



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Métodos para determinar la
excavabilidad de los
materiales**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Michael Angelo Castillo López

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2 de Mayo de 2018

Agradecimientos

A mis padres y hermana, por el amor y apoyo que me han brindado en todos sentidos y a lo largo de toda mi vida.

Al Ing. Ernesto Mendoza, por proponerme este vasto tema así como su tutoría en el desarrollo del mismo.

Al Ing. Ulisses Solana y al Ing. Pedro Corona, por transmitirme sus experiencias de campo a través de correo y platicas personales, respectivamente.

A mis sinodales, por su revisión y comentarios sobre el trabajo en tiempo y forma.

A la Psicóloga Rebeca Morales, por ayudarme a lidiar con varios dilemas personales y seguir adelante en este camino.

A mis amigos, por su compañía y confianza en momentos de alegría y otros donde no lo fue tanto pero que siempre estuvieron presentes de alguna u otra forma.

Al resto de mi familia, por su apoyo constante.

Por último pero no menos importante, *a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería*, que me brindaron la oportunidad de vivir momentos invaluable, junto a profesores y colegas memorables.

A todos ellos, gracias.

Métodos para determinar la excavabilidad de los materiales

Índice

Introducción.....	1
1. Planteamiento del problema.....	2
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Justificación.....	3
2. Mecánica de rocas.....	4
2.1. Minerales y sus propiedades.....	4
2.2. Formación y tipos de rocas.....	7
2.2.1. Características generales.....	7
2.2.2. Ciclo las rocas.....	8
2.2.3. Rocas ígneas.....	10
2.2.4. Rocas sedimentarias.....	10
2.2.5. Rocas metamórficas.....	12
2.3. Propiedades índices de las rocas.....	13
2.3.1. Propiedades físicas.....	13
2.3.2. Propiedades mecánicas.....	15
2.4. Macizos rocosos y formas de clasificarlos.....	19
2.4.1. Clasificación RQD.....	19
2.4.2. Sistema RMR de Bieniawski.....	21
2.4.3. Sistema Q de Barton.....	25
2.5. Discontinuidades.....	31
3. Mecánica de suelos.....	34
3.1. Formación y tipos de suelo.....	34
3.2. Propiedades índice.....	35
3.3. Parámetros de resistencia.....	40
3.4. Clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	41
4. Exploración en suelos y macizos rocosos.....	44
4.1. Métodos de exploración indirectos.....	44

4.1.1. Sísmicos.....	45
4.1.2. Eléctricos.....	59
4.1.3. Magnetométricos.....	52
4.1.4. Gravimétrico.....	55
4.2. Métodos de exploración directos.....	59
5. Métodos para determinar la excavabilidad de materiales.....	64
5.1. Método RIP de Caterpillar (1958).....	64
5.2. Método de Atkinson (1971).....	65
5.3. Método de Franklin (1971).....	65
5.4. Método de Weaver (1975).....	68
5.5. Método de Kirsten (1982).....	72
5.6. Método de Abdullatif y Cruden (1983).....	76
5.7. Método de Scoble y Muftuoglu (1984).....	78
5.8. Método de Hadjigeorgiou y Scoble (1988).....	79
5.9. Método de Singh (1989).....	81
5.10. Método de Karpuz (1990).....	82
5.11. Método de Pettifer y Fookes (1994).....	84
5.12. Método de Romana.....	88
5.13. Método de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.....	91
5.14. Análisis de los métodos expuestos.....	96
6. Maquinaria y equipo para excavación.....	101
6.1. Tractores.....	101
6.2. Excavadoras hidráulicas.....	104
6.3. Perforación y voladura.....	106
Conclusiones.....	113
Referencias.....	114
Anexo.....	122

Introducción

En la actualidad, se vive en un mundo donde la información ha pasado a convertirse en uno de los recursos más valiosos a nivel mundial. Aquella frase popular de “conocimiento es poder”, no hace más que enaltecer el peso de la misma que funge como base para la toma de decisiones en un sin fin de aspectos teniendo el potencial de beneficiar la vida de individuos, comunidades, empresas o naciones enteras. La ingeniería civil, junto a su compromiso con el desarrollo de un amplio espectro de proyectos que abarcan todo tipo de infraestructura encaminados a satisfacer la igualmente diversidad de necesidades humanas, no es ajena a esta tendencia. Por tanto, sus metodologías, procedimientos, tecnologías y conocimientos de los que se valen han sido perfeccionados y adaptados a través del tiempo siguiendo la tendencia ya mencionada, principalmente mediante sistemas de información,¹.

Dados los contextos sociales, ambientales, económicos y políticos, conceptos como tiempo, costo, calidad y sustentabilidad (que actualmente resultan tan familiares para el gremio de ingenieros) son referentes en las diferentes etapas que constituyen las obras civiles, como es el caso de las carreteras. Para satisfacer las exigencias que demanda cada proyecto es necesario recabar información de varios campos como hidrología, topografía, geografía, geología, geotecnia e ingeniería de tránsito, por mencionar algunos de que conforman la parte técnica. Lo que cada área tenga que aportar tendrá repercusiones importantes en las fases posteriores a la planeación.

Dentro de esta última es importante conocer la facilidad o dificultad que presente el material del terreno elegido para desarrollar el proyecto, es decir, atender a su excavabilidad ya que su determinación precisa brinda la disminución de riesgos durante la ejecución de la misma, costos y tiempos más realistas, elección de equipo y maquinaria mejor ajustada a las necesidades de la obra y mayor control en caso de imprevistos.

¹ *Method engineering: engineering of information systems development methods and tools* (p. 1), por S. Brinkkemper, 1996. Países Bajos: Elsevier.

1. Planteamiento del problema

En México, es relativamente fácil encontrar noticias en diferentes medios de comunicación acerca de obras que al concluirse y ser revisadas resultan presentar tiempo y costos sumamente excesivos,² o peor aún, se encuentran aquellos donde la fase de construcción se comenzó sin tener siquiera el proyecto listo,³. La consecuencia es evidente: proyectos que fracasan en el cumplimiento de sus objetivos en términos, (de acuerdo al Método ESCALA descrita en el libro “Administración Profesional de Proyectos”) de tiempo, costo, calidad, satisfacción del cliente y de los involucrados clave así como la formación de relaciones a largo plazo con proveedores e integrantes del equipo.

¿Cómo se puede obtener información más precisa sobre las condiciones del terreno donde se desarrollan la gama de proyectos carreteros para alcanzar las exigencias de los mismos? Por fortuna no soy el primero en plantear esta pregunta y mucho menos en darle respuesta. Si bien, la cuestión política queda fuera del alcance de esta obra, sí compete abordar la problemática desde el ámbito ingenieril mostrando a las áreas de geología, geotecnia y geofísicas como vías para conocer el terreno donde las obras se ejecuten beneficiando así a las fases que prosigan la labor. Tal como se mencionó en la sección anterior, determinar la excavabilidad de los materiales de manera más precisa trae beneficios importantes y de acuerdo a las normas mexicanas para proyecto y construcción de carreteras, emitidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), los responsables de entregar esta información al proyectista son los ingenieros geólogo y geotecnista, por lo que conocer la manera en que proceden en el campo para cumplir su labor es indispensable.

Cabe aclarar que la mayor parte de la documentación acerca del tema se encuentra en inglés por lo que esta obra, aunque para el autor no representó demasiada dificultad su entendimiento, podría ser una barrera importante para aquellos desconocedores de la lengua sajona y con interés en el tema, ya sean colegas de profesión o público curioso con conocimientos básicos de las disciplinas ya mencionadas.

2 “Túnel Emisor Oriente; el costo se triplicó por falta de proyecto”, por Arturo Páramo, 2016, Excelsior.

3 “SCT encareció Paso Express al adjudicarlo sin proyecto: SFP”, por Everardo Martínez e itzel Castañeres, 2017, El Financiero.

1.1. Objetivos

Exponer los diferentes métodos que se han aplicado en otras partes del mundo, como Australia, Sudáfrica o Turquía, donde los resultados obtenidos incluyen diversos ahorros, por lo cual, al aplicarse en proyectos carreteros en México, dichos ahorros se verían reflejados en la construcción: los procedimientos constructivos se ajustarían de forma óptima a las condiciones del terreno con la maquinaria necesaria, y se reduciría el número de situaciones imprevistas por falta de información confiable.

Además, tal como ya se mencionó, al ser el idioma un impedimento para algún interesado en el tema el presente trabajo pretende ser un referente para introducirse en el mismo ya que se parte de conceptos básicos sobre geología, geotecnia y geofísica que, si bien parecen dispersos algunas veces, más tarde se relacionan con la temática principal.

1.2. Justificación

Ya que se carece de investigación robusta en el tema dentro del territorio nacional, éste trabajo se apoya directamente en libros, tesis, artículos, investigaciones, métodos, estándares y recomendaciones hechas en el extranjero. La selección adecuada del método para determinar la excavabilidad de materiales que mejor se adapte a las necesidades del proyecto, se beneficiará en un ahorro importante en términos de costo y tiempo, ya que la selección de la maquinaria cuyas características serán las suficientes para ejecutar eficientemente el trabajo, además de reducir sus costos de mantenimiento. Además, dentro de la vastedad del tema llama la atención que existe muy poca literatura relacionada en lengua española dado que al investigar, la mayor parte del material bibliográfico disponible se encuentra en inglés y una fracción del mismo inclusive, requiere efectuar pagos electrónicos si bien, a pesar de esta limitante, existen referencias indirectas al mismo (por lo que el rigor que exige una investigación se mantiene). Con el presente trabajo ambas problemáticas serán tratadas debidamente durante el desarrollo de este trabajo.

2. Mecánica de rocas

El estudio de los diversos materiales que conforman la Tierra, como las rocas, corresponde a la geología, ciencia de gran interés para la temática principal de este trabajo puesto que sus aportaciones incluyen conocimiento de éstos constituyentes a partir de sus propiedades, tales que permiten una posterior caracterización de acuerdo a diferentes criterios, siendo las físicas y mecánicas aquellas de mayor atención. Sin embargo, cabe iniciar con una distinción importante entre mineral y roca evitando así caer en confusiones o contradicciones.

2.1. Minerales y sus propiedades

Un mineral es un sólido inorgánico de origen natural que posee una estructura química definida que le proporciona un conjunto único de propiedades físicas (Tarbuck y Lutgens, 2005). Para que se considere como mineral a un material terrestre, éste debe cumplir con las siguientes características:

1. Aparecer de forma natural.
2. Ser inorgánico.
3. Ser un sólido.
4. Poseer una estructura interna ordenada, es decir, sus átomos deben estar dispuestos según un modelo definido.
5. Tener una composición química definida, que puede variar dentro de unos límites.



(a)



(b)

Figura 2.1. Ejemplos de: a) forma cristalina (cuarzo); y b) brillo (galena). Fuente: www.geovirtual2.cl

Además está compuesto por una disposición ordenada de átomos químicamente unidos para formar una estructura cristalina concreta. Este empaquetamiento ordenado de los átomos se refleja en los objetos de formas regulares que denominamos cristales. Las principales propiedades que acompañan a los minerales son:

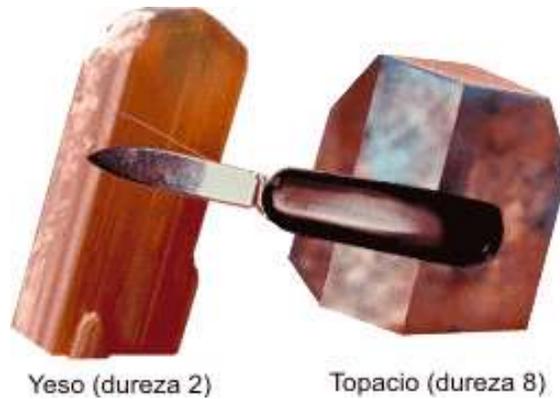
1. *Forma cristalina*: Es la expresión externa de una estructura ordenada internamente del mineral (ver figura 2.1a).
2. *Brillo*: Cantidad de la luz reflejada de la superficie de un mineral (ver figura 2.1b).
3. *Color*: Queda determinado por la capacidad de absorber o reflejar determinadas longitudes de onda de la luz. Esta característica depende de su composición química.
4. *Raya*: El color de un mineral en polvo que se obtiene frotando a través del mineral con una pieza de porcelana no vidriada, denominada *placa de raya*.



Figura 2.2. Raya. a) Ejemplo de varios minerales junto a sus respectivas rayas, y b) Momento justo cuando se genera la raya. Fuente: es.slideshare.net

5. *Dureza*: Medida de la resistencia de un mineral a la abrasión o al rayado. Esta propiedad se determina frotando un mineral de dureza desconocida contra uno de dureza conocida, o viceversa. La forma más común para obtener su valor numérico es utilizar la escala de Mohs, que consiste en diez minerales dispuestos en orden, desde 1 (el más blando) hasta 10 (el más duro) (ver figura 2.3).
6. *Exfoliación*: Tendencia de un mineral a romperse a lo largo de planos con enlaces débiles. No todos los minerales tienen planos definidos con enlaces débiles, pero los

que poseen exfoliación pueden ser identificados por sus superficies lisas y distintivas, que se producen cuando se rompe el mineral.



Yeso (dureza 2) Topacio (dureza 8)
Figura 2.3. Ejemplo de dos muestras con sus respectivas durezas. Fuente: www.clarionweb.es

7. **Fractura:** Los minerales que no exhiben exfoliación cuando se rompen, como el cuarzo, se dice que tienen fractura. Los que se rompen en superficies curvas lisas que recuerdan a vidrios rotos tienen una fractura concoide (ver figura 2.4).

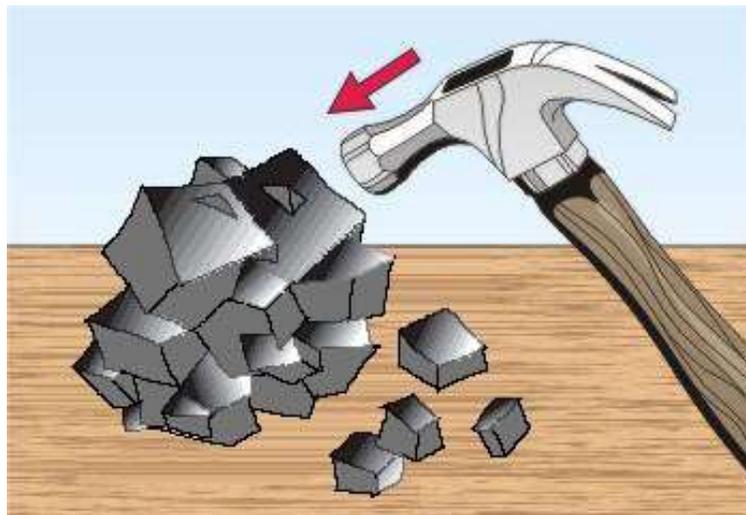


Figura 2.4. Ejemplo de un mineral fracturado. Fuente: www.aula2005.com

Además, un número de propiedades químicas y físicas especiales (sabor, olor, elasticidad, maleabilidad, tacto, magnetismo, birrefracción y reacción química con ácido clorhídrico) son útiles para identificar ciertos minerales. Cada mineral tiene un conjunto específico de propiedades que pueden utilizarse para su identificación.

2.2. Formación y tipos de rocas

Se define como roca al material sólido formado por cristales o granos de al menos un tipo de mineral y que está presente de forma natural en la Tierra. El criterio que se usa para su clasificación está en función de su formación, es decir, depende de los procesos necesarios para llegar a ser una roca con características propias algunas de las cuales son observables a simple vista y que se describen a continuación.

2.2.1. Características generales

Para realizar cualquier tipo de clasificación es necesario considerar ciertas características que permitan agrupar a mayor o menor escala los diferentes tipos de rocas y las que se muestran a continuación suelen ser las más representativas para realizar dicha distinción.

- *Color*: Es un indicador sobre el matiz, tono y opacidad de la roca.
- *Forma*: Se indica con distintos términos. *Acicular* cuando tenga forma de aguja, *laminar* cuando tenga forma de lámina, y *equidimensional* cuando sus tres dimensiones tengan el mismo orden de magnitud. A su vez, esta última descripción puede detallarse aún más al considerar otros 4 casos: *angulosos*, *subangulosos*, *subredondeados* y *redondeados*.
- *Superficie*: Se evalúa que tan lisa o rugosa es su superficie. Va desde *lisa* y *ligeramente lisa* hasta *medianamente rugosa* y *muy rugosa*.
- *Intemperismo o meteorización*: En los casos en que la composición o la estructura de las rocas resulte alterada en la proximidad de la superficie terráquea como consecuencia de la acción de agentes físicos y químicos que intervienen como resultado de los procesos atmosféricos, se dice que la roca ha quedado meteorizada. Los agentes atmosféricos de acción primordial son el aire y el agua. El vocablo meteorización suele emplearse como sinónimo de *alteración*. Los procesos de meteorización se subdividen en aquellos que originan desintegración y aquellos que causan descomposición.
- *Cementación*: Es de gran importancia, principalmente, en rocas clásticas sedimentarias e ígneas piroclásticas ya que se relaciona directamente con aspectos

de porosidad, permeabilidad y estabilidad de macizos rocosos. Se expresa como *nula*, *ligera*, *media* y *alta*, y dependerá de la resistencia que presenta a la separación manual del observador.

- *Composición mineralógica*: Se refiere al tipo, número y porcentaje del total de minerales que componen la roca. Pueden encontrarse monominerálicas (un solo mineral) o poliminerálicas (dos o más minerales).
- *Estructura*: A la serie de rasgos morfológicos, megascópicos de las rocas, debidos a oquedades, deformaciones o discontinuidades se le llama *estructura*. Sobra decir que dependerá en gran medida del origen de la roca.
- *Textura*: Es el arreglo y disposición que existe entre los granos o minerales individuales, con respecto a su orientación, tamaño, forma y grado de cristalización. Las principales variables que influyen en este aspecto son el origen de la roca y las características de los granos por lo que esta información revela datos sobre el ambiente en el que se formó la roca.

2.2.2. Ciclo las rocas

Como ya se ha mencionado anteriormente, el factor más importante para clasificar los diferentes tipos de rocas es el proceso que pasan durante su formación y este puede explicarse a través del ciclo de las rocas, también conocido como *ciclo litológico*, el cual es resultado de los cambios ocurridos sobre los diferentes componentes de las rocas bajo condiciones particulares y por fenómenos que ocurren tanto en la superficie terrestre como debajo de la misma.

En la figura 2.5 se muestra un diagrama que apoya la explicación del ciclo, y para empezar, se tomará como punto de partida al magma que se encuentra en la cámara magmática. Con el tiempo, el magma se cristaliza, es decir, se enfría y se solidifica ya sea en la superficie por producto de una erupción volcánica o debajo de esta. Al producto resultante de este proceso se le llama *roca ígnea*.

Las rocas del primer caso quedarán expuestas ante efectos de descomposición o desintegración, conocidos como meteorización. Los materiales resultantes son transportados ya sea por efectos de la gravedad o por agentes erosivos tales como corrientes de agua o

viento. Una vez que se acumulan suficientes partículas transportadas, llamadas sedimentos, y que son depositadas en océanos, ríos, desiertos, etc., donde los diferentes materiales se *litifican* dando lugar a una roca sedimentaria debido a la compresión que ejercen las capas de material sobre este o por procesos de cementación, gracias al agua infiltrada que aprovecha la porosidad de la roca para acumular minerales. Cabe mencionar que este proceso es lento. Cuando una roca sedimentaria queda enterrada a profundidades donde condiciones de presión o calor son muy altas, esta reaccionará ante los cambios del entorno dando paso al último tipo de rocas, es decir, las metamórficas.

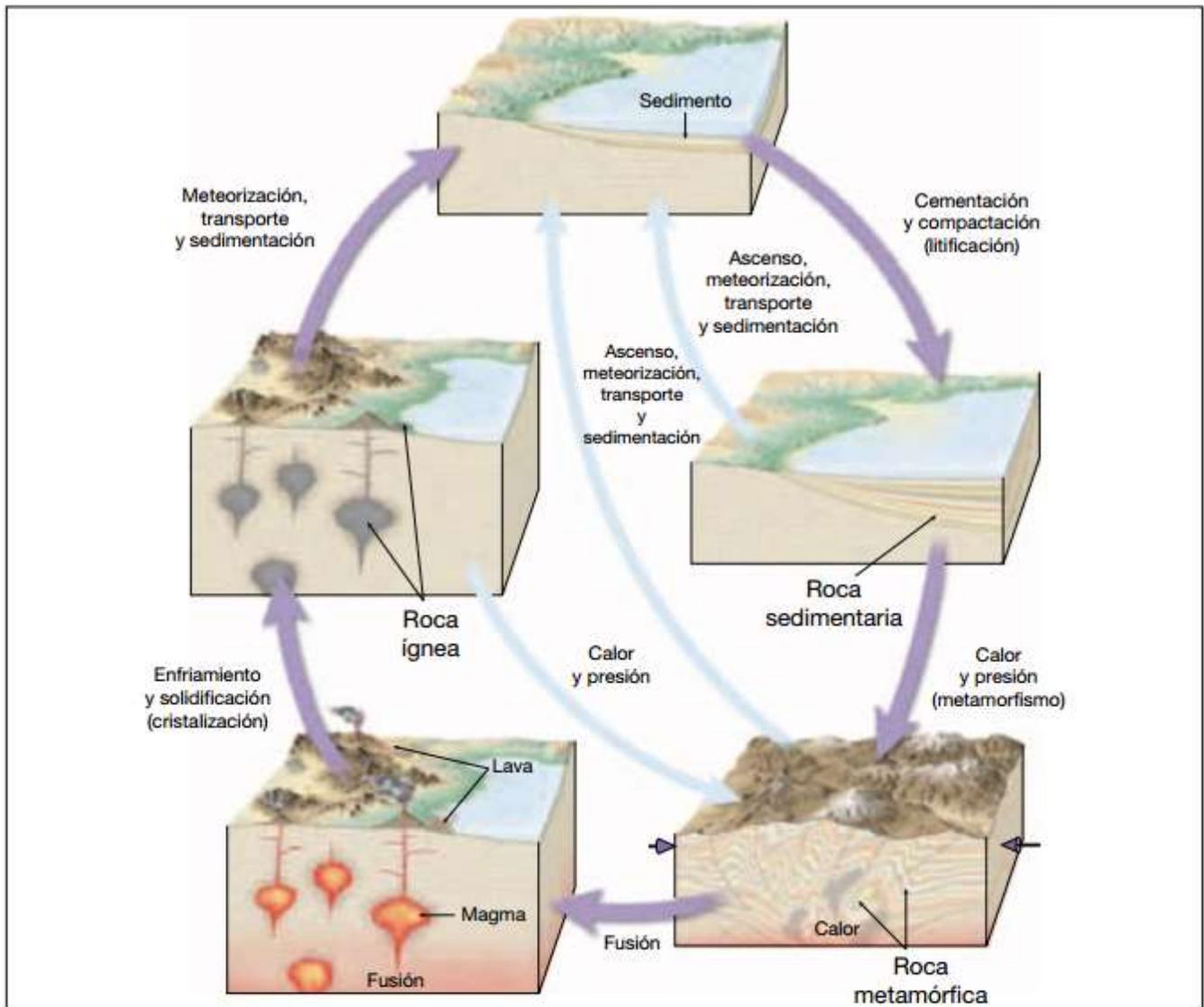


Figura 2.5. Ciclo de formación y transformación de las rocas. Fuente: Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física (Tarbuck y Lutgens, 2005)

2.2.3. Rocas ígneas

Son rocas formadas debido al enfriamiento de magma o lava, ya sea en cámaras magmáticas o cerca de la superficie, por la que emerge y fluye el material caliente. Es preciso hacer una distinción entre los conceptos de lava y magma.

- *Lava*: Porción del magma, que emerge en la superficie terrestre y que entra en contacto ya sea con aire y/o con agua.
- *Magma*: Material fundido debajo de la superficie terrestre que es formado a grandes temperaturas por: silicatos sólidos; sílice, aluminio, potasio y calcio fundidos; vapor de agua, dióxido de carbono y dióxido de azufre.

Hecha la aclaración, lo siguiente es mencionar una subdivisión para diferenciar a las rocas ígneas dependiendo del lugar y la velocidad a la que se enfrían:

- *Intrusivas o plutónicas*: El magma se enfría lento y no alcanza a emerger lo que ocasiona que se formen a gran profundidad.
- *Extrusivas o volcánicas*: La roca fundida en la superficie de la Tierra, debido a la acción volcánica se solidifica rápidamente.

Una característica muy importante es la textura puesto que revela datos sobre el ambiente en el que se formó la roca. Uno de los factores que más influye en ésta es la velocidad a la cual se enfría el magma, ya que el enfriamiento lento promueve el crecimiento de grandes cristales, mientras que el enfriamiento rápido tiende a generar cristales más pequeños.

2.2.4. Rocas sedimentarias

Existen procesos en la superficie terrestre que causan daños a las rocas y desplazan el material desprendido a zonas de menor elevación. Estos procesos son tres:

- *Meteorización*: Fragmentación física (desintegración) y alteración química (descomposición) de las rocas de la superficie terrestre o cerca de ella.
- *Procesos gravitacionales*: Transferencia de roca y suelo, pendiente abajo, por influencia de la gravedad.

- Erosión: Eliminación física de material por agentes dinámicos como el agua, el viento o el hielo.

Los productos de la meteorización mecánica y química constituyen la materia prima para las rocas sedimentarias. La mayor parte del sedimento se deposita de esta manera mientras que los restos meteorizados son barridos constantemente desde el lecho de roca siendo transportados y por fin depositados en lagos, ríos, mares, etc. Dado que, tanto la meteorización del lecho de roca como el transporte y depósito de sus productos de este proceso, son continuos, se encuentran sedimentos en casi cualquier parte del globo.

El enterramiento promueve la *diagénesis*, ya que conforme los sedimentos van siendo enterrados, son sometidos a temperaturas y presiones cada vez más elevadas. La diagénesis incluye la litificación, término que se refiere a los procesos mediante los cuales los sedimentos no consolidados se transforman en rocas sedimentarias sólidas (lithos = piedra; fic = hacer). Los procesos básicos de litificación son compactación y cementación.

Conforme el sedimento se acumula a través del tiempo, el peso del material suprayacente comprime los sedimentos más profundos. Cuanto mayor es la profundidad a la que está enterrado el sedimento, más se compacta y más firme se vuelve. Por otro lado, la cementación es el proceso más importante mediante el cual los sedimentos se convierten en rocas sedimentarias. Es un cambio diagenético químico que implica la precipitación de los minerales entre los granos sedimentarios individuales. Los materiales cementantes son transportados en solución por el agua que se mueve a través de los poros de la roca.

El sedimento tiene dos orígenes principales: en primer lugar, el sedimento puede ser una acumulación de material que se origina, siendo transportado en forma de clastos sólidos derivados de la meteorización mecánica y química, por lo que a depósitos de este tipo se denominan *detríticos*, y a las rocas sedimentarias que estos forman, *rocas sedimentarias detríticas*. La segunda fuente principal de sedimento es el material soluble producido en gran medida mediante meteorización química. Cuando estas sustancias disueltas son precipitadas mediante procesos orgánicos o inorgánicos, el material se conoce como sedimento químico y las rocas formadas a partir de él se denominan rocas sedimentarias químicas.

