



## 12 MACIZO ROCOSO

Cabo de la Vela. Guajira Colombia.

Las rocas pueden ser duras o blandas y las fallas de los macizos se pueden presentar por zonas de debilidad o de discontinuidad estructural. Las rocas blandas fallan a través del cuerpo de la masa rocosa y también a través de sus defectos estructurales.

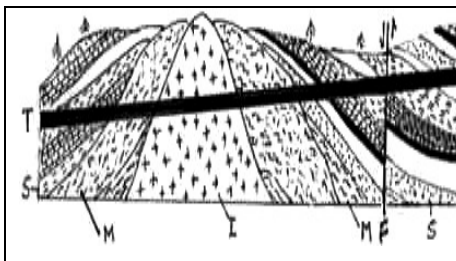


Figura 65. Túnel en un macizo afectado por una intrusión. Originalmente el macizo era sedimentario y ahora posee aureola de metamorfismo. (T túnel, F falla, I roca ígnea, M roca metamórfica y S roca sedimentaria).

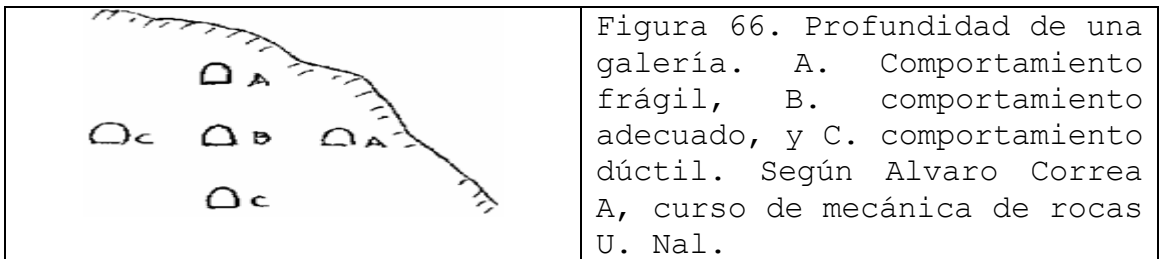
En la fig. 65 las capas sedimentarias están levantadas hacia la intrusión ígnea. El metamorfismo se da sobre las rocas sedimentarias por efectos del magma ascendente. El contacto entre las rocas metamórficas y la intrusión está fallado. Existe una falla tectónica, además. Un túnel atravesando este macizo encontrará comportamientos diferentes en las rocas: habrá comportamiento plástico en las metamórficas y elástico en las dos zonas de falla; serán rocas duras las ígneas y metamórficas y blandas las sedimentarias, habrá discontinuidades de retracción en las ígneas y de estratificación en las sedimentarias entre estas, los comportamientos varían sustancialmente.

### 12.1 CALIDAD DEL MACIZO

Se considera que un suelo o roca es blando o duro, según su resistencia a la compresión esté en los siguientes rangos:

Suelo blando menos de	4 Kg/cm <sup>2</sup>
Suelo duro entre	4 - 10 Kg/cm <sup>2</sup>
Roca blanda de	10 a 375 Kg/cm <sup>2</sup>
Roca intermedia de	375 a 700 Kg/cm <sup>2</sup>
Roca dura mas de	700 Kg/cm <sup>2</sup>
El concreto corriente es de sólo 210 Kg/cm <sup>2</sup> .	

Las rocas blandas son aquellas que pueden fallar a través de material intacto a los niveles de esfuerzos existentes que se pueden dar en el área de influencia de una excavación, sin que tenga sentido un valor numérico para definir la resistencia de dichas rocas, máximo aún si se tiene en cuenta que los macizos de roca más dura pueden fallar y fallan en las excavaciones más profundas. El comportamiento de una galería puede ser dúctil, adecuado o frágil, como se muestra en la fig. , cuando se consideran profundidades del orden de 100, 200 y 300 metros respectivamente.



En A hay relajamiento de esfuerzos y el bloque superior puede caer.

En B el confinamiento es suficiente y la región es óptima.

En C se corre peligro de implosión cuando se cierre el túnel si la roca fluye por plasticidad.

Si la densidad de la roca es 2,5 ton/m<sup>3</sup>, la carga de roca a 300 metros de profundidad ( $P_z = \gamma H$ ) será 75 Kg/cm<sup>2</sup> y a 600 metros 150 Kg/cm<sup>2</sup>.

Experimentalmente se sabe que para las excavaciones el factor de seguridad es del orden de 5. Esto es, la presión litostática  $P_z$  dividida por el esfuerzo de ruptura  $s_c$  debe ser superior a 0,2, inverso de 5 y límite por debajo del cual las rocas supuestamente fallarían. En los casos anteriores  $P_z / 0,2 > s_c$ , da los siguientes valores.

Para  $H = 300$  m de la relación anterior  $75 / 0,2 > 375$   
 $\text{Kg/cm}^2$

Para  $H = 600$  m de la relación anterior  $150 / 0,2 > 750$   
 $\text{Kg/cm}^2$

Algunos autores consideran el límite entre roca blanda o dura la resistencia confinada de  $375 \text{ Kg/cm}^2$ , e incluso  $750 \text{ Kg/cm}^2$  o más, si los esfuerzos horizontales son mayores que los verticales aunque las profundidades sean menores que las indicadas. Para los casos anteriores, taludes en rocas de esta resistencia, con alturas de 500 metros podrían presentar falla parcial a través de la masa de la roca intacta. En proyectos de ingeniería profundos los macizos con esta resistencia pueden fallar a través del material intacto bajo ciertas consideraciones extremas de profundidad al comportarse de manera dúctil como se ilustró con el ejemplo del túnel.

### **12.1.1 Propiedades de las rocas.**

- **Las rocas ígneas.** Son muy resistentes, isotrópicas, rígidas, frágiles, densas y de textura entrabada. Su inconveniente se da por presencia de materiales alterables y diaclasamiento.

- **Las rocas ígneas plutónicas.** Tienen minerales resistentes, entrabados, se da fallamiento en escalonado de minerales porque son diferentes.

