a que la discontinuidad ha experimentado desplazamientos cortantes.

“El comportamiento mecánico de las discontinuidades depende en gran medida de las características del relleno, las más importantes son:

- *Espesor*
- *Mineralogía*
- *Granulometría*
- *Relación de sobreconsolidación*
- *Humedad y permeabilidad*
- *Desplazamientos cortantes previos*³¹.

³¹Ramírez Oyanguren Pedro, Alejano Monge Leandro., “Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes”, Madrid (España).

Fotografía 10. Discontinuidad “ondulada-rugosa” en calizas con abertura “muy ancha” y relleno arcillosos



Fuente: Prospección y Geotecnia.

Para estimar la resistencia al corte de una discontinuidad es importante estudiar, en caso de existir, las características de la fricción arcillosa del relleno, sobre todo si se trata de arcillas expansivas. Además, es conveniente determinar si ha existido desplazamiento cortante previo de la discontinuidad, puesto que la resistencia residual al corte de la arcilla es menor que la resistencia pico.

- Filtración: Generalmente la circulación de agua en los macizos rocoso se realiza a lo largo de las discontinuidades (permeabilidad secundaria), excepto en las rocas sedimentarias con un alto índice de poros, en las cuales el agua circula por la propia roca (permeabilidad primaria). Esta permeabilidad necesita que los estratos permeables se conecten unos con otros, frecuentemente a través de discontinuidades. *“La permeabilidad secundaria es más propia de los macizos de rocas ígneas y metamórficas. Por lo que se acaba de exponer, la permeabilidad en los macizos rocosos suele ser muy anisotrópica”³².*

³² Ramirez Oyanguren Pedro, Alejano Monge Leandro., “Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes”, Madrid (España).

Las observaciones respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan relleno o aparecen limpias se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 7. Descripción de las filtraciones en las discontinuidades

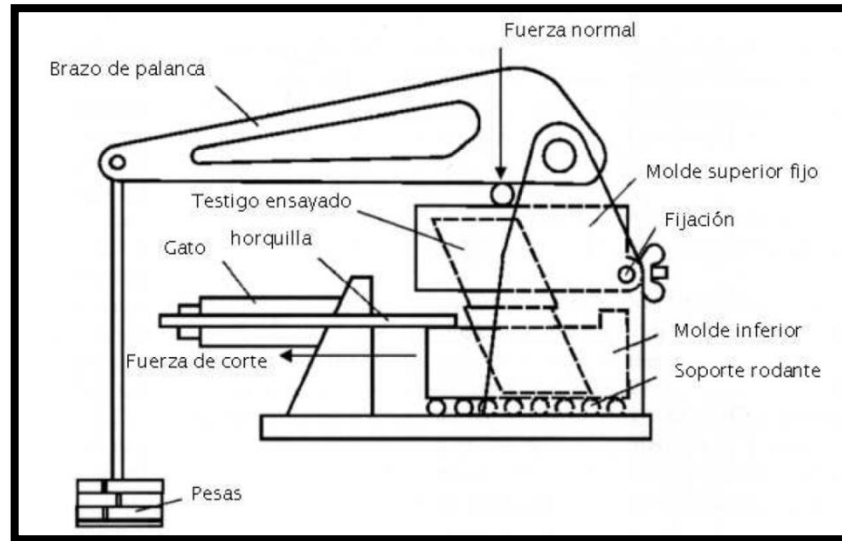
Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no parece posible que circule agua.	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua.
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua.	Relleno húmedo pero sin agua libre.
III	Junta seca pero con evidencia de haber circulado agua.	Relleno mojado con goteo ocasional.
IV	Junta húmeda pero sin agua libre.	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar el caudal en l/min).
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo pero sin flujo continuo	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal y presión).
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min y la presión).	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas.

Fuente: ISRM, 1981

3.5.3 Ensayos de laboratorio.

3.5.3.1 Ensayo de corte directo. Se basa en ensayar a cortante una discontinuidad. Se emplea una caja de corte por dos mitades, una fija y otra móvil, donde se introducirán dos bloques correspondientes a ambos lados de la junta. La discontinuidad debe quedar asentada en dirección paralela al movimiento de corte que se le vaya aplicar. Las máquinas constan de dos sistemas de aplicación de tensión accionados por mecanismos hidráulicos o mecánicos con sus correspondientes sistemas de medida de la carga aplicada. Se suelen colocar dos dispositivos de medida de desplazamientos para estimar en todo momento los desplazamientos cortantes y normales.

Figura 17. Máquina de Corte directo utilizada para la medida de resistencia al corte de juntas de granito.



Fuente: Hoek, 1999

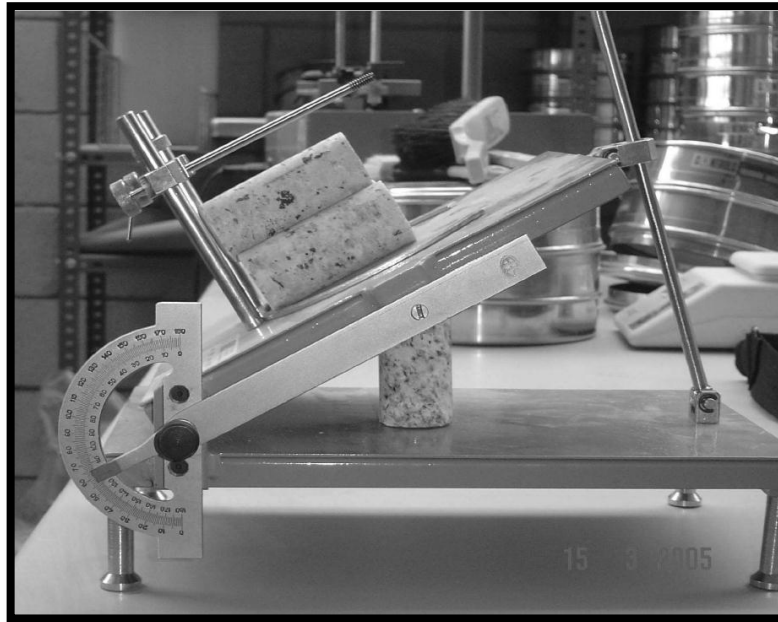
3.5.3.2 Ensayo de inclinación de laboratorio para obtener el ángulo de fricción básico. El ángulo de fricción básico de un material rocoso se puede obtener en laboratorio con solo aplicar la definición de Barton (1976) “ $\arctan(\tau/\sigma_n)^n$ ” logrado cuando se realiza un ensayo de inclinación sobre discontinuidades totalmente sanas, planas, secas y cerradas en laboratorio.

Stimpson (1981) contempló que resulta más sencillo contar las muestras de sondeo que con bloques o placas tales como lo indicaba Barton. Así plantea realizar el ensayo de inclinación con tres probetas dejando que una de ellas se deslizara sobre las otras dos y midiendo el ángulo de inclinación α en el momento de comienzo del deslizamiento.

Simpson demostró a partir de la configuración geométrica del ensayo, que el ángulo de fricción básico de la roca se podía calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_b = \arctan\left(\frac{2}{\sqrt{3}} * \tan \alpha\right)$$

Figura 18. Realización en laboratorio de un ensayo de inclinación con probetas para obtener el ángulo de fricción básico.



Fuente: Stimpson, 1981

4. TALUDES EN ROCA.

El comportamiento de las rocas es muy diferente al de los suelos ya que por su homogeneidad y apariencia sólida estos ocultan anisotropías producidas por diaclasas, planos de fractura o estratificación, grietas y plegamientos que hacen que su comportamiento no sea el esperado a primera vista. Los taludes en roca o naturales están sometidos de forma continua a procesos de inestabilidad, provocados ya sea por su geometría artificial, agua en sus diferentes estados y agentes erosivos.

La orientación y distribución de las discontinuidades respecto al talud junto con el grado de fracturación del macizo rocoso definen los diferentes tipos de rotura a los que están condicionados los taludes en roca.

4.1 MECANISMOS DE ROTURA.

4.1.1 Rotura Plana.

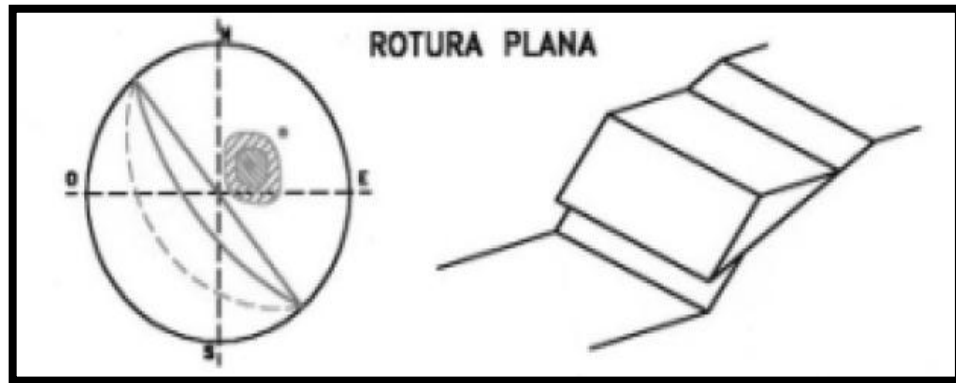
Se produce a partir de una superficie plana o una única familia de planos de rotura que buzan en el mismo sentido del talud cuya dirección es paralela a la del frente del talud. Se producen básicamente debido a que el buzamiento de los planos es menor que el talud, llegando a diferencias de hasta 20°, con lo que el rozamiento movilizado no es suficiente para asegurar su estabilidad.