Se utilizan dos texturas principales para clasificar las rocas sedimentarias: clástica y no clástica. El término clástica procede de una palabra griega que significa «*roto*». Las rocas

que exhiben una textura clástica están formadas por fragmentos discretos y clastos que están cementados y compactados juntos. Todas las rocas detríticas tienen una textura clástica. Algunas rocas sedimentarias químicas tienen una textura no clástica o cristalina en la cual los minerales forman un mosaico de cristales intercrecidos. Los cristales pueden ser microscópicos o suficientemente grandes como para verse a simple vista, sin aumento.

2.2.5. Rocas metamórficas

El metamorfismo es la transformación de un tipo de roca en otro. Las rocas metamórficas se forman a partir de rocas ígneas, sedimentarias o incluso de otras rocas metamórficas. Por tanto, todas las rocas metamórficas tienen una roca madre: la roca a partir de la cual se formaron. Además es un proceso que provoca cambios en la mineralogía, la textura y, a menudo, la composición química de las rocas. El metamorfismo tiene lugar cuando las rocas se someten a un ambiente físico o químico significativamente diferente al de su formación inicial. Se trata de cambios de temperatura y presión (esfuerzo) y la introducción de fluidos químicamente activos. En respuesta a esas nuevas condiciones, las rocas cambian gradualmente hasta alcanzar un estado de equilibrio con el nuevo ambiente.

El metamorfismo suele progresar de manera incremental, desde cambios ligeros (metamorfismo de grado bajo) a cambios notables (metamorfismo de grado alto). En los ambientes metamórficos más extremos, las temperaturas se aproximan a las de fusión de las rocas. Sin embargo, durante el metamorfismo la roca debe permanecer esencialmente en estado sólido, pues si se produce la fusión completa, entraríamos en el ámbito de la actividad ígnea. La mayor parte del metamorfismo ocurre en uno de estos tres ambientes:

1. Cuando una masa magmática intruye en las rocas, tiene lugar el metamorfismo de contacto o térmico. Aquí, el cambio es impulsado por un aumento de la temperatura en el interior de la roca huésped que rodea una intrusión ígnea.
2. El metamorfismo hidrotermal implica alteraciones químicas que se producen conforme el agua caliente rica en iones circula a través de las fracturas de las rocas. Este tipo de metamorfismo suele estar asociado con la actividad ígnea, pues, proporciona el calor necesario para provocar las reacciones químicas y hacer circular estos fluidos a través de la roca.

3. Durante la formación de montañas, grandes volúmenes de rocas están sometidas a presiones dirigidas y a las elevadas temperaturas asociadas.

2.3. Propiedades índices de las rocas

Existen diferentes propiedades no solo para fines de caracterización sino también con el objetivo de conocer su comportamiento. Cabe aclarar que estas propiedades son conocidas de manera estandarizada de acuerdo a organismos como la American Society of Testing and Materials (ASTM).

2.3.1. Propiedades físicas

Densidad natural y seca: La densidad natural es la relación entre la masa de la muestra (incluyendo cierto contenido de humedad) respecto al volumen que esta ocupa.

$$\rho_n = \frac{m_m}{V_m}$$

donde:

ρ_n = Densidad natural de la muestra.

m_m = Masa de la muestra (incluyendo contenido de agua).

V_m = Volumen de la muestra (incluyendo contenido de agua).

Por otro lado se tiene la densidad seca y tal como el nombre sugiere, los conceptos descritos anteriormente son los mismos salvo que las condiciones de su medición estarán dadas en el estado seco de la muestra.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

donde:

ρ_s = Densidad natural de la muestra.

m_s = Masa de la muestra (restando el contenido de agua).

V_s = Volumen de la muestra (restando el contenido de agua).

Peso volumétrico: Se define como la relación del peso del material entre el volumen que este ocupa

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

donde:

γ_m = Peso específico de la muestra.

W_m = Peso de la muestra.

V_m = Volumen de la muestra.

Tal como en el caso de la densidad, también resulta de interés conocer este parámetro bajo la condición seca.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

donde:

γ_s = Peso específico de la muestra seca.

W_s = Peso de la roca seca.

V_s = Volumen de la roca seca.

Contenido de agua: Se define como la relación entre el peso de la masa contenida en la roca y el peso de la roca seca. Además queda expresada como porcentaje.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

donde:

ω = Peso específico de la muestra seca.

W_w = Peso de la roca húmeda.

W_s = Peso de la roca seca.

Relación de vacíos: Es la relación que existe entre el volumen de los vacíos y los sólidos de una roca. También se expresa en porcentaje.

$$e = \frac{V_v}{V_s} * 100$$

donde:

e = Relación de vacíos.

V_v = Volumen de vacíos (la suma del volumen debido al agua y al aire)

V_s = Volumen de la roca seca.

Porosidad: Se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la roca.

$$n = \frac{V_v}{V_m} * 100$$

Un valor alto representa una importante presencia de oquedades, producto de gases o desgaste por parte del agua al interior de la roca. Al contrario, un porcentaje bajo indicaría acciones de esfuerzos por dilatación debidos a cambios térmicos en los minerales y efectos de movimientos tectónicos.

Abrasividad:

Puede definirse como el desgaste de partículas sobre la una superficie, es decir, es un proceso que causa la remoción o desplazamiento de material en una superficie rígida, la cual provocará desgaste, especialmente en herramientas que son aplicadas en la minería, perforación o aplicaciones en túneles. Para evaluar este parámetro, suele emplearse el Índice de Abrasividad CERCHAR (CAI, por sus siglas en inglés) y se encuentran dos diseños de pruebas: el original, propuesto por Valantin (1973), y el modificado, por West (1989).

Según Valantin, durante un segundo y sometida a una carga estática de 7 kg, una punta metálica es desgastada sobre un centímetro sobre la superficie fracturada fresca de la roca. El diámetro resultado del plano abrasado, medido in 1/10 mm, determina dicho índice. Cuando el tamaño de grano de la muestra es menor a un milímetro, bastan cinco veces rayar la superficie para obtener un valor representativo de este parámetro.

Por otro lado, en rocas más rugosas, se requiere una cantidad mayor del proceso descrito. La bondad que ofrece radica en su relación con la composición mineral de rocas naturales y la forma de hacerlo es comparando el patrón de raya de cada muestra con alguno ya conocido. De ahí la precisión y cuidado requeridos al realizar esta prueba.

2.3.2. Propiedades mecánicas

Dureza: Es una característica que depende de los minerales que constituyen a la roca y de la fuerza de sus enlaces. Un valor de dureza alto implica mayor dificultad de extracción

mientras que un valor bajo será indicador de lo contrario. Dicho valor está asociado a una escala propuesta por Mohs (ver tabla 2.1), la cual consiste en rayar la roca con diferentes objetos y observar si queda rastro de la raya.

Elasticidad: Es la propiedad de cualquier material para deformarse ante algún tipo de esfuerzo y recuperar su estado parcial o totalmente cuando dicho esfuerzo deja de aplicarse siendo el efecto observado un cambio en la forma de la roca. Es decir, se establece una relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación provocada en el material, conocida como módulo de elasticidad o de Young (E).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

donde:

E = Módulo de elasticidad.

σ = Esfuerzo axial.

ε = Deformación unitaria.

Otro aspecto importante asociado al tema de elasticidad es la relación o coeficiente de Poisson, que se establece como una relación entre la deformación provocada en la dirección de la fuerza actuante sobre el cuerpo (ε_a) y la deformación perpendicular a la misma (ε_t).

$$\nu = \frac{-\varepsilon_t}{\varepsilon_a}$$

donde:

ν = Relación de Poisson.

ε_t = Deformación unitaria transversal.

ε_a = Deformación unitaria axial o longitudinal.

Sin embargo, en la práctica resulta de mayor interés conocer el modulo de elasticidad de un macizo rocoso y no solo de una roca por lo que existe un método empírico propuesto por Deer (1969) para conocer este valor a partir del valor de RQD (este último será explicado en la siguiente sección).

$$E = (0.0231 * RQD - 1.32) * E_{t150}$$

donde:

E = Módulo de elasticidad, en [Gpa]

RQD = Rock Quality Designation (índice de calidad del macizo rocoso)

E_{t150} = Módulo tangencial al 50% (obtenido en el laboratorio).

Tabla 2.1. Escala de Mohs para medir la dureza de la roca. Fuente: www.wikipedia.com

Dureza	Mineral	Prueba de rayado
1	Talco	Rayado por la uña fácilmente
2	Yeso	Rayado por la uña difícilmente
3	Calcita	Rayado por una pieza de moneda
4	Fluorita	Rayado por un cuchillo de fácilmente
5	Apatito	Rayado por un cuchillo difícilmente
6	Ortosa	Rayado por una lima
7	Cuarzo	Raya un cristal
8	Topacio	Rayado por herramientas con tungsteno
9	Corindón	Rayado por herramientas de carburo de silicio
10	Diamante	Raya a otro diamante

También se puede conocer a partir de los índices RMR y Q , propuestos de forma empírica y que se detallan más adelante.

Resistencia: Se entiende como resistencia a la propiedad de someter la roca ante esfuerzos externos. Los términos que acompañan esta definición son compresión, tensión y cortante, donde cada uno indica la dirección del esfuerzo aplicado, de tal forma que, en el primer y segundo caso, ocurren sobre el eje longitudinal, es decir, de manera axial, con diferencia en el sentido de ambos. Por otro lado, el tercer caso se refiere al esfuerzo que ocurre de manera perpendicular a los otros casos.

La manera más común de conocer la resistencia a la compresión de una roca en laboratorio es mediante el sometimiento de especímenes a pruebas de carga axial o triaxial estandarizadas. El valor de la carga máxima que se le aplica a la muestra y que provoca la falla del mismo es la resistencia a la compresión aunque en el caso de las pruebas triaxiales, la información, que además se obtiene de la sucesión de pruebas, es la envolvente de falla. En la tabla 2.2 se muestran valores obtenidos para algunos tipo de rocas comunes.

Velocidad de onda: Tal como lo mencionan Tarbuck y Lutgens (2005), la velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de la densidad y elasticidad de los diferentes materiales por los que se propagan y, en principio, viajarán más rápido en materiales rígidos, mientras que lo harán de manera más lenta en materiales menos densos.

Tabla 2.2. Valores para algunas de las propiedades índice de varias rocas. Fuente: Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes (Ramírez y Alejano, 2004).

Rocas	Densidad (kg/m ³)	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Porosidad %	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a flexión (MPa)
Rocas batolíticas							
Granito granodiorita	2500 – 2750	30 – 70	0.12 – 0.25	0.1 – 2	120 – 280	4 – 7	10 – 20
Gabro	2920 - 3050	60 - 100	0.12 – 0.25	2.5	150 - 200	5 - 8	10 -22
Rocas extrusivas							
Riolitas	2450 – 2600	10 – 20	0.1 – 0.2	0.4 – 4	80 – 160	5 – 9	10 – 22
Dacita	2500- 2750	8 – 18	0.09 – 0.2	0.5 – 5	80 – 160	3 – 8	9 – 20
Andesita	2300 – 2750	12 – 35	0.11 – 0.2	0.2 – 8	40 – 320	5 – 11	13 – 25
Basaltos	2750 – 3000	20 – 100	0.14 – 0.2	0.2 – 1.5	30 – 420	6 – 12	14 – 26
Diabasa	2900 – 3100	30 – 90	0.12 – 0.2	0.3 – 0.7	120 – 250	6 – 13	12 – 26
Tobas volcánicas	1300 - 2200	-----	0.1 – 0.2	8 - 35	5 - 60	0.5 – 4.5	3 - 8
Rocas sedimentarias							
Arenisca	2100 – 2500	15 – 17	0.07 – 0.12	1 – 8	10 – 120	1.5 – 6	4 – 16
Caliza de grano fino	2600 – 2850	50 – 80	0.1 – 0.2	0.1 – 0.8	50 – 200	4 – 7	5 – 15
Caliza de grano grueso	1550 - 2300	-----	0.12	2 – 16	4 – 60	1 – 3.5	2.5 – 7
Caliza	1550 – 2500	-----	0.07 – 0.12	1.5 – 6	49 – 200	1.5 – 5	3 – 9
Dolomita	2200 – 2700	20 – 30	0.08 – 0.2	0.2 – 4	15 – 200	2.5 – 6	4 – 16
Esquistos	2450 - 2750	-----	-----	0.2 – 0.4	-----	-----	20 - 30
Rocas metamórficas							
Mármol	2650 – 2750	60 – 90	0.11 – 0.2	0.1 – 0.5	50 – 180	5. - 8	8 – 12
Gneis	2600 - 2780	25 - 60	0.09 – 0.2	1 - 5	80 - 250	4- 7	8 - 20

Existen dos tipos de ondas sísmicas: las ondas primarias o de compresión, *P*, que vibran hacia adelante y atrás en el mismo plano que su dirección de movimiento y viajan más deprisa; las ondas de cizalla, *S*, que vibran en ángulo recto respecto a la dirección de propagación y viajan más despacio. Para conocer la velocidad de propagación de las ondas *P* de forma aproximada, en sólidos, es posible usar la siguiente ecuación:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}$$

donde

E = Modulo de elasticidad de la roca.

ν = Relación de Poisson de la roca.

ρ = Densidad de la roca.

2.4. Macizos rocosos y formas de clasificarlos

Se define como macizo a la forma en la que se encuentran las rocas en el medio natural, presentando una estructura afectada por las diferentes discontinuidades que se formaron desde su origen,⁴. Cabe mencionar que un macizo rocoso es discontinuo, heterogéneo, anisotrópico e inelástico. Si bien, clasificar a los macizos rocosos es una tarea sumamente compleja por la diversidad con la que estos se encuentran, existen criterios que facilitan su clasificación basándose en propiedades compartidas entre sí y que en las próximas secciones se exponen.

2.4.1. Clasificación RQD

Deere propuso en 1967 un sistema de clasificación a partir de un único indicador llamado Rock Quality Designation (*RQD*, por sus siglas en inglés). Este indicador se obtiene como porcentaje de la suma de las longitudes de fragmentos de roca mayores a 10 cm en su mayor dimensión provenientes de los sondeos de exploración y muestreo entre la longitud del avance del muestreador al ir perforando. Aunque se desarrollaron métodos más confiables posteriormente a esta propuesta, dicho valor es recurrente para conocer el grado de facturación del macizo y diversos métodos que definen índices de excavabilidad. De acuerdo a este valor, se puede corresponder al macizo con 5 grupos distintos de calidad (ver tabla 2.3).

$$RQD = \frac{\sum \text{Longitud de fragmentos mayores a 10 cm}}{\text{Longitud total perforada}} * 100$$

Sin embargo, hay ocasiones donde el índice RQD puede ser estimado mediante una fórmula empírica debido principalmente a la carencia de sondeos. En el caso de J_v , se cuenta con un sistema de valoración propio para fines descriptivos en la tabla 2.4.

⁴ *Procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos*, por N. Hernández, 2015, Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico.

$$RQD = 115 - 3.3 * J_v$$

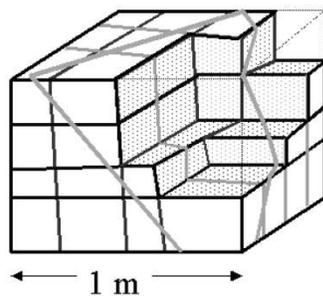
donde:

RQD = Índice de calidad de la roca.

J_v = Número de juntas por metro cúbico en un macizo rocoso (ver figura 2.6).

Tabla 2.3. Índice de calidad RQD, propuesto por Deere. Incluye valoración para su aplicación en el sistema RMR. Fuente: El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas (Universidad Politécnica de Cataluña).

Índice de Calidad RQD (%)	Calidad	Valoración RMR
0 - 25	Muy mala	3
25 - 50	Mala	8
50 - 75	Regular	13
75 - 90	Buena	17
90 - 100	Excelente	20



$$J_v = 3 + 3 + 3 + 1 = 10$$

Figura 2.6. Ejemplo del número de juntas que intersectan un metro cúbico de un macizo rocoso. Fuente: Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de taludes (Ramírez y Alejano, 2004)

Tabla 2.4. Clasificación del tamaño de bloque en función del número de juntas. Los términos descriptivos de la tabla dan una idea del tamaño del bloque en función de J_v . Fuente: Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes (Ramírez y Alejano, 2004).

Tamaño de bloque	Valor de J_v
Muy grande	< 1
Grande	1 - 3
Medio	3 - 10
Pequeño	10 - 30
Muy pequeño	> 30

2.4.2. Sistema RMR de Bieniawski

En 1973, Bieniawski propuso un sistema de clasificación contemplando parámetros como el *RQD* o características típicas de discontinuidades, y de manera similar a su contemporáneo, el sistema RSR, se plantea la evaluación de 8 aspectos diferentes mediante rangos y porcentajes dando lugar a un indicador llamado Rock Mass Rating (*RMR*, por sus siglas en inglés) pero no fue sino hasta 1989 que el autor refinó lo suficiente su trabajo y que es del cual se expone a continuación. En este sistema para clasificar al macizo rocoso se recurre al índice *RMR*, dependiente de 6 parámetros con sus respectivas subdivisiones, retomando así el tema de los rangos y valoraciones,⁵ (ver tabla 2.5).

Tabla 2.5. Clasificación de parámetros y sus valoraciones. Fuente: Traducción de *Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reef ton (Clark, 1996)*.

Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia de roca intacta	Resistencia a la carga puntual (Is(50), MPa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para este rango bajo, la prueba de compresión uniaxial es preferible		
		Resistencia a la compresión uniaxial (RCU, MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
	Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	Índice de Calidad RQD (%)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25			
	Valoración	20	17	13	8	3			
3	Espacio entre discontinuidades	> 2 m	0.6 – 2 m	200 – 600 mm	60 – 200 mm	< 60 mm			
	Valoración	20	15	10	8	5			
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas Sin separación Paredes de roca inalteradas No continua	Superficie ligeramente rugosa Separación < 1 mm Paredes ligeramente alteradas	Superficie ligeramente rugosa Separación < 1 mm Paredes altamente alteradas	Superficie lisa o Cavidades < 5mm de espesor o Separación 1 – 5 mm Continua	Cavidades suaves > 5 mm de espesor o Separación > 5 mm Continua			
		Valoración	30	25	20	10	0		
5	Presencia de agua	Flujo por cada 10 m de longitud del túnel (l/min)	Ninguna	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Relación entre presión hidrostática en la junta y esfuerzo principal mayor.	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5		
		Condiciones generales	Completamente seca	Ligeramente húmeda	Húmeda	Goteo	Flujo		
	Valoración	15	10	7	4	0			

⁵ *Cimentaciones en roca* (p. 32), por M. Gallardo, 2013, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

En el caso de la resistencia del material, puede conocerse mediante pruebas de compresión uniaxial o de carga puntual, aunque, al igual que el índice *RQD* y el espacio entre discontinuidades, resulta útil el empleo de gráfica mostradas en las figuras 2.6 a 2.8. Estas últimas incluyen fórmulas consideradas confiables, dadas las excelentes correlaciones, pero, cabe aclarar, no fueron propuestas originalmente por Bieniawski. Una relación especial existe entre el índice *RQD* y el espacio entre discontinuidades, pues, si alguno de estos se muestra poco confiable, la figura 2.9 establece una correlación para conocer el dato dudoso o ausente. Por otro lado, las condiciones de las discontinuidades pueden ser definidas con ayuda de la tabla 2.6, cuya descripción está basada en recomendaciones de la ISRM (1981).

Cabe destacar que este sistema define un factor de ajuste dada la orientación de las discontinuidades (ver tabla 2.10), que corresponde de manera análoga con rangos de valoración (ver tabla 2.7). Una vez ajustado el índice *RMR*, solo queda ubicarlo dentro de alguno de los rangos mostrados en la tabla 2.8 y asignándolo en una de las cinco categorías. Por último, una de las bondades que ofrece este indicador es la aproximación a otros parámetros (ver tabla 2.9) especialmente útil para temas de estabilidad de taludes pero esto queda fuera del alcance de este trabajo.

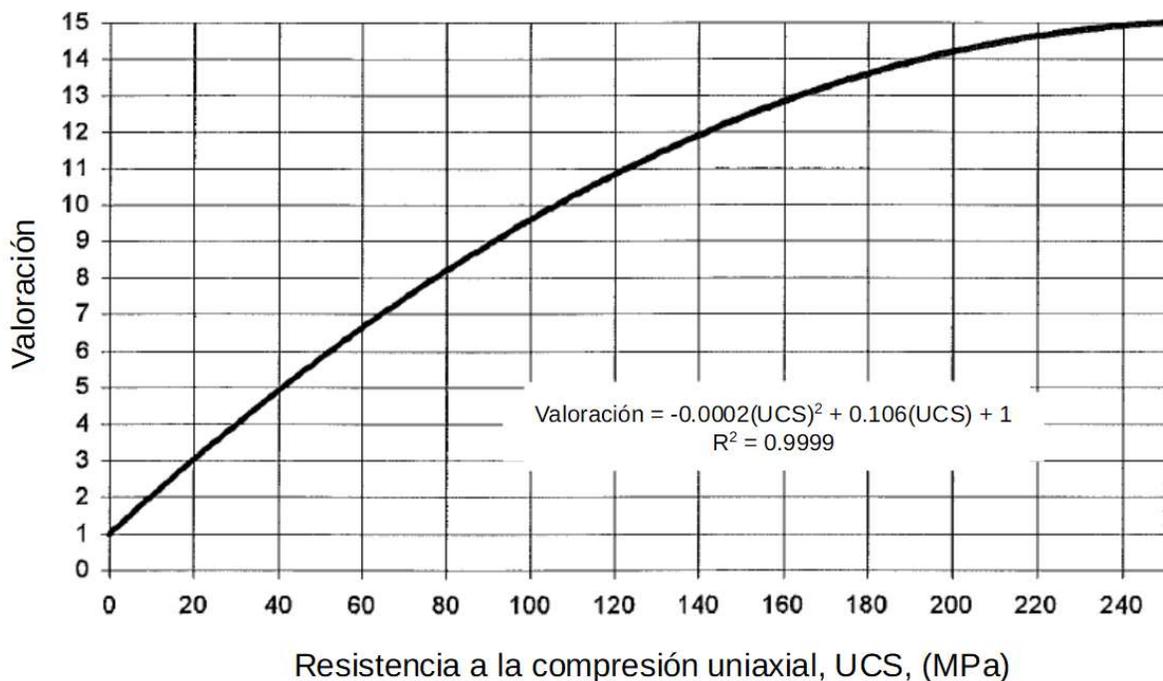


Figura 2.6. Valoración para la resistencia de la roca (Bieniawski, 1989). Fuente: Traducción de *Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reefion* (Clark, 1996).

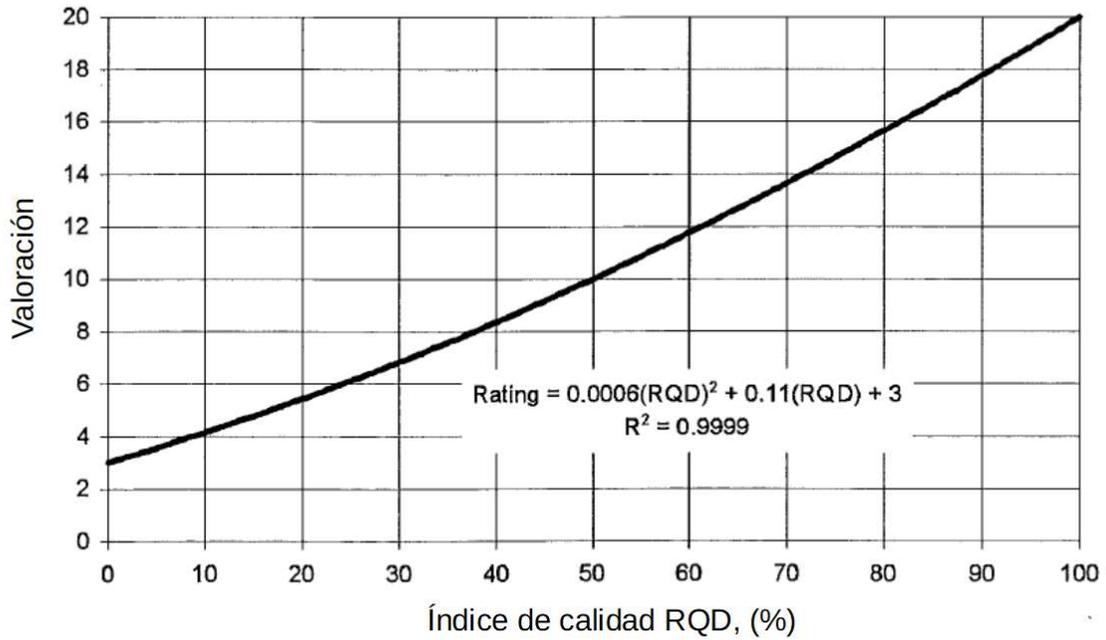


Figura 2.7. Valoración para el índice RQD (Bieniawski, 1989). Fuente: Traducción de Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reefton (Clark, 1996).

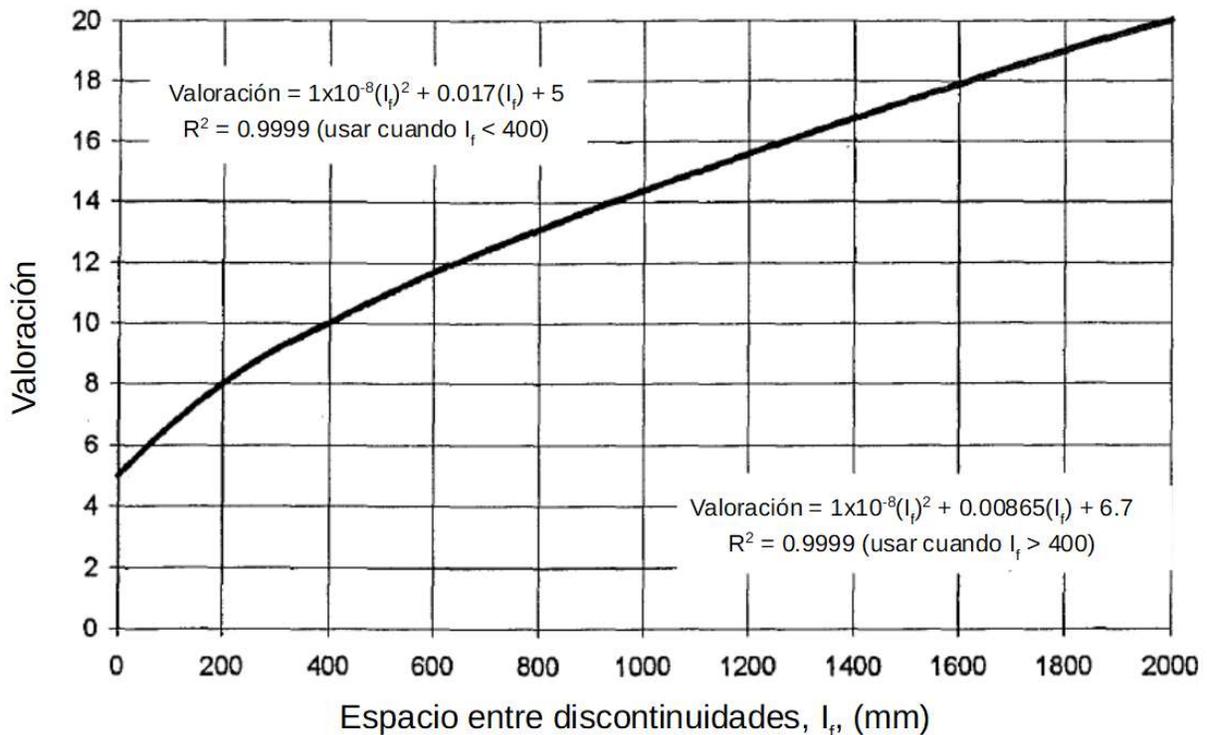


Figura 2.8. Valoración para el espaciamiento de las discontinuidades (Bieniawski, 1989). Fuente: Traducción de Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reefton (Clark, 1996).