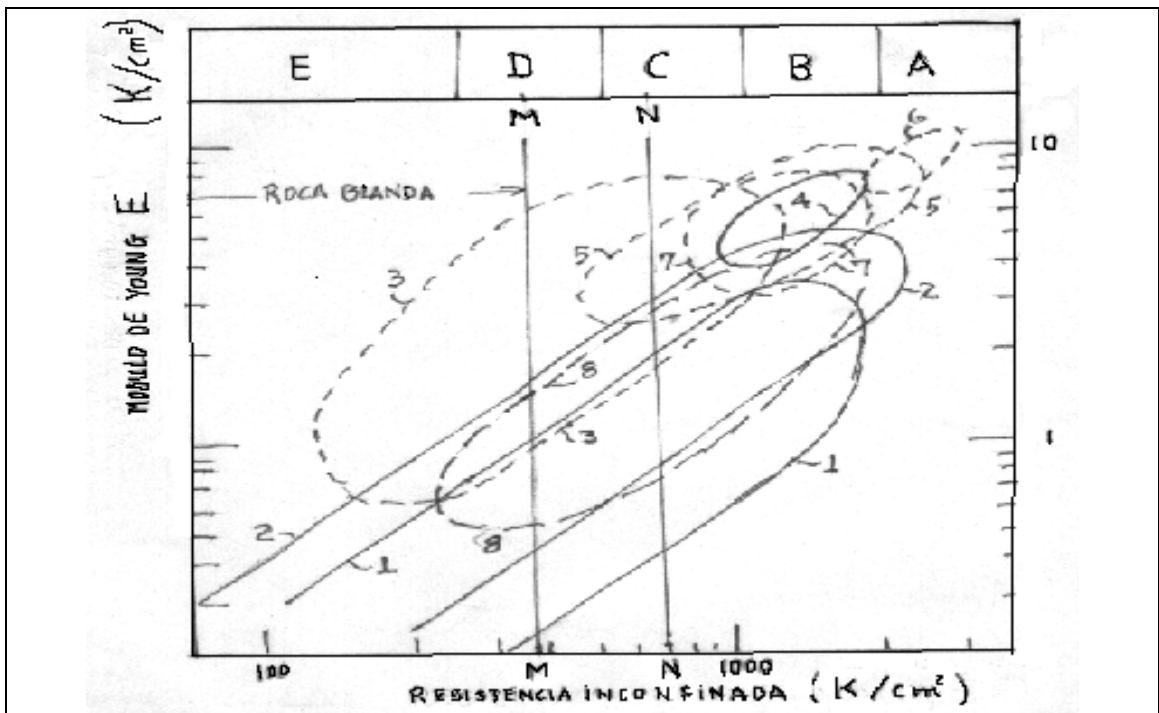


Figura.67. Clasificación ingenieril de roca intacta según Deere. E. Resistencia muy baja, D resistencia baja, C. resistencia media, B. resistencia alta, A. resistencia muy alta. 1. Roca arcillosa, 2. Areniscas, 3. Esquistos de foliación fina, 4. Granitos, 5. Calizas, 6. Cuarzitas, 7. Gneises, 8. Esquistos de foliación gruesa. M. 375 Kg/cm<sup>2</sup>, N. 700 Kg/cm<sup>2</sup>. Adaptado de Alberto Nieto, Caracterización G. de Macizos de Roca Blanda

- **Las rocas ígneas volcánicas.** Muestran heterogeneidad de minerales; hay falla en poros que afectan la roca, la porosidad le da plasticidad a la masa que si es de rocas masivas resulta poco porosa.

- **Las rocas sedimentarias.** Tienen resistencia media a baja son ortotrópicas, poco rígidas, dúctiles, porosas y presentan textura cementada-laminada. Su inconveniente es la ortotropía que hace difíciles los cálculos de estabilidad y comportamiento del macizo.

En las rocas sedimentarias la resistencia depende del grado de cementación y de su densidad. Ella aumenta cuando los granos son finos; si hay disolución en la masa hay porosidad. Los planos de estratificación son zonas de debilidad.

- **Las rocas metamórficas.** Se caracterizan por una resistencia medio alta, su ortotropía, tenacidad, textura entrabada y baja porosidad. Hay rigidez en el sentido paralelo y plasticidad en el perpendicular, con relación a los planos de clivaje. Su ortotropía dificulta los cálculos.

Las rocas metamórficas resultan elásticas por la cristalización de la masa. Son densas por el empaquetamiento. Si hay minerales laminados hay debilidad. Si hay esquistocidad hay zonas de debilidad. Los gneises son como los granitos aunque el bandeamiento les da debilidad.

**12.1.2 Macizos en roca blanda.** Los macizos de roca blanda están constituidos por materiales generalmente sedimentarios de grano fino, como arcillolitas, lodolitas, limolitas, tobas y margas, y también areniscas o conglomerados, pobremente cementadas, o por rocas metamórficas con orientación esquistosa desfavorable (filitas, esquistos), cuyo comportamiento geomecánico está controlado por la roca intacta y también por fracturas, diaclasas y fallas.

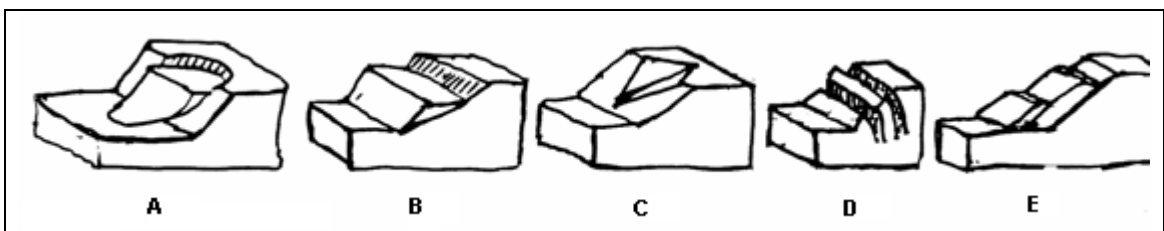


Figura 68. Fallas de un talud de roca: A. Falla circular. B. Falla planar, C. Falla en cuña, D. Falla por volcamiento, E. Fallas por flexión y Falla por pateo. Según Hoek and Bray, Rock Slope Engineering.

Los macizos de roca meteorizada también pueden ser considerados como masa de roca blanda cuyas discontinuidades

son rellenos de materiales tipo suelo; dichos macizos a menudo muestran una transición hacia suelos residuales donde los saprolitos tienen estructuras relictas, heredadas de la roca sana, las que sirven de zona de falla.

**12.1.3 Caracterización del macizo rocoso.** Esta es una tarea de observación, mediciones y ensayos para obtener parámetros cuantitativos útiles al diseño ingenieril. Este proceso además se desarrolla a lo largo de todas las etapas del desarrollo del proyecto, desde el diseño hasta su construcción y operación. Según la fase de diseño se requiere establecer un nivel mínimo de caracterización. El primero es con base en observaciones geológicas, el segundo nivel exige prospecciones geofísicas y el nivel final perforaciones exploratorias, medidas y ensayos geotécnicos.

Los parámetros geotécnicos fundamentales son la resistencia al corte, la deformabilidad, la permeabilidad y el estado original de esfuerzos, tanto para macizos en rocas duras como en rocas blandas. En las segundas la durabilidad de las rocas y su potencial de expansión y fluencia deben ser propiedades de primer orden.

En el caso de cimentaciones los principales problemas para una estructura en roca blanda son asentamientos diferenciales, rebote, falla a lo largo del contacto estructura-roca, las altas presiones de poros, las fugas excesivas y rara vez la falla por capacidad portante del macizo.

En los taludes la altura condiciona el tipo de caracterización geotécnica, como también lo hace la resistencia de la roca intacta y la geometría de las discontinuidades. Si es relevante la resistencia al corte, la deformabilidad puede tener interés por la inducción de fracturas de tensión en la corona, donde el agua introducida genera situaciones de inestabilidad que no existían.

Las obras más difíciles de caracterizar y modelar, son las excavaciones subterráneas. A diferencia de una estructura de concreto, el escenario estructural es aleatorio e incierto y queda escondido bajo una cubierta de suelo y material rocoso. Entre los problemas a resolver en el diseño de túneles, que han de conducir agua a presión están el de la estabilidad de las paredes sin agua y con ella, el grosor del refuerzo, la permeabilidad del macizo y la estabilidad de las laderas exteriores vecinas en caso de presiones hidrostáticas inducidas y de fuga de agua hacia los taludes y laderas.

La caracterización apropiada de los macizos rocosos, además de ser la base para el diseño de las obras, contribuye a la optimización del método constructivo, da vía al mejoramiento del macizo (anclajes, inyecciones, drenaje) y permite la programación de observaciones durante el funcionamiento de las obras.

## **12.2 DISCONTINUIDADES EN MACIZOS ROCOSOS**

Las discontinuidades están presentes en la roca y afectan la resistencia, permeabilidad y durabilidad de la masa. Es importante evaluar la geometría, naturaleza, estado y condición de las discontinuidades, porque ellas definen la fábrica estructural del macizo rocoso. Además de su génesis, la influencia en el comportamiento del macizo, exige evaluar la génesis de los rellenos, la cantidad de agua, las cicatrices y revestimientos en las paredes por materiales solubles, la abertura, rugosidad y persistencia de las discontinuidades, y el número de familias.