Los diferentes tipos de roturas planas dependen de la distribución y características de las discontinuidades del talud, las más frecuentes son:

- *“Rotura por un plano que aflora en la cara o en el pie del talud, con o sin grieta de tracción.”*

- *Rotura por un plano paralelo a la cara del talud, por erosión o pérdida de resistencia del pie*³³.

Figura 19. Rotura Plana



Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamento e Ingeniería de Taludes

Fotografía 11. Rotura Planar



Fuente: Jaime Suárez

³³ Oteo Carlos, Ortuño Luis, Ferrer Mercedes, Gonzales de Vallejo Luis I., "Ingeniería Geológica", Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.

4.1.1.1 Análisis de estabilidad. Es el análisis más sencillo para los tipos de falla que se pueden producir en un macizo rocoso, las ecuaciones para calcular el factor de seguridad se constituyen a partir de las fuerzas actuantes sobre la superficie de rotura.

$$FS = W \cos \alpha - \frac{1}{2} \gamma_w Z_w A \sin \alpha + T$$

Donde,

γ_w Densidad del agua

A Longitud de la superficie de deslizamiento

T Fuerza total de anclaje o grupo de anclajes

α Ángulo de buzamiento de la familia que produce el plano deslizante

W Peso del bloque deslizante

Z_w Altura del talud en la que existe presión de agua

Después de garantizar que puede existir estabilidad en el bloque deslizante, el cálculo del factor de seguridad para el caso general en que existe una grieta de tensión se realiza un utilizando la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{cA + \left(W \cos \alpha - \frac{1}{2} \gamma_w Z_w A - \frac{1}{2} \gamma_w Z_w^2 \sin \alpha - Cs * W \sin \alpha + T \cos \delta \right) * \tan \phi}{W \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w Z_w^2 \cos \alpha + Cs * W \cos \alpha - T \sin \delta}$$

Donde,

γ_w Densidad del agua.

Z_w Altura del talud en la que existe presión de agua

A Longitud de la superficie de deslizamiento.

T Fuerza total del anclaje o grupo de anclajes. Cuando los anclajes son de tipo pasivo se debe considerar como cero el valor de la tensión en el denominador.

c Cohesión en el plano de deslizamiento.

α Ángulo de buzamiento de la familia que produce el plano deslizante.

z_w Altura de la grieta de tensión en la que existe presión de agua.

δ Ángulo de incidencia del anclaje con respecto a la normal del plano de deslizamiento.

W Peso del bloque deslizante.

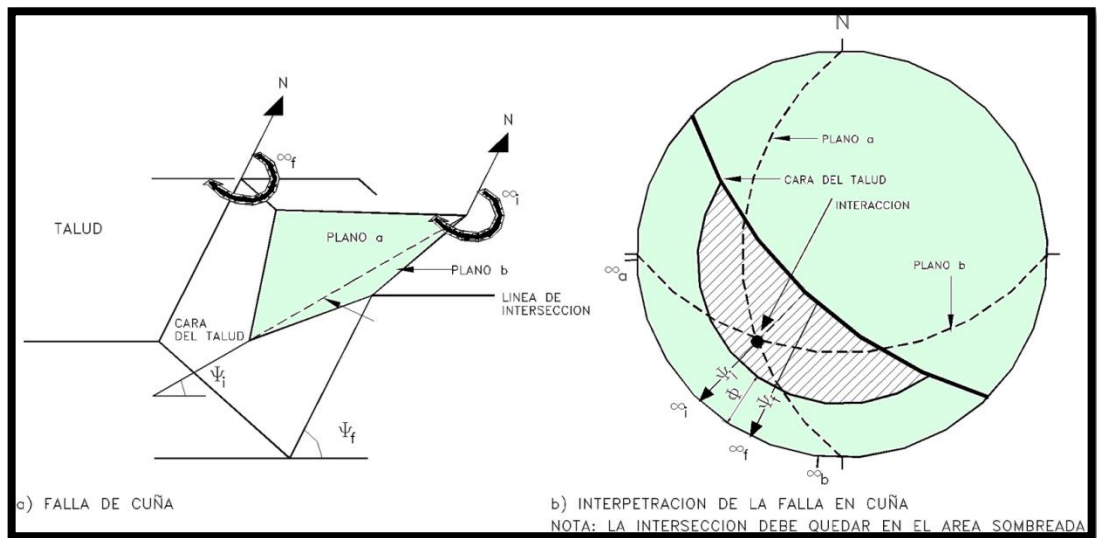
ϕ Ángulo de fricción de la base del bloque.

C_s Coeficiente sísmico.

4.1.2 Rotura por cuña.

Se produce por la intersección de dos o más familias de planos de discontinuidad de diferente orientación, formándose una línea de inmersión a favor del talud, con una inclinación inferior al buzamiento de éste. Para que se genere este tipo de rotura los planos deben mostrarse en la superficie del talud³⁴.

Figura 20. Análisis cinemático de la falla en cuña (Hoek y Bray, 1981)



Fuente: Autores

³⁴ Herrera Fernando., "Análisis de Estabilidad de Taludes", Geotecnia 2000, Madrid (España).

Fotografía 12. Rotura por cuña de un talud rocoso



Fuente: Comportamiento Sísmico de Taludes en Roca, Madrid, 2011

Por lo general este tipo de rotura es limitado por cuatro caras, dos planos de discontinuidades, dos de superficie de roca y a veces incluye un planos correspondiente a la grieta de tracción.

4.1.2.1 Análisis de estabilidad.

Para definir el riesgo que tiene un talud para soportar este tipo de falla es importante realizar una representación estereográfica del sitio que se va analizar. Se utiliza la siguiente ecuación para hallar el factor de seguridad:

$$FS = \frac{3}{\gamma_w H} (C_a X + C_b Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y \right) \tan \phi_b$$

Donde,

- H Altura total del bloque.
- γ_w Densidad del agua.
- γ_r Densidad de la roca

ϕ_b Ángulo de fricción del plano formado por la familia b .

C_b Cohesión en el plano formado por la familia b .

C_a Cohesión en el plano formado por la familia a .

X, Y, A, B : Dependen de la geometría y se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$X = \frac{\text{Sen } \theta_{24}}{\text{Sen } \theta_{25} \text{Cos } \theta_{na}}$$

$$X = \frac{\text{Sen } \theta_{13}}{\text{Sen } \theta_{35} \text{Cos } \theta_{nb*1}}$$

$$A = \frac{\text{Cos } \varphi_a - \text{Cos } \varphi_b * \text{Cos } \theta_{na*nb}}{\text{Sen } \varphi_i * \text{Sen}^2 \theta_{na*nb}}$$

$$B = \frac{\text{Cos } \varphi_b - \text{Cos } \varphi_a * \text{Cos } \theta_{na*nb}}{\text{Sen } \varphi_i * \text{Sen}^2 \theta_{na*nb}}$$

Donde,

φ_i Buzamiento de la intersección.

φ_b Buzamiento del plano b .

φ_a Buzamiento del plano a .

Los valores que hacen falta se obtienen de manera gráfica a partir del análisis de admisibilidad cinemática³⁵.

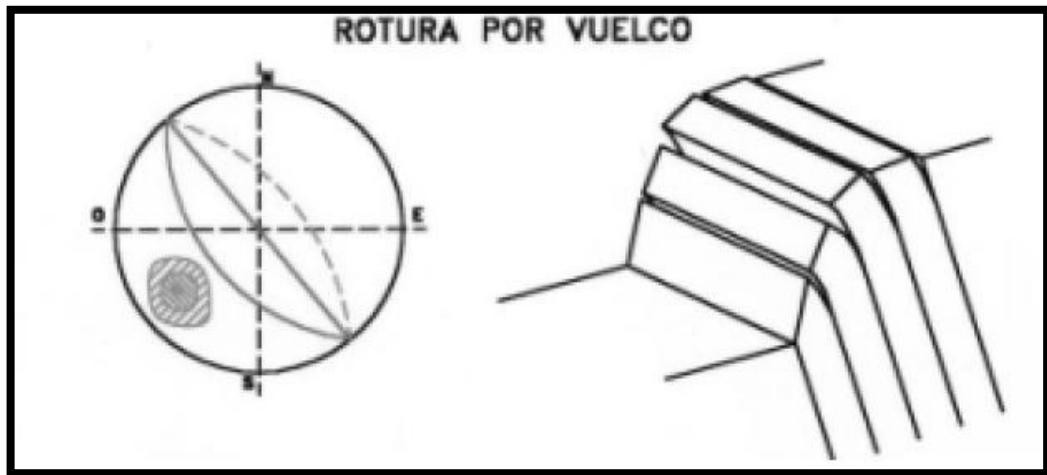
4.1.3 Rotura Por Vuelco.

Se produce generalmente en taludes de macizos rocosos donde los estratos muestran buzamiento contrario a la inclinación del talud y con dirección paralela a

³⁵ Herrera Fernando., "Análisis de Estabilidad de Taludes", Geotecnia 2000, Madrid (España).

éste. Esta falla implica un movimiento de rotación de los bloques donde la estabilidad de los mismos no está condicionada solo a la resistencia al deslizamiento.

Figura 21. Rotura por Vuelco



Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamento e Ingeniería de Taludes

Fotografía 13. Rotura por Volcamiento



Fuente: Jaime Suárez

4.1.3.1 Análisis de estabilidad. Se realiza estudiando las condiciones de equilibrio que conforman cada uno de los bloques del talud. Goodman y Bray (1976) y Hoek y Bray (1981), desarrollaron metodologías de análisis para casos sencillos con bloques esquemáticos utilizando modelos simples, sin embargo los casos más complejos no pueden ser resueltos utilizando esta metodología de equilibrio límite.