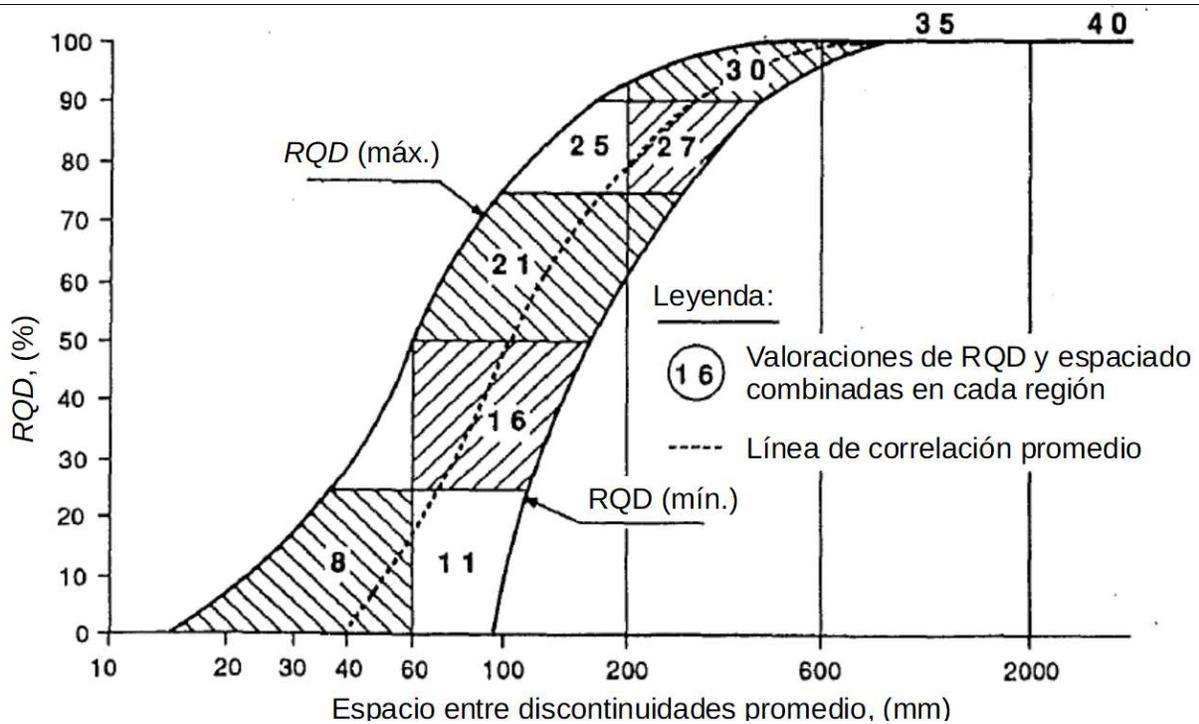


Figura 2.9. Correlación entre RQD y el espacio entre discontinuidades (Bieniawski, 1989). Fuente: Traducción de Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reef ton (Clark, 1996).

Tabla 2.6. Clasificación de valoración para la condición de discontinuidades. Fuente: Traducción de Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reef ton (Clark, 1996).

Parámetro	Rango de valores				
Longitud (persistencia/continuidad)	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Valoración	6	4	3	1	0
Separación (apertura)	Ninguno	< 0.1 mm	0.1 – 1 mm	1 – 5 -mm	> 5 mm
Valoración	6	5	3	1	0
Rugosidad	Muy rugoso	Rugoso	Ligeramente rugoso	Lisa	Plano de falla
Valoración	6	5	3	2	0
Relleno	Duro			Blando	
	Ninguno	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
Valoración	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Altamente alterada	Extremadamente alterada
Valoración	6	5	3	1	0

Tabla 2.7. Ajuste de valoración para la orientación de discontinuidades. Fuente: Traducción de Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reefton (Clark, 1996).

Orientación del rumbo y buzamiento en discontinuidades		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable
Valoración	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 2.8. Clases de macizos rocosos determinados a partir de la valoración total. Fuente: Traducción de Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reefton (Clark, 1996).

Valoración	81 – 100	61 – 80	41 – 60	21 – 40	< 20
Número de clase	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy bueno	Bueno	Medio	Pobre	Muy pobre

Tabla 2.9. Relaciones de las clases de macizos rocosos. Fuente: Traducción de Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reefton (Clark, 1996).

Número de clase	I	II	III	IV	V
Tiempo promedio estando de pie	20 año para un espacio de 15 m	1 año para un espacio de 10 m	1 semana para un espacio de 5 m	10 horas para un espacio de 2.5 m	30 minutos para un espacio de 1 m
Cohesión del macizo rocoso	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Ángulo de fricción del macizo rocoso	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

2.4.3. Sistema Q de Barton

Desarrollado por Barton, Lien y Lunde en 1974, este sistema se basa en la evaluación numérica de seis parámetros que definen el índice Q con fines de clasificación, aunque fue pensado inicialmente para proyectos de túneles su aplicación para otros fines ha entregado resultados más que aceptables,⁶. Se muestra la fórmula para obtener Q a continuación:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) * \left(\frac{J_r}{J_a} \right) * \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

6 El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas, (p. 25), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.

donde:

Q = Índice de calidad de la roca, propuesto por Barton.

RQD = Índice de calidad, propuesto por Deere.

J_n = Índice por grupos de juntas.

J_r = Índice de rugosidad, relleno y continuidad de las discontinuidades.

J_a = Índice por alteración de las juntas.

J_w = Coeficiente reductor por la presencia de agua.

SRF = Factor de Reducción de Esfuerzo.

Tabla 2.10. Evaluación de la orientación de la discontinuidad para uso en aplicaciones de túneles, minería y arado. Las valoraciones para cada clase puede ser encontrada en la tabla 2.8. Fuente: Traducción de Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reef ton (Clark, 1996).

Aplicaciones en túneles y minería			
Orientación del rumbo	Buzamiento		
	< 20°	20 - 45°	45 - 90°
Perpendicular al eje del túnel: conducido con buzamiento	Medio	Favorable	Muy favorable
Valoración	-5	-2	0
Perpendicular al eje del túnel: conducido contra buzamiento	Medio	Desfavorable	Medio
Valoración	-5	-10	-5
Paralelo al eje del túnel	Medio	Medio	Muy desfavorable
Valoración	-5	-5	-12
Aplicaciones en arado			
Orientación del rumbo	Buzamiento		
	< 20°	20 - 45°	45 - 90°
Perpendicular al eje del túnel: conducido con buzamiento	Desfavorable	Favorable	Muy favorable
Valoración	-2	-10	-12
Perpendicular al eje del túnel: conducido contra buzamiento	Desfavorable	Desfavorable	Medio
Valoración	-2	-2	-5
Paralelo al eje del túnel	Desfavorable	Medio	Muy desfavorable
Valoración	-2	-5	0

El método detalla el uso de los parámetros J_r y J_a para los grupos de juntas más desfavorables por lo que calidad y orientación juegan un papel fundamental. A continuación se muestran las tablas (de 2.11 a 2.16) para obtener los diferentes valores de cada parámetro mostrado. Una vez obtenido el valor Q y conocida la profundidad de la excavación, el siguiente paso es consultar la figura 2.10 para caracterizar dicha excavación. De manera resumida, se encuentran las ya mencionadas categorías en la tabla 2.17.

Tabla 2.11. Índice de calidad, RQD. Fuente: Traducción de Rock Quality Designation (RQD) after twenty years (Deere, 1989)

Descripción de la calidad	RQD, [%]
Muy mala	0 – 25
Mala	25 – 50
Media	50 – 75
Buena	75 – 90
Excelente	90 – 100

Notas: (1) Cuando se obtienen valores de RQD inferiores a 10 (incluyendo 0), se toma un valor nominal de 10 para calcular el índice Q.

(2) Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.

Tabla 2.12. Número de grupos de juntas, J_n . Fuente: Clasificaciones geomecánica de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown y Romana (Belandria y Bongiorno, 2012).

Descripción	J_n
Roca masiva	0-5 – 1
Un grupo de diaclasas	2
Un grupo y algunas juntas ocasionales	3
Dos grupos	4
Dos grupos y algunas juntas	6
Tres grupos	9
Tres grupos y algunas juntas	12
Cuatro o más grupos, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15
Roca triturada terrosa	20

Notas: En boquillas de túneles, $J_n = 2$

En intersecciones de túneles, $J_n = 3$

Tabla 2.13. Índice de rugosidad, J_r . Fuente: Clasificaciones geomecánica de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown y Romana (Belandria y Bongiorno, 2012).

Contacto entre las dos caras de la junta mediante un desplazamiento cortante de menos de 10 cm (1)	J_r
A. Juntas discontinuas	4
B. Rugosa o irregular, ondulada	3
C. Suave, ondulada	2
D. Lisa, ondulada	1.5
E. Rugosa o irregular, plana	1.5
F. Suave, plana	1.0
G. Lisa, plana	0.5
Sin contacto entre las caras de la discontinuidad ante desplazamiento lateral o por cortante (2), (3)	J_r
H. Zona que contiene minerales arcillosos, suficientemente gruesa para prevenir el contacto entre las caras de la junta	1.0
J. Arenas, gravilla o zona gruesa impactada suficiente para prevenir el contacto entre las caras.	1.0

Notas: (1) La descripción se refiere a características desde escala pequeña hasta intermedia.

(2) Si el espaciado principal del grupo de junta predominante es mayor que 3 m, agregar 1.0

(3) Para juntas tanto planas como lisas, si estas fueron resultado de lineaciones y se encuentran orientadas de acuerdo a dirección de resistencia mínima, $J_r = 0.5$.

Tabla 2.14. Índice de alteración de las juntas, J_a . Fuente: Clasificaciones geomecánica de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown y Romana (Belandria y Bongiorno, 2012).

Contacto entre las dos caras de la junta	J_a	φ_r
A. Junta sellada, dura, sin reblandecimiento, impermeable, por ejemplo cuarzo, paredes sanas	0.75	
B. Caras de la junta ligeramente manchadas	1	25 – 30
C. Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecidos, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	2	25 – 30
D. Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecida.	3	20 – 25
E. Recubrimientos de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, por ejemplo caolinita, mica, clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 ó 2 mm.	4	8 - 16
Contacto entre las dos caras de la junta con menos de 10 cm de espesor	J_a	φ_r
F. Partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	4	25 – 30
G. Rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos, fuertemente sobreconsolidados. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor	6	16 – 24
H. Sobreconsolidación de media a baja, reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos con menos de 5 mm de espesor.	8	12 – 16
J. Rellenos de arcillas expansivas, por ejemplo, montmorillonita, de espesor continuo de 5 mm. El valor J_a depende del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva.	8 - 12	6 - 12
Sin contacto entre las dos caras de la junta cuando ésta ha sufrido un desplazamiento por cortante (rellenos de minerales de gran espesor)	J_a	φ_r
K, L, M. Zonas o bandas de roca desintegrada, o roca triturada, y arcillas (ver clases G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas).	6 – 24	6, 8 u 8 - 12
N. Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fracción de arcilla, sin reblandecimiento.	-	5
O, P, R. Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clase G, H y J, para la descripción de las condiciones de la arcilla)	6 – 24	10, 13 ó 13 - 20

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

Tabla 2.15. Coeficiente reductor por la presencia de agua, J_w . Fuente: Clasificaciones geomecánica de los macizos rocosos según: Bieniaski, Barton, Hoek y Brown y Romana (Belandria N. y Bongiorno F., 2012).

Descripción	J_w	Presión de agua aprox. [kg/cm ²]
A. Excavaciones secas o de afluencia poco importante, por ejemplo menos de 5 l/min localmente.	1	< 1
B. Afluencia o presiones medias, lavado ocasional de los rellenos de las juntas	0.66	1 – 2.5
C. Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin rellenos.	0.5	2.5 – 10
D. Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las juntas.	0.33*	2.5 – 10
E. Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar voladuras, decayendo con el tiempo.	0.1 – 0.2	> 10
F. Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable.	0.05 – 0.1	>10

Notas: (1) Clases C a F son solo estimaciones. Para mediciones instaladas de drenaje, incrementar J_w .

(2) Problemas especiales causados por formaciones de hielo no están considerados.

Tabla 2.16. Factor de reducción de esfuerzo, SRF. Fuente: Clasificaciones geomecánica de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown y Romana (Belandria y Bongiorno, 2012).

a. Las zonas débiles intersecan a la excavación, las cuales pueden causar desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando (1)			SRF	
A. Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor.			10	
B. Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente. Profundidad de excavación < 50 m.			5	
C. Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente. Profundidad de excavación > 50 m.			2.5	
D. Varias zonas de fractura en roca competente libre de arcilla, roca suelta alrededor. Cualquier profundidad.			7.5	
E. Sólo una zona fracturada en roca competente, libre de arcilla. Profundidad de excavación <50 m.			5	
F. Sólo una zona fracturada en roca competente, libre de arcilla. Profundidad > 50 m.			2.5	
G. Diaclasas abiertas sueltas, muy fracturadas. Cualquier profundidad.			5	
b. Rocas competentes, problemas tensionales en rocas (2)(3)		σ_d/σ_1	σ_d/σ_1	SRF
H. Tensiones pequeñas cerca de la superficie, juntas abiertas.	> 200	> 13	2.5	
I. Tensiones medias, condiciones tensionales favorables.	200 – 10	13 – 0.33	1	
J. Tensiones altas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de muros.	10 – 5	0.66 - 0.33	0.5 – 2	
K. Explosión de roca moderada (masizo rocoso).	5 – 2.5	0.33– 16	5 – 10	
L. Explosión de roca fuerte (macizo rocoso).	< 2.5	< 0.16	10 - 20	
c. Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostática				
M. Presión de flujo suave.		1 – 5	5 – 10	
N. Presión de flujo intensa.		> 5	10 - 20	
d. Rocas expansivas, actividad expansiva química dependiendo de la presencia del agua				
O. Presión expansiva suave.			5 – 10	
P. Presión de expansiva intensa.			10 - 15	

(1) Si en zonas de cortante predominante únicamente afecta pero no interseca la excavación, reducir SRF entre 25 y 50%.

(2) Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisotrópicos: Cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, se disminuye el valor de σ_c y σ_t hasta $0.8\sigma_c$ y $0.8\sigma_t$. Cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, se tomará en vez de σ_c el valor $0.5\sigma_c$. Donde σ_c es la resistencia a compresión simple; σ_1 y σ_3 son las tensiones principales mayor y menor, respectivamente, y σ_t es la tensión tangencial máxima. (estimada a partir de la teoría de la elasticidad).

- (3) En aquellos casos en que los que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación, se sugiere aumentar el valor del factor *SRF* entre 2,5 y 5 unidades (véase clase H)
- (4) Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades: $H > 350 \cdot Q^{1/3}$ (Singh et al., 1992). La resistencia a compresión del macizo rocoso puede estimarse mediante la expresión: $q(\text{Mpa}) = 7 \cdot Q^{1/3}$, donde q es la densidad de la roca en g/cm^3 (Singh, 1993).

Tabla 2.17. Clasificación del sistema Q de Barton. Fuente: Clasificaciones geomecánica de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown y Romana (Belandria y Bongiorno, 2012).

Descripción del macizo	Valor de Q
Excepcionalmente malo	0.001 – 0.01
Extremadamente malo	0.01 – 0.1
Muy malo	0.1 – 1
Malo	1 – 4
Medio	4 – 10
Bueno	10 – 40
Muy bueno	40 – 100
Extremadamente bueno	100 – 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000

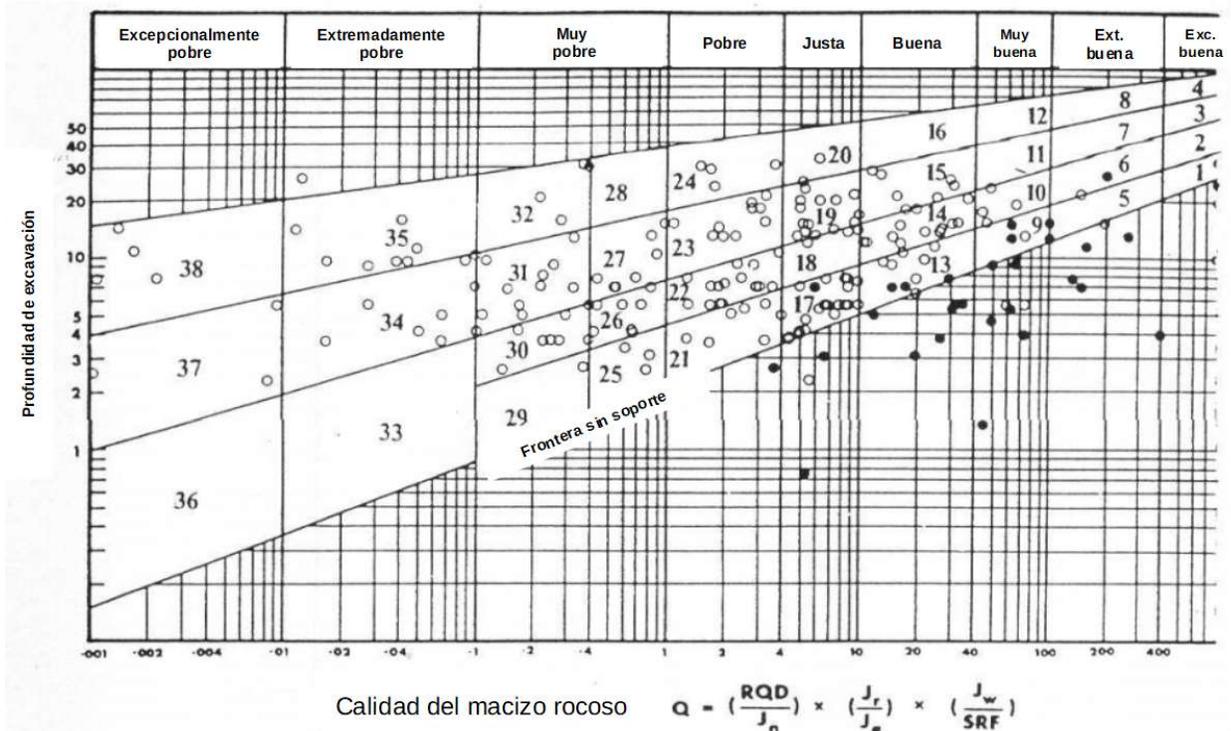


Figura 2.10. Gráfica de clasificación para el sistema Q de Barton. Fuente: El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas (Universidad Politécnica de Cataluña).

2.5. Discontinuidades

Tal como se mencionó en la definición de macizo rocoso, su comportamiento está influido directamente por las características de las discontinuidades que este presenta. Sin embargo, es necesario aclarar algunos términos encontrados en la literatura especializada.

Las discontinuidades, también llamadas estructuras geológicas, son planos de debilidad a lo largo de los cuales la roca tiene baja o nula resistencia a la tensión. Los planos a los que se refiere pueden ser identificados como fallas, juntas, diaclasas, crucero, foliación, esquistosidad, vetas, planos de estratificación y discordancias.

Para describir las diferentes discontinuidades hay que considerar los siguientes aspectos:

- *Orientación*: Lugar de la discontinuidad en el espacio descrita por el rumbo y echado de la línea máxima de inclinación en el plano de discontinuidad.
- *Espaciamiento*: Distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes, es decir, la distancia entre una y otra discontinuidad.
- *Persistencia*: Longitud de la traza de la discontinuidad como se observa en un afloramiento.
- *Rugosidad*: Se refiere tanto a la rugosidad como a la ondulación inherente al plano principal de una discontinuidad. La rugosidad estará influenciada por la textura, tamaño de los granos o minerales y el grado de alteración de algunos minerales.
- *Resistencia de las paredes*: Equivale a la resistencia por compresión de las paredes en rocas adyacentes de una discontinuidad. Puede ser menor que la resistencia del bloque de roca debido al intemperismo o alteración de las paredes.
- *Abertura*: Es la distancia perpendicular entre las paredes de roca adyacentes de una discontinuidad, en la cual el espacio intermedio está relleno de aire o agua.
- *Relleno*: Es el material que separa las paredes de roca, adyacentes a una discontinuidad, que ocupa el espacio existente entre los espacios la misma, usualmente más débil que la roca madre.

- *Filtraciones*: Flujos de agua y humedad visible en las discontinuidades indivisibles o en las masas rocosas conjunto.
- *Número de grupos*: El número de grupos de fracturas o juntas abarca los sistemas de fracturas que se intersecan.
- *Tamaño de bloques*: Las dimensiones de los bloques de roca son resultado de la orientación de los sistemas de fracturas que se intersecan.

Juntas

Es un movimiento a lo largo del cual no se aprecia que haya ocurrido un movimiento paralelo al plano de discontinuidad. Se originan principalmente por esfuerzos tectónicos pero también por procesos magnéticos durante el enfriamiento de las rocas ígneas y por contracción-expansión de las capas más superficiales durante la erosión.

Diaclasas

Planos divisorios o superficies que dividen las rocas, y a lo largo de los cuales no hubo movimiento visible paralelo al plano o superficie. Aunque la mayoría de las diaclasas son planas, algunas son superficies curvas. Las diaclasas pueden tener cualquier posición; algunas son verticales, otras horizontales, y muchas están inclinadas en ángulos visibles. El rumbo y la inclinación (o buzamiento) de las diaclasas se miden de la misma manera que en la estratificación. Se genera principalmente por esfuerzos tensionales y de cizalla en respuesta a movimientos mayores de la corteza terrestre aunque también el intemperismo puede ser un factor importante cuando se encuentran en la superficie. Cabe mencionar que suelen aparecer en grupo o conjunto de manera adyacente, compartiendo similar geometría. Cuando aparecen dos o más juegos de diaclasas presentes en un afloramiento o cartografiadas en un mapa entonces se le llama sistema de diaclasas dentro de los que destacan los ortogonales, irregulares, conjugados, y sigmoidales.

Fallas

Las fallas son rupturas a lo largo de las cuales las paredes opuestas se han movido la una con relación a la otra. La característica esencial es el movimiento diferencial paralelo a la superficie de la fractura. Algunas fallas tienen sólo unos pocos centímetros de largo y el desplazamiento total se mide en fracciones de centímetro. En el otro extremo hay fallas que

tienen centenares de kilómetros de longitud y cuyo desplazamiento mide kilómetros, o aún decenas de kilómetros. El rumbo y buzamiento se miden de la misma manera que en la estratificación o en las diaclasas. Aunque muchas fallas son bien definidas, en múltiples casos el desplazamiento no está confinado a una fractura única sino que está distribuido a través de una zona de falla que puede tener centenares o miles de metros de espesor.

Pliegues

Son ondulaciones del terreno formadas por el movimiento de rocas sometidas a presiones laterales, que se producen a causa de fuerzas tectónicas las cuales causan esfuerzos de compresión. Se presentan generalmente en rocas sedimentarias o metamórficas en el caso de las rocas ígneas, este fenómeno solo ocurre cuando el enfriamiento del magma ocurre en un estado viscoso ondulatorio por lo que no es muy común.

Por último, para hacer cualquier tipo de evaluación dependiente de las condiciones del terreno, es necesario conocer las propiedades específicas de cada roca presente en el lugar del proyecto. Con la ayuda de estudios geológicos, conocer estas características se vuelve una tarea relativamente sencilla. Sin embargo, en la naturaleza difícilmente se encuentran estos materiales de forma aislada y en proporciones reducidas, por lo que, en conclusión, estudiar a los macizos rocosos así como la interacción entre sus propiedades a pequeña y gran escala, constituye la base para, posteriormente, evaluar de forma más precisa su excavabilidad.

3. Mecánica de suelos

Las propiedades de rocas y macizos rocoso son relevantes para determinar la excavabilidad pero sería un error considerar que el terreno presente únicamente por lo que hablar de suelo complementaría el entendimiento y la posterior evaluación sería aún más precisa. Es por ello que se incluye este capítulo, donde se describen las propiedades fundamentales para llevar a cabo una pertinente descripción y clasificación.

3.1. Formación y tipos de suelo

Para empezar, *suelo* se define como un agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios entre las partículas sólidas. El suelo se puede usar como material de relleno, construcción o recubrimiento en diversas estructuras que se ven cotidianamente, ya sea en forma de edificios, presas, carreteras, etc.⁷. Por *desintegración mecánica*, entiéndase la intemperización de las rocas debido a agentes físicos, tales como cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas, efectos de organismos, plantas, etc. Por los fenómenos descritos, las rocas llegan a formar arenas o cuando mucho, limos, y sólo en casos especiales arcillas.

Por *descomposición química*, se entiende la acción de agentes que atacan las rocas modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es, desde luego, el agua, cuyos mecanismos de ataque más importantes son la oxidación, la hidratación y la carbonatación. Los efectos químicos de la vegetación juegan un papel no despreciable. Estos mecanismos generalmente producen arcillas como último producto de descomposición. Los suelos deben, pues, su origen a una tal variedad de causas que excede todo poder de descripción detallada. El resultado de ese curso de causas, es una inmensa diversidad de



Figura 3.1. Ejemplo de tamiz empleado para realizar la clasificación granulométrica de los suelos. Fuente: www.macopmine.com

⁷ *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, (p.1), por B. M. Das, 2001, México: Cengage Learning.

suelos. También debe notarse que su formación ha ocurrido a través de las *eras geológicas*, tal como sigue ocurriendo hoy; en consecuencia, el hombre es completamente ajeno a la génesis del suelo; sólo le toca manejarlo, tal como la naturaleza se lo presenta.

Los productos del ataque de los agentes de intemperismo pueden quedar en el lugar, directamente sobre la roca de la cual se derivan, dando así origen a suelos llamados residuales. Pero sus productos pueden ser removidos del lugar de formación, por los mismos agentes geológicos y redepositados en otra zona. Así se generan suelos que descansan sobre otros estratos sin relación directa con ellos; a estos se les denomina suelos transportados.

3.2. Propiedades índice

Granulometría

La granulometría se refiere a la distribución del tamaño de los granos de suelo asociados al porcentaje que representan del total de la muestra. Dicho en otras palabras, la granulometría ofrece información sobre el tamaño de los granos y qué tanta variación existe entre los mismos. De este modo resulta interesante conocer la distribución de esta variación en términos de tamaño, y la metodología más usada para tal fin es aquella basada en el uso del tamiz, un conjunto de charolas que tienen mallas de dimensiones variables en su entramado cada vez más reducido, tal como se muestra en la figura 3.1.