Las discontinuidades pueden ser:

Cuadro 16. Tipos principales de discontinuidades en macizos rocosos

Origen	Roca	Clase	Mecanismo
--------	------	-------	-----------

Origen	Roca	Clase	Mecanismo
Genético	Igneas	Estructura de flujo	Contactos entre coladas de lavas sucesivas
		Estructura de retracción	Grietas de retracción por enfriamiento
	Metamór	Foliación	Por gradientes térmicos, de presión y anatexia
	Sedimen to	Estratificación	Contactos entre eventos de deposición
Físico-químico	Todas	Termofracturas	Ciclos de calentamiento-enfriamiento o humedecimiento-secado
		Halifracturas	Expansión de sales y arcillas en fracturas
		Gelifracturas	Ciclos de congelamiento y fusión de agua
Gravedad	Todas	Relajación	Pérdida de presión de sepultura y esfuerzos de tracción
		Corte	Concentración de esfuerzos horizontales en valles
Tectónico	Todas	Estructuras de placa	Bordes constructivos, pasivos y destructivos
		Fallas	Rupturas con desplazamientos por esfuerzos de compresión, tracción y corte
		Diaclasas	Rupturas por esfuerzos tectónicos, pero sin desplazamiento de bloques
		Fracturas de pliegues	Radiales en la zona de tracción y de corte en la



Origen	Roca	Clase	Mecanismo
Biológico	Todas	Acción de las raíces	Penetración y crecimiento de las raíces de los árboles

Adaptado de Alvaro J. González G. Universidad Nacional, 1995.

- **Genéticas o primarias.** Son discontinuidades asociadas a estructuras de flujo y a fenómenos de retracción térmica en las rocas ígneas, a la foliación en algunas rocas metamórficas y a la estratificación en las sedimentarias. Son contemporáneas con la formación de la roca.

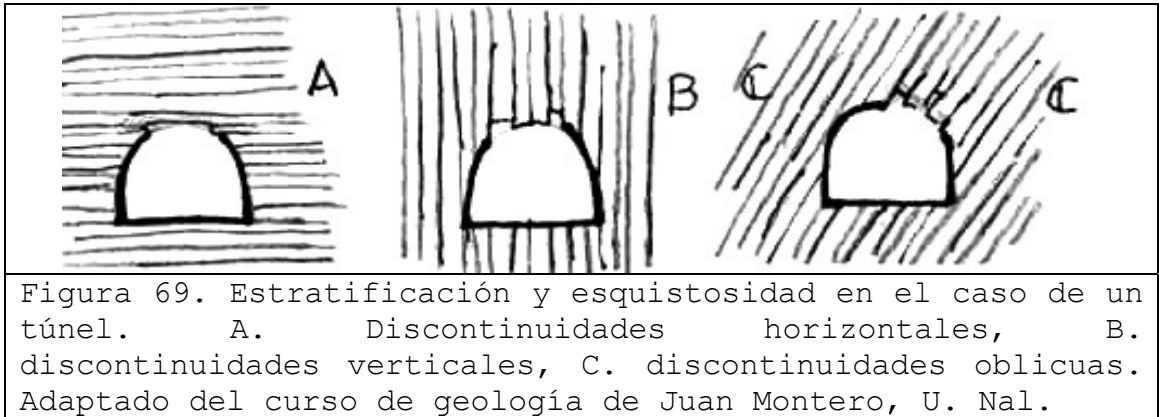
- **Termoquímicas.** Estas discontinuidades, de carácter secundario, pueden ocurrir después de formada la roca por causa del medio externo, como la termofracturación por gradiente térmico, gelifracturación por agua-hielo, halifracturación por sales y argilofracturación por arcillas.

- **Gravitacionales y tectónicas.** Son discontinuidades secundarias asociadas a esfuerzos gravitatorios como grietas de tracción, o a esfuerzos tectónicos donde se incluyen diaclasas, fallas y estructuras de placas tectónicas.

**12.2.1 Sistemas de diaclasas.** Los métodos para recolectar información de discontinuidades son inexactos y entre ellos la brújula y la construcción del plano o el mapa y la topografía son los más generalizados. La descripción de las perforaciones es útil cuando hay control de verticalidad y orientación, acompañados de una buena descripción de muestras.

Una familia de diaclasas es un grupo de diaclasas con igual orientación y varias familias presentes en un macizo,

intersecándose, se denominan sistema de diaclasas del macizo.



Las diaclasas pueden ser abiertas o cerradas y estar cementadas o no. También pueden ser paralelas a los planos de estratificación (rocas sedimentarias) o de clivaje (rocas metamórficas).

Por regla general un macizo tiene tres familias de fracturas o diaclasas asociadas a esfuerzos y cuando hay más de tres es porque existe superposición de esfuerzos.

**12.2.2 Parámetros de las discontinuidades.** Los parámetros de descripción de las discontinuidades son diez.

- **Orientación.** Es la posición espacial y se da con el rumbo y buzamiento de la superficie de discontinuidad. Es importante ver la actitud de los bloques y fracturas para efectos de estabilidad.

- **Espaciamiento.** Es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de una misma familia. Debe advertirse que el espaciamiento aparente, el que muestra en superficie la roca, por regla general es mayor que el real. Se utiliza el promedio.

- **Persistencia.** Es la longitud de la traza de una discontinuidad en un afloramiento (se trabaja estadísticamente y con criterios probabilísticos como el espaciamiento). Cuando hay persistencia se garantiza el flujo de agua a través de la masa.

- **Rugosidad.** Se alude a la rugosidad de la superficie y a la ondulación de la discontinuidad, pues ambos afectan la resistencia del macizo rocoso. Una alta rugosidad aumenta la resistencia a la fricción.

- **Resistencia de las paredes de la discontinuidad.** Generalmente es la resistencia a la compresión inconfiada, pues es una buena medida de la alteración de las paredes de la discontinuidad. La resistencia aumenta con la presencia de dientes de roca en la discontinuidad.

- **Abertura.** Es la distancia perpendicular entre las paredes de las distancias de las diaclasas cuando estas no tienen relleno (sólo agua o aire). Hay diaclasas cerradas.

- **Relleno.** Alude al material entre las paredes de la discontinuidad, casi siempre más blando que el macizo rocoso. Un parámetro en el material de relleno es su grado de cementación.

- **Flujo.** Agua presente en la discontinuidad que se encuentra libre o en movimiento. Se describe por el caudal y debe evaluarse si el agua brota o no con presión.

- **Número de familias presentes.** Es indicativo del grado de fracturamiento del macizo y depende de la dirección y tipo de esfuerzos. El menor número de familias en un macizo es tres; también las familias presentan características distintivas, no solamente en dirección y espaciamiento sino también en condiciones de relleno, caudal e incluso edad y tipo de esfuerzos que la origina.

- **Tamaño de bloques.** El que se cuantifica con algunas metodologías específicas. Deben identificarse además los bloques críticos: aquellos que tienen tamaños finitos y posibilidad de desprenderse.

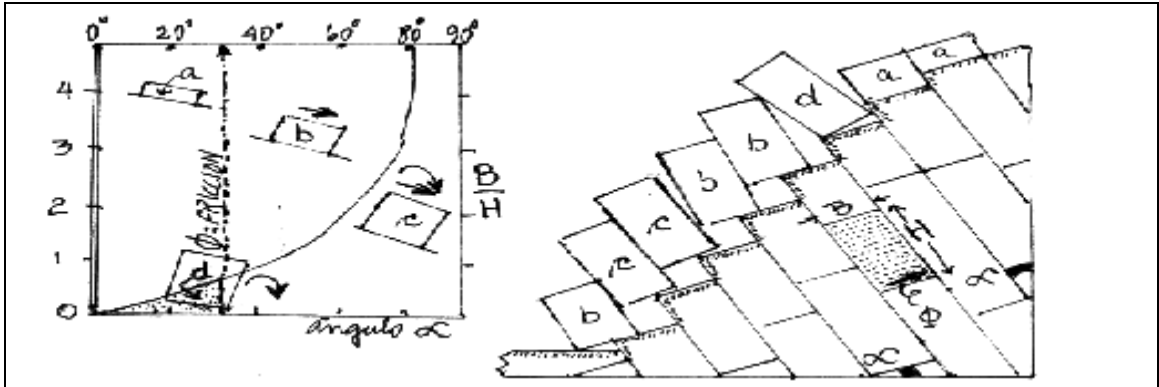


Figura 70. Volcamiento y deslizamiento de bloques. En el macizo: (a) bloques sin volcamiento ni deslizamiento; (d) con volcamiento y sin deslizamiento; (b) con deslizamiento y sin volcamiento; (c) con deslizamiento y volcamiento. En el ábaco se presentan las situaciones anteriores para un bloque sin empuje, en función de la inclinación del piso, de la relación base - altura de los bloques y de la fricción en el piso. Adaptado de E. Hoek and J. Bray, Rock Slope Engineering.