En función de las fuerzas actuantes y las dimensiones del bloque, cada uno de los que forman el talud puede sufrir inestabilidad por deslizamiento o vuelco según se cumplan las siguientes condiciones:

$$\frac{\Delta_x}{Y_n} > \tan \alpha \implies \text{No es posible el vuelco}$$

$$\frac{\Delta_x}{Y_n} < \tan \alpha \implies \text{Es posible el vuelco}$$

$$\phi > \alpha \implies \text{No es posible el deslizamiento}$$

$$\phi < \alpha \implies \text{Es posible el deslizamiento}$$

Donde,

α = Ángulo de inclinación con la horizontal

ϕ = Ángulo de fricción de la base del bloque




Para el caso de vuelco, estableciendo momentos con respecto al punto de giro de la ecuación de equilibrio de un bloque n que define la fuerza P_{n-1} que se opone al vuelco es la siguiente:

$$P_{n-1,v} = \frac{\left[\frac{1}{2} W_n (\sin \alpha * Y_n (1 + CS * g) - \cos \alpha * \Delta_x (1 - CS * g)) + P_n (M_n - \tan \phi * \Delta_x) + \frac{1}{6} * \gamma_w * Y_n^3 \right]}{L_n}$$

Donde,

γ_w Densidad del agua

CS Coeficiente sísmico

Δ_x Ancho del bloque
 g Aceleración de la gravedad
 ϕ Ángulo de fricción de la base del bloque
 α Ángulo de buzamiento de la familia que produce el plano deslizante o de volcamiento
 W_n Peso del bloque $n - 1$
 $M_n = Y_n - a_2$ y $L_n = Y_n - a_1$  Para bloques en la coronación del talud
 $M_n = Y_n$ y $L_n =$ 
 $Y_n - a_1$ Para bloques por debajo de la coronación del talud
 $M_n = Y_n - a_2$ y $L_n =$ 
 Y_n Para bloques por encima de la coronación del talud

De igual manera, la fuerza P_{n-1} que se opone al deslizamiento es:

$$P_{n-1,d} = \left[\frac{W_n (\text{Sen } \alpha (1 + CS * g) - \text{Cos } \alpha * \tan \phi (1 - CS * g)) + \frac{1}{2} \gamma_w Y_n^2}{1 - \tan^2 \phi} \right]$$

De esta forma, el análisis de estabilidad del talud se realiza como se describe en los siguientes pasos:

- Una vez definidos los bloques a analizar, se halla comenzando por la parte superior el primer bloque que cumpla con la condición de vuelco $\Delta_x / Y_n / < \tan \alpha$.
 x Para este primer bloque se toma $P_n = 0$.
- Se calculan para el bloque n_1 las fuerzas $P_{n-1,v}$ y $P_{n-1,d}$ necesarias para que no se vuelque ni se deslice a partir de los datos geométricos del bloque y de su peso, y suponiendo un ángulo ϕ inicialmente mayor que α .
- De los dos valores obtenidos se tomará el mayor para aplicarlo al análisis del siguiente bloque, valor que será correspondiente a la fuerza P_n de nuevo bloque y se repite nuevamente el paso 2 hasta llegar al bloque que se encuentra al pie del talud.

- Al analizar el bloque que se encuentra al pie del talud se pueden obtener una de las siguientes tres condiciones:

$P_{n-1} = 0$ El talud se encontrará en equilibrio límite para el ángulo ϕ considerado³⁶.

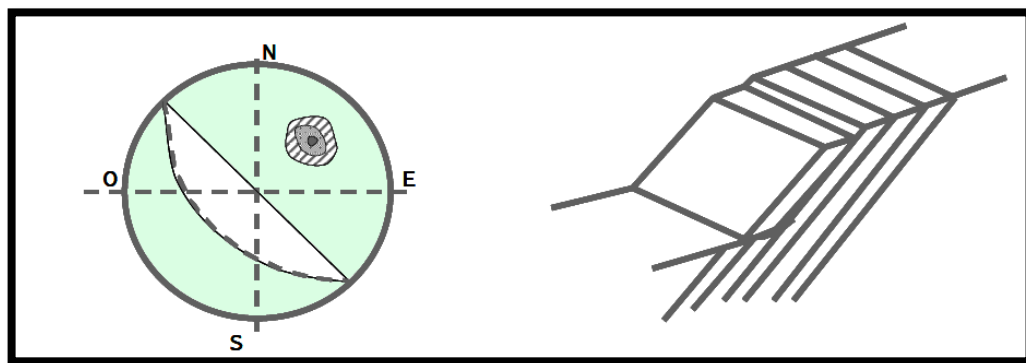
$P_{n-1} < 0$ El cálculo no es válido y deberá repetirse para otros valores de ϕ mayores que el inicial.

$P_{n-1} > 0$ El talud es inestable para el valor de ϕ considerado, por lo que se deberán utilizar anclajes u otro tipo de sostenimiento³⁷.

4.1.4 Rotura Por Pandeo.

Se obtiene a favor de planos de estratificación paralelos al talud, con buzamiento mayor al ángulo de fricción interno. Con o sin flexión del estrato se puede producir la rotura; la condición necesaria es que los estratos sean suficientemente esbeltos en relación con la altura del talud.

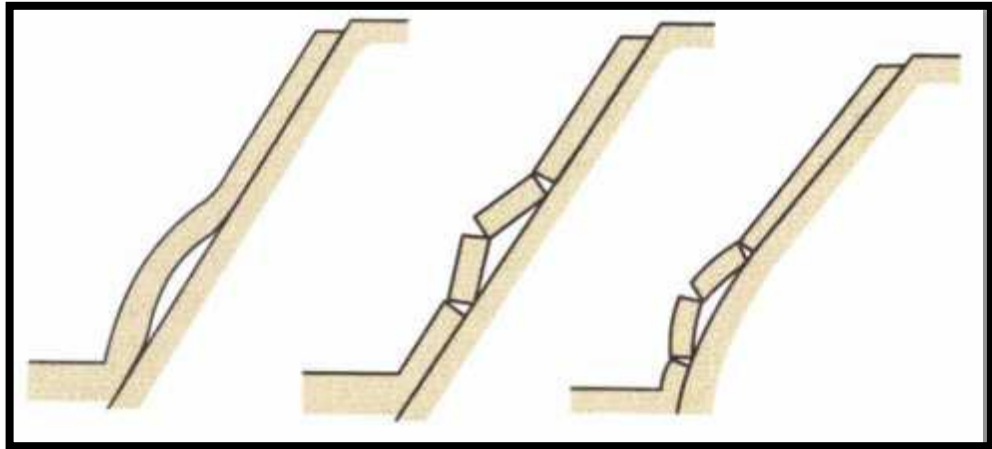
Figura 22. Rotura por Pandeo



Fuente: Diseño de Taludes en Roca para la contrapresa del P.H. Pirrís

³⁶ Jover Roberto, Prieto Ignacio, Gadea Irene, Ivorra María del Carmen., "Aplicaciones de la proyección estereográfica en Ingeniería Geológica", Santander (España), 2002.

³⁷ Jover Roberto, Prieto Ignacio, Gadea Irene, Ivorra María del Carmen., "Aplicaciones de la proyección estereográfica en Ingeniería Geológica", Santander (España), 2002



Fuente: Ingeniería Geológica Luis Gonzales, 2004.

4.1.4.1 Análisis de estabilidad. Se efectúa mediante las ecuaciones de para el pandeo de vigas, empleada en el análisis de resistencia de materiales. La ecuación del factor de seguridad para una columna de roca puede que sufrir pandeo está dada por:

$$F = P_{cr}/P_D$$

Donde,

P_D Fuerza ejercida sobre el punto que sufre el pandeo de la columna

P_{cr} Carga crítica de pandeo

Mediante la siguiente ecuación se da a conocer la carga crítica (P_{cr}), que puede soportar la columna de roca antes de ocurra el pandeo:

$$P_{cr} = K\pi^2EI/4l_b^2$$

Donde,

l_b Longitud de la columna que sufre flexión y pandeo

K Constante que es función de las condiciones de los extremos de la columna

E Módulo de elasticidad

I Momento de Inercia

Considerando diferentes condiciones para los extremos de la columna (sometida a compresión centrada con la base empotrada), la siguiente ecuación es propuesta por Martin y Piteau³⁸:

$$P_{cr} = \pi^2 EI / 4l_b^2$$

$$P_D = W_D \text{sen } \alpha - W_D \cos \alpha \tan \phi - l_D c$$

Donde,

l_D Longitud de la columna

W_D Peso de la columna

c Cohesión del plano

ϕ Fricción

La longitud crítica de la columna por medio de la cual se puede producir pandeo está dada por la siguiente ecuación:

$$l = \sqrt{\frac{\pi^2 E d^2}{2,25 (\gamma \text{sen } \alpha - \gamma \cos \alpha \tan \phi - c/d)}}$$

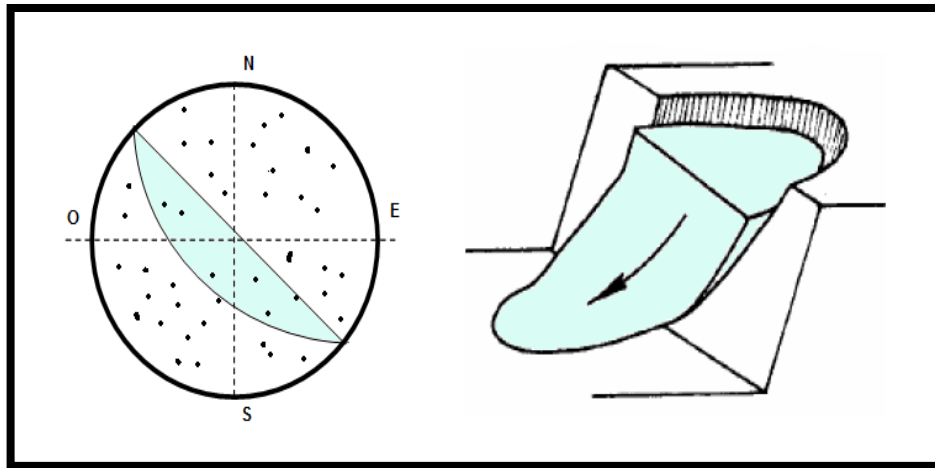
γ Peso específico

4.1.5 Rotura circular.

La superficie de deslizamiento es parecida a una superficie cilíndrica cuya sección transversal se asemeja a un arco de círculo. Este tipo de rotura suele producirse en terrenos homogéneos ya sea en suelos o rocas altamente fracturadas, sin direcciones de deslizamiento, en las que debe cumplirse que el tamaño de las partículas sea muy pequeño comparadas con el tamaño del talud.