La muestra de suelo se hace pasar por las diferentes mallas con la finalidad de retener los granos de tamaño ligeramente mayor al de éstas y, posterior a ello, se pesan y hacen los cálculos pertinentes para determinar el porcentaje de granos que cada charola retiene. Luego se traza una gráfica similar a la mostrada en la figura 3.2. La forma de la curva es signo de su distribución pero para fines más prácticos, Allen Hazen propuso un coeficiente de uniformidad. La manera de interpretarlo es que a menor valor implica mayor uniformidad.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

donde:

D_{60} = Tamaño tal que el 60% en peso, del suelo, sea igual o menor.

D_{10} = Tamaño tal que el 10% en peso, del suelo, sea igual o menor.

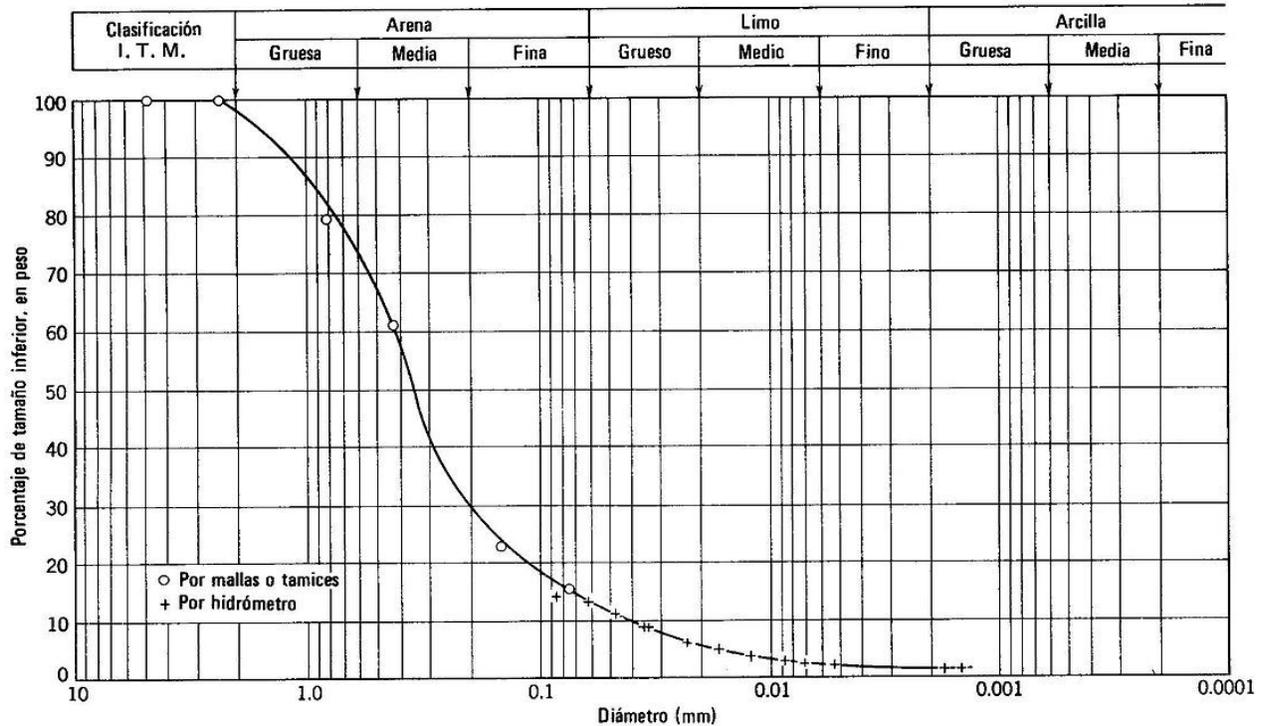


Figura 3.2. Curva granulométrica. Fuente: Wikimedia Commons.

En adición al anterior coeficiente, se encuentra el coeficiente de curvatura, que para suelos bien graduados (aquellos que presentan gran variedad en los tamaños de los granos), los valores suelen ser entre 1 y 3.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

donde:

D_{30} = Tamaño tal que el 30% en peso, del suelo, sea igual o menor.

Relaciones peso - volumen

En el caso de suelos también existen relaciones entre el peso y volumen del mismo y para pero llegar al entendimiento de este caso es preciso observar la figura 3.3 la cual representa un diagrama conocido como *diagrama de fases*. Las fases que se muestran son tres: sólida (granos), líquida (agua) y gaseosa (aire). Cabe aclarar que varias de las relaciones que se mencionarán a continuación ya fueron definidas en el capítulo relativo a las rocas por lo que solo se mostrarán sus respectivas fórmulas.

Relación de vacíos

$$e = \frac{V_v}{V_s} * 100$$

Porosidad

$$n = \frac{V_v}{V_m} * 100$$

Nota: $V_a + V_w + V_s = V$
 $W_w + W_s = W$

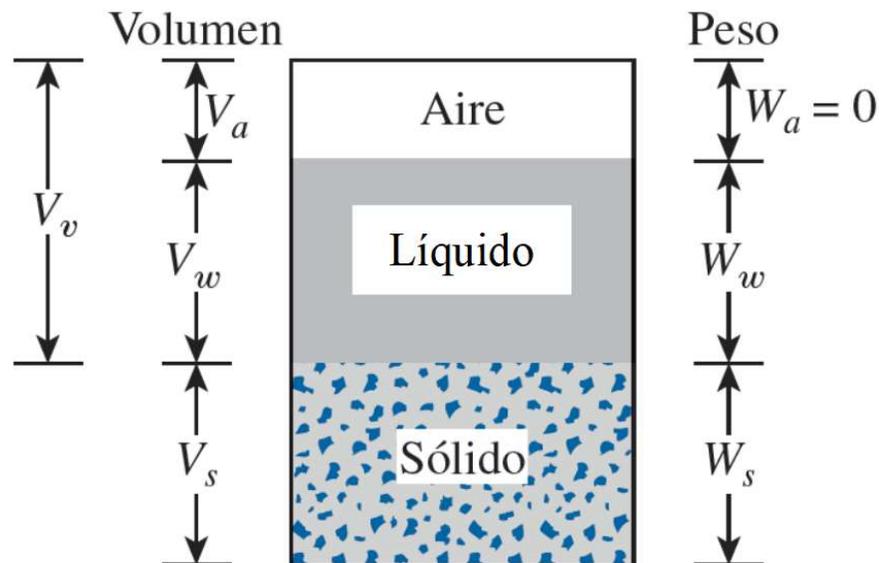


Figura 3.3. Diagrama de fases del suelo. Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (Das, 2011).

Grado de saturación

Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de sus vacíos. Dicho de otra manera, es un indicador del espacio que ocupa el agua del total de huecos presentes en la muestra.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Contenido de agua

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Peso específico seco

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m}$$

Peso específico saturado

El peso específico saturado se refiere a la relación entre el peso y el volumen de la muestra bajo la condición en que el volumen del agua es igual al de los vacíos.

$$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w}$$

Peso específico relativo de la fase de sólidos

Se refiere a la relación que existe entre el peso específico de la fase sólida respecto a la del agua a 4 °C, destilada y sujeta a una atmósfera de presión.

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} = \frac{W_s}{(V_s * \gamma_0)}$$

Densidad Relativa

En el caso de suelos granulares, resulta especialmente útil conocer que tan compacto o suelto se encuentra este a partir de sus huecos, en condiciones extremas en el campo. En la tabla 3.2 se muestra la interpretación en función del valor de dicha densidad.

$$\gamma = \frac{W_s + W_w}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w}$$

donde:

$e_{m\acute{a}x}$ = Relación de vacíos del suelo en el estado suelto.

$e_{m\acute{i}n}$ = Relación de vacíos del suelo en el estado más denso.

e = Relación de vacíos *in situ*.

Límites de Atterberg o de consistencia

Cuando se trata de suelos finos, el contenido de agua influye directamente en el comportamiento que este tendrá, encontrándose los diferentes estados mostrados en la

figura 3.4, divididos entre sí por varios límites. Existen 3 límites que separan los diferentes estados los cuales son: límite líquido, límite plástico y límite de contracción.

Tabla 3.2. Interpretación de los resultados de la densidad del suelo granular. Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (Das, 2011).

Compacidad relativa (%)	Descripción de depósito de suelo
0 – 15	Muy suelto
15 – 50	Suelto
50 – 70	Medio
70 – 85	Denso
85 - 100	Muy denso

Límite líquido, LL: Es el límite entre los estados plástico y semilíquido. Se determina utilizando la Copa de Casagrande y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12.7 mm mediante 25 golpes.

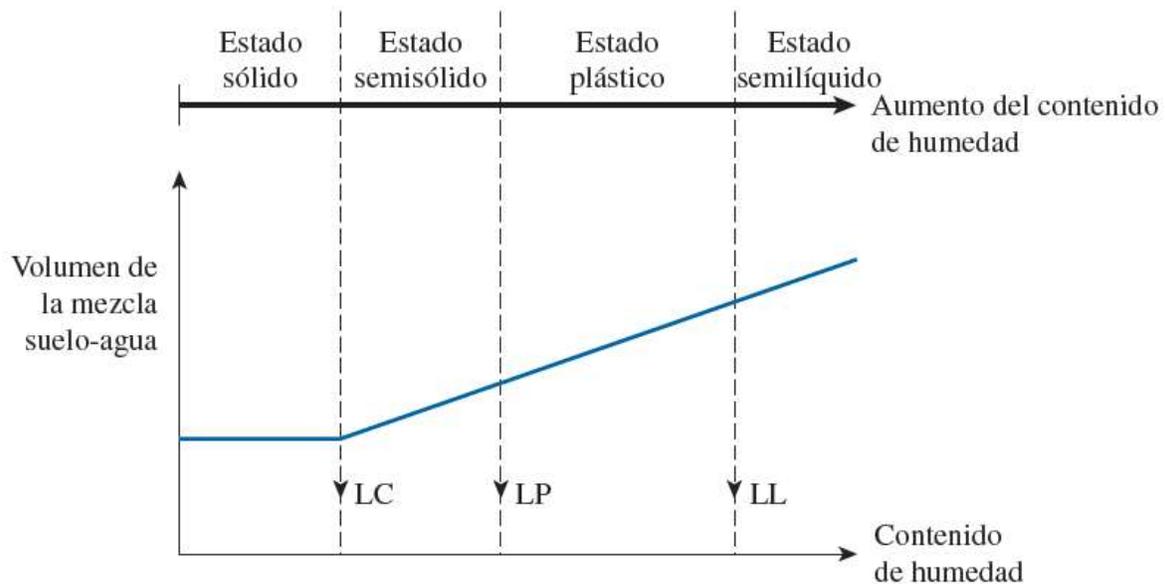


Figura 3.4. Definición de límites de Atterberg. Fuente: Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (Das, 2011)

Límite plástico, LP: Es el límite entre los estados semisólido y plástico. Se define como el contenido de agua en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3.18 mm de diámetro.

Límite de contracción, LC: Se define como el contenido de humedad en el que el suelo no experimenta ningún cambio adicional en su volumen por la pérdida de agua.

$$L_c = w - \Delta w$$

donde:

w = Contenido de agua inicial.

Δw = Cambio en el contenido de agua desde el inicio hasta el límite.

Índice de plasticidad

Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico y se puede entender como un rango donde el suelo se comporta como un semisólido (IP).

Índice de liquidez

Un suelo cohesivo en estado natural es susceptible a cierta consistencia que puede ser conocida a través del índice de liquidez, el cual se interpreta como una medida de si dicho suelo llega a comportarse de manera similar a un fluido (IL).

$$IL = \frac{w - L_p}{L_L - L_p}$$

3.3. Parámetros de resistencia

Resistencia al esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante puede ser entendido como la resistencia del material ante efectos de falla o desplazamientos que ocurren desde su interior. Para que un material falle sobre cierto plano, debe existir la combinación de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, ambos en sus valores críticos, la cual se presenta mediante una relación directamente proporcional y de forma lineal (figura 3.5).

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

donde:

τ = Esfuerzo cortante

σ = Esfuerzo normal

c = Cohesión

ϕ = Ángulo de fricción interna

Tal como se observa en la ecuación anterior hay dos parámetros, adicionales al esfuerzo, que definen a la recta llamada *envolvente de falla*: cohesión y ángulo de fricción interna.

Dichos valores se obtienen como resultado de alguna de las siguientes pruebas de laboratorio:

- Prueba de compresión simple.
- Prueba de corte directo.
- Prueba de compresión triaxial consolidada drenada.
- Prueba de compresión triaxial consolidada no drenada.
- Prueba de compresión triaxial no consolidada no drenada.

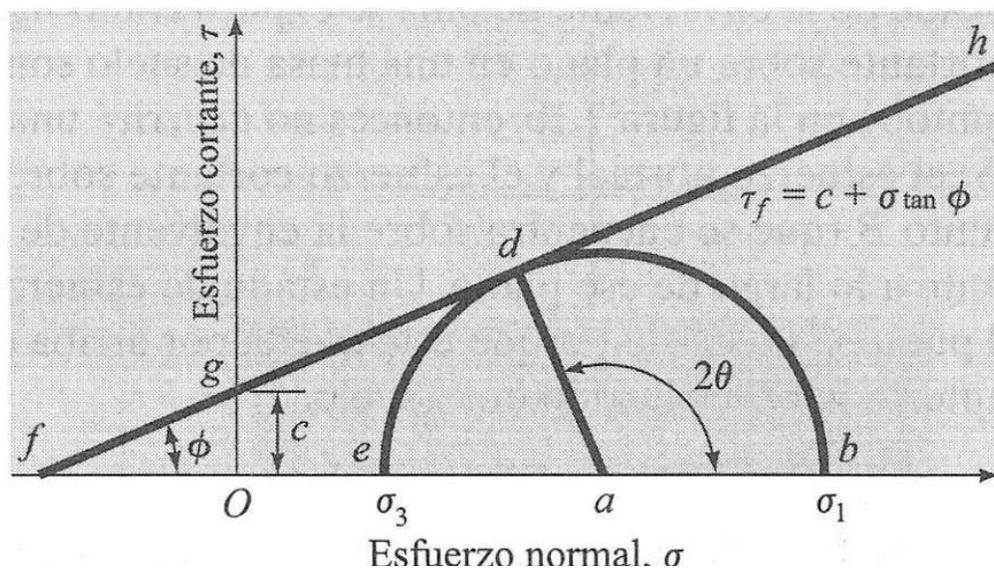


Figura 3.5. Diagrama del círculo de Mohr. Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica (Das, 2001)

3.4. Clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (o SUCS por sus siglas) es un sistema originalmente propuesto por Casagrande (1942), el cual se basa en la distribución granulométrica y los límites de consolidación.

Dicho sistema clasifica los suelos en dos categorías generales:

1. Suelos de grano grueso, tipo grava y arena, con menos del 50% pasando por la malla No. 200 del tamiz. Los símbolos del grupo comienzan con un prefijo G o S. G indica presencia de grava o mientras que S indica presencia de arena.

- Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos del grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Además, como símbolos complementarios se encuentran:

W: Bien graduado.

P: Pobremente graduado.

L: Baja plasticidad (límite líquido menor que 50).

H: Alta plasticidad (límite líquido mayor que 50).

Para llevar a cabo una apropiada clasificación es necesaria conocer una parte o todo de la información siguiente:

- Porcentaje de grava, es decir, la fracción que pasa la malla de 76.2 mm y es retenida en la malla No. 4 (abertura de 4.75 mm).
- Porcentaje de arena, es decir, la fracción que pasa por la malla No. 4 (abertura de 4.75 mm) y es retenida en la malla No. 200 (abertura de 0.075 mm).
- Porcentaje de limo y arcilla, es decir, la fracción de finos que pasan la malla No. 200 (abertura de 0.075 mm).

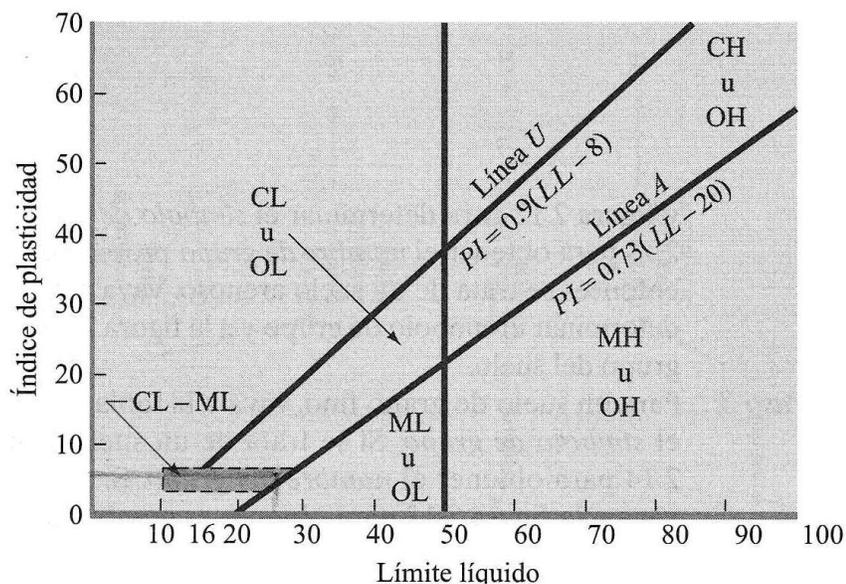


Figura 3.6. Carta de plasticidad. Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica (Das, 2001).

4. Coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de curvatura (C_c).

5. Límite líquido e índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla No. 40.

Para facilitar el proceso de clasificación, se recurre a la carta de plasticidad, la cual contiene de forma detallada zonas delimitadas para el caso de suelos finos (ver figura 3.6).

Al igual que el capítulo anterior, las propiedades de los suelos representan una parte importante no solo para fines de clasificación sino para evaluar la excavabilidad mediante alguno de los métodos que aprovechan este conocimiento.

4. Exploración en suelos y macizos rocosos

Desde un punto de vista estrictamente geofísico, el término *prospección* puede definirse como la exploración del subsuelo basada en el análisis de las características físicas del terreno y de las variaciones superficiales de los campos naturales de la Tierra, encaminada a descubrir recursos naturales y minerales del subsuelo (Del Valle, 1984). Cabe aclarar que en la literatura especializada respecto al tema, suelen encontrarse los términos *prospección* y *exploración* de manera indistinta para referirse al mismo concepto y este escrito no es la excepción.

4.1. Métodos de exploración indirectos

La exploración por métodos indirectos es un paso fundamental para comenzar el diseño y si se lleva a cabo un buen análisis preliminar se pueden obtener grandes beneficios entre los cuales se encuentran: estimar los tiempos de ejecución, prevenir diferentes tipos de inconvenientes durante (los procesos lo cual repercute directamente en los costos del proyecto) y determinar así la excavabilidad de materiales,⁸.

Fotogeología

Si se quiere reconocer la geología sobre la superficie del terreno del proyecto desde el gabinete, este método es una gran opción para ello ya que en un periodo de tiempo relativamente corto se cubren extensas áreas (aproximadamente 35, 000 kilómetros cuadrados) para su análisis . Sin embargo, se tiene que complementar con la verificación en campo para despejar cualquier duda derivada de la fotointerpretación.

El objetivo de este estudio es determinar en una primera aproximación, las características litológicas y estructuras generales del lugar, así como sus relaciones estratigráficas. La escala de las fotografías aéreas depende del tipo de estudio. Por ejemplo, en caso de reconocimiento se utilizan las de 1:25000 a 1:50000, mientras que para trabajos de detalle de 1:200 a 1:5000 y 1:20000 particularmente (si son en color).

La fotogeología se usa principalmente en la etapa de reconocimiento permitiendo seleccionar áreas donde el terreno reúne las características mínimas indispensables para proyectar una

⁸ Testimonio del Ing. Ulisses Solana, 2017.

obra determinada y por tanto ser sujeto de procedimientos exploratorios detallados. Las características principales susceptibles de ser reconocidas en un estudio fotogeológico son las siguientes:

- Litológicas: Tipo de roca, homogeneidad, permeabilidad, cohesión, solubilidad, grado de intemperismo.
- Estructurales: Rumbo y echado de los estratos, pliegues, diaclasas, lineamientos regionales, fallas, fracturas, deslizamientos.
- Estratigráficas: Columna estratigráfica, discordancias.
- Geohidrológicas: Sistemas de drenaje superficial, zonas de posible infiltración, determinación de cuencas de captación.
- Geomorfológicas: Morfología y fisiografía de la región.
- Geotécnicas: planeación del trazo de carreteras, vías de ferrocarril, canales, oleoductos, localización de sitios que requerirán de un puente, delimitación y ubicación de bancos de material para la construcción, estabilidad de las pendientes que causen duda, estudios preliminares de boquillas y vasos en presas.

La información obtenida sirve para decidir la estrategia y los métodos más adecuados para las posteriores investigaciones directas.

Geofísicos

Son aquellos que determinan propiedades físicas del terreno, se realizan desde la superficie o en profundidad mediante sistemas mecánicos (Haaz, 2014). Estos son recomendados en múltiples casos ya que proporcionan información de la histología y de las estructuras geológicas del subsuelo. Dentro de los métodos geofísicos, se encuentran los sísmicos, eléctricos, el magnetométrico y gravimétrico.

4.1.1. Sísmicos

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas, depende de las propiedades elásticas del material. Esto determina los tipos de ondas que pueden transmitirse en los materiales y la velocidad a la que dichas ondas pueden viajar a través de ellos.

Por un lado se encuentran las ondas P las cuales son deformaciones compresivas y expansivas que viajan más rápido que otras ondas generadas por cualquier disturbio sísmico; pueden viajar a través de los sólidos, líquidos y gases. Cuando se involucra al módulo de compresibilidad, k , en vez del módulo de elasticidad, se puede emplear la fórmula:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + 4\mu/3}{\rho}}$$

Por otro lado, las ondas S son ondas transversales que viajan al mover partículas de lado a lado, en forma similar al movimiento que caracteriza a las serpientes al desplazarse. Es importante destacar que estas ondas no interactúan con líquidos o gases sino únicamente con sólidos, por lo que depende del módulo de cortante (G) y la densidad del material.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Cabe mencionar que la velocidad sísmica también depende de otros factores como los siguientes:

- Matriz y estructura del contenido de minerales
- Litología
- Porosidad
- Temperatura
- Grado de compactación
- Resistencia

Para conocer mejor la propagación de estas ondas (también llamadas *rayos sísmicos*) a través de diferentes estratos hay que explicar dos conceptos bien conocidos en el área de la óptica: reflexión y refracción.

Reflexión: De acuerdo a la figura 4.1a, considerando dos medios homogéneos horizontalmente con diferentes propiedades entre sí y un rayo con velocidad de propagación igual a V_1 que incide desde el punto A , a través del primer medio, este pasa por un punto O ubicado sobre la interfaz entre ambos medios. Con un ángulo i_1 . Posteriormente, el rayo

llegará a un punto B con un mismo ángulo de reflexión (i_1). Al hecho de que tanto el ángulo de incidencia como el de reflexión sean iguales se le conoce como *ley de reflexión*.

Refracción: De acuerdo a la figura 4.1b, de manera análoga se consideran dos medios distintos y un rayo partiendo del punto A . Al incidir el rayo sobre la interfaz entre medios, parte de este quedará desviado con cierto ángulo en el segundo medio.

La ley de refracción establece una relación entre los dos ángulos (incidencia y refracción) y las velocidades de propagación en ambos estratos. A partir de esta relación es interesante ver lo que sucede cuando el ángulo refractado es igual a 90° . El resultado es un ángulo conocido como “crítico” y queda definido en términos de las velocidades de propagación en cada estrato.

$$i_c = \frac{V_1}{V_2}$$

Lo anterior quiere decir que cualquier onda con una inclinación equivalente al ángulo crítico viaja de manera paralela al límite del medio inferior a la velocidad máxima pero perturbando e “irradiando” energía al medio superior en forma de rayos con trayectorias descritas también por el mismo ángulo crítico. La onda con esta característica es llamada *head wave*.

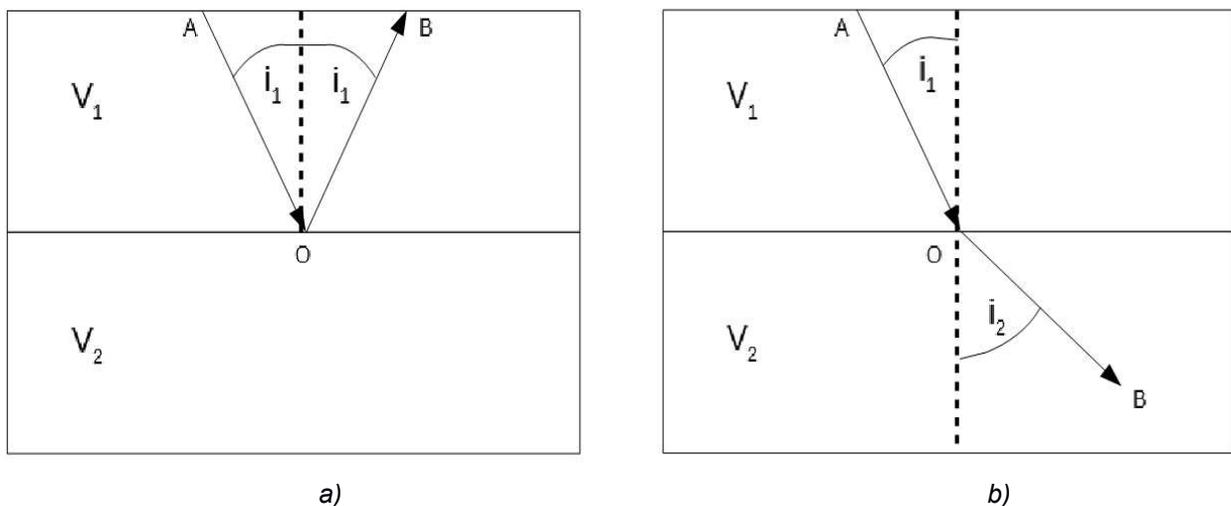


Figura 4.1. Diagrama que muestra diferentes efectos de la propagación de un rayo sísmico: a) reflexión; y b) refracción.

Mediante diferentes métodos, los fenómenos descritos hasta ahora son aprovechados para conocer los diferentes materiales que forman las capas o estratos del terreno en cuestión.

Por lo tanto, dentro de los métodos sísmicos se encuentran los de refracción y reflexión sísmica. En ambos casos, a partir de una fuente que provoca perturbaciones dinámicas artificiales en o cerca de la superficie del terreno (por ejemplo, utilizando cargas de dinamita o golpeando una placa con martillo) para generar tanto ondas *P* como ondas *S* con la finalidad de medir los diferentes intervalos del tiempo que tardan en llegar hasta los geófonos colocados a distintas distancias.

Los geófonos son dispositivos que sirven para medir los intervalos de tiempo que tarda la onda en propagarse desde la fuente hasta su recepción y que son enviados a un oscilógrafo para llevar registro de los datos con los cuales se construye posteriormente una gráfica tiempo (eje de las ordenadas) contra distancia (eje de las abscisas), mejor conocida como *curva dromocrónica*, la cual permite determinar la velocidad de propagación de las ondas en el sitio de interés.

Cabe mencionar que existen variaciones entre la teoría y la práctica ya que los estratos no suelen ser homogéneos, lo que implica que sus propiedades determinan variaciones de la velocidad de propagación, sea por diferencias en la profundidad de los estratos o longitudinalmente (suelen coincidir con cambios en la geología del terreno).