### 12.3 ESTABILIDAD DEL MACIZO

**12.3.1 Estabilidad general.** En un macizo rocoso se evalúa el material rocoso, el sistema de diaclasas, las condiciones del agua y las condiciones de esfuerzos.

En el material rocoso se evalúa la compresión inconfiada y la resistencia a la tracción utilizando núcleo de prueba. En el sistema de diaclasas se evalúan los parámetros señalados de rugosidad, separación (distancia), abertura (tamaño de bloques), rellenos, orientación (número de familias), persistencia y continuidad. En las condiciones del agua se evalúan la cantidad y los efectos del agua. También las características físicas y químicas de agua, y las modificaciones del caudal en el tiempo pueden importar. En

las condiciones de esfuerzos se evalúan, en cantidad, rata y dirección, los cambios en la masa y los cambios en la carga. Aquí es posible considerar la necesidad de estudios de sismicidad local.

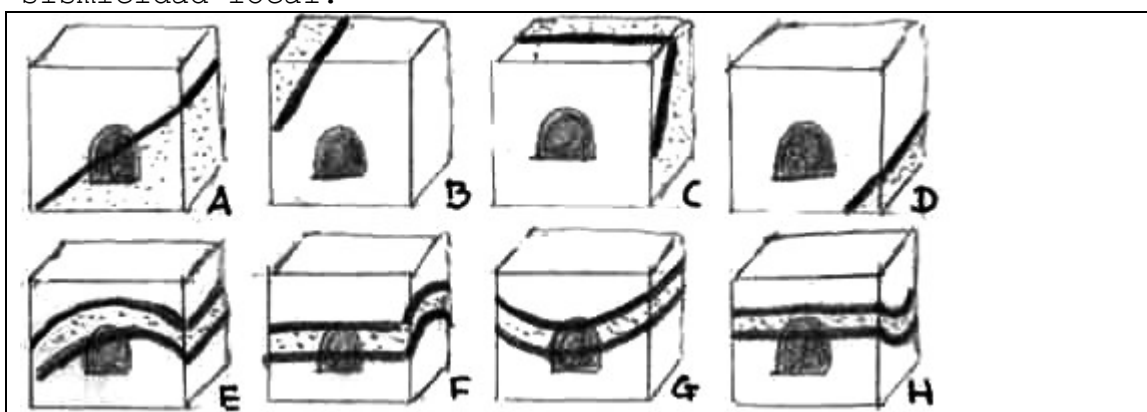


Figura 71. Aptitud de una estructura geológica y la dirección de un túnel. . La falla va con el túnel, B. y D. la falla no corta el túnel, C. la falla corta transversalmente el túnel, E. y F. el túnel se encuentra en un anticlinal, G. y H. el túnel cruza un sinclinal. Adaptado de Pedro Hernández, Conceptos de Geología Estructural.

Es importante notar la diferencia en los casos A y C. Se supone que C. es más favorable que A. porque la zona de fracturamiento intenso donde el túnel requiere blindaje es sólo una sección del túnel. En los sinclinales G. y H. se puede prever concentración de agua fluyendo hacia el túnel. Es más crítico G. que H. Los anticlinales E. y F. ofrecen mejores condiciones de autosoporte que las que ofrecen los sinclinales.

Una segunda consideración, es la anisotropía de tipo litológico: en el primer caso a ambos lados de la falla las rocas no coinciden en razón del desplazamiento que esta supone; en el segundo caso los sinclinales y anticlinales son estructuras propias de ambientes sedimentarios, y esto supone la presencia de estratos. En uno y otro caso existiera la posibilidad de encontrar rocas con propiedades

diferentes que contrastan como parámetros de diseño (permeabilidad, resistencia, plasticidad, alterabilidad, etc.).

**12.3.2 Estabilidad cinemática.** Para evaluar la estabilidad de un bloque rígido, previendo una falla de talud en un macizo rocoso, hay que averiguar rasgos geométricos para ver el tamaño, forma y disposición de bloques o cuñas de roca, recurriendo a un análisis de estabilidad o inestabilidad cinemática.

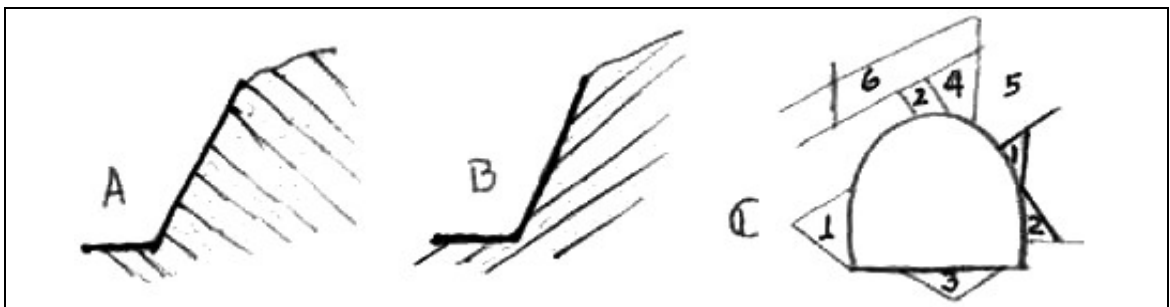


Figura 72. Estabilidad de cuñas de roca. A. talud cinemáticamente estable. B. talud cinemáticamente inestable, C. bloques formados en las paredes de un túnel. Según Hoek and Brown, Excavaciones subterráneas.

De los dos taludes, el que muestra discontinuidades buzando en contra de la pendiente, resulta cinemáticamente estable. El talud de la derecha se considera cinemáticamente inestable puesto que se facilita el deslizamiento de las masas de roca, toda vez que los bloques resultan inconfinados. La fricción de ser suficiente, podrá evitar el deslizamiento de las cuñas.

En la sección del túnel, con bloques críticos y potencialmente críticos, estos son bloques que se pueden caer. El seis no lo es por faltarle caída libre, el cinco tampoco por ser infinito, el cuatro por ser cono cuñado; tampoco, los bloques uno, dos y tres son finitos y removibles, y su estabilidad está en duda por fricción y geometría; uno y dos son críticos y potencialmente críticos.

Tres y dos por gravedad son seguros, el dos del techo por fricción puede ser estable y exige una fuerza actuante. El dos de la pared exige fuerzas actuantes. El uno de la derecha cae libremente y el uno de la izquierda cae friccionando. Aunque exista inestabilidad cinemática no se sabe si se dará o no la falla del talud, pues desde el punto de vista mecánico el talud puede ser estable. En los túneles pueden darse bloques críticos, cuando la geometría de las discontinuidades los conforme con una actitud desfavorable, propicia al desprendimiento por falta de confinamiento e inclinación pronunciada. La falla de estos elementos se da en caso fuerzas desequilibrantes, pérdida de la resistencia y fricción insuficiente para el apoyo.

El análisis cinemático supone averiguar geoméricamente las dimensiones probables del bloque y su disposición, de acuerdo a la orientación, espaciamiento y persistencia de las discontinuidades del macizo rocoso, obtenidas de perforaciones y taludes vecinos.

De otro lado, algunos depósitos de suelo pueden fallar por planos tan débiles que por su forma, su comportamiento es el de fallas en material rocoso.

**12.3.3 Auscultación y control de túneles y galerías.** El proceso apunta a observar la dinámica de los procesos en la masa rocosa y con respecto a la galería, particularmente esfuerzos, deformaciones y degradaciones por agentes ambientales. El propósito es garantizar la estabilidad y servicio de la estructura.