³⁸ Rodríguez Juan Carlos., Diseño de Taludes en Roca para la contrapresa del P.H. Pirris, Universidad de Costa Rica, Mayo de 2008

Figura 23. Rotura Circular



Fuente: Diseño de Taludes en Roca para la contrapresa del P.H. Pirrís

Fotografía 14. Rotura Circular



Fuente: Jaime Suárez

4.1.5.1 Análisis de estabilidad. Se puede realizar con los siguientes métodos:

- Método simplificado de Bishop: Este método supone la superficie de deslizamiento circular. Se hace por medio de un método de cálculo por dovelas o rebanadas. Se supone la masa deslizante dividida en “n” fajas verticales.
- Ábacos de Hoek y Bray: Estos ábacos proporcionan un límite inferior al factor de seguridad, asumiendo que las tensiones normales en la superficie de deslizamiento se concentran en un solo punto. En la construcción de los ábacos se tuvieron en cuenta diferentes condiciones de presiones intersticiales debidas a la presencia de un nivel freático en el terreno, que divide el talud en una zona seca y otra saturada³⁹.

³⁹ Rodríguez Juan Carlos., Diseño de Taludes en Roca para la contrapresa del P.H. Pirris, Universidad de Costa Rica, Mayo de 2008.

CONCLUSIONES

- La información existente sobre el estudio de taludes en roca, su análisis y estabilización es extensa y se encuentra publicada en diversos medios, en el contenido del presente documento se hizo una recopilación de esta información, se clasificó según su importancia y luego se sintetizó para mostrarla en forma clara y concisa, teniendo el cuidado de manejar información veraz y altamente confiable.
- Se deja en el proceso de la realización del estado del conocimiento sobre el análisis y estabilización de taludes en roca gran información, ordenada de forma jerárquica para que posteriormente sea abordada con el fin de adelantar estudios y como fuente de consulta de los diversos métodos de estabilización, las teorías fundamentales que rigen el comportamiento físico y mecánico tanto de los taludes en roca como de los materiales que los constituyen
- Existe en el mercado gran variedad de herramientas informática que se pueden utilizar en el análisis de estabilidad de los taludes en roca, estos programas presentan una interface amable y su utilización es muy sencilla, por tanto hace que sean utilizados de una forma generalizada por los profesionales en los campos que conciernen al estudio del comportamiento de masas rocosas como elementos de construcción o elementos que han de ser intervenidos.
- Es muy importante en el estudio y análisis de estabilidad de los taludes en roca la implementación de metodologías que permitan recopilar en campo y en laboratorio características importantes de la matriz rocosa y del macizo rocoso y que influyen y tiene que ver con el comportamiento físico y mecánico de los mismos.

BIBLIOGRAFIA

- AYALA CAICEDO, FRANCISCO JAVIER ED, Manual de ingeniería de taludes, igme , serie guias y manuales.
- BEER FERDINAND P., “Mecánica de Materiales”, Mc Graw Hill, Tercera edición, México 2001.
- CARRILLO JOSUÉ. Cuaderno de Ingeniería Geológica, Mecánica de Rocas Primera parte.
- CHÁVEZ MONCAYO MIGUEL ÁNGEL, Geomecánica aplicada a la pequeña minería, Tema IV. Estabilización de taludes.
- DUNCAN C. WYLLIE & CHRISTOPHER. Rock Slope Engineering 4th Editions.
- HERRERA FERNANDO., “Análisis de Estabilidad de Taludes”, Geotecnia 2000, Madrid (España).
- HOEK-BROWM. El criterio de rotura de Hoek-Brown – Edición 2002, E. Hoek(1), C. Carranza-Torres(2), B. Corkum(3), (1) Consulting Engineer, (2) University of Minnesota, (3) RocScience Inc
- JAIME SUAREZ, “Deslizamientos Técnicas de Remediación”, Volumen 2.
- JOVER ROBERTO, PRIETO IGNACIO, GADEA IRENE, IVORRA MARÍA DEL CARMEN., “Aplicaciones de la proyección estereográfica en Ingeniería Geológica”, Santander (España), 2002.

- LUIS BAÑÓN BLAZQUEZ Y JOSÉ F. BEVIÁ GARCÍA, manual de carreteras 1 y 2.
- LUIS GONZALEZ DE VALLEJO, ingeniería geológica, PEARSON EDUCACION, 2002.
- OTERO CARLOS, ORTUÑO LUIS, FERRER MERCEDES, GONZALES DE VALLEJO LUIS I., “Ingeniería Geológica”, Pearson Prentice Hall (ed.), 139-140, España: 2004.
- RAMIREZ OYANGUREN PEDRO, ALEJANO MONGE LEANDRO., “Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes”, España.
- RAMÍREZ RONALD, SALCEDO YOVANNY. Comparación de los métodos esfuerzo-deformación y equilibrio límite en la modelación de estabilidad de taludes utilizando los software Slope/w y Plaxis.
- RODRÍGUEZ ARCE JUAN CARLOS. Diseño de taludes en roca para la contrapresa del p.h. pirrís, universidad de costa rica.
- RODRÍGUEZ JUAN CARLOS, “Diseño de Taludes en roca para la contrapresa del P.H. Pirrís. Costa Rica, Mayo 2008.
- ROS AVILA JOAN. Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos, Universitat Politècnica de Catalunya, nov-2008.
- SERRANO EFRAIN, PRADA OSCAR., “Análisis y determinación de la amenaza de los taludes, generado por su saturación y desembalse, en el proyecto de regulación del río Tona, Bucaramanga, 2009.

- SUAREZ DÍAZ JAIME, Deslizamientos versión 2009 tomos 1 y 2.
- SUÁREZ JAIME, Deslizamientos Técnicas de Remediación, Volumen 2.
- TOMÁS JOVER ROBERTO. Aplicaciones de la proyección estereográfica en ingeniería geológica, Universidad de Alicante, España.

RECURSOS ELECTRONICOS

- CIVOGAL, soluciones geotécnicas, www.civogal.com.
- GEOBRUGG AG, Kyle of Lochash, Scotland, www.geobrugg.com.
- GEOTALUD, Sistemas de estabilización.
- WARCO S.A.S. Sistemas de protección y control de erosión, www.warco.com.co//editorial.cda.ulpgc.es/instalacion/7_OPTATIVAS/IHA/IHA3_drenaje/IHA37_actuaciones.htm.
- www.jorgealvahurtado.com, Estabilización de taludes en roca.
- www.erosion.com.co

ANEXOS

Anexo A. Análisis de proyección estereográfica.

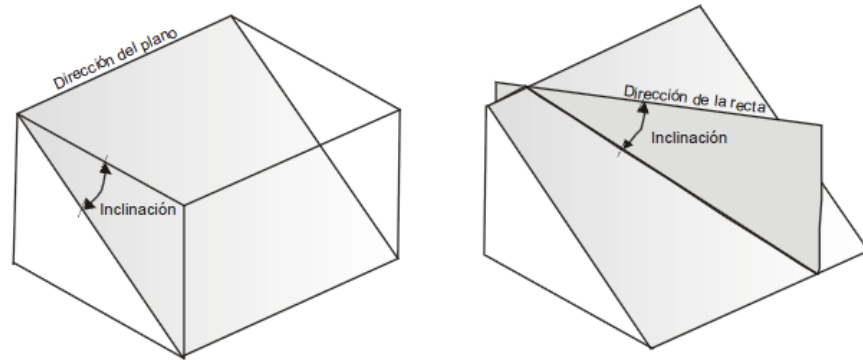
“La proyección estereográfica es una herramienta de la mecánica de las rocas muy usada en cristalografía y geología estructural que permite establecer la relación angular existente entre las caras de los cristales o entre las estructuras geológicas. Este tipo de proyección es de vital importancia en el estudio de obras de geotecnia como túneles y taludes, ya que proporciona información que permite tomar decisiones que faciliten la construcción de las estructuras o también estableciendo las mejores opciones de diseño.

En el caso del análisis de un talud en roca, es necesario determinar los posibles mecanismos de falla mediante un sistema de representación estereográfico, donde se definan las familias de discontinuidades que se puedan presentar en la estructura del macizo rocoso. Para poder realizar esta representación es preciso conocer, inicialmente, una serie de términos geométricos, que permitan definir de cada elemento (ver figura 22), estos términos nos determinan su orientación.