Para conocer la profundidad de los estratos basta con conocer las diferentes velocidades de propagación en los medios, ta como se muestra en la siguiente fórmula (la deducción de ésta se muestra en el Anexo):

$$H = \frac{X}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

donde:

H = Profundidad de la capa superior, en (m)

X = Distancia crítica, en (m)

V_1 = Velocidad de la onda en el estrato superior, en (m)

V_2 = Velocidad de la onda en en el estrato inferior, en (m)

Las principales aplicaciones de este método son:

- Determinación de los espesores y estratigrafía en el subsuelo.
- Determinación de la profundidad del basamento, espesores de aluvión.

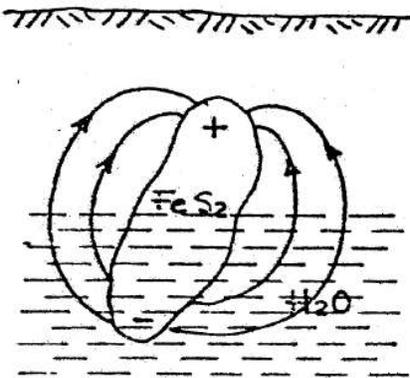
- Auxiliar en la identificación de estructuras.

Para realizar interpretaciones más precisas deberá de tomarse en consideración las siguientes condiciones:

- En general deben ser rocas estratificadas y sus echados deben variar cuando más de cero a 35 grados.
- La interpretación será mejor mientras más homogéneas sean las formaciones y el contraste de velocidades entre cada una de ellas sea mayor.
- Es importante que las velocidades se vayan incrementando con la profundidad, pues se puede dar el caso de que no se detecten ciertas capas cuando los materiales de alta velocidad se encuentran en la superficie (como puede ser por ejemplo una colada de basalto).

4.1.2. Eléctricos

La conductividad eléctrica de la Tierra, es generalmente baja y depende principalmente del contenido de fluidos y la constitución de la roca. Por ejemplo, en las rocas superficiales depende del contenido de agua salina en los poros de las mismas mientras que en el aire depende del grado de ionización y el número de partículas cargadas por unidad de volumen. La parte sólida de la Tierra parece tener un exceso de cargas negativas, lo que genera una



corriente de iones con carga positiva del aire hacia la Tierra.

Sin embargo, existen campos locales que pueden formarse por diversas causas como reacciones químicas, variaciones de concentración salina del agua o por circulación a través de rocas permeables y que incluso pueden aparecer y desaparecer periódicamente coincidiendo con eventos naturales como ciclos hidrológicos o de estiaje.

Figura 4.2. Diagrama que muestra la circulación de iones provocada por el contacto entre agua y minerales.

Fuente: Apuntes de introducción a la geofísica (Del Valle E., 1984)

Estas corrientes eléctricas no se miden directamente, sino a través de la resistividad de las rocas, siendo la resistividad el inverso de la conductividad. Este fenómeno sucede cuando hay concentraciones de sulfuros de hierro en el subsuelo se encuentran parcialmente cubiertos por agua que se ha filtrado desde la superficie. El mineral (sulfuro) en la parte superior sufre una oxidación mientras que la parte inferior reacciona con el agua, lo que produce ácido sulfúrico y genera un electrolito, permitiendo así la circulación de iones y estableciendo una diferencia de potencial en los extremos (ver figura 4.2).

Tal como ya se ha mencionado, la presencia de agua en las rocas es indispensable para la aparición de estos campos pero si el agua filtrada aumentara hasta cubrir totalmente el cuerpo ya no existirían diferencias de potencial y el campo eléctrico puede desaparecer.

Con el auxilio de una fuente de poder, se aplica una corriente eléctrica al suelo mediante electrodos. Su principio se basa en que las variaciones de la conductividad del subsuelo alteran el flujo de corriente en el interior de la tierra, lo que ocasiona una variación de la distribución del potencial eléctrico. Dentro de los métodos eléctricos que existen se encuentran principalmente dos.

Resistividad

Como no siempre se pueden medir campos naturales, se acostumbra hacer observaciones de la resistividad para conocer la distribución de las propiedades eléctricas de subsuelo, y con base en ellas inferir su influencia en los campos terrestres. Para hacer mediciones de resistividad se utilizan dos juegos de electrodos, un par que permite introducir al subsuelo corrientes eléctricas conocidas que generan un campo.

El campo producido artificialmente, es modificado por la resistividad de las rocas que atraviesa la corriente. Con el otro par de electrodos conectados a un potenciómetro se miden las caídas de potencial. Si el suelo es eléctricamente homogéneo e isotrópico, la resistividad podrá calcularse fácilmente a partir de la separación de los electrodos, y de la corriente y potencial observados.

Para llevar a cabo este método de exploración se utilizan principalmente los arreglos de Wenner y Schueleberger, que en términos generales, consisten en hacer una serie de mediciones con un arreglo electródico de 4 polos, para obtener la resistividad a distintas

profundidades en un punto dado de la superficie. Los electrodos de potencial se fijan en una posición y se toman varias lecturas moviendo los electrodos de corriente (A, B); cuando las lecturas ya son lejanas, se llega con máximo a una separación $AB = 1/5 MN$; se moverán los electrodos de potencial a una nueva posición fija y se continúa la secuencia. Para el caso del arreglo tipo Wenner (ver figura 4.3b), la distancia entre dos electrodos contiguos es a con lo que la ecuación del potencial toma la forma:

$$E = \frac{i \cdot \rho_e}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

En general, el arreglo de Schulemberger (ver figura 4.3a) se prefiere por ser más económico y fácil de operar, además de ser más efectivo al aplicarse en formaciones geológicas que presentan un echado menor de 30° y cuya resistividad sea homogénea lateralmente y contrastante verticalmente.

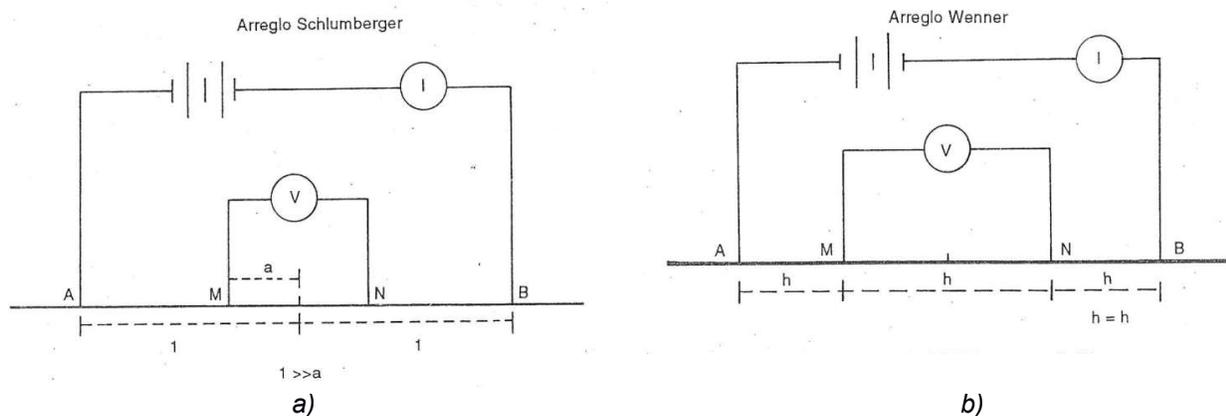


Figura 4.3. Método eléctrico de resistividad. a) arreglo de Schulemberger ; b) arreglo de Wenner. Fuente: Geología aplicada a la ingeniería civil (Ruiz y González, 2004).

Relación de caídas de potencial

Las diferencias del potencial terrestre se miden colocando dos electrodos en la superficie del suelo, o bien, enterrándolos y midiendo la diferencia entre ellos mediante un potenciómetro o galvanómetro (ver figura 4.4). Se prefiere utilizar un potenciómetro pues la corriente absorbida por un galvanómetro tiende a aumentar la polarización que se produce en los electrodos. En este método las mediciones de campo eléctrico se hacen a lo largo de una línea $A-D$, normal a la línea primaria $A-B'$, mediante tres electrodos de potencial B, C, D .

El método permite, en ciertos casos, obtener mayor detalle que con el método de resistividad (en estructuras verticales y de espesor reducido como fallas, diques). En el caso de heterogeneidad local de los mantos superficiales, no es recomendable su empleo. Una de sus principales ventajas, es que no necesita conocerse la intensidad de la corriente.

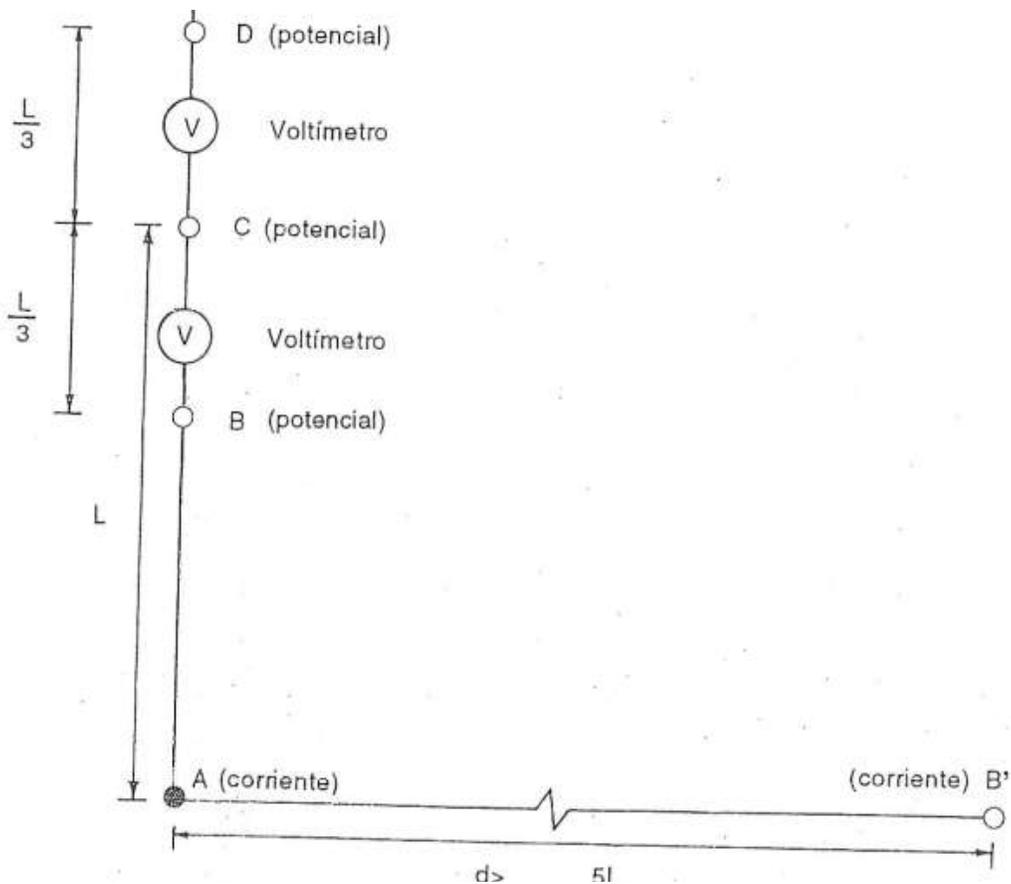


Figura 4.4. Método caídas de potencial. Fuente: Geología aplicada a la ingeniería civil (Ruiz y González, 2004).

4.1.3. Magnetométricos

La Tierra cuenta con un campo magnético propio pero sobre su superficie la intensidad y dirección de éste no son uniformes por lo que es posible medir sus variaciones en diferentes puntos y de manera local. La principal razón de esta distribución está relacionada con la presencia de materiales magnetizados o con propiedades magnéticas que modifican el campo. Hay tres propiedades muy relevantes que se involucran en la mayoría de los estudios.

La primera a tomar en cuenta es la susceptibilidad magnética (k). Al someter una sustancia magnética (como la magnetita) a un campo magnético, ésta se magnetiza además de

adquirir intensidad de imantación, proporcional al campo exterior aplicado. Su medición se realiza en laboratorio y se ha determinado que en rocas sedimentarias, dicho valor es bajo mientras que en ígneas y metamórficas (basamento), resulta el caso contrario.

La segunda se refiere a la permeabilidad magnética (μ), la cual puede entenderse como la facilidad que ofrece un cuerpo al paso del flujo magnético. Usualmente se toma como la relación entre el flujo magnético inducido en un material respecto al que circula por el aire. Se relaciona con susceptibilidad magnética de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_0(1+k)$$

Por último, la remanencia magnética se refiere al registro que deja la roca acerca de la dirección del campo magnético existente al momento en que ésta se formó y es de gran ayuda para conocer la edad de la misma. Para explicar el proceso, se recurre al *ciclo de histéresis*, el cual muestra las diferentes etapas en que se magnetizó o desmagnetizó una sustancia magnética.

Ya que estas propiedades son la base para determinar las variaciones en el campo antes descritas, existen diferentes instrumentos más o menos sensibles a diferentes condiciones del entorno al momento de la medición, por lo que, en general, se requieren realizar dos tipos de correcciones antes de procesar la información:

Correcciones Espaciales

- *Latitud y longitud*: El campo magnético tiene una forma un tanto irregular además de que existe diferencia en cuanto a la dispersión de valores al compararse las mediciones ubicadas en los polos respecto a las del ecuador.
- *Altitud*: Es poco frecuente esta corrección pero, cuando se hace, es debido a que se estudian áreas con cambios de relieve prominentes.

Correcciones temporales

- *Variaciones seculares*: Son aquellas alteraciones que se presentan de manera lenta y progresiva con el paso de los años por lo que los valores de referencia cambian para cada latitud y longitud.

- *Variaciones diurnas:* A partir de una base se repiten las mediciones cada hora para, posteriormente, eliminar el efecto en cada punto. Requiere conocerse tanto la variación solar (variación adicional en ciclos de 27 años según la rotación solar) como la lunar (variación a lo largo del mes lunar, 28 días). Respecto a las tormentas magnéticas, éstas son bruscos disturbios que están relacionados con la actividad de las manchas solares más intensas cada 11 años, cuando se revierte la polaridad magnética de la estrella.

Influencia del avión

Cuando la prospección magnetométrica es realizada mediante avión (método muy utilizado) se considera que la variación ocurre tanto por el campo magnético propio de la zona como por el ángulo de colocación del vehículo, para contrarrestar el efecto se sigue una operación que consiste en recorrer previamente un área sin anomalías (llano).

La variedad de los instrumentos de medición empleados en este método cubre una amplia gama de opciones, de los cuales se muestran a continuación algunos de los más utilizados.

Magnetómetro de Precesión Protónica o Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

En la década de 1950, se popularizó su uso al utilizarse los protones de una muestra de agua sometidos a un campo magnético exterior para orientar los momentos magnéticos de los protones. Al cesar el campo, los protones tenderán a orientarse según el campo magnético terrestre de acuerdo a un movimiento de *precesión amortiguado*. Este movimiento supone una variación del flujo magnético y por lo tanto, en una bobina, se produce una *fem* de frecuencia, que puede medirse. Como el oxígeno no da respuesta, toda la resonancia se debe a los protones del hidrógeno, cuya constante girométrica es de 23.5 *gamma/Hz*.

Magnetómetro de Overhauser

Es semejante al anterior pero, en este caso, la resonancia magnética, además del nivel protónico, tiene lugar también en los iones paramagnéticos que conforman la sustancia. Se aplica primero un campo de microondas que produce la resonancia de los electrones no apareados de la sustancia líquida, para después aplicar una señal de radiofrecuencia que genera el acople de la señal resonante de los electrones con la de los núcleos, efecto que

suele dar respuestas unas mil veces más intensas que la RMN pura, pero que requiere de un mayor intervalo entre mediciones.

Magnetómetro de Absorción Óptica o Vapor de Alkali

Es otra variante del magnetómetro de RMN, utilizado desde mediados de la década de 1960, que se distingue por la forma de medición de la frecuencia de Larmor ya que utiliza la inestabilidad óptica que presentan vapores de rubidio, cesio, etc. Cuando los núcleos atómicos del vapor de álcali entra en resonancia, el paso de luz polarizada a través de la misma se hace casi nulo, minimizándose en consecuencia la intensidad luminosa detectada, a partir de la cual, automáticamente, se regula la frecuencia entregada por un generador a los valores de resonancia, en Hz, que se pueden equiparar a intensidad en gamma.

Magnetómetro criogénico o SQUID

El Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica (SQUID, pos sus siglas en inglés) es un moderno dispositivo de muy alto costo y gran precisión que registra mediante un toroide superconductor, en el que, en todo momento, se genera una corriente eléctrica, cuya tensión resulta proporcional al campo magnético terrestre. También se la emplea para determinar la susceptibilidad en muestras de laboratorio, en reemplazo de otros dispositivos más convencionales.

Prospección aeromagnética

En este caso, el instrumento es más bien un vehículo aéreo con aditamentos especiales que le permiten obtener datos sobre regiones de difícil acceso o minimizar los efectos que rocas profundas pueden causar en las mediciones. Es común que oscile entre los 150 y 200 metros la altura para trabajos mineros mientras que suelen superarse los 1000 en el caso de hidrocarburos.

4.1.4. Gravimétrico

Es un método que, a partir de las variaciones del campo de gravedad terrestre, establece relaciones entre éstas con presencia de materiales que alteran dicho campo. Básicamente, la metodología empleada es la siguiente:

- Ubicación del área

- Determinación de los puntos bases (se requiere un malla lo más regular posible) y estaciones.
- Relevamiento topográfico donde se determinen cotas y distancias entre las estaciones. La precisión de planimetría y altimetría queda a merced de la precisión del aparato.
- Relevamiento gravimétrico para obtener los valores de g , ya sea la componente vertical, z , de la gravedad, o más raramente los valores de gradiente de la gravedad.

Una vez obtenida la información anterior es necesario efectuar diversas correcciones, según sea el caso, con la finalidad de homogeneizar los datos y hacerlos comparables para su correcto trazo sobre gráficas e interpretación, desde un punto de vista geológico.

Corrección Temporal

El objetivo es tener valores corregidos que se aproximen a los que se hubiesen obtenido si todas las estaciones, y con el mismo instrumento, midieran simultáneamente. Es importante mencionar que las mediciones del valor g cambian con el paso de los años, principalmente, debido a dos fenómenos los cuales son: efecto de mareas y deriva instrumental.

Efecto de mareas

Los efectos de atracción combinados de la Luna y el Sol afectan la forma de geoide que tiene la Tierra, de manera que la distancia entre los polos disminuye mientras que el diámetro de la curvatura respecto al Ecuador tiende a aumentar, es decir, tiende a adoptar la forma de un elipsoide de revolución. Este hecho implica que la distribución del agua contenida en los mares cambia favoreciendo mareas más prominentes en zonas cercanas al Ecuador aunque en los polos el efecto sea contrario. Como es de esperar, dicha deformación afecta las mediciones con el tiempo, sin embargo, para llevar a cabo la corrección derivada de este fenómeno, los valores pueden obtenerse de tablas publicadas.

Deriva instrumental

Los instrumentos tradicionales suelen presentar fallas recurrentes en sus componentes, tal como el caso de los muelles, los cuales se fatigan y son muy susceptibles a cambios de temperatura. Para conseguir la corrección se recurre a métodos gráficos.

Corrección Espacial

El objetivo de esa sección es tener valores en los que se busca cancelar los efectos debidos a latitud y altitud sobre las lecturas obtenidas en cada estación. Para el caso de la latitud, hay que considerar la forma de la Tierra como la de un elipsoide de revolución, por lo cual, de acuerdo con la ley de gravitación universal, implica que se percibirá mayor atracción en los polos por ser los puntos donde el radio del planeta es menor.

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

donde:

F : Fuerza de atracción por efecto de la gravedad.

G : Constante de gravitación.

m_1, m_2 : Masas de dos cuerpos que se atraen.

r : Distancia entre ambos cuerpos.

De manera análoga, en el caso de los puntos más alejados, (aquellos que se encuentran sobre el Ecuador), dicha fuerza será menor. La diferencia de atracción entre los polos y el Ecuador parece apenas relevante (983.2 *gal* y 978.0 *gal*, respectivamente), pero a escalas locales, esta variación puede traer consigo importantes errores. Respecto al caso de la altitud, se modifica el valor teórico de la gravedad a nivel local según la altimetría, lo cual se manifiesta con dos efectos contrarios que se explican a continuación.

Corrección de aire libre o Faye

El objetivo es corregir la diferencia entre lo que se mide desde la superficie del terreno y lo que se hubiese medido estando sobre el nivel de referencia, que puede ser el nivel medio del mar, y así uniformar las magnitudes medidas dentro del área de trabajo.

Corrección de Bouguer

Dado que la masa del terreno que se encuentra entre las cotas del lugar de medición y el del plano de referencia también interviene en el fenómeno de atracción gravitatoria, es necesario corregir dicha medición de g . Para el cálculo, se supone la existencia de una losa horizontalmente infinita y espesor equivalente a la diferencia de cotas antes mencionada, así como la densidad rocosa media. Por lo anterior, el concepto de corrección altimétrica (o por

elevación) queda entendido como la combinación de los efectos ya descritos, conservando su respectivo signo.

Corrección topográfica

Es un ajuste que refina la corrección de Bouguer y se debe a la presencia de diferencias laterales en la obtención de elevaciones y depresiones del lugar, puesto que, anteriormente se suponía homogéneo (respecto al plano de referencia).

Respecto a los instrumentos empleados en este método, éstos se dividen en dos categorías según sea la medición deseada y a continuación se muestran algunos de ellos.

Mediciones de gravedad relativa

Gravímetros estables: Basados en la idea del dinamómetro de Isaac Newton, se fabricaron con un muelle o resorte único sobre el cual se accionaba el tornillo de ajuste entre mediciones. El cambio de la longitud del muelle se medía directamente por medio de una amplificación (óptica, mecánica o eléctrica). Actualmente en desuso.

Gravímetros inestables o asiáticos: Desarrollados en Estados Unidos a principios de la década de 1930, constan de una masa suspendida inestablemente a través de un brazo de palanca, tal que para determinado valor de g la masa se encuentra en equilibrio. Basta un pequeño cambio de g para que se abandone el equilibrio y esto se traduzca en desplazamientos relativamente grandes. Cuenta con dos muelles principales para ajustar mediciones y suspender el sistema llamado resorte de longitud cero.

Gravímetros por Levitación Magnética: Son más modernos y toman como base la levitación de un imán sobre un campo inducido por medio de una bobina. Cabe aclarar que se parte de un cero de referencia y el imán bajará en caso de ir a un punto con menor g ; lo que haga falta, aumentar el voltaje para centrar de nuevo el imán será proporcional al diferencial de g .

Mediciones de gravedad absoluta

Péndulos: Basados en el sincronismo de su periodo (descubierto por Galileo Galilei), fueron los primeros instrumentos usados y aún se les emplea.

Aparatos de caída libre: Desarrollados en las últimas dos décadas, miden la gravedad por caída de un cuerpo en un receptáculo de vacío, haciendo las determinaciones mediante instrumental electrónico de alta precisión.

Gravímetro superconductor o criogénico: De desarrollo reciente, consiste en una esfera hueca suspendida en un campo magnético generado por un toroide superconductor enfriado por un compresor de helio. Usado para mediciones absolutas y monitoreo fino de mareas y sismos.

4.2. Métodos de exploración directos

Levantamientos geológicos superficiales

El objetivo es inspeccionar y obtener la información que permita definir con precisión las condiciones geológicas presentes en la zona de estudio. Se tienen dos tipos de levantamientos:

Levantamiento geológico superficial: Son inspecciones de campo para identificar, clasificar y cartografiar las principales unidades geológicas existentes en el área bajo estudio, permitiendo así reconocer características estructurales como: rumbo, echado, pliegues, contactos, fallas, fracturamiento, etcétera.

A su vez, estos se dividen en levantamientos regionales y levantamientos locales. Los primeros se realizan con base en mapas fotogeológicos. Estos sitios se escogen al considerar la accesibilidad y exposición de los materiales que permitan hacer observaciones relacionadas con las características de rocas y suelos. La escala que suele manejarse es de 1:25000 a 1:50000. Por otro lado, los levantamientos locales se llevan a cabo en áreas de extensión reducida, para lo cual, se emplea brújula, cinta o plancheta. De manera análoga, las escalas de 1:500 a 1:10000, son las preferidas.

Levantamiento de obras subterráneas. Consiste en el estudio minucioso del techo y las paredes de un socavón, galería o túnel, mediante el uso de brújula, cinta y flexómetro, permitiendo conocer el tipo de roca, grado de alteración, estratificación, rumbos, echados, fallas, fracturamiento filtración de agua, mineralización.

Suele complementarse este levantamiento con fotografías de los aspectos relevantes de la excavación, o inclusive con una secuencia que registre una o ambas paredes a todo lo largo de la obra con la finalidad de conservar un registro aun cuando ya no sean accesibles posteriormente.

Pozos a cielo abierto

Son excavaciones realizadas con equipo manual desde la superficie del terreno en sentido vertical, de profundidad variable y excepcionalmente mayor de diez metros, de sección cuadrada aproximadamente de 1.5 a 2 metros por lado. Se emplean en estudios someros, en materiales que permiten la excavación con pico y pala o, de ser el caso, con explosivos. Estos permiten conocer directamente la columna geológica, las características de cada uno de los materiales atravesados y la profundidad a la que se encuentra la roca sana.

Dentro de las ventajas de utilizar este métodos se identifican las siguientes:

- La obtención de muestras, sin emplear equipo especial de perforación.
- La recolección de muestras inalteradas.
- La realización de observaciones y pruebas *in situ* (SPT, CPT, etc.).
- La posibilidad de utilizarlos como pozos de correlación para establecer el perfil estratigráfico del sitio.

Las desventajas del método son:

- Es demasiado lento por realizarse en forma manual y los materiales o las condiciones en las que se encuentran pueden variar de un día para otro.
- El costo de la excavación se incrementa notablemente con la profundidad, resulta económica hasta cuatro o cinco metros.
- Si se presentan grandes cantos rodados o bloques de roca, se dificulta el avance del pozo, por lo que es necesario usar explosivos que quizá alteren la constitución de los materiales de la zona.
- Si el material no está cementado y la profundidad es grande, se requerirán ademes, lo cual eleva el tiempo de excavación y el costo.

- Si se excava por debajo del nivel freático, pueden presentarse problemas de extracción de agua o deformaciones en el suelo por el flujo de agua, limitando de esta manera la profundidad.

Trincheras

Son excavaciones de poca profundidad, alargada y angosta. Su principal ventaja es la posibilidad de elaborar un perfil geológico continuo, puesto que permite también la observación directa y la toma de muestras. Se puede excavar una sola trinchera a lo largo del eje deseado o bien una serie de trincheras separadas a intervalos regulares entre sí. La decisión de usar pico y pala en su excavación depende de la extensión y profundidad requerida. En general tienen las mismas ventajas y desventajas que los pozos a cielo abierto.

Túneles o socavones

Son excavaciones lo suficientemente grandes para que un hombre pueda trabajar dentro de ellas (1.5 a 2 metros de anchura y 2 a 2.5 metros de altura). Son trabajos que por su costo elevado, sólo se realizan en obras civiles de gran importancia (obras subterráneas y presas). Se recomienda que tengan pendiente de tal forma que facilite el drenaje en caso de existir agua o favorezca la extracción del material de desecho de la excavación.