El **nivel de alarma** es diferente en minas que en casas de máquinas pues en las primeras hay cuasiestabilidad (factor de seguridad cercano a 0,9), mientras en casas de máquinas el factor de seguridad es 7 u 8.

En las minas hay procesos de avance del frente y extracción de materiales, en el primero el factor de seguridad es 3 y en el de extracción 0,7 a 0,9. Eso supone que las

características del macizo son malas y se puede utilizar poca voladura obteniendo economías.

La auscultación debe basarse en una **base amplia de datos** manejables estadísticamente y las medidas deben hacerse, desde que se abre el frente a auscultar. Estas son al principio medidas cada hora, más tarde medidas diarias y por último medidas cada seis meses que nunca podrán suspenderse.

La previsión de eventos es compleja porque son muchos los parámetros y difícil su integración. Por ejemplo datos geológicos, hidrológicos y geotécnicos; datos topográficos; aspectos geométricos, aspectos técnicos como métodos de avance, tipos de soportes y revestimientos; además modificación del estado inicial de esfuerzos.

El modelo exige la determinación de ensayos de laboratorio y de medidas in situ. El ajuste del modelo o de las hipótesis supone la confrontación de resultados de observación directa. La auscultación depende del tipo de roca, magnitud y dirección de esfuerzos, métodos de avance, sostenimiento de la galería y el recurso humano.

Si **los materiales fallan por esfuerzos o deformaciones**, para la auscultación interesa la deformación. La medida de esfuerzos y deformaciones siempre es diferente desde el punto de vista espacial. Los esfuerzos suponen mediciones por áreas o volúmenes y las deformaciones, la medición puntual. De todas maneras el puente para conocer los esfuerzos a partir de la magnitud y la dirección de las deformaciones es el módulo de Young.

Hay métodos de auscultación visuales e instrumentales (métodos sencillos y complejos). Los **métodos visuales**, aunque no cuantifican, son económicos, recomendados y significativos. Su ventaja es que permite la cualificación y extrapolación de las deformaciones. Las medidas visuales incluyen caída de bloques pequeños, generación y avance de grietas, formación de vientres y vacíos, deslizamiento de



elementos de soporte, punzonamiento del piso, presencia de humedad e infiltraciones, observación de bloques críticos, oxidación de los elementos del soporte, gases, etc.

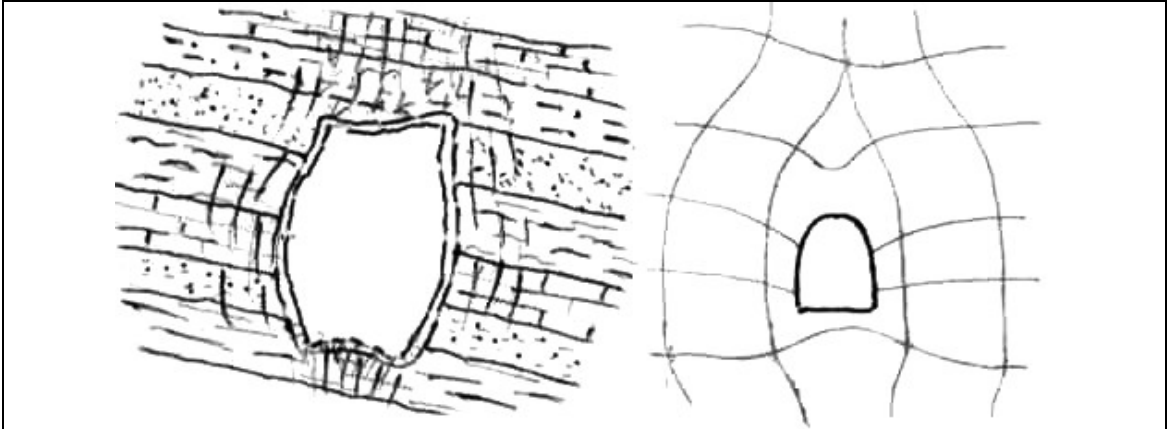


Figura 73. Galería rectangular en roca con fuerte anisotropía estratigráfica. En el dibujo la galería sugiere una elipse. La rigidez del material en las paredes es buena pero no en el piso. A la derecha se muestra la trayectoria de los esfuerzos principales en la galería, la que depende de la forma y orientación de la galería. Notas del curso de instrumentación geotécnica de Guillermo Angel, U. Nal.

Las **medidas instrumentales** varían en costos. Las económicas y rápidas son: para deformaciones, las de convergencias (cierre de diámetros), la de expansiones (hechas con gatos), los grietómetros (pie de rey), la altura rectante (entre techo y piso); para esfuerzos, celdas de carga (miden esfuerzos por deformación) y gato plano; y para velocidad, la microsísmica que mide las diferencias de tiempo de arribo de ondas provocadas. Las medidas de costo intermedio son las que se toman con estratoscopio (especie de periscopio para introducir en rotos). Las medidas costosas y demoradas son el radiofor, distofofor, telemetría, distanciómetro (todas para deformaciones), el overcoring (mide esfuerzo y deformación sobre perforaciones) y el doorstopper (que mide esfuerzos).

Uno de los **errores** de la auscultación es que la medición no es sistemática. Las características del comportamiento del

macizo y la estructura no están siempre bien definidas y por ello no se instalan los instrumentos debidos. Es frecuente la falta de experiencia para la correcta instalación y lectura de los instrumentos o para su corrección. También la falta de interés en las condiciones geológicas y en la necesidad del control, como las instalaciones tardías y la falta de mediciones (que no se ejecutan), aunque existan los instrumentos.

## 12.4 RASGOS ESTRUCTURALES

Planicies, montañas y mesetas en la superficie de la Tierra, muestran rasgos estructurales con características propias; esos rasgos son llamados pliegues, fracturas (fallas o diaclasas) y contactos (discordancias), además de los mantos de corrimiento.

**12.4.1 Rumbo y buzamiento.** La disposición o geometría de un rasgo estructural se anuncia con dos parámetros: el rumbo o dirección y el buzamiento o echado.

- **Rumbo.** Supóngase un plano inclinado del cual se pueden dibujar las curvas del nivel (CN), perpendiculares a la línea de máxima pendiente (ZL); Fig. 74.

El rumbo será el ángulo horizontal  $\phi$  que hace una curva de nivel del plano inclinado (CN) con la Norte-Sur, de tal manera que el ángulo sea agudo.

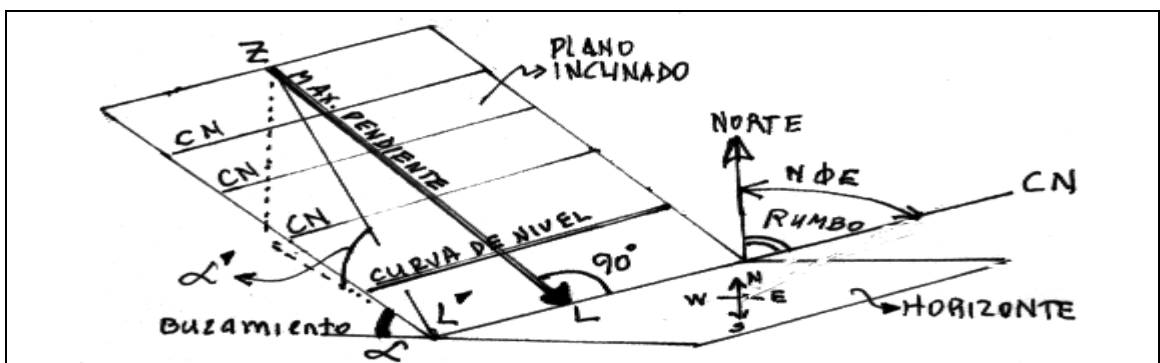


Figura 74. Plano inclinado: este plano inclinado representa una superficie de falla o cualquier otro rasgo estructural. El ángulo con la norte es horizontal y el ángulo alfa, vertical.