La orientación se define como la posición de un plano o línea en el espacio, referenciado mediante coordenadas geográficas y su relación con el plano horizontal de comparación. La orientación de un elemento queda definida mediante el rumbo y la inclinación:

- *Inclinación o Buzamiento: Ángulo vertical comprendido entre la horizontal y el plano o línea considerado.*
- *Rumbo o Dirección: Horizontal comprendido entre una línea y una dirección preestablecida que para el caso de la geología estructural es el norte magnético.*

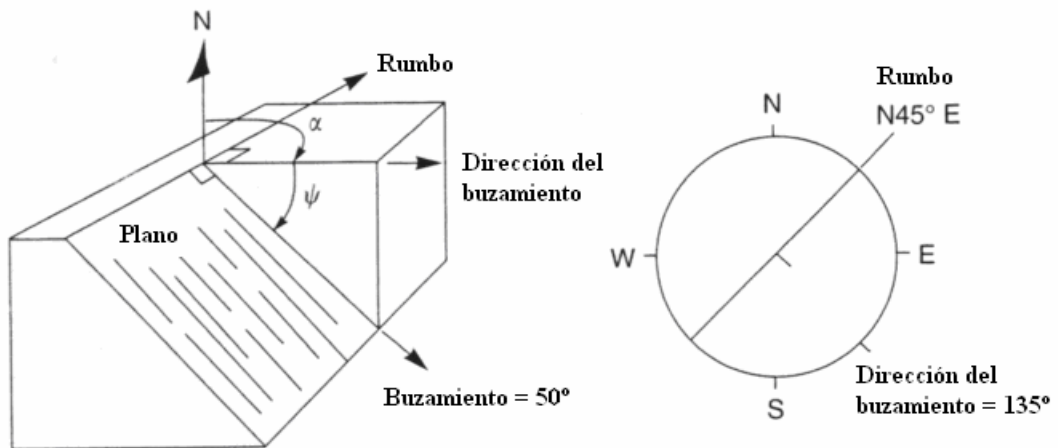
- *Figura 21. Elementos que definen una recta y un plano en geología*



Fuente: Aplicaciones de la proyección. Estereográfica en Ingeniería Geológica, Roberto Tomás Jover

La proyección estereográfica consiste en una esfera de referencia, en la cual el plano ecuatorial es horizontal para el que las líneas y planos con un buzamiento y dirección específica son posicionados en un sentido imaginario con respecto a los ejes que pasan de manera ortogonal por el centro de la esfera, así por ejemplo un plano será representado por una línea recta, mientras que una línea será representada por un punto.

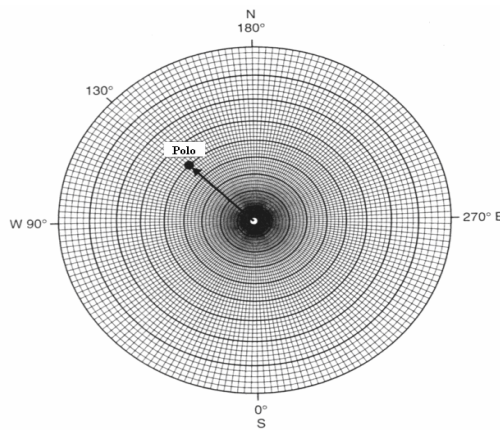
Figura 24. Representación Estereográfica



Fuente: Diseño de Taludes en Roca para la Contrapresa del P:H. Pirrís, Juan Carlos Rodríguez

Para representar las condiciones de la geología estructural propias del sitio que se va a analizar se utiliza un plano polar como el que se muestra en la figura 24, este plano polar se divide en 360 grados que representan la dirección de la discontinuidad tal y como se hace con la brújula, y noventa círculos concéntricos que representan el buzamiento de la discontinuidad que se quiere graficar. De este modo cada discontinuidad observada en campo se representa mediante el trazo de un punto en el plano polar, en donde la dirección del buzamiento se mide a partir de la coordenada norte y el buzamiento de la discontinuidad se representa de acuerdo con la distancia radial existente entre el círculo concéntrico que represente el ángulo del buzamiento de la discontinuidad.

Figura 25. Plano polar

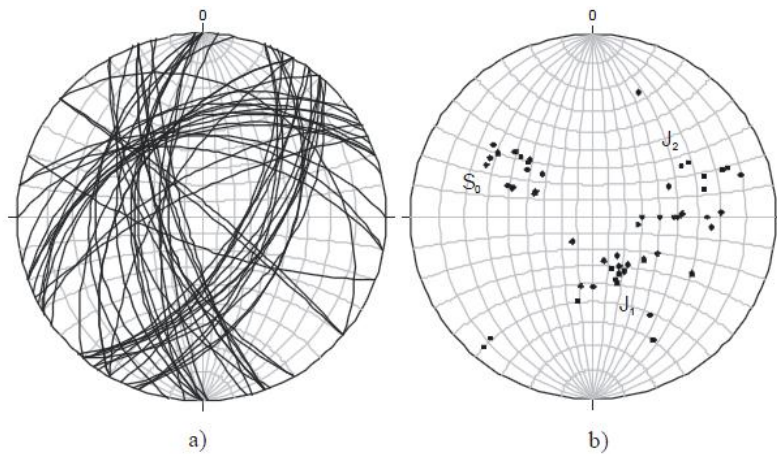


Fuente: Diseño de Taludes en Roca para la Contrapresa del P:H. Pirrís, Juan Carlos Rodríguez

Para determinar la dirección de las familias de discontinuidades presentes en el macizo rocozo, se debe trazar los puntos correspondientes a cada una de las diaclasas y partir de un análisis estadístico establecer las zonas que muestran una alta concentración de puntos en el plano polar lo que representa una familia de diaclasas.

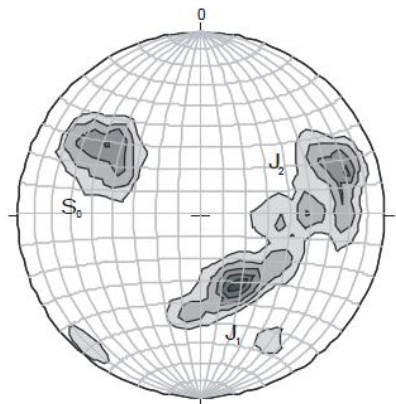
Normalmente este análisis estadístico se realiza por medio de programas de computación que simplifican el análisis creando la representación de las familias de diaclasas por medio de diagramas de polos, de círculos máximos o bien de densidad de polos, representados en las figuras 25 y 26.

Figura 26. a) Diagrama de círculos máximos (beta) y b) diagrama de polos (π).



Fuente: Aplicaciones de la Proy. Esterográfica en ingeniería geológica, Roberto Tomás Jover

Figura 27. Diagrama de Densidad de Polos



Fuente: Aplicaciones de la Proy. Esterográfica en ingeniería geológica, Roberto Tomás Jover

La figura 27 muestra la concentración o familias de discontinuidades que más se presentan en el sector en estudio, de tal forma que éstas me permiten por medio de un análisis de admisibilidad cinemática determinar los tipos de fallas que pueden presentarse con más probabilidad”⁴⁰

⁴⁰ Serrano Efrain, Prada Oscar., “Análisis y determinación de la amenaza de los taludes, generado por su saturación y desembalse, en el proyecto de regulación del río Tona, Bucaramanga, 2009.

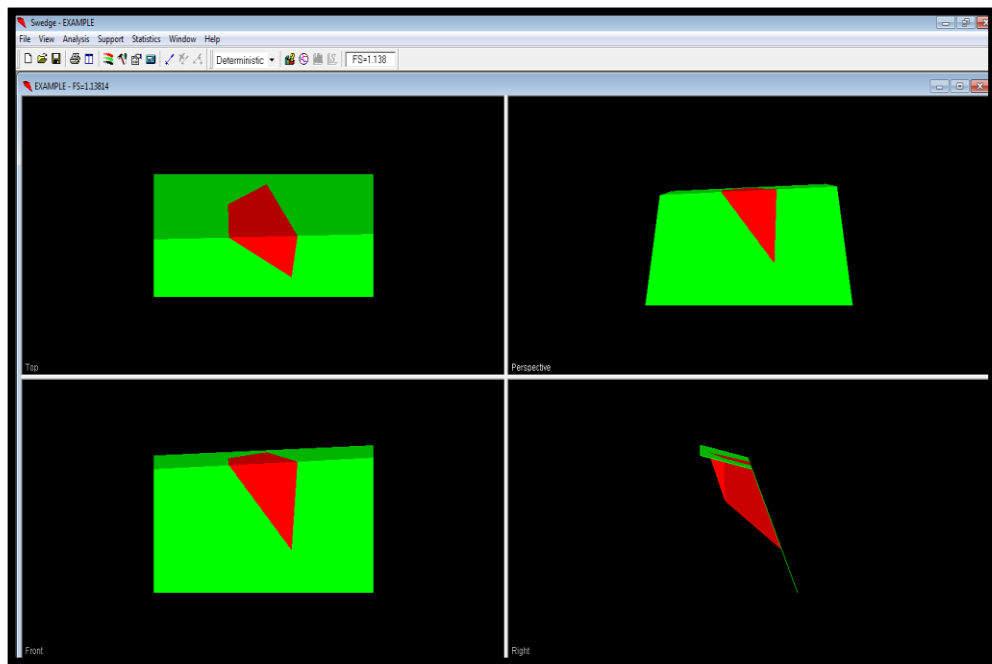
Anexo B. Software en el análisis de estabilidad de taludes en roca.