El número, localización y profundidad de las socavaciones dependen de las condiciones geológicas del sitio. Este tipo de exploraciones requieren de equipos simples de barrenación y el uso de explosivos. A veces requieren el uso de ademes (particularmente a la entrada).

Perforaciones

Después de realizar los estudios preliminares que definen la factibilidad geológica para la ubicación de una obra civil, es necesario efectuar perforaciones que proporcionan información sobre las características físicas del terreno (permeabilidad, resistencia) y ayuden a solucionar problemas de interpretación en sitios donde se haya dudas. Los sistemas de perforación y maquinaria empleada serán expuestos en el capítulo 6.

Con esa información se pueden elaborar perfiles geológicos, se podrá detallar la columna estratigráfica del lugar, y ayudan en la elaboración de planos geológicos y geotécnicos. La información proporcionada por este método será: composición, espesor y extensión de cada una de las formaciones del área, la profundidad a la que se encuentra roca sana, la

profundidad del agua subterránea, o registros geofísicos de pozo; también se obtienen muestras a las cuales se les harán diferentes pruebas de laboratorio. Además de lo anterior, es posible obtener información adicional como:

- *Velocidad de rotación y avance*: Esta es la correlación con el tipo de roca, en rocas duras no muy fracturadas a pesar de que la velocidad de rotación será alta, el avance será lento, mientras que para rocas alteradas la velocidad puede ser muy baja y el avance alto.
- *Pérdida de agua (total o parcial)*: La pérdida es parcial si el gasto de retorno es menor que el de inyección. Es total si el gasto de retorno es nulo. Cabe mencionar la importancia en el registro de la presión y el gasto de inyección.
- *Nivel freático y presencia de aguas artesianas*: Debido a la inyección de agua durante la perforación se puede medir erróneamente el nivel de aguas freáticas; por lo cual se recomienda hacer dicha medición después de un tiempo suficiente de suspensión de las maniobras en el sondeo, de preferencia la mañana antes de iniciar nuevamente la perforación.
- *Brusco descenso de la broca*: Indica la presencia de huecos o cavernas, que en algunas rocas son pequeños como el basalto (producidos por desprendimiento de gases).
- *Necesidad de ademar*: Durante la perforación, al atravesar ciertos materiales, se puede presentar el caso de inestabilidad de las paredes, por lo que se debe estabilizar la perforación con ademe, o bien, con lodos de perforación (bentonita).

Como se puede apreciar, la exploración es un gran complemento para tener un panorama mucho más amplio de las condiciones generales del terreno y de todos los métodos existentes, los geofísicos son las más usados para trabajos de minas, túneles y carreteras, en especial el de refracción sísmico pues para conocer la excavabilidad resulta más barato y confiable el equipo, procedimientos y procesamiento de la información.

5. Métodos para determinar la excavabilidad de materiales

El término excavación se refiere a la remoción, carga, transporte, disposición y compactación de todos los materiales encontrados dentro de los límites del trabajo necesario para la construcción de una obra. De forma muy relacionada existe el concepto de excavabilidad el cual se refiere a la dificultad con la que estos materiales pueden ser excavados. Las rocas en estratos gruesos y compactos son mucho más duros y difíciles de extraer que las rocas que se encuentran en capas delgadas y fisurables por lo que tienen que aflojarse primero ya sea por desgarramiento o por la combinación entre perforación y voladura.

Es común encontrar en la literatura en español los términos arabilidad,⁹ desgarrabilidad,¹⁰ escarificado,¹¹ o ripabilidad,¹² (del inglés *ripping*), para referirse a la dificultad con que los materiales pueden ser rotos o aflojados por equipo mecánico (por ejemplo, rippers o desgarradores acoplados a tractores) para facilitar su remoción por otros equipos. Se aplica, principalmente, cuando hay presencia de rocas sedimentarias, ya que éstas se forman naturalmente por estratos, característica que lo favorece, pero no la única (como algunos autores proponen), pues también influyen las fracturas y planos de debilidad, intemperismo, fragilidad, estructuras con alto contenido de agua, baja resistencia a la compresión y velocidad de propagación de ondas sísmicas. De lo contrario, como en el caso de rocas ígneas (por ejemplo, granitos o basaltos), se contarán con serias dificultades y ni los aditamentos ni equipos más sofisticados concebidos para este fin, podrán desempeñarse de manera óptima, impactando en el aumento de costo y tiempo de la obra.

En estas situaciones donde la escarificación no es suficiente hay que recurrir al método de voladura acompañado por perforación previa. El objetivo es provocar el rompimiento de la roca mediante la carga de explosivos, ya sea con o sin confinamiento, para que sea procesada como agregado o bien para trabajar el derecho de vía. Independientemente del caso, existen dos formas en que la energía es liberada al momento de la detonación: (1) impacto, cuando la carga no lleve confinamiento, y (2) gas, donde exista confinamiento. El

9 *Tractores en la construcción*, por C. M. Chávarri, México: Fundación para la enseñanza de la construcción A. C.

10 *Idem*.

11 Procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos, 2015, N. Hernández, Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

12 *Definición racional de ripabilidad o volabilidad de los macizos rocosos: Factores económicos y técnicos*, 2005, F. Luengo y S. González. Oviedo, España: Unión Española de Explosivos, S. A.

diseño de la explosión afectará aspectos como el tipo de equipo y el factor de llenado del cucharón para excavadoras. Ante ambas opciones de aflojamiento surge la duda ¿cómo saber si se debe escarificar o utilizar voladura? En las próximas secciones se explican los métodos para clasificar los materiales a partir de su excavabilidad que mayormente se aplican en otros países y con lo cual, las fases de planeación y diseño buscan la solución óptima de la obra en cuestión, ya sean civiles, como carreteras y túneles, o mineras. Al final del capítulo se incluye un análisis entre las diferentes alternativas tomando en cuenta los aspectos que cada uno considera y las características que comparten entre sí.

5.1. Método RIP de Caterpillar (1958)

En 1958, Caterpillar Tractor Company (CAT, por sus siglas en inglés) desarrolló un método gráfico basado en la velocidad de ondas sísmicas para evaluar la escarificación, siendo pionera con la publicación de sus manuales de rendimiento y escarificación (*Performance Handbook* y *Handbook of Ripping*, respectivamente), los cuales incluyen una serie de gráficos para cada tipo de tractores que la compañía fabrica (ver figura 5.1), donde se relacionan distintos tipos de rocas y suelos con el parámetro ya mencionado.

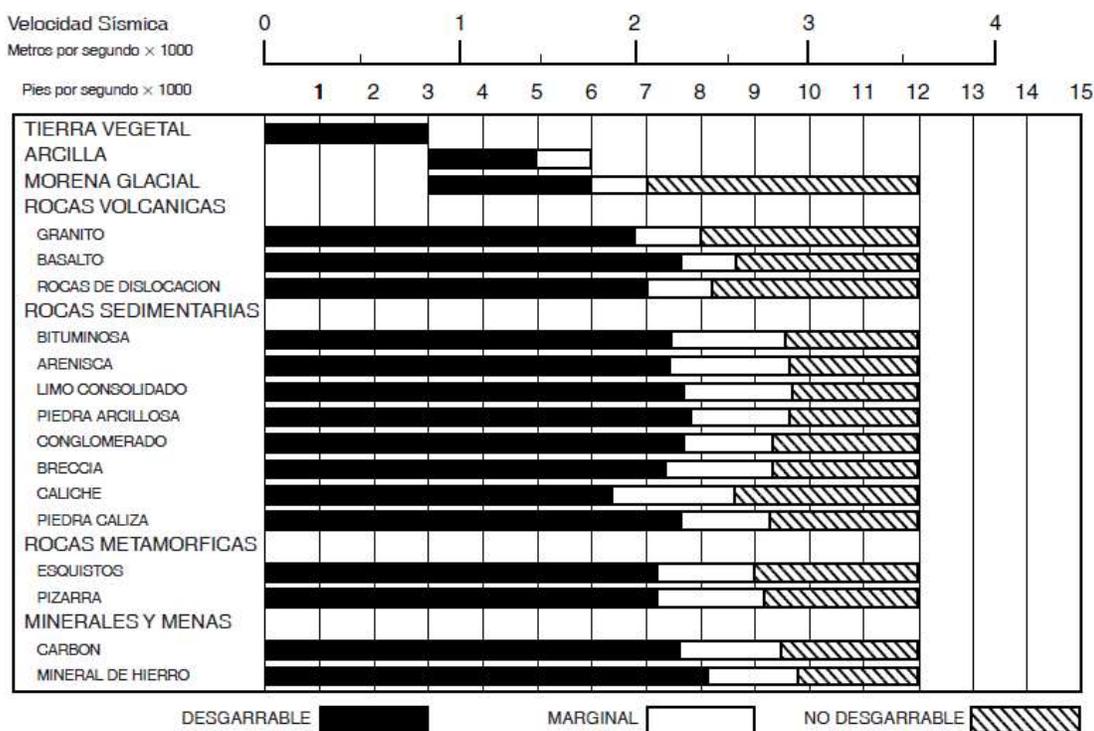


Figura 5.1. Diagrama de ripabilidad para tractores Caterpillar D9R, en función de la velocidad de propagación de ondas sísmicas para varios materiales. Fuente: Manual de rendimiento Caterpillar (Caterpillar, 2000).

Caterpillar ofrece como servicio la predicción de ripado pero advierte en su publicación que requiere de cierta información para realizar todo el proceso, al que llaman Investigación y Predicción de Desgarrabilidad (RIP, por sus siglas en inglés). En general, este método se divide en tres pasos:

1. Análisis de rocas: Requiere del envío de una muestra fresca, de mínimo 10"x10"x10", a los laboratorios de la empresa acompañada de información pertinente acerca del sitio.
2. Inspección del sitio: Personal de Caterpillar examina la formación rocosa en cuestión, en busca de características que faciliten el desempeño del tractor al realizar el arado .
3. Análisis sísmico: Firmas independientes utilizan el método de refracción sísmica (ver sección 4.1.1).

5.2 Método de Atkinson (1971)

Este método es de los más sencillos y se entiende, pues, para ese entonces, la exploración del tema era escasa, lo que ubica al autor como uno de los pioneros en el desarrollo del mismo. El concepto de sencillez que se asocia surge por involucrar únicamente la resistencia a la compresión axial de las rocas y suelos como parámetro de evaluación agregando, además, propuestas sobre el uso de varios tipos de maquinaria y equipo en función de dicho parámetro y de forma gráfica (ver tabla 5.1). Su principal limitante es la falta de consideración de otros parámetros, similar al método anterior, que a pesar de ser relevante esta resistencia en suelos y rocas, el autor deja fuera características que sus sucesores evaluarán.

5.3. Método de Franklin (1971)

El objetivo de Franklin junto a su equipo de investigación, (también pioneros) fue aprovechar los núcleos de roca para evaluar características de ésta mediante técnicas simples, como la prueba de carga puntual, que no requieren de instalaciones ni equipo sofisticado en campo aunque no se descarta recurrir a laboratorios cuando las exigencias sean superiores. El autor menciona la necesidad por llevar registros geológicos y mecánicos por separado, enfocándose a la presentación de los primeros en forma de índices pues sirven como guía para los primeros.

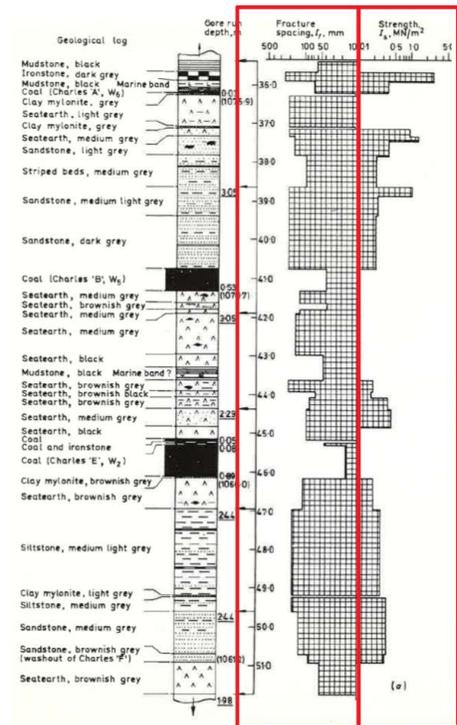
Tabla 5.1. Elección de maquinaria en función de la resistencia a la compresión simple según Atkinson. Fuente: Diseño y ejecución de obras subterráneas (Pérez, 2016).

	Código	Descripción	Resistencia a la compresión	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 100px; height: 10px; background-color: black; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="width: 100px; height: 10px; border: 1px solid black; margin-bottom: 2px;"></div> </div> R: Roca S: Suelo cohesivo G: Suelo granular Aplicación posible Uso marginal														
				Roto. Peq.	Roto. Grd.	Mototr. s/ripado	Mototr. c/ripado	Dragalina peq.	Dragalina grd.	Pala cargadora	Excavadora	D.Cort. Succión						
ocas	R7	Roca extremadamente resistente	≥ 200															
	R6	Muy resistente	200 - 100															
	R5	Resistente	100 - 50															
	R4	Moderadamente resistente	50 - 12.5															
	R3	Roca moderadamente débil	12.5 - 5.5															
	R2	Débil	5.5 - 1.25															
	R1	Muy débil	1.25 - 0.6															
Suelo	C4 - G4	Duro (cementación débil)	0.6 - 0.15															
	C3 - G3	Firme (compacto)	0.15 - 0.08															
	C2 - G2	Blando (suelto)	0.08 - 0.04															
	C1 - G1	Muy blando (suelto)	< 0.04															

Nota: En dragalinas, palas y excavadoras, voladura requerida para materiales resistentes en zona marginal

Acerca del registro geológico, éste es básicamente cualitativo e incluye nombre de la roca, grado de alteración, estructura, descripción de discontinuidades, color y tamaño de grano o textura de la roca. Entonces se propone el empleo del índice de espaciado entre fracturas, I_f , el cual se refiere al tamaño promedio del núcleo del material perteneciente a alguna unidad geológica reconocible.

Figura 5.2. Registro geotécnico de núcleos provenientes de Inglaterra. Fuente: Logging the character of rock (Franklin, 1971).



Éste debe ir acompañado de un histograma que muestre la variación de cada intervalo (ver figura 5.2). Mediante un dispositivo de medición de carga puntual

portátil desarrollado en el Colegio Británico, Inglaterra, se obtuvo la fuerza P , con la cual se provoca la falla de un espécimen en campo y la distancia D entre dos placas de dimensiones estándar. Con los valores anteriores se calcula el índice de resistencia bajo carga puntual, I_s , de la forma P/D^2 . Una vez conocidos ambos índices es posible consultar el diagrama de clasificación mostrado en la figura 5.3a donde el eje de las abscisas representa al índice I_s mientras que el de las ordenadas I_f .

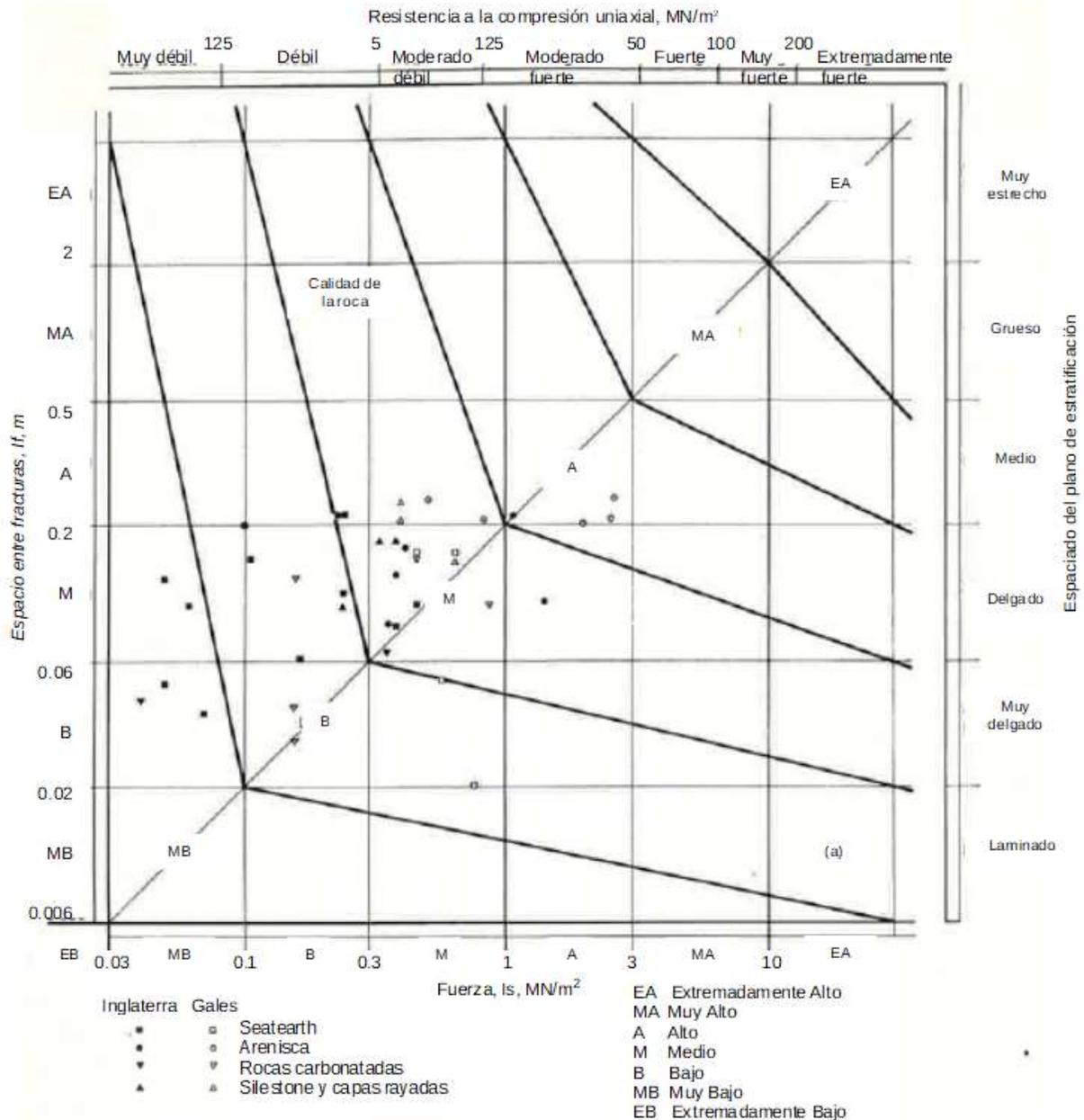


Figura 5.3. a) Diagramas de clasificación de calidad de la roca para propósitos generales (la subdivisión mostrada en la parte superior derecha del diagrama, se refiere a sugerencias emitidas por la Sociedad Geológica de Londres). Fuente: Traducción de *Logging the character of rock* (Franklin, 1971).

Sin embargo, la interpretación del resultado hace referencia a la calidad de la roca estudiada por lo que se incluyeron otros dos gráfico más prácticos. El primero de ellos está pensado para conocer la calidad de la roca cuando ésta cumple la función de agregado en obras de caminos (ver figura 5.3b), mientras que el segundo se ve enriquecido por la experiencia en campo y relaciona cuatro zonas distintas donde cada una representa el método adecuado para tratar el macizo rocoso de interés (figura 5.3c).

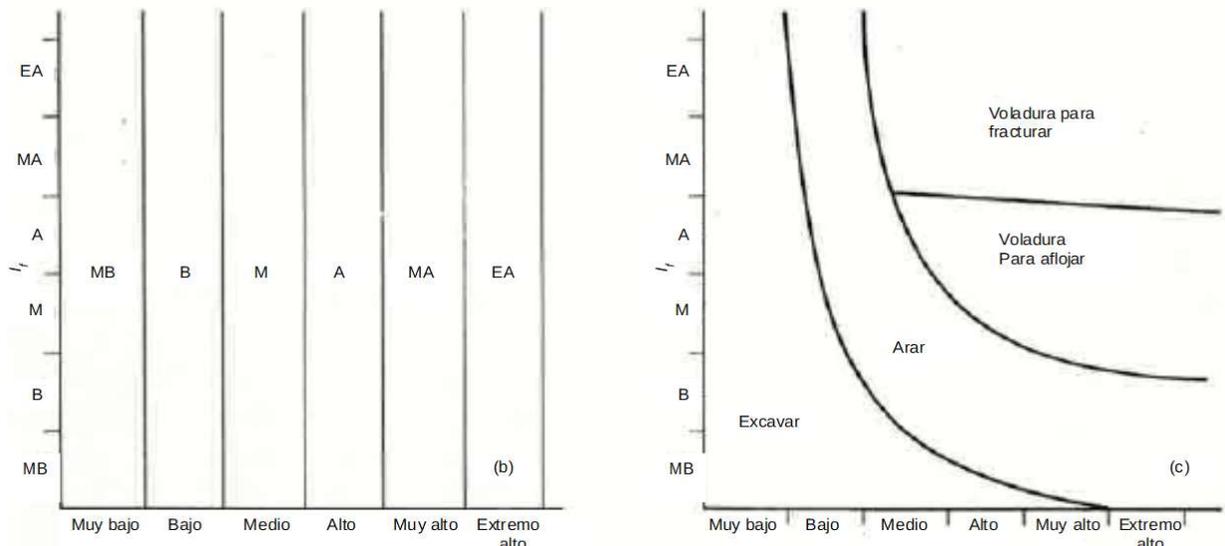


Figura 5.3. Continuación: b) y c) Métodos alternativos de las subdivisiones (ver texto). Fuente: Traducción de *Logging the character of rock* (Franklin, 1971).

5.4. Método de Weaver (1975)

El trabajo en equipo entre ingenieros, civiles o mineros, y geólogos constituye la base de la evaluación para determinar el método y costo de la excavación. Para ello, mediante varios casos de estudio realizados en Sudáfrica, el autor identifica inicialmente en su estudio seis factores geológicos que influyen en la evaluación de la ripabilidad:

1. Tipo de roca. De acuerdo a su origen, pueden ser ígneas, sedimentarias o metamórficas, descritas en la sección 2.2.
2. Velocidad de ondas sísmicas: Ya que la velocidad a la que viajan las ondas provocadas por impactos inducidos al terreno (refracción sísmica) depende de la densidad y grado de compactación de cada material que forma los estratos del subsuelo, se aprovecha esta propiedad de forma semejante a la clasificación que Caterpillar emplea para indicar el equipo necesario así como el método de excavación (ver figura 5.1).

3. Dureza de la roca: El autor realiza inspección visual en campo siguiendo el procedimiento que describen Jennings y Robertson, que es similar a la escala de consistencia de los suelos. En la tabla 5.2 se muestran la velocidad sísmica y las características de excavación (suponiendo un tractor pesado) para diferentes categorías de durezas.

Tabla 5.2. Dureza de rocas y características de excavación. Fuente: Traducción de *Geological factors significant in the assessment of rippability* (Weaver J., 1975).

Descripción de la dureza de roca	Criterio de identificación	Resistencia a la compresión sin confinamiento, MPa	Velocidad de onda sísmica m/s	Características de la excavación
Roca muy suave	El material se quiebra bajo golpes firmes con pico geológico, cuyo acabado es filoso; puede ser rayado con un cuchillo. Demasiado difícil obtener una muestra para prueba triaxial. SPT se negará. Fragmentos hasta de 3 cm de espesor pueden romperse mediante presión con los dedos.	1.7 – 3.0	450 – 1200	Ripado fácil
Roca suave	Solo puede ser rayado con cuchillo; pequeños cortes entre 1 y 3 mm mostrados en el espécimen por golpes firmes de pico; sonido grave al ser martillado.	3.0 – 10.0	1200 – 1500	Ripado difícil
Roca dura	No puede ser rayado con cuchillo; espécimen manual puede romperse con un solo golpe firme; sonido agudo al ser martillado.	10.0 – 20.0	1500 – 1850	Ripado muy difícil
Roca muy dura	Especimen manual se rompe con pico después de más de un golpe; sonido agudo al ser martillado.	20.0 – 70.0	1850 – 2150	Ripado extremadamente difícil o voladura
Roca extremadamente dura	Especimen requiere muchos golpes con pico geológico para atravesar material intacto; sonido agudo al ser martillado.	> 70.0	> 2150	Voladura

Tabla 5.3. Clasificación del espaciado de las juntas. Fuente: Traducción de *Geological factors significant in the assessment of rippability* (Weaver, 1975).

Descripción	Espaciado de las juntas, mm	Consistencia del macizo rocoso	Características de la excavación
Muy cercanas	>50	Triturada/Fragmentada	Ripado fácil
Cercanas	50 – 300	Fracturada	Ripado difícil
Moderadamente cercanas	300 – 1000	Bloques/plegada	Ripado muy difícil
Separadas	1000 – 3000	Masiva	Ripado extremadamente difícil y voladura
Muy separadas	>3000	Sólido/Ruidoso	Voladura

Nota: * Tractor-riper con masa de trabajo entre 45 y 49.5 toneladas, motor entre 280 y 360 kW.

4. Alteración de la roca: Cuanto mayor sea ésta también lo será la facilidad de ripado. Los casos con especial resistencia a este efecto son aquellas formaciones de rocas ígneas

(basaltos, dolerita, diabasa, gabro, norita) y rocas sedimentarias (dolomías, calizas, tilita, y arenisca).

5. Estructura de la roca: La presencia de discontinuidades reduce la resistencia al esfuerzo cortante del macizo rocoso, de ahí la importancia por conocer las características de las mismas. Espaciado (tabla 5.3), orientación de la dirección y buzamiento, continuidad y relleno son las más relevantes.

Cabe resaltar un caso en específico cuando existen capas de rocas granulares gruesas entre matrices de roca dura (superior) y suelo (inferior) por lo que en vez de obtener velocidades de ondas sísmicas del orden de 3600 m/s y 1220 m/s, respectivamente, se encontraría un promedio de 1830 m/s (ver figura 5.4) por lo cual es necesario recurrir a la tabla 5.4 para ajustar el valor de la velocidad de ondas sísmicas de acuerdo a una variación por rangos incluyendo las características de la excavación.

Tabla 5.4. Rangos de velocidad para ripado con tractor pesado. Fuente: Traducción de Geological factors significant in the assessment of rippability (Weaver, 1975).

Características de la excavación	Velocidad para perfil normalmente alterado	Velocidad para situación de grava gruesa
Ripado fácil	450 – 1200	450 – 900
Ripado difícil	1200 – 1500	900 – 1200
Ripado muy difícil	1500 – 1850	1200 – 1500/1850
Ripado extremadamente difícil o voladura	1850 – 2150	1500 – 1850
Voladura	>2150	> 1850

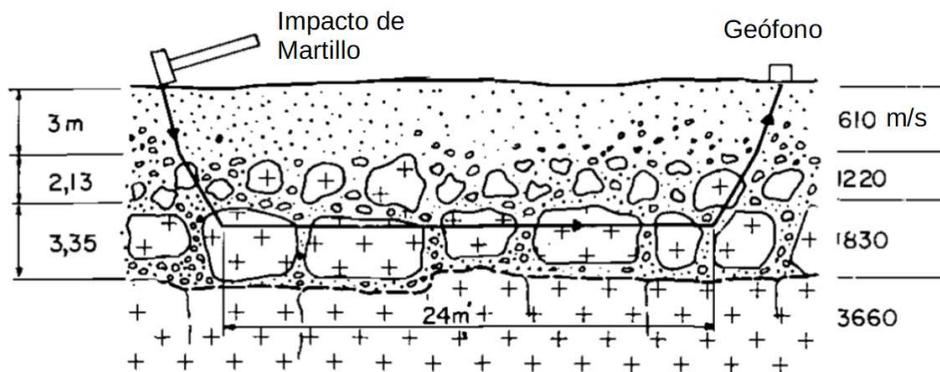


Figura 5.4. Grava gruesa que requiere explosivos es vista en un 88% de la matriz de granos ripables descompuestos; la roca madre es moderadamente cerrada; formación discontinua. Fuente: Traducción de Geological factors significant in the assessment of rippability (Weaver, 1975).