En el rumbo antes del valor angular  $\phi$  va la letra N o S, según el extremo del meridiano de origen sea norte o sur, y después del ángulo  $\phi$  va la letra E o W dependiendo del cuadrante (Este u Oeste) hacia donde avance la curva de nivel (CN).

- **Buzamiento.** La línea de máxima pendiente (ZL) muestra la trayectoria de las aguas lluvias sobre el plano inclinado. Esa línea y también el plano tienen por buzamiento el ángulo  $\alpha$  medido con relación al horizonte. Después del ángulo  $\alpha$  se escriben dos letras consecutivas, la primera N o S y la segunda E o W, de tal manera que quede registrado el cuadrante hacia el cual el plano inclinado se deprime, es decir, hacia el cual avanza la línea de máxima pendiente (ZL). Como las curvas de nivel (CN) y las de máxima pendiente (ZL) son perpendiculares, una de las dos letras cardinales para el buzamiento ( $\alpha$ ), será igual a otra de las que tiene el rumbo ( $\phi$ ).

Si al rumbo de una línea se le cambian las dos letras cardinales, se produce un giro de  $180^\circ$ ; si se le cambia una sola letra, se producirá un giro de  $90^\circ$ .

- **Buzamiento aparente.** Obsérvese en la fig. 74 (plano inclinado) la línea ZL' (en diagonal), esta hace un ángulo  $\alpha'$  con el horizonte (no dibujado) ángulo menor que  $\alpha$  y que es llamado ángulo de buzamiento aparente.

Hay muchos buzamientos aparentes  $\alpha'$ , medido cualquiera de ellos sobre una línea no perpendicular a la curva de nivel CN.

**12.4.2 Representación estereográfica.** Se puede hacer una representación plana de una esfera intersecada por varios

planos de corte que pasan por su centro. Estas intersecciones son círculos Máximos.

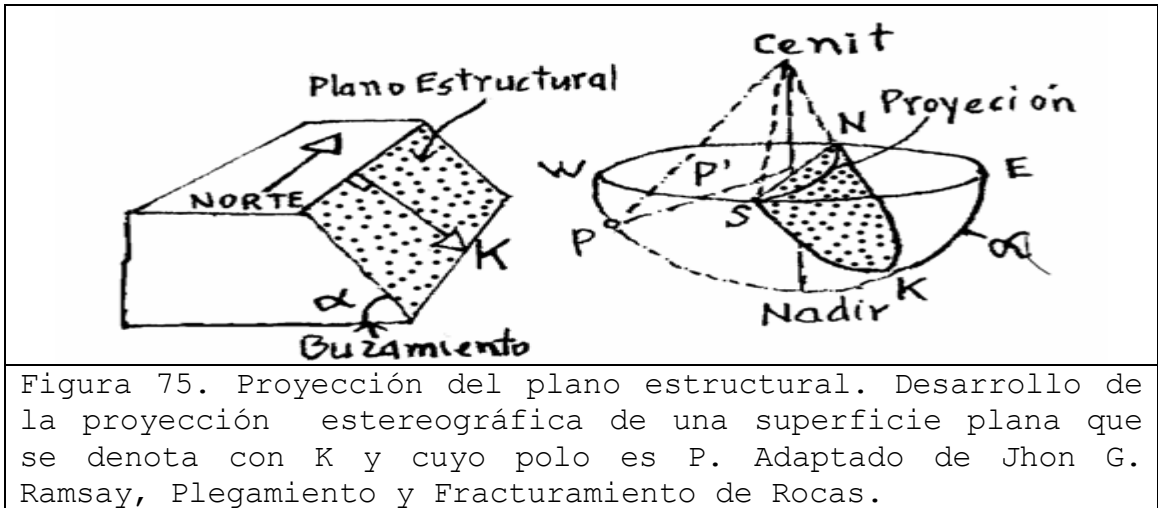


Figura 75. Proyección del plano estructural. Desarrollo de la proyección estereográfica de una superficie plana que se denota con K y cuyo polo es P. Adaptado de Jhon G. Ramsay, Plegamiento y Fracturamiento de Rocas.

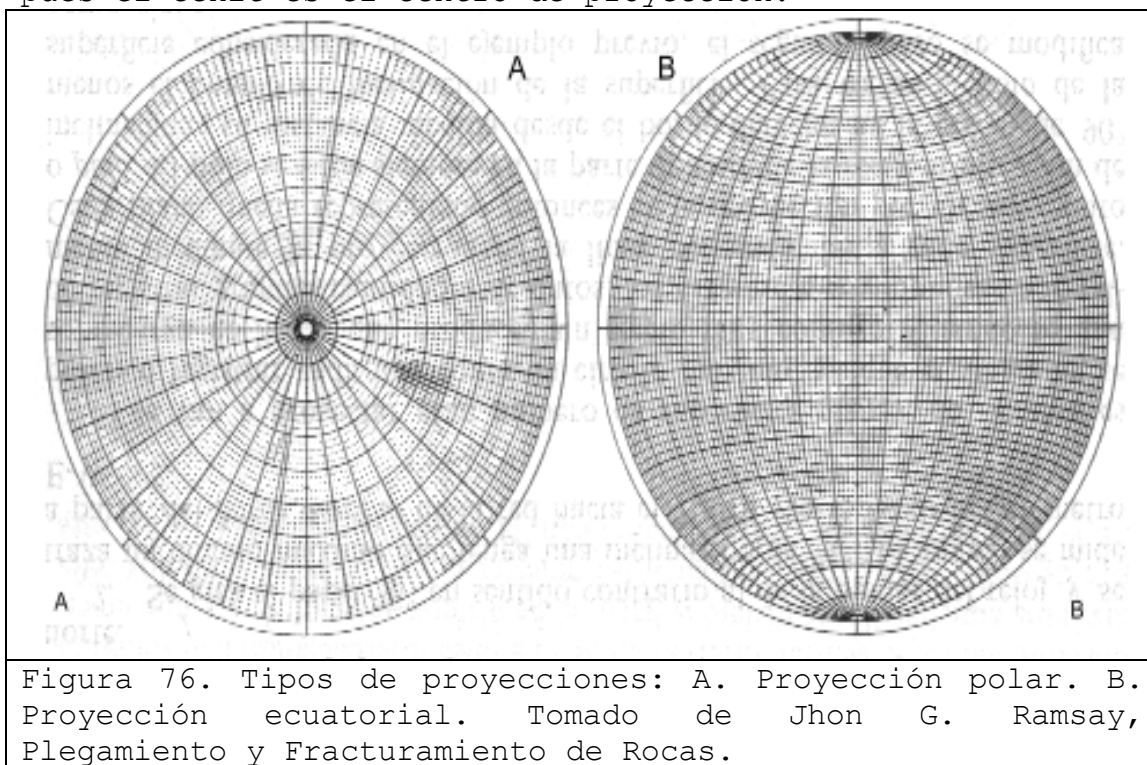
Ubicándose el observador en el centro de la esfera, podrá señalar sobre su superficie seis (6) puntos fundamentales: arriba y abajo el cenit y el nadir, que son antípodas. A izquierda y derecha el oriente (E) y occidente (W), ubicados sobre los extremos de otro diámetro. Al frente y atrás estará el norte (N) y el sur (S), ambos diametralmente opuestos. Los cuatro últimos definen el horizonte NESW, sobre el cual cae perpendicularmente la línea cenit-nadir.

Pártase en dos esa misma esfera con el horizonte y considérese la semiesfera inferior, que ya había sido intersecada por un plano de corte que pasa por su centro, y del cual queda el semiplano que está por debajo del horizonte.

Este semiplano representará un plano estructural y el conjunto se puede dibujar con una proyección esférica polar o ecuatorial, en el denominado diagrama estereográfico.