5.1. SWEDGE.

Es una herramienta de análisis rápido, interactivo y fácil de usar para la evaluación de la estabilidad de las cuñas de superficie en pendientes rocosas, que se define por dos planos de discontinuidad, la superficie de la pendiente y una grieta de tensión opcional. La estabilidad de la cuña se puede realizar utilizando:

- Determinístico: Factor de Seguridad. Para calcular el factor de seguridad por el análisis determinístico se debe conocer la orientación de la cuña.
- Probabilístico: Posibilidad de Falla. Para el análisis probabilístico, los datos estadísticos de entrada que se deben conocer son la orientación y la fuerza.

Figura 28. Falla Cuña de un Talud, Programa Swedge



Fuente: Tutorial Swedge

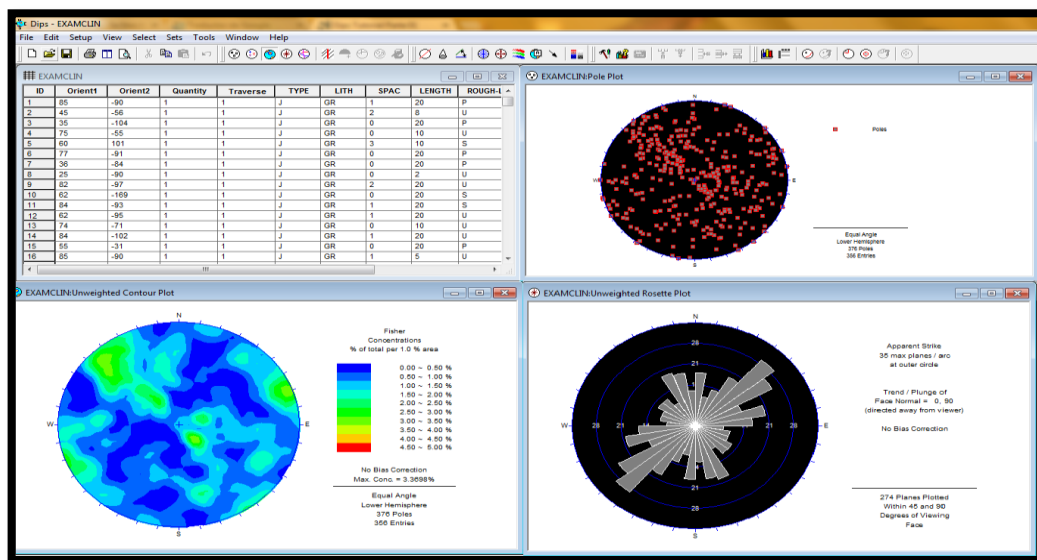
5.2. DIPS.

Es un programa diseñado para el análisis interactivo de datos geológicos basados en la orientación. El programa es un conjunto de herramientas que tiene diferentes aplicaciones y está diseñado tanto para el usuario novato u ocasional, y para el usuario experto de la proyección estereográfica que desee utilizar las herramientas más avanzadas en el análisis de datos geológicos.

DIPS permite al usuario analizar y visualizar los datos estructurales siguiendo las mismas técnicas utilizadas en proyecciones estereográficas manuales. Además, que muchas características computacionales están disponibles, como el contorno estadístico de la agrupación de orientación, el cálculo de la orientación y el análisis de atributos cualitativos y cuantitativos

DIPS ha sido diseñado para el análisis de las características relacionadas con el análisis de ingeniería de estructuras de roca, sin embargo, el formato libre del archivo de datos DIPS permite el análisis de los datos basados en la orientación.

Figura 29. Modelamiento Dips



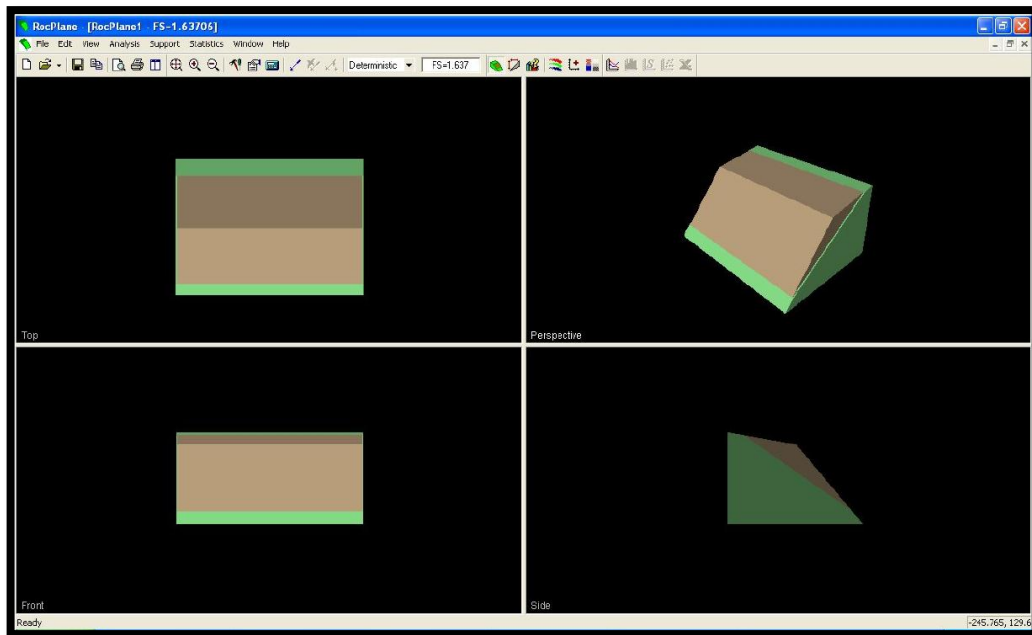
Fuente: Tutorial Dips

5.3. ROCPLANE.

Es una herramienta de fácil uso que permite evaluar la posibilidad de falla de deslizamiento planar en los taludes rocosos. Las principales hipótesis en un análisis de falla planar son las siguientes:

- El análisis ROCPLANE es un análisis de 2 dimensiones, donde se asume que la pendiente de la cara superior, plano de falla y la grieta de tensión, son paralelos, o casi paralelos dentro de aproximadamente más o menos 20 grados, con el fin de que el análisis sea aplicable.
- El buzamiento del plano de falla debe ser menor que la inclinación de la cara de la pendiente.
- El análisis se lleva a cabo en una unidad de anchura de la pendiente.
- Todas las fuerzas en el análisis (peso de cuña, las fuerzas de agua, externa y las fuerzas de apoyo) actúan a través del centroide de la falla. No se consideran Momentos.
- Por lo tanto, el modo de falla es asumido como deslizamiento traslacional - deslizamiento rotacional y de volcamiento no se tienen en cuenta.

Figura 30. Programa Rocplane



Fuente: Tutorial Rocplane

5.4. SLIDE.

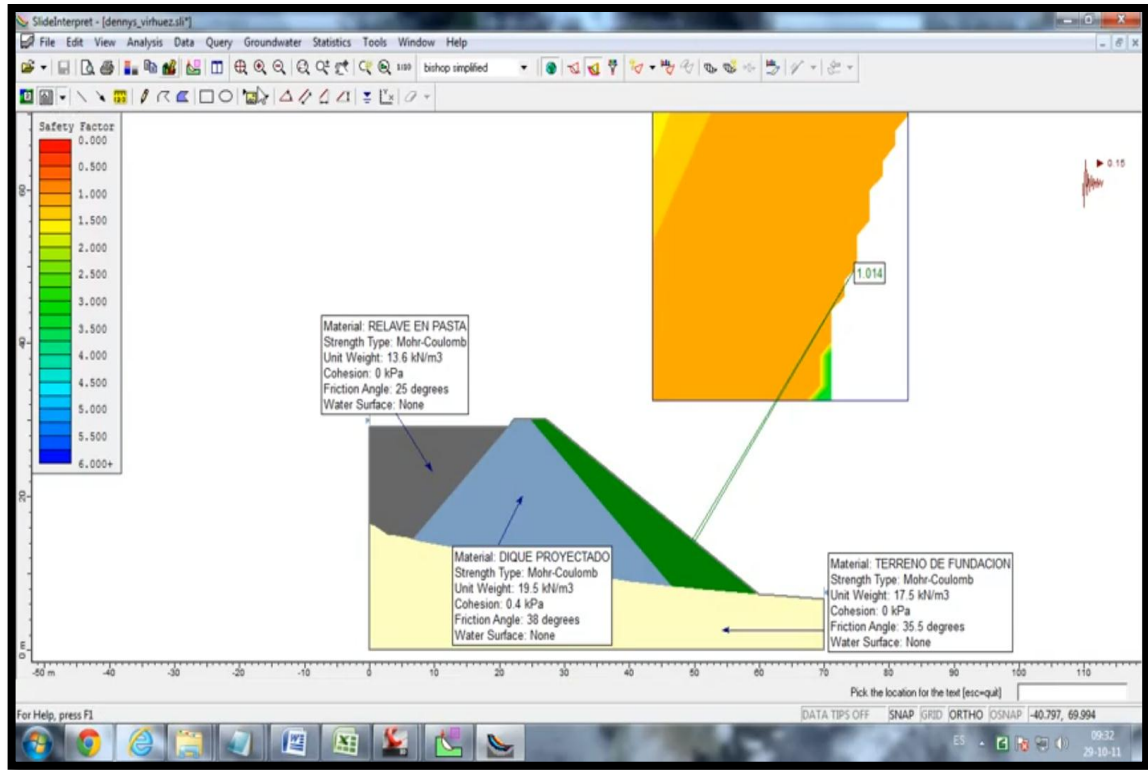
Es un software disponible para la estabilidad de taludes, donde se puede evaluar la estabilidad de falla circular y no circular en taludes de suelo y roca.