6. Fábrica de la roca: De forma empírica, se puede generalizar que las rocas granulares gruesas con gran tamaño de grano (> 5 mm), como carbón y conglomerados, pueden ser más fácilmente aradas que rocas de grano fino (<1 mm) como basaltos o dolomitas. Además, rocas ígneas básicas tenderán a presentar velocidad de ondas sísmicas mayor que aquellas rocas ígneas ácidas, debido a las características de los feldespatos que las componen.

Tabla 5.5. Sistema de valoración usado por Weaver (1975). Fuente: Traducción de *Geological factors significant in the assessment of ripability* (Weaver J., 1975).

Clase de roca	I	II	III	IV	V
Descripción	Roca muy buena	Roca buena	Roca media	Roca mala	Roca muy mala
Velocidad de onda sísmica (m/s)	> 2150	2150 - 1850	1850 - 1500	1500 - 1200	1200 - 450
Valoración	26	24	20	12	5
Dureza	En extremo dura	Muy dura	Dura	Blanda	Muy blanda
Valoración	10	6	2	1	0
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Alterada	Muy alterada	Completamente alterada
Valoración	8	7	6	3	1
Espaciado entre juntas (mm)	> 3000	3000 - 1000	1000 - 300	300 - 60	< 60
Valoración	30	26	20	10	6
Continuidad de juntas	Discontinua	Poco continuas	Continuas sin relleno	Continuas con algún relleno	Continua con relleno
Valoración	5	5	3	0	0
Relleno en juntas	Sin separación	Algo separadas	Separadas < 1 mm	Con relleno < 5mm	Con relleno > 5mm
Valoración	5	5	4	3	1
* Orientación de la dirección y buzamiento	Muy desfavorable	Desfavorable	Poco desfavorable	Favorable	Muy favorable
Valoración	15	13	10	5	3
Valoración total	100 - 90	90 - 70 **	70 - 50	50 - 25	< 25
Valoración de la arabilidad	Voladura	Extremadamente difícil	Muy difícil	Difícil	Fácil
Selección del tractor	-	DD9G / D9G	D9 / D8	D8 / D7	D7
Potencia (HP)	-	770 / 385	385 / 270	270 / 180	180
KiloWatts	-	575 / 290	290 / 200	200 / 135	125

Notas: * Orientación de la dirección y buzamiento originales ahora revisados para evaluación de ripabilidad.

** Valoración que exceda 75 debe ser revisada como no ripable sin prevoladura.

Por último, la tabla 5.5 muestra los parámetros que se emplean en un sistema de valoración donde a cada uno le corresponde un porcentaje de participación. Nótese que para tal caso, se emplean 7 parámetros y no 6, como se planteó al principio, ya que se basa en el sistema de clasificación propuesto por Bieniawski, pero considerando a rocas identificadas con

calidad pobre, serán más fáciles de ripar, por lo que dicho sistema se ajusta con los aspectos geológicos que se incluyen en el sistema de valoración propuesto por Weaver.

5.5. Método de Kirsten (1982)

Kirsten reconoce que la velocidad de ondas sísmicas no es un factor determinante para realizar cualquier tipo de clasificación puesto que comparó la correlación de los parámetros involucrados en el método de Weaver con respecto a las mediciones hechas en campo. Para el autor, la excavabilidad del material se puede interpretar a través de un índice que depende de varios parámetros:

$$N = M_s \cdot \frac{RQD}{J_n} \cdot J_s \cdot \frac{J_r}{J_a}$$

donde:

N = Índice de excavabilidad.

M_s = Factor de resistencia o consistencia

RQD = Índice de calidad

J_n = Índice por grupos de juntas

J_s = Factor de estructura relativa al terreno

J_r = Índice de rugosidad, relleno y continuidad de las discontinuidades

J_a = Índice por alteración de las juntas

Tal como está dispuesta la ecuación anterior, se puede observar que hay variables con relación más estrecha por lo que resulta sencillo agruparlas en 4 factores:

Factor de resistencia o consistencia, M_s : Las variables de *fuerza, densidad, contenido de agua y velocidad de ondas sísmicas* están muy relacionadas puesto que al variar alguno de estos también lo hacen el resto. Existe una escala de cinco puntos para clasificar la consistencia de los suelos de acuerdo a su tamaño, la cual Kirsten resumió para fines prácticos (ver tabla 5.6). Dicha tabla incluye valores para suelos cohesivos, rocas y detritos, aclarando que estos fueron tomados tanto por Lambe y Whitman como por el propio autor.

Factor de tamaño del bloque, RQD/J_n : El segundo término corresponde al grupo del *tamaño del bloque* y la *forma de excavación relativa al equipo utilizado*, los cuales se interpretan en

conjunto como la libertad de movimiento que dicho bloque presenta ante los efectos derivados de la excavación.

Tabla 5.6. Obtención de la carga del macizo debida a carga axial y densidad en estado seco. Fuente: Traducción de A classification system for excavation in natural materials (Kirsten, 1982).

Tipo de material	Consistencia	Carga uniaxial promedio	Peso volumétrico en estado seco típico	Coefficiente de densidad relativa	Factor de carga del macizo promedio
Granular / suelo cohesivo	Muy suelto / muy blando	0.035	14.0	0.52	0.02
	Suelto / blando	0.069	15.4	0.57	0.04
	Densidad media / firme	0.14	17.0	0.63	0.09
	Denso / rígido	0.28	18.4	0.68	0.19
	Muy denso / muy rígido	0.55	19.7	0.73	0.41
Detrito * Clástico * Sedimentos	Muy suelto	0.035	16.5	0.61	0.02
	Suelto	0.069	17.8	0.66	0.05
	Densidad media	0.14	19.2	0.71	0.10
	Denso	0.28	20.3	0.75	0.21
	Muy denso	0.55	21.3	0.79	0.44
Roca	Muy blanda (a)	1.1	21.3	0.79	0.87
	(b)	2.2	22.7	0.84	1.9
	Blanda (a)	4.4	24.0	0.89	4.0
	(b)	8.8	25.7	0.95	8.4
	Dura	17.7	27	1.00	17.7
	Muy dura (a)	35.4	27	1.00	35.0
	(b)	70.7	27	1.00	70.0
	Extremadamente dura (a)	141.3	27	1.00	140.0
	(b)	282.6	27	1.00	280.0

Tabla 5.7. Número de juntas, J_c . Fuente: Traducción de A classification system for excavation in natural materials (Kirsten, 1982).

Factor de juntas por cada metro cúbico (J_c)	Definición de calidad de la roca (RQD)	Factor de juntas por cada metro cúbico (J_c)	Definición de calidad de la roca (RQD)
33	5	18	55
32	10	17	60
30	15	15	65
29	20	14	70
27	25	12	75
26	30	11	80
24	35	9	85
23	40	8	90
21	45	6	95
20	50	5	100

Notas: En suelos agrietados, el número de juntas deben ser contadas.

Suelos granulares, gravas o detritus, $RQD = 100$

Materiales cementados, $RQD = 100$

Tabla 5.8. Número de estructura del terreno relativo (J_s). Fuente: Traducción de A classification system for excavation in natural materials (Kirsten, 1982).

Dirección ^[1] entre caras más profundas y estrechas dentro del grupo de juntas (grados)	Ángulo ^[2] del espacio más profundo y cercano dentro del grupo de juntas (grados)	Relación del espaciamiento de la junta, r			
		1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	90	1.00	1.00	1.00	1.00
0	85	0.72	0.67	0.62	0.56
0	80	0.63	0.57	0.50	0.45
0	70	0.52	0.45	0.41	0.38
0	60	0.49	0.44	0.41	0.37
0	50	0.49	0.46	0.43	0.40
0	40	0.53	0.49	0.46	0.44
0	30	0.63	0.59	0.55	0.53
0	20	0.84	0.77	0.71	0.68
0	10	1.22	1.10	0.99	0.93
0	5	1.33	1.20	1.09	1.03
0/180	0	1.00	1.00	1.00	1.00
180	5	0.72	0.81	0.88	0.90
180	10	0.63	0.70	0.76	0.81
180	20	0.52	0.57	0.63	0.67
180	30	0.49	0.53	0.57	0.59
180	40	0.49	0.52	0.54	0.56
180	50	0.53	0.56	0.58	0.60
180	60	0.63	0.67	0.71	0.73
180	70	0.84	0.91	0.97	1.01
180	80	1.22	1.32	1.40	1.46
180	85	1.33	1.39	1.45	1.50
180/0	90	1.00	1.00	1.00	1.00

- Notas:
1. Dirección entre caras más profundas y estrechas dentro del grupo de juntas relativo a la dirección de desgarre.
 2. Ángulo del espacio más profundo y cercano dentro del grupo de juntas en el plano vertical que contiene la dirección del escarificado.
 3. Para materiales intactos considerar $J_s = 1.0$
 4. Para valores de r menores que 0.125 considerar J_s así como $r = 0.125$.

El autor sugiere la obtención del valor RQD tal como lo propone Barton en su sistema de clasificación, apoyándose del uso de la fórmula empírica para la obtención de J_c (cuando de rocas se trate), pero en el caso de suelos se tomarán los valores mostrados en la tabla 5.7 para dicho cálculo. Cabe mencionar que únicamente las juntas que afectan el proceso de excavación deben ser tomadas. Respecto al término J_n , de nueva cuenta se recurren a los datos de Barton disponibles en el capítulo 2 (ver tabla 2.12).

Tabla 5.9. Factor de alteración de las juntas, J_a . Fuente: Traducción de A classification system for excavation in natural materials (Kirsten, 1982).

Descripción de la excavación	Factor de alteración de la junta (J_a) para la separación de juntas (mm)		
	< 1.0 ¹	1.0 – 5.0 ²	> 5.0 ³
Fuertemente sellado, duro, sin cambios en el relleno impermeable	0.75	-	-
Pared de juntas inalterada, superficie manchada	1.0	-	-
Roca mineral o roca con relleno fragmentado ligeramente alterada, sin variaciones y sin cohesión.	2.0	4.0	6.0
Sin variaciones, ligeramente arcilloso, relleno no cohesivo.	3.0	6.0	10.0
Arcilla con relleno mineral, con o sin roca fracturada, sin variaciones fuertemente sobre consolidada.	3.0 * ⁴	6.0*	10.0*
Recubrimiento de arcilla mineral con baja fricción y pequeñas cantidades de arcilla expansible.	4.0	8.0	13.0
Arcilla rellena de mineral con variación moderada y sobre consolidada, ya sea con o sin roca impactada	4.0	8.0*	13.0*
Terreno arcilloso fragmentada o micro-fragmentada (expansivo) con o sin roca impactada.	5.0	10.0*	18.0

Nota: 1 Las paredes de las juntas realmente en contacto.

2 Las paredes de las juntas entran en contacto después de aproximadamente a 100 mm del corte.

3 Las paredes de las juntas no entran en contacto en absoluto con el corte.

4 Valores con asterisco añadidos a los datos de Barton.

Factor de estructura relativa al terreno: La orientación relativa de la estructura del suelo y el espaciado de las características estructurales afectan el esfuerzo requerido para penetrar el suelo además del esfuerzo requerido para desprender bloques de manera individual por lo tanto será más sencillo arar el suelo en la dirección en la cual las juntas están orientadas en vez de la dirección contraria (ver tabla 5.8).

Factor de resistencia de las juntas: La rugosidad, profundidad y separación de juntas se relacionan entre sí, dando lugar al esfuerzo requerido para separar bloques de manera individual del material. Tal como ocurrió en el caso de J_n , el autor considera que los valores propuestos por Barton para J_r y J_a también son adecuados (ver capítulo 2, tablas 2.13 y 2.14, respectivamente) puesto que la función arco tangente entre estos últimos se aproxima bastante a la fuerza cortante que se espera de distintas combinaciones para estos parámetros. Como nota adicional, en el caso de J_a , el autor agrega algunos valores a los ya existentes por lo que se decidió añadir dichas modificaciones (ver tabla 5.9).

Por último, de acuerdo al Índice de Excavabilidad obtenido se podrá clasificar el material en alguna de las 8 categorías propuestas (ver tabla 5.10). Cabe mencionar que las primeras 4 categorías (con relación a roca), generalmente están asociadas en la industria a los tractores Caterpillar D7, D8, D9 y D10, respectivamente.

Tabla 5.10. Métodos de excavación en función del Índice de excavabilidad, N . Fuente: Traducción de A classification system for excavation in natural materials (Kirsten, 1982).

Tipo de material	Rango	Descripción de excavación
Suelo	< 0.001	Medios manuales: Pala
	$0.001 \leq N < 0.1$	Medios manuales: Pico y pala
	$0.01 \leq N < 1$	Herramientas mecánicas
Roca	$1 \leq N < 10$	Fácil arado
	$10 \leq N < 100$	Difícil arado
	$100 \leq N < 1,000$	Muy difícil arado
	$1,000 \leq N < 10,000$	Extremadamente difícil de arar/ Voladura
	$> 10,000$	Voladura

5.6. Método de Abdullatif y Cruden (1983)

Con datos obtenidos de 23 pruebas (que incluían la resistencia de material intacto, espaciado entre juntas así como su orientación y alteración), los autores compararon varios métodos y sistemas que agrupan la interacción entre varios parámetros, siendo estos: i) El método de Franklin, por la sencillez con que se pueden conocer los parámetros *in situ*, I_s e I_r ; ii) Sistema Q de Bartón; y iii) Sistema RMR de Biennawski.

Con los parámetros anteriores, los autores recurren a dos diagramas que corresponden al método de Franklin y la relación Q – RQD, mostradas en las figuras 5.5a y b, respectivamente.

Tal como se observa, los puntos marcados en la figura 5.5a se encuentran más dispersos en comparación con los mostrados en la 5.5b debido a la información implícita en cada caso pues considera más condiciones de campo. Además, aunque ambos representan los métodos recomendables para cada punto, dicha dispersión dificulta cualquier intento de clasificación en el primer caso mientras que en el segundo pueden establecerse fácilmente tres categorías: ante un *RMR* máximo de 30 se recomienda excavar el terreno, entre 30 y 60 ararlo, y mayores a 60 se debe implementar voladura.

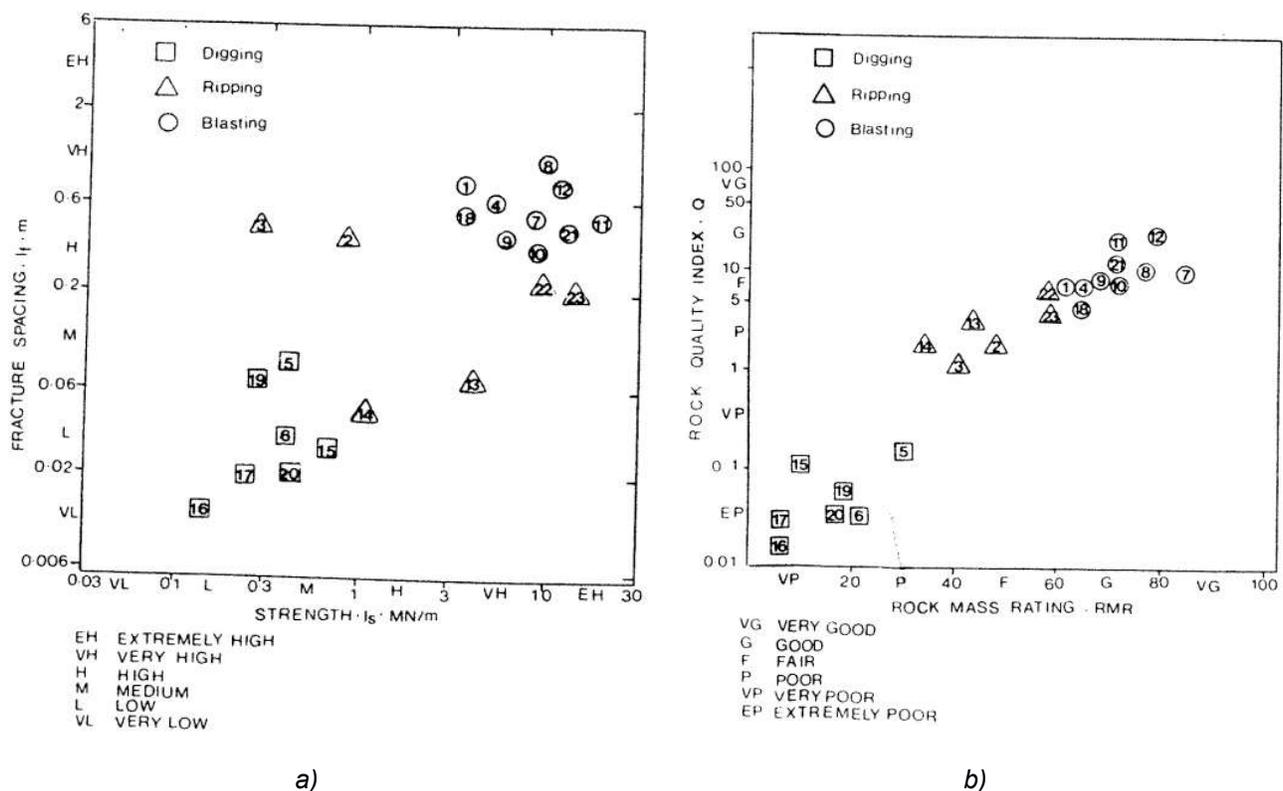


Figura 5.5 Diagrama de clasificación del método a emplear a) en función de I_s e I_f ; y b) en función de RMR y Q.
Fuente: *The relationship between rock mass quality and ease of excavation* (Abdullatif y Cruden, 1983).

De manera análoga, se puede recurrir a los valores de Q para determinar el método de excavación más adecuado, sin embargo, se presentan ciertas dificultades en valores hasta de 1.05, pues el mismo autor advierte una carencia de datos para establecer un rango bien definido entre excavación y arado. Ocurre algo similar entre los valores 3.2 y 5.2, ya que conviven muestras tanto de arado como de voladura.

5.7. Método de Scoble y Muftuoglu (1984)

Para los autores, el terreno se puede clasificar en 7 niveles de acuerdo a su excavabilidad (ver tabla 5.9) que va desde muy fácil hasta extremadamente difícil, así como una recomendación acerca de la maquinaria necesaria para tales trabajos, y para llegar a tales conclusiones, Scoble y Muftuoglu también definieron un Índice de Excavabilidad, aunque similar al sistema de clasificación de Weaver, este se diferencia por el número y tipo de parámetros empleados cuyos valores se muestran en la tabla 5.11:

$$IE = W + S + J + B$$

donde:

IE = Índice de Excavabilidad

W = Alteración por meteorización

S = Resistencia a la compresión simple

J = Separación entre juntas

B = Espesor de los estratos

El motivo por el que los autores tomaron en cuenta la alteración es que un valor elevado influye en una reducción notable en la resistencia del macizo rocoso. Respecto a los límites superiores de los parámetros S , J y B estos fueron obtenidos al considerar la variedad en el rendimiento de las distintas máquinas preferibles para estos trabajos.

Tabla 5.11. Sistema de valoración de los parámetros empleados en el método de Scoble y Muftuoglu. Fuente: *Diseño y ejecución de obras subterráneas (Pérez, 2016)*.

Parámetros	Clase de macizo				
	1	2	3	4	5
Alteración	Intensa	Alta	Moderada	Ligera	Nula
W	< 0	5	15	20	25
Resistencia de la roca [MPa]	< 20	20 - 40	40 - 60	60 - 100	> 100
S	0	10	15	20	25
Separación entre juntas [m]	0.3	0.3 – 0.6	0.6 – 1.5	1.5 - 2	> 2
J	5	15	30	45	50
Espesor de estratos [m]	< 0.1	0.1 – 0.3	0.3 - 0.6	0.6 – 1.5	> 1.5
B	0	5	10	20	30

Por otro lado, *W*, *S* y *B* pueden conocerse en campo o en laboratorio tal como ya ha sido explicado en capítulos anteriores. A pesar del rigor con el que es descrita su investigación (García G., 2004), esta presenta algunas limitaciones puesto que trata únicamente con maquinaria ignorando otros métodos como la voladura, así como considerar inicialmente un medio estratificado ignorando el caso homogéneo (ver tabla 5.12).

Tabla 5.12. Sistema de evaluación de la excavabilidad en función del Índice de Excavabilidad de acuerdo al método de Scoble y Muftuoglu. Fuente: Procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos (Hernandez, 2015)

Clase	Facilidad de excavación	Índice de excavabilidad	Equipo de excavación	Modelos de equipos empleados
1	Muy fácil	< 40	Tractores con ripper Dragalinas Excavadores	A. Tractor (Cat. D8) B. Dragalina > 5 m ³ (Lima 2400) C. Excavadora de cables > 3 m ³ (Ruston Bucyrus 71 RB)
2	Fácil	40 - 50		A. Tractor (Cat. D9) B. Dragalina > 8 m ³ (Marion 195) C. Excavadora de cables > 5 m ³ (Ruston Bucyrus 150 RB)
3	Moderadamente fácil	50 - 60	Dragalinas	A. Tractor - Excavadora - Pala B. Cargadora (Cat. D9) C. Excavadora hidráulica > 3 m ³ (Cat. 245)
4	Difícil	60 - 70	Excavadoras	A. Tractor - Excavadora - Pala Cargadora (Cat. 010) B. Excavadora hidráulica > 3 m ³ (Cat. 245 ó O&K RH40)
5	Muy difícil	70 - 95	Excavadora	Excavadora hidráulica > 3 m ³ (Cat. 245 ó O&K R1-140)
6	Extremadamente difícil	95 - 100		Demang H111 Excavadoras Poclain 1000 CK hidráulicas P & H 1200 > 7 m ³ RH75
7	Marginal sin voladura	> 100		Demang Demang O & KRH300 > 10 m ³

5.8. Método de Hadjigeorgiou y Scoble (1988)

Hadjigeorgiou y Scoble tomaron como base la investigación previa en la que Scoble trabajó, por lo que se recurre de nueva cuenta a un Índice de Excavabilidad. Aunque con cambios

notables respecto al anterior trabajo, así como un sistema de valoración para cada uno de estos, muy similar al de Scoble (ver tabla 5.13).

$$IE = (I_s + B_s) * W * J_s$$

donde:

IE = Índice de excavabilidad

I_s = Índice de resistencia bajo carga puntual

B_s = Índice de tamaño de bloque

W = Índice de alteración

J_s = Índice de disposición estructural relativa

Tabla 5.13. Sistema de evaluación del Índice de Excavabilidad de Hadjigeorgiou y Scoble. Fuente: Procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos (Hernandez, 2015).

Clase	1	2	3	4	5
Resistencia bajo carga puntual: I_s	0.5	0.5 - 0.2	1.5 - 2.0	2.0 - 3.5	> 3.5
Valoración (I_s)	0	10	15	20	25
Tamaño de bloque	Muy pequeño	Pequeño	Medio	Grande	Muy grande
J_v (Juntas/m ³)	30	10 - 30	3 - 10	1 - 3	1
Valoración (B_s)	5	15	30	45	50
Alteración	Completa	Alta	Moderada	Ligera	Nula
Valoración (W)	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Disposición estructural relativa	Muy favorable	Favorable	Ligeramente favorable	Desfavorable	Muy desfavorable
Valoración (J_s)	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5
Valoración IE	Muy fácil	Fácil	Difícil	Muy difícil	Voladura
Facilidad de excavación	< 20	20 - 30	30 - 45	45 - 55	> 55

De acuerdo a la ecuación anterior, los índices más influyentes son los relacionados a la resistencia bajo carga puntual y al tamaño de bloque del macizo rocoso porque condicionan la propagación de la rotura a través del material. Sin embargo, cuando éste último presenta alta alteración o meteorización y además la disposición de sus juntas (dirección y sentido) es similar respecto a los elementos con los que se ejecuta la labor, resulta ésta más fácil. La clasificación final se muestra en la tabla 5.14. Cabe mencionar que esta metodología es recomendable tanto en trabajos subterráneos como a cielo abierto.

Tabla 5.14. Clasificación del macizo rocoso según el Índice de Excavabilidad de Hadjigeorgiou y Scoble.
Fuente: Diseño y ejecución de obras subterráneas (Pérez, 2016).

<i>IE</i>	< 20	20 - 30	30 - 45	45 - 55	> 55
Facilidad de excavación	Muy fácil	Fácil	Difícil	Muy difícil	Voladura

5.9. Método de Singh (1989)

De manera análoga, Singh y sus colaboradores orientaron esfuerzos al desarrollo de un nuevo Índice de Ripabilidad (*IR*) cuyas aportaciones principales son la inclusión de la abrasividad como parámetro, debido a que ésta afecta la vida del desgarrador y su producción, además de la especificación de maquinaria en términos de peso y potencia. Si bien Weaver, proponía algo similar, Singh actualiza la tecnología propuesta (ver figura 5.15).

Tabla 5.15. Clasificación de Singh. Diseño y ejecución de obras subterráneas (Pérez, 2016).

Parámetros	Clases de macizos rocosos				
	1	2	3	4	5
Resistencia a tracción (MPa)	< 2	2 - 6	6 - 10	10 - 15	> 15
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
Grado de alteración	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo	Inalterado
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
Grado de abrasividad	Muy bajo	Bajo	Moderado	Ato	Extremo
Valoración	0 - 4	4 - 8	8 - 12	12 - 16	16 - 20
Espaciamiento entre discontinuidades (m)	< 0.06	0.06 – 0.3	0.31 - 1	1 - 2	> 2
Valoración	0 - 10	10 -20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
Valoración total	< 22	22- 44	44 - 66	66 - 88	> 88
Ripabilidad	Fácil	Moderado	Difícil	Marginal	Voladura
Tractor recomendado	Ninguno – Clase 1 Ligerio	Clase 2 Medio	Clase 3 Pesado	Clase 4 Muy pesado	Clase 5 -
Potencia (kW)	< 150	150 - 250	250 - 350	> 350	-
Peso (Ton)	< 25	25 - 35	35 - 55	> 55	-

Cabe aclarar que el autor se refiere al uso de tractores de orugas y no toma en cuenta tecnologías aplicadas al desgarrador, dado el estancamiento de su desarrollo en aquel entonces. Una vez más, el estudio presenta un sistema de valoración de varios parámetros que en esta ocasión corresponden a:

- Resistencia a tracción: Estimada a partir del índice de resistencia bajo de carga puntual o ensayo brasileño.
- Grado de alteración: Obtenido por inspección visual.
- Grado de abrasividad: Estimado por medio del Índice de Abrasividad, CERCHAR.
- Espaciamiento entre discontinuidades: Se requiere de registro lineal.