Si desde el cenit se llevan rectas al círculo máximo que pasa por el punto K, éste haz interceptará el horizonte

formando un arco que es la proyección del plano K. Varios arcos de estos generan una red meridional o ecuatorial como la de la fig. 76 B precedente. La proyección del polo P sobre el horizonte la determina el rayo que sale del cenit, pues el cenit es el centro de proyección.



- **Medida del rumbo y buzamiento.** El semiplano de corte que idealiza un plano estructural tiene por intersección con el horizonte, un diámetro (CN) sobre el cual se mide la dirección del plano -rumbo- y una línea de máxima pendiente (ZL), perpendicular al diámetro, sobre la cual se mide la inclinación ( $\alpha$ ) del plano - que es el buzamiento -.

- Una perpendicular a la línea de máxima pendiente, levantada por el centro de la esfera, interceptará la semiesfera por debajo del horizonte en un punto (P) denominado polo. Además la línea de máxima pendiente del semiplano inclinado que sale del centro de la esfera intercepta la esfera en un punto K distante  $90^\circ$  del polo P

de dicho semiplano. Este semiplano estructural (el que aparece achurado) se puede denotar con las coordenadas del polo (P) o las del punto K.

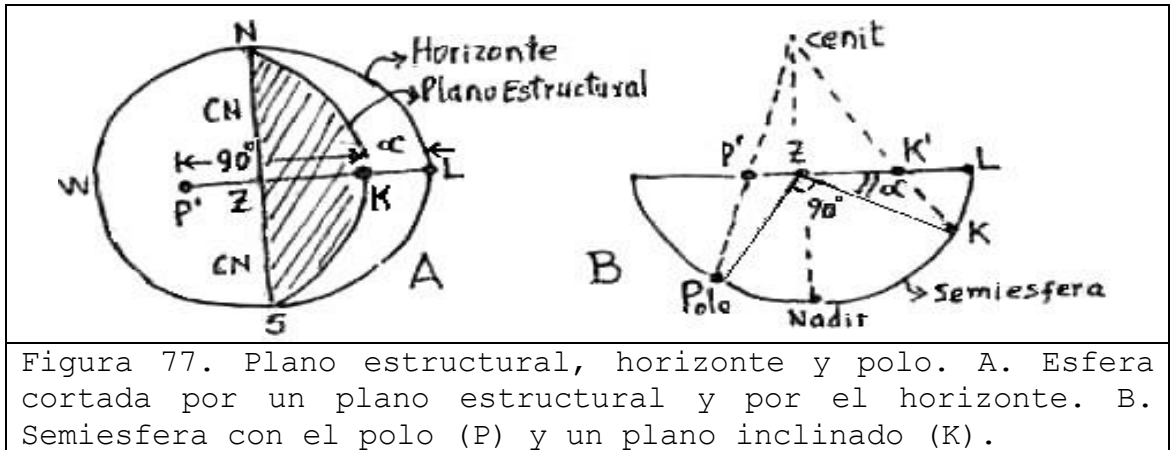


Figura 77. Plano estructural, horizonte y polo. A. Esfera cortada por un plano estructural y por el horizonte. B. Semiesfera con el polo (P) y un plano inclinado (K).

Supóngase esa esfera cuyo centro se intercepta con el plano inclinado visto antes y dibujemos la semiesfera del nadir vista en dirección Cenit-Nadir, para que el horizonte se vea en verdadera magnitud (Fig. 78).

- 1° Se dibuja la curva de nivel  $CN$  con dirección  $S \phi W$  o con  $N \phi E$  que es lo mismo (diámetro).
- 2° Se traza la línea de máxima pendiente  $ZL$  perpendicular a la curva de nivel  $CN$  por el costado  $SE$  (radio), obteniendo el punto  $L$  sobre el perímetro de la circunferencia.
- 3° A partir de  $L$  (sobre la circunferencia) se marca el ángulo  $\alpha$  en dirección al nadir  $Z$  (centro de la circunferencia) y se coloca el punto  $K$  (sobre el radio).
- 4° Se traza un arco de círculo máximo con cuerda  $CN$  (que es un diámetro), pasando por el punto  $K$  de coordenadas dadas (rumbo y buzamiento).

El siguiente esquema muestra el horizonte y los ángulos del rasgo, estructural. Se ve la curva de nivel con un rumbo

$N \phi E$ , y perpendicular a la curva de nivel se ve la recta  $ZL$  sobre la que se mide el buzamiento.

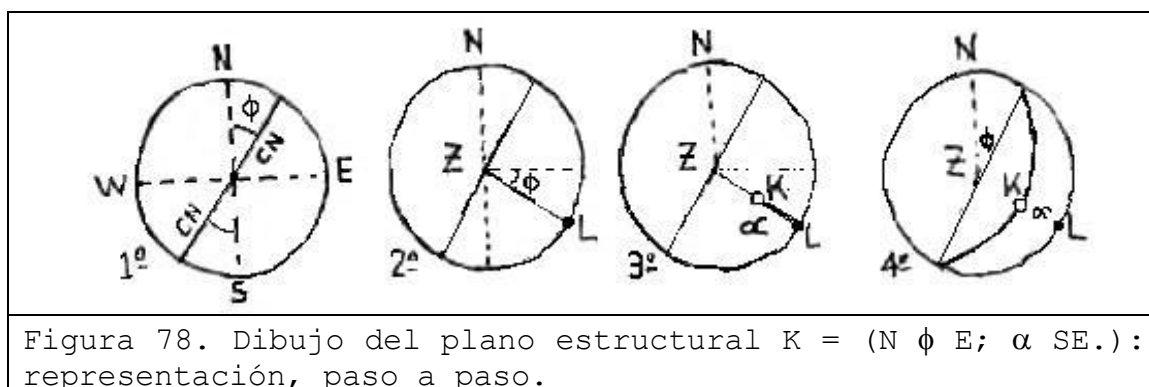


Figura 78. Dibujo del plano estructural  $K = (N \phi E; \alpha SE.)$ : representación, paso a paso.

En el ejemplo el plano buza  $\alpha$  grados medidos desde el horizonte y en dirección SE. El valor de  $\alpha$  se mide a partir de L y hacia Z, pues a L le corresponden  $0^\circ$  y a Z  $90^\circ$ . Posteriormente se coloca el punto K sobre ZL y se dibuja un arco que tenga por cuerda la curva de nivel CN que pasa por el punto K de coordenadas  $N \phi E; \alpha SE.$

- **Ejercicio.** Se pide el punto K representativo de una falla, rasgo estructural con los siguientes parámetros: K ( $N 60^\circ W; 30^\circ SW$ ). Dibujar la intersección entre el plano de falla y la semiesfera sobre el diagrama estereométrico (Fig. 79).

Primero se dibuja la curva de nivel CN como un diámetro, según el rumbo (y contra rumbo dado):  $N 60^\circ W$  (y  $S 60^\circ E$ ). El observador está en el centro y bajo Z, mirando al SW, y la curva de nivel CN avanza a su izquierda y derecha.

Después se dibuja el radio ZL perpendicular a la curva de nivel CN de acuerdo a las dos letras del buzamiento; SW.

A continuación sobre ZL se marcan  $30^\circ$  medidos a partir de L, es decir, a partir del horizonte y en dirección al nadir Z.

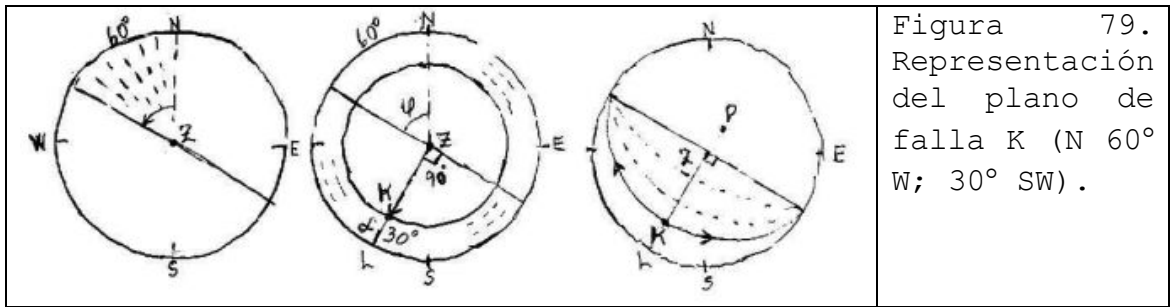


Figura 79. Representación del plano de falla K (N 60° W; 30° SW).