Slide analiza la estabilidad en superficies de deslizamientos usando métodos de equilibrio límite con rodajas verticales. Analiza superficies de deslizamientos individuales o los métodos que pueden ser aplicados para buscar y localizar la superficie de deslizamiento crítica para un talud dado.

Características:

- Métodos de búsqueda de la superficie crítica para superficies de deslizamiento circular o no circular.
- Bishop, Janbu, Spencer, GLE/Morgenstern-Price y otros métodos de análisis.
- Múltiples materiales. Anisotrópicos, materiales no-lineales Mohr-coulomb y otros.
- Agua subterránea a presión, factores R_u , red de presiones de poro, o el análisis de infiltración.
- Carga externa lineal, distribuida o sísmica.
- Soportes, geotextiles, pilotes. Análisis de fuerzas de apoyo requeridas.
- Vista de cualquiera o todas las superficies generadas por la búsqueda. Los resultados individuales detallados pueden trazarse para las superficies de deslizamiento.

Figura 31. Programa Slide



Fuente: Dennys Virhuez Sanchez

5.5. GEOSLOPE.

El SLOPE/W, también conocido como GEO-SLOPE, simplemente, es uno de los programas de cálculo de estabilidad de taludes más extendidos, en gran parte gracias a su versión de evaluación gratuita para estudiantes, versión que, pese a no permitir el acceso a todas las opciones, si permite aprender a usarlo y disponer de toda la información, manuales y ejemplos incluidos.

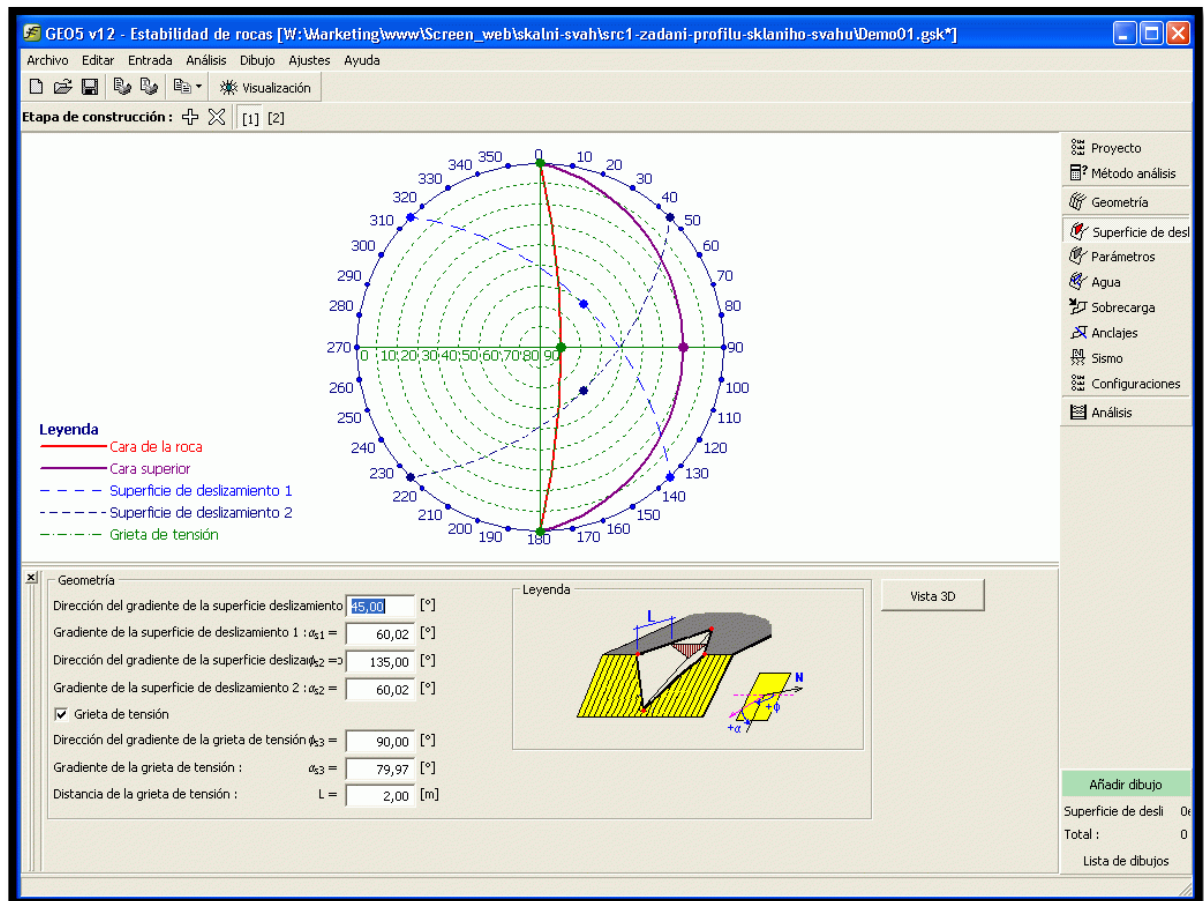
5.6. GEO5.

El programa analiza la estabilidad de taludes en roca y muros para un tipo especificado de rotura, incluyendo una superficie de deslizamiento plana o poligonal o una cuña de suelo (roca).

Características principales

- Deslizamiento a lo largo de una superficie recta o poligonal
- Deslizamiento de un espacio de cuña de tierra
- Modelos materiales de acuerdo a Mohr-Culombio, Hoek-Brown y Barton-Bandis
- Superficie de deslizamiento lisa, rugosa y escalonada
- Entrada simple de la geometría de los bloques
- Permite cualquier tipo de sobrecargas (franja, trapezoidal, lineal)
- Permite cualquier número de anclajes
- Modelos de agua en diaclasas y fisuras
- Análisis de efectos sísmicos.

Figura 32. Programa GEO5



Fuente: Civil engineering software

Anexo C. Estabilización y protección de taludes en roca.

El objetivo de la estabilización de taludes en roca se basa en identificar primordialmente los elementos que pueden fallar o ser inestables para luego aislarlos y generar estructuras o intervenciones que estén encaminadas en mitigar el riesgo que representa la falla de estos elementos, pues la ocurrencia de la falla del mismo puede acarrear incidentes que comprometan vidas humanas o pérdidas económicas sustanciales.

En el ámbito de estudio de la estabilización y protección de taludes en roca sobresalen los siguientes métodos:

6.1. MÉTODOS ACTIVOS

Son métodos en los que se interviene el talud en sus elementos constituyentes, es decir de alguna manera se afectan sus condiciones físicas y mecánicas.

Dentro de los métodos activos se destacan:

6.1.1 INSTALACIÓN DE BULONES (barras de acero considerados como anclajes pasivos) y anclajes para fijación de bloques. Estos elementos trabajan a tracción y generan una fuerza contraria al desplazamiento de los bloques de roca.

6.1.2 INSTALACIÓN DE SISTEMAS DE MALLAS Y CABLES que cubren superficialmente el talud, estos sistemas se anclan a la roca y se utilizan en situaciones donde el talud presenta un alto grado de fracturación.

Fotografía 15. Mallas y cables anclados al macizo.

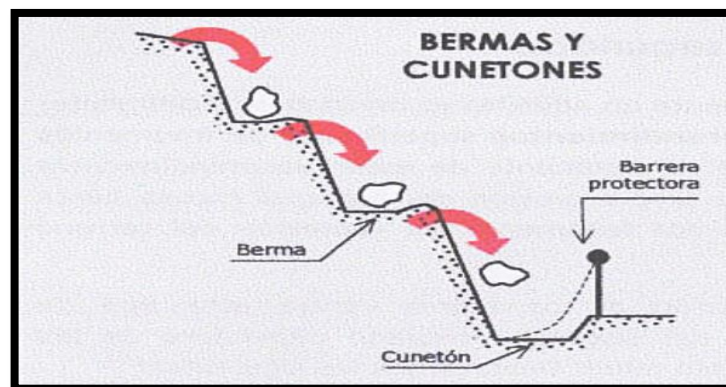


Fuente: GEOBRUGG AG, Kyle of Lochash, Scotland, www.geobrugg.com

6.1.3 PERFILADO DEL TALUD por medios mecánicos para aligerar fuerzas gravitacionales, remover bloques muy inestables o para crear terrazas que reducen la velocidad y energía de impacto de las rocas al desprenderse; la implementación del anterior método va ligado a la construcción de un cunetón en el pie del talud para recibir las rocas desprendidas.

Para perfilar o remover bloques se pueden emplear métodos neumáticos con grandes martillos, voladuras con explosivos y últimamente se están implementando procesos de intrusión de materiales expansivos en las fracturas, diaclasas o superficies discontinuas.

Figura 30. Terrazas de amortiguación en caído de rocas.



Fuente: manual de carreteras 1 y 2 de Luis Bañón Blazquez y José f. Beviá García

6.1.4 IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE MUROS PANTALLA Y VIGAS ANCLADAS al macizo rocoso que trabajan de manera solidaria aportando resistencia al deslizamiento de bloques en superficies que presentan fallo y protegiendo al talud de los procesos erosivos. En el caso de las vigas ancladas, estas solo aportan resistencia al deslizamiento o caída de bloques.

6.1.5 SISTEMAS DE MALLAS ANCLADAS Y CONCRETO LANZADO, que es un sistema utilizado también en la estabilización de taludes en suelos. Este sistema se emplea en taludes altamente fracturados.

Fotografía 16. Mallas, cables y anclajes para estabilizar talud altamente fracturado



Fuente: www.jorgealvahurtado.com, Estabilización de taludes en roca

6.1.6 CONTRAFUERTES EN CONCRETO REFORZADO ANCLADOS a la rocas para prevenir desplazamientos. Este sistema se debe anclar en sustratos de roca con un grado de calidad alto.

Fotografía 17. Contrafuertes en concreto.



Fuente: SOPE, Sociedade de Obras e Projetos de Engenharia,
<http://www.sopeengenharia.com.br>

6.1. METODOS PASIVOS

Estos métodos son implementados para mitigar y prevenir los daños a las estructuras aledañas a los taludes en roca.

Son mecanismos en los cuales no se interviene de forma directa el talud o sus elementos constitutivos y si se hace esta intervención solo afecta las capas más superficiales del talud.

Se destacan los siguientes sistemas:

6.2.1 MALLAS DE GUIADO.

Son sistemas de mallas utilizadas para cubrir el talud y así evitar que bloques pequeños de roca (alrededor de 0.5 m^3) al desprenderse rueden libremente por la ladera, reboten e impacten sobre vehículos y personas que utilizan una vía o construcciones aledañas al mismo⁴¹.

La malla se instala de forma tal que tenga algún tipo de fijación en la parte superior del talud y se excava o se conforma una cuneta en la pata para que en este sitio se almacenen los fragmentos de roca que se desprenden del talud.

Figura 34. Instalación de Malla de Guiado.



Fuente: CIVOGAL, soluciones geotécnicas, www.civogal.com

⁴¹ Ayala Carcedo, Francisco Javier Ed, MANUAL DE INGENIERÍA DE TALUDES, IGME , SERIE GUIAS Y MANUALES

6.2.2 ZANJAS O CUNETONES.

Son excavaciones profundas que se realizan en la pata del talud con el fin de atrapar rocas que se desprenden y ruedan por la ladera. El ancho y la profundidad dependen de la altura del talud, del tamaño de los bloques que se desprenden y de la regularidad en la pendiente de la cara del mismo.

Estas zanjas por lo general deben tener una capa de tierra o material granular, como la grava, en el fondo para que amortigüe la caída de las rocas, adicionalmente en algunos casos se debe instalar una malla tipo barrera para evitar que las rocas al rebotar se salgan del cunetón.

6.2.3 VALLAS ESTÁTICAS.

Son sistemas verticales empleados para prevenir que las rocas desprendidas del talud alcancen zonas de tráfico vehicular, personas o edificaciones. Estas vallas son barreras que se conforman con postes metálicos empotrados en la roca o embebidos en concreto y mallas o solo con postes metálicos, espaciados de tal forma que intercepten la mayor cantidad de rocas.

Las vallas estáticas se sitúan en partes intermedias del talud o en la pata del mismo y su altura depende esencialmente de la regularidad en la pendiente de este. También es importante recalcar que sus elementos se ven seriamente afectados por el impacto de bloques que llegan hasta esta con una energía cinética muy grande.

Fotografía 18. Barrera estática.



Fuente: GEOTALUD, Sistemas de estabilización.

6.2.4 VALLAS DINÁMICAS

Son sistemas conformados con postes metálicos y malla de triple torsión, este tipo de malla a diferencia del sistema estático tiene la propiedad de amortiguar el impacto de los bloques de roca con todos sus elementos.

Fotografía 19. Barrera dinámica.



Fuente: WARCO S.A.S. Sistemas de protección y control de erosión,
www.warco.com.co

6.2.5 TÚNELES ARTIFICIALES

Son obras cuya función es evitar que los bloques impacten sobre vías de comunicación terrestre. Estos elementos se construyen en concreto reforzado y en su techo se dispone una capa de material granular para evitar el rebote de las rocas.

Fotografía 20. Túnel falso vía Bucaramanga-Barrancabermeja.



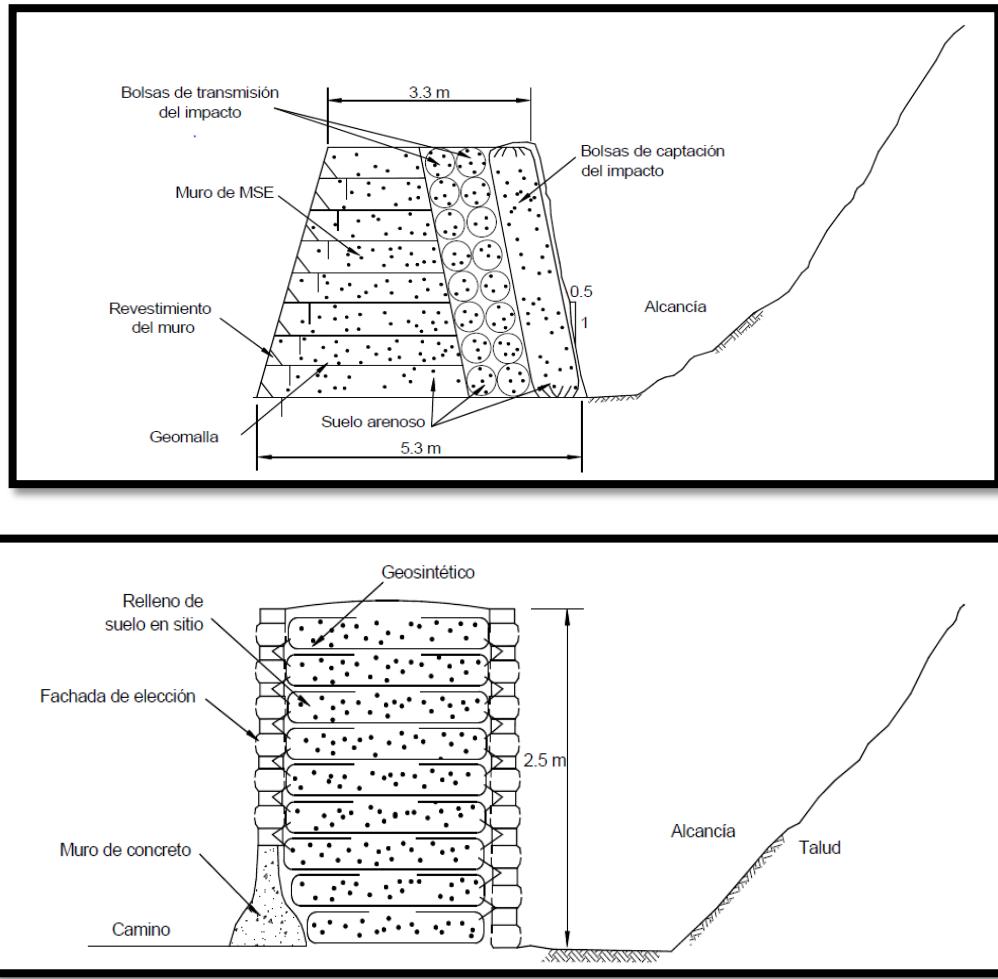
Fuente: www.panoramio.com

6.2.6 BARRERAS EN TIERRA REFORZADA

Muros con construidos mediante capas de material de relleno, colocándose entre sí elementos que arman el mismo. La combinación de los distintos prefabricados junto con la tierra compactada y las armaduras de refuerzo dan lugar a un sistema estructuralmente resistente y estable debido a su gran peso. Su uso importante es el de sostenimiento o contención de tierras.

Su principal característica se encuentra en su sistema constructivo, el cual utiliza una compactación por capas con elementos de refuerzo. Actualmente se sustituyen los anclajes de acero galvanizado por geotextiles o geosintéticos. Se pueden alcanzar altura de 20 y 30 m.

Figura 31. Muros Alcancía de Tierra Armada con Geotextil para Protección contra Caídos y Avalanchas.



Fuente: Suárez Jaime, Deslizamientos Técnicas de Remediación, Volumen 2.

6.2.7 BARRERAS EN ROCA O GAVIONES

Cajones de malla de alambre galvanizado que se rellenan de cantos de roca, estas son estructuras de gravedad y su diseño sigue la práctica estándar de la Ingeniería Civil. Por su flexibilidad el muro de gaviones puede deformarse fácilmente al ser sometido a presiones, puede flectarse sin necesidad que ocurra volcamiento o deslizamiento y es común encontrar deflexiones hasta el 20 % de la altura.

Ventajas:

- Se puede construir sobre fundaciones débiles.
- Simple de construir, mantener utiliza los cantos y rocas disponibles en el sitio.
- Su estructura es flexible, puede tolerar asentamientos diferenciales mayores que otro tipo de muros y es fácil de demoler o reparar.
- Es de construcción sencilla y económica.

Desventajas:

- Sus mallas de acero galvanizado se corroen fácilmente en ambientes ácidos.
- Al amarre de la malla y las unidades generalmente no se le hace un buen control de calidad⁴².

Fotografía 21. Muros en Gaviones



Fuente:http://editorial.cda.ulpgc.es/instalacion/7_OPTATIVAS/IHA/IHA3_drenaje/IHA37_actuaciones.htm

⁴² Jaime Suarez, "Deslizamientos Técnicas de Remediación", Volumen 2.

6.2.8 BARRERAS EN CONCRETO CICLÓPEO

Es una mezcla de concreto con cantos rodados o bloques de roca dura. Se utilizan generalmente mezclas de 60% de concreto y 40% de volumen de bloques de roca. A mayor cantidad de roca, mayor posibilidad de agrietamiento del muro por presencia de zonas de debilidad estructural interna.

Ventajas:

- Simples de construir y mantener.
- Utilizan bloques o cantos de roca como material embebido, disminuyendo los volúmenes de concreto.
- Son más económicos que los de concreto simple o reforzado.

Desventajas:

- Se requiere muy buena fundación.
- No soporta esfuerzos de flexión grandes.
- Se requiere la disponibilidad de bloques de roca.