Por último, utilizando como cuerda la curva de nivel CN, se traza un arco de círculo máximo que pase por K, el cual representa la intersección del plano estructural con la semiesfera del nadir.

**12.4.3 Dirección de buzamiento y buzamiento.** Se puede definir un plano estructural ya con el punto K o ya con su polo P. Sólo basta observar la línea ZK o la línea ZP y darle a cualquiera de ellas su acimut y buzamiento. Esta es una nomenclatura más expedita para los planos estructurales. El acimut es un ángulo que se mide a partir del norte, en la dirección de las manecillas del reloj y cuyo valor está, entre 0° y 360° sexagesimales. Se barre el ángulo hasta encontrar el punto K, y a éste punto se le mide el buzamiento sobre el radio que lo contiene, ángulo que varía de 0° a 90°, medidos del perímetro hacia el centro de la circunferencia. A 90° de K y en dirección al centro de la circunferencia, después del centro de la misma está el polo P, tal que el ángulo KZ es complementario con ZP.

En Fig. 80 se tienen varios ejemplos de planos estructurales donde las coordenadas de K, expresadas en la forma K (azimut de buzamiento / buzamiento), se dan en las gráficas, con su notación equivalente  $K = (\text{rumbo de la curva de nivel; buzamiento de la línea de máxima pendiente})$ .



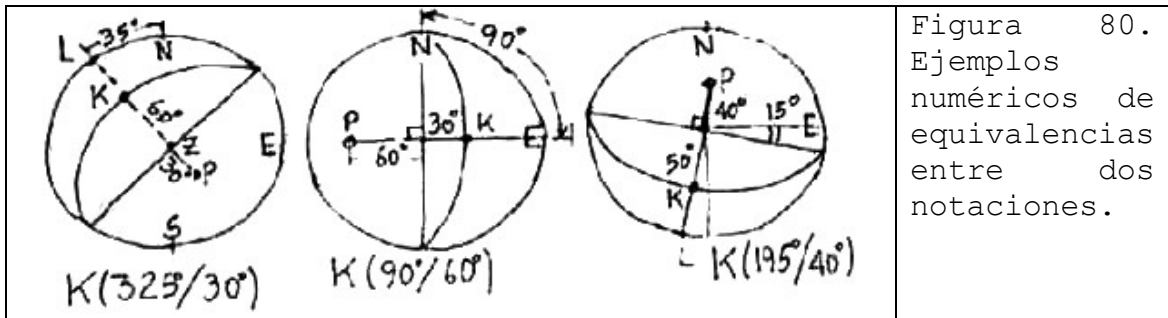


Figura 80. Ejemplos numéricos de equivalencias entre dos notaciones.

**12.4.4 Aplicación al análisis de estabilidad cinemática.**

Uno de los problemas importantes en taludes es prever la posibilidad de falla de un talud, cuando la actitud de las discontinuidades es desfavorable. Se deberá tener en cuenta que muchas cuñas cinemáticamente inestables se sostienen gracias a la resistencia de la fricción que se ejerce entre las paredes adyacentes de las discontinuidades. Las fuerzas dinámicas inducidas por el tráfico en la vía o los sismos y las presiones por columnas de aguas infiltradas pueden romper el estado de equilibrio de las estructuras cinemáticamente inestables. Se dan ejercicios de taludes construidos en macizos rocosos con discontinuidades y las consideraciones generales del análisis.

- **Falla planar.** Se da una estratificación -línea continua- y un talud construido -línea punteada- de conformidad con las ilustraciones siguientes. Si la estratificación tiene los parámetros del plano K y el talud los del plano T, ¿hay estabilidad cinemática? (Fig. 81).

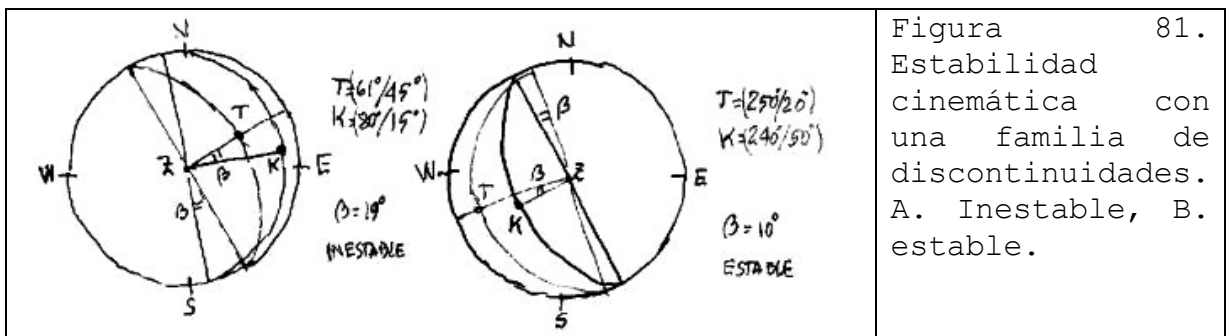
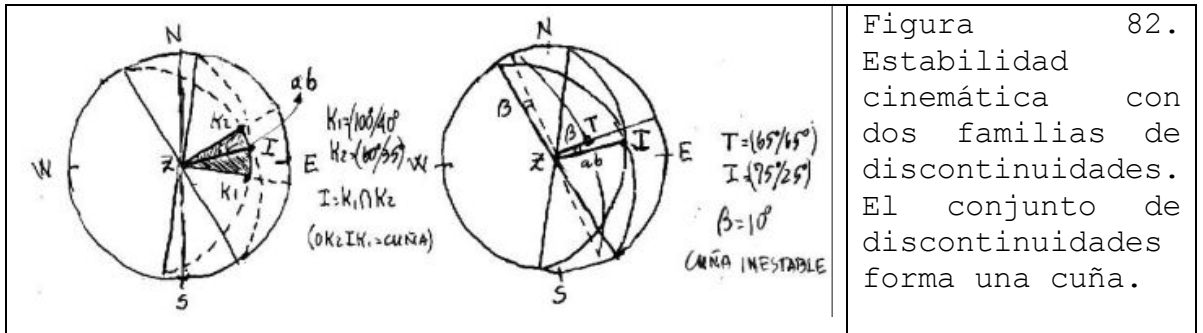


Figura 81. Estabilidad cinemática con una familia de discontinuidades. A. Inestable, B. estable.

En la figura 81 B hay estabilidad pero en la 80 A no, pues el buzamiento del talud no puede ser mayor que el de la estratificación.



**Falla en cuña.** En un macizo hay dos familias de diaclasas asociadas a esfuerzos,  $K_1$  y  $K_2$ , cuya intersección, en  $ab$ , genera cuñas como se ilustra a continuación. Si se hace un talud buzando en la dirección de la línea de cabeceo  $ab$ , ¿hay estabilidad cinemática? (fig. 82). El tercer sistema en el ejercicio no tiene persistencia y en consecuencia se atiende a los dos sistemas relevantes.

El buzamiento de la línea de cabeceo  $ab$  es más suave que el del talud  $T$ . La estabilidad cinemática depende del ángulo horizontal entre la línea de cabeceo  $ab$  y el valor del buzamiento del talud  $T$ ; dicho ángulo debe superar  $20^\circ$  si queremos estabilidad cinemática. En el ejemplo no existe estabilidad por la poca inclinación de la línea de cabeceo y el estrecho ángulo entre ésta línea y el buzamiento del talud.