Tal como se observa en la tabla mencionada, se establecen 5 clasificaciones de ripabilidad (de igual forma, la maquinaria propuesta en 4) pero dicha consideración tiene el inconveniente de utilizar únicamente tractores oruga convencionales para el desarrollo de la investigación puesto que técnicas más modernas como el desgarrador de impactos aún no estaban tan extendidas en uso como lo es actualmente.

5.10. Método de Karpuz (1990)

Siete fueron las superficies estudiadas por el autor, con 284 muestras analizadas y posteriormente agrupadas en 78 unidades rocosas con propiedades compartidas, correspondientes a minas de lignito y pertenecientes a una compañía Turca, que aplicó este método debido a la relación del método con un modelo económico.

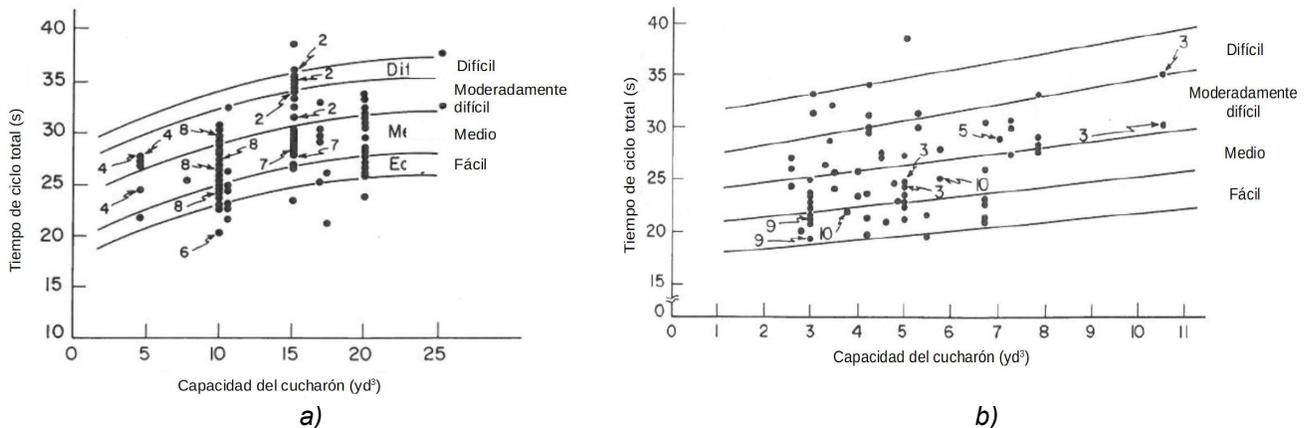


Figura 5.6. Correlación entre el tiempo total de ciclo y la capacidad del cucharón para a) excavadoras eléctricas; y b) a) excavadoras hidráulicas. Fuente: Traducción de *A classification system for excavation of surface coal measures* (Karpuz, 1990).

Además de estudiar distintas propiedades de la roca, tanto en campo como en laboratorio, se incluyeron aquellas relacionadas con excavadoras eléctricas e hidráulicas, tal es el caso del tiempo de ciclo, capacidad del cucharón, factor de llenado, experiencia del operador,

excavación con o sin explosivos, etc. Mediante correlaciones entre los dos primeros parámetros para los equipos antes mencionados (ver figuras 5.6a y 5.6b, respectivamente) el autor señala los casos donde resultó más o menos difícil excavar el terreno además de observar que, al emplear excavadoras hidráulicas, éstas incrementan su eficiencia hasta un 15% en terrenos de excavabilidad entre media y moderada cuando se acompañan con explosivos.

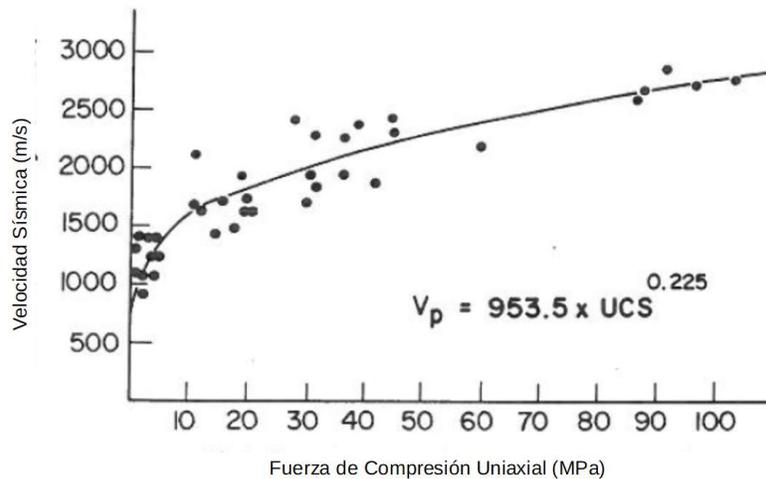


Figura 5.7. Relación entre velocidad de ondas sísmicas y resistencia a la compresión uniaxial. Fuente: Traducción de A classification system for excavation of surface coal measures (Karpuz, 1990).

Tabla 5.16. Parámetros usados para crear el índice de excavabilidad. Fuente: Traducción de A classification system for excavation of surface coal measures (Karpuz, 1990).

Parámetro	Clase				
	1	2	3	4	5
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	< 5	5 – 20	20. 40	40 – 110	> 110
$I_{s(50)}$ (MPa)	(0.2)	(0.2.9	(0.8 – 1.6)	(1.6 – 4.4)	(4.4)
Valoración	2	5	10	20	25
Espacio entre discontinuidades promedio (m)	< 0.3	0.3 – 0.6	0.6 – 1.2	1.2 – 2.0	> 2.0
Valoración	5	10	15	20	25
Velocidad de ondas sísmicas (m/s)	< 1600	1600 – 2000	2000 – 2500	2500 – 3000	> 3000
Valoración	5	10	15	20	25
Alteración	Completa	Alta	Moderada	Ligera – Fresca	Ligera – Fresca
Valoración	0	3	6	10	10
Dureza (SHV, Schmidt Hardness Value)	< 20	20 – 30	30 – 45	45 – 55	> 55
Valoración	3	5	8	12	15

Nota: El sistema de valoración es válido en presencia de láminas y dos grupos de juntas. Agregar al total: 5 puntos si hay una lámina y un grupo de juntas, 10 si hay láminas solamente, 15 si no hay discontinuidades apreciables.

Luego del análisis de toda la información recopilada, se eligieron 5 parámetros que varían de acuerdo a rangos y corresponden a una valoración particular que, al sumarse, dan lugar a un índice de excavabilidad (ver tabla 5.16); aunque el autor aclara, para el caso de la velocidad de ondas sísmicas, se puede recurrir a la gráfica y fórmula empírica de la figura 5.7. Obtenido el indicador mencionado, se recurre a un sistema de evaluación que incluye sugerencias en cuanto al uso de la maquinaria que se debe emplear, abarcando los casos donde se requiere el uso de voladura (ver tabla 5.17).

Tabla 5.17. Clasificación de excavabilidad. Fuente: Traducción de A classification system for excavation of surface coal measures, (Karpuz C, 1990).

Clase	Dificultad de excavación	Índice	Método de excavación			En caso de voladura	
			Excavación con pala eléctrica	Excavadora hidráulica ²	Arado, tipo de desgarrador	Tasa de perforación (m/min)	Carga específica (kg/m ³)
1	Fácil	0 – 25	Excavación	Excavación	Fácil D7	-	-
2	Media	25 – 45	Voladura	Excavación	Moderado a difícil D8 o D9	1.48	0.13 – 0.20
3	Moderadamente difícil	45 – 65	Voladura	Voladura	Difícil o muy difícil D9 o D11	1.28	0.20 – 0.28
4	Difícil	65 – 85	Voladura	Voladura	Marginal o no arable D11	0.57	0.28 – 0.35
5	Muy difícil	85 - 100	Voladura	Voladura	No arable (voladura)	< 0.42	> 0.35

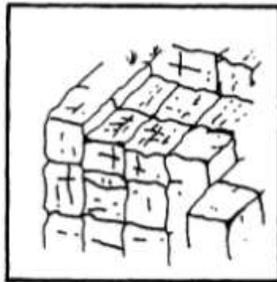
¹ Válido para pala eléctrica de 7.65 – 19.11 m³ (10-25 yd³) capacidad de cucharón.

² Válido para excavadoras hidráulicas con capacidad de cucharón menor a 8.03 m³ (10.5 yd³).

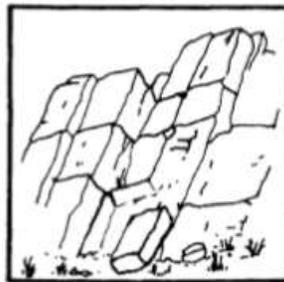
5.11. Método de Pettifer y Fookes (1994)

Los autores se inspiran del trabajo de Franklin (1971) para señalar las ventajas en campo que representa contar con un gráfico confiable pero reconocen que, desde ese primer intento de clasificación hasta el trabajo de Pettifer y Fookes, habían pasado más de 20 años por lo que había que actualizar los rangos que en aquel entonces se propusieron debido al avance tecnológico por parte de la maquinaria durante ese periodo de tiempo.

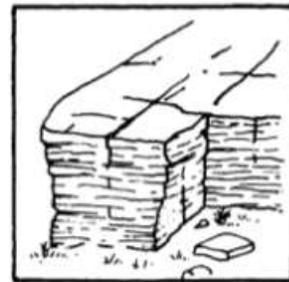
Con muestras obtenidas en África, Hong Kong y Reino Unido se analizaron propiedades como la resistencia, grado de alteración, espacio entre las discontinuidades y la orientación de las mismas. Los autores recomiendan aproximar la medición del espaciamiento (I_f) como tridimensional ya que pudieron identificar hasta 3 grupos principales, que definían las características del bloque en la mayoría de las zonas estructurales o dominios.



A. Bloque
[Aproximadamente equidimensional. Dimensión más larga no mayor que el doble de la más pequeña.]



B. Tabular
[Dimensión más pequeña mayor que 60 mm; otras dimensiones al menos del doble de la más pequeña.]



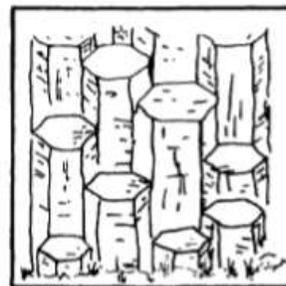
C. Estratificado
[Dimensión más pequeña entre 20 y 60 mm; otras dimensiones al menos del doble de la más pequeña.]



D. Pizarra
[Dimensión más pequeña menor que 20 mm; otras dimensiones al menos del doble de la más pequeña.]



E. Irregular
[Incluyendo piramidal]



F. Columna o alargado
[Dimensión más larga al menos del doble de cada uno de los otros]

Figura 5.8. Bosquejos ilustrando varios tipos de estructuras de macizos rocosos (después de CIRIA/CUR 1991).
Fuente: Traducción de *A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock* (Pettifer y Frookes, 1994).

El índice I_f puede ser expresado como frecuencia, número promedio de fracturas por metro, o de manera recíproca como el espacio promedio, en metros. De acuerdo a procedimientos del ISRM (1981), para el primer caso la manera de proceder empieza por expresar los datos de

espaciamiento individuales en forma de frecuencias, para luego obtener su promedio y terminar con su equivalencia en espaciamiento, al cual se refieren los autores como volumen unitario de la roca. Por otro lado, la segunda forma de expresión se obtiene simplemente con el promedio de los valores individuales de espaciamiento. Ambas formas de conocer este parámetro se muestran expresadas matemáticamente a continuación:

A partir de frecuencias

$$I_f = \frac{N}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}}$$

A partir de espaciamientos

$$I_f = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{N}$$

donde:

N = Número total de grupos

n = Número máximo de grupos

S_i = Espaciamiento individual modal.

Sin embargo, de acuerdo a una clasificación de formaciones rocosas que establecieron los autores, se advierte una importante limitación que presenta la primer fórmula ante bloques tipo tabulares o de columna (ver figura 5.8) ya que, al poseer dos dimensiones más largas que la restante, los valores llegan a ser increíblemente bajos.

Por lo tanto, se sugieren las siguientes recomendaciones que fueron acompañadas en su trabajo:

- Si la dimensión más larga es mayor que 2 (m), calcular I_f a partir de espaciamientos.
- Si la dimensión más larga está entre 0.6 y 2 (m), calcular I_f de ambas formas para entregar un rango que incluya ambos casos, los más favorables y desfavorables. Alternativamente, el promedio de los dos valores puede ser usado para representar un solo punto en la gráfica.
- Si la dimensión más larga es menor que 0.6 (m), calcular I_f a partir del volumen unitario base (frecuencias).

La resistencia de la roca intacta fue determinada en campo usando la prueba de carga puntual en muestras irregulares aunque corregidas posteriormente y expresados como

Índice de Carga Puntual Estandarizado, $I_{s(50)}$, de nueva cuenta, de acuerdo a procedimientos sugeridos por el ISRM (1985), donde, se menciona la existencia de una buena correlación entre el $I_{s(50)}$ y la Resistencia a la Compresión Uniaxial, y ya que ésta última es proporcional a la carga puntual entre 20 y 25 veces, los autores de éste método consideran la posibilidad de su uso pero con un factor de 20, luego de analizar sus propias muestras y las de autores contemporáneos a ellos.

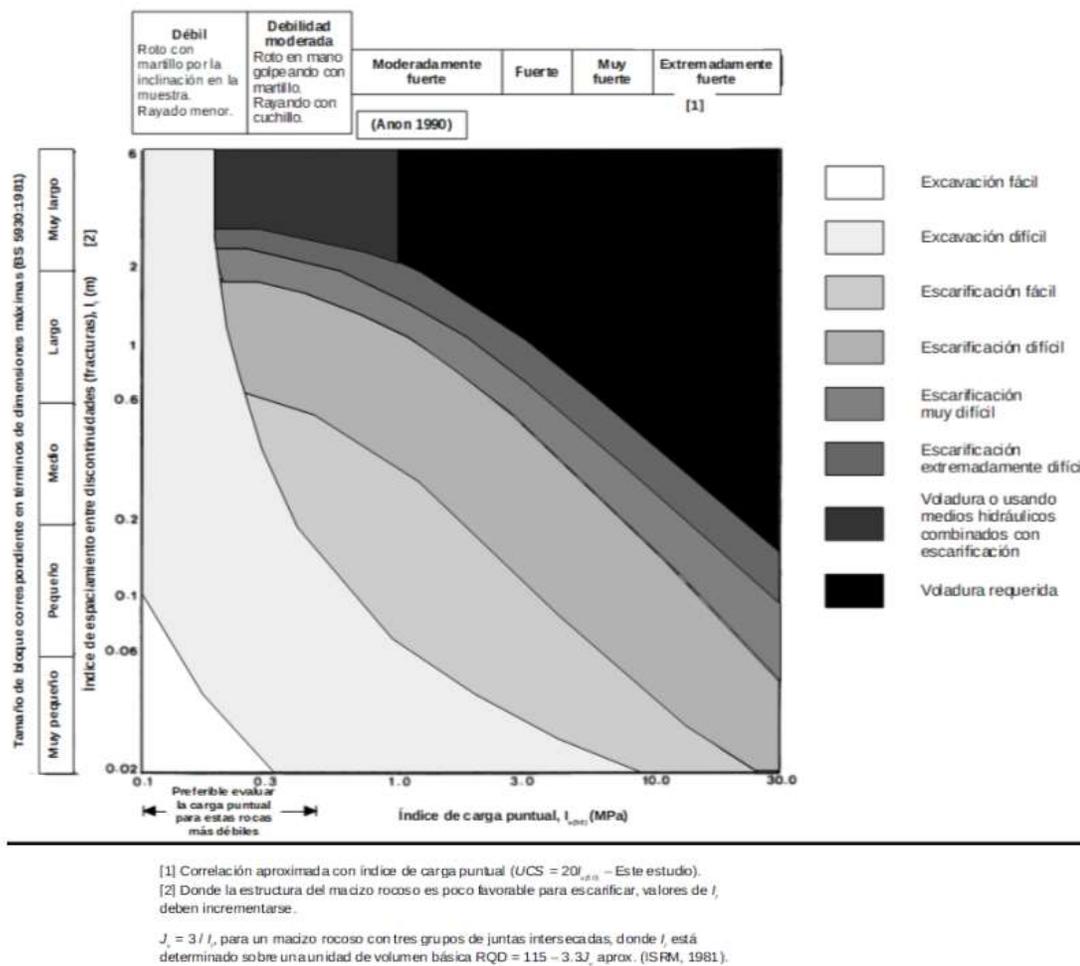


Figura 5.9. Gráfico revisado de excavabilidad Fuente: Traducción de "A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock" (Pettifer y Fookes, 1994). Edición propia.

Aún así, sugiere que, de ser posible, se establezca dicho factor de acuerdo a cada proyecto. Con la combinación de ambos parámetros definidos, I_f e $I_{s(50)}$, es posible acceder al gráfico mostrado en la figura 5.9, el cual corresponde a una modificación de aquel propuesto por Franklin. Por último, los autores hacen una serie de recomendaciones que se listan a continuación:

- Se omite aplicar correcciones por grado de alteración dado que ya están consideradas indirectamente por el tamaño de bloque o la resistencia.
- Basándose en su experiencia, los valores de I_f deben incrementarse entre 20 y 50% donde las condiciones estructurales sean desfavorables.
- Para macizos rocosos cuyo I_f sea menor que 10 (Mpa), la ecuación, para el área entre arado extremadamente difícil y voladura, sugiere que el macizo es adecuado para no ser arado cuando $I_f(m) \times I_s^{0.8}(\text{MPa}) > 2.6$. Una similar ecuación indica que los macizos dentro del rango superior pueden ser arados usando un tractor D9 si $I_f \times I_s^{0.8} < 1.8$.

5.12. Método de Romana (1993)

Romana Ruiz desarrolló una nueva clasificación con especial atención en la tecnología existente de aquel entonces, la cual perfeccionó para 1993, dándose así mayor difusión en el medio especializado. En un principio, la resistencia a la compresión uniaxial y el índice de calidad RQD eran la base para evaluar la excavabilidad.

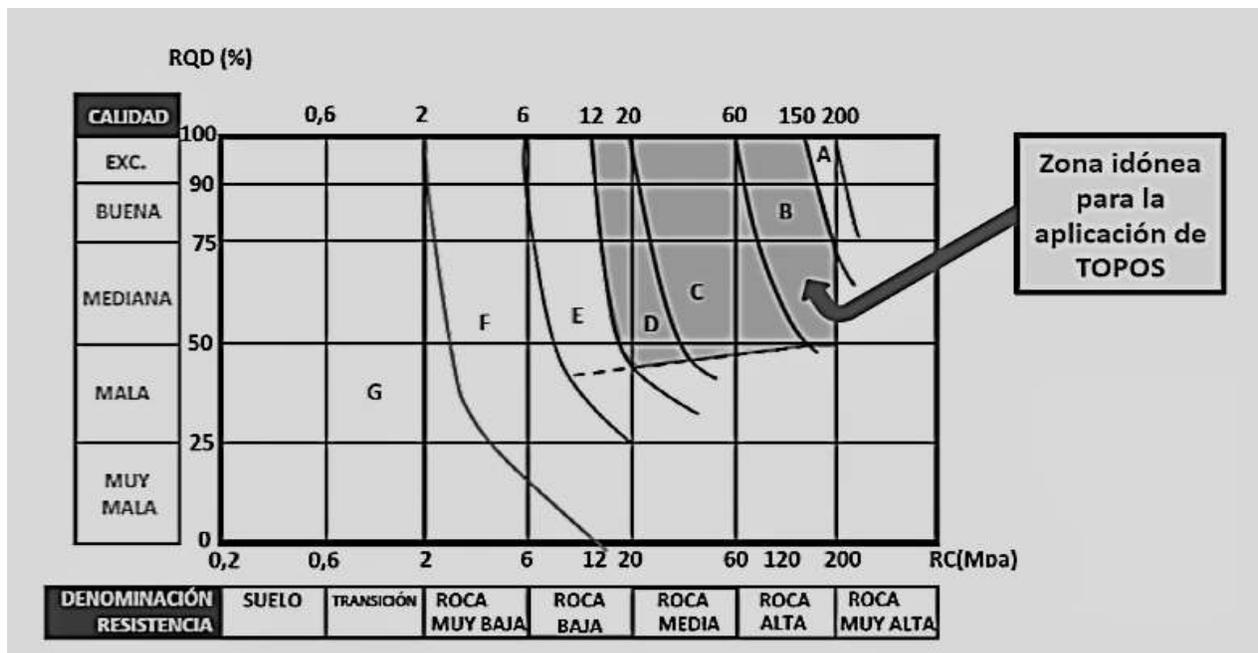


Figura 5.10. Clasificación de materiales en función del índice RQD y la Resistencia a la Compresión. Fuente: Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas (Pérez, 2016).

Tabla 5.14. Clasificación de los macizos rocosos respecto a la excavabilidad. Fuente: Diseño y ejecución de obras subterráneas (Pérez, 2016). Edición propia.

Zona	Tuneladora		Rozadora		Martillo	Pala
	> 25 [Ton]	< 25 Ton]	> 80 Ton]	50 - 80 [Ton]		
A	¿Posible?					
B	Adecuado	¿Posible?	¿Posible?			
C	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado		
D	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Posible	¿Posible?
E	Posible	Posible	Posible	Adecuado	Adecuado	Posible
F				Posible	Adecuado	Adecuado
G					Posible	¿Posible?

En la versión final del sistema (1993) el autor retomó los parámetros antes mencionados, que pueden ser conocidos parcialmente a partir de valores dados por la ISRM (ver tabla 5.19a) y por Deere (ver capítulo 2, tabla 2.3), respectivamente, además de un tercero que curiosamente, no incluye el tema de alteración o alguna característica sobre las juntas sino la abrasividad del macizo rocoso (ver tabla 5.19b) que para su fin, se apega a la determinación de ésta mediante otra característica denominada *contenido de cuarzo equivalente*. La clasificación final se muestra en forma gráfica (ver figura 5.10) y tabular (tabla 5.18).

Tabla 5.19. a) Escalas de resistencias de la matriz rocosa; y b) abrasividad. Fuente: Diseño y ejecución de obras subterráneas (Pérez, 2016). Edición propia.

R _c (MPa)	Material	Resistencia
< 0.6	Suelo	-
0.15 - 2	Transición	-
2 - 6	Roca	Muy baja
6 - 20	Roca	Baja
20 - 60	Roca	Media
60 - 200	Roca	Alta
> 200	Roca	Muy alta

(a)

Cuarzo Equivalente (%)	Viabilidad de la excavación mecánica
< 40	Viable económicamente
40 - 60	Posible. Los costos crecen con el contenido en cuarzo equivalente
60 - 80	Posible. Costos altos, rendimientos bajos
> 80	Inviabile económicamente

(b)

Adicionalmente, el autor ofrece flexibilidad en la aplicación de su método en función del tipo de trabajo a realizar utilizando tuneladoras y rozadoras.

Tabla 5.20. Escala de utilización de topos en roca compactada (RQD > 90%). Fuente: Análisis de factibilidad de excavación mecánica como alternativa al método convencional, túnel corral de piedras de la línea de metro “Las Adjuntas – Los Teques”. (García, 2004).

R _c (kg/cm ²)	Condiciones de excavación	F _n (Ton)
6 - 12	Posible. Problemas de apoyo	Cualquiera
12 - 20	Posible. Muy adecuado	Cualquiera
20 - 60	Posible. Muy adecuado	> 15
60 - 150	Posible. Problemas de empuje	> 25
150 - 200	¿Posible? Dificultad de corte	> 25
> 200	Inviabile	-

Tabla 5.21. Escala de utilización de topos en función de las necesidades de sostenimiento. Fuente: Análisis de factibilidad de excavación mecánica como alternativa al método convencional, túnel corral de piedras de la línea de metro “Las Adjuntas – Los Teques”. (García, 2004).

RMR		RQD	Condiciones de utilización de tuneladoras sin escudo en función del sostenimiento
Valor	Clase		
80 - 100	I	> 90	Excelente. Rendimientos récord
60 - 80	II	70 - 90	Buenos. Rendimientos altos
50 - 60	III a	50 - 70	Adecuados. Rendimientos reducidos
40 - 50	III b	40 - 50	Poco adecuados
20 - 40	IV	25 - 40	Tolerables sólo en tramos muy cortos
0 - 20	V	< 25	Totalmente inadecuados

Tabla 5.22. Escala de utilización de la rozadoras en roca compacta (RQD > 90%). Fuente: Análisis de factibilidad de excavación mecánica como alternativa al método convencional, túnel corral de piedras de la línea de metro “Las Adjuntas – Los Teques”. (García, 2004).

R _c (kg/cm ²)	Condiciones de excavación	Peso de rozadoras (Ton)		
		30 - 50	50 - 80	> 80
2 - 6	Problemas de apoyo	Adecuado	Posible	-
6 - 12	Problemas de apoyo	Adecuado	Adecuado	Posible
12 - 20	Normales	Posible	Adecuado	Adecuado
20 - 60	Normales	-	Adecuado	Adecuado
60 - 120	Inviabile económicamente	-	-	¿Posible?
> 120	Imposible	-	-	-

Respecto a las primeras, cuando se presenta roca compacta con un índice RQD > 90%, se debe recurrir a la información mostrada en la tabla 5.20, mientras que para estabilidad de taludes, añade una categoría para tuneladoras sin escudo, donde el rendimiento es función del valor RMR (ver tabla 5.21). Por otro lado, el caso de aplicación de rozadoras en roca compacta se ajusta a las necesidades de acuerdo a su peso y la resistencia que el material presente (ver tabla 5.22). Cabe destacar que el autor exige prudencia para el uso y aplicación de su método.

5.13. Método de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes

En México, existen normas orientadas a la legislación, proyección, construcción, conservación y operación de carreteras así como referentes a las características de los materiales empleados desde muestreo y pruebas necesarias hasta control y aseguramiento de calidad para los mismos,¹³.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT, emite la normativa mencionada y periódicamente se someten a revisión varios de sus capítulos. Para las fases de planeación y diseño, se cuenta con una publicación llamada “Manual para Proyecto Geométrico de Carreteras”, que en su edición 2016, el capítulo VII: Ejecución del Proyecto de Terracerías, se refiere al empleo de métodos que pueden emplearse y que responden a la denominación, según la publicación, de la siguiente forma:

- Método directo: Muestreo en cortes o terraplenes hasta de 7 metros de altura (ver tabla 5.23). Nótese que el tipo de muestras varía en función de la etapa de exploración.
- Método indirecto: Exploración mediante algún método geofísico cuando se presenten cortes de altura mayor a 7 metros, cuya pertinencia queda a juicio de la Secretaría. La profundidad de la exploración debe ser tal que se supere el espesor de los suelos meteorizados superficiales y se llegue a la capa de los materiales de los cuales dependen las condiciones de estabilidad. Para el caso de la exploración sísmica, se añaden recomendaciones. Respecto al espaciamiento entre los puntos de exploración la misma Secretaría lo debe fijar, en caso contrario se toman 500 metros máximo.

¹³ Para cada una de las mencionadas etapas, existen normas publicadas por el Instituto Mexicano de Transporte; aunque en la sección de “Referencias” solo se mencionan las relacionadas con excavabilidad.

Tabla 5.23 Descripción de las distintas etapas de exploración, tipo de prueba, tipo de muestra y dimensiones de las mismas. Fuente: Manual para Proyecto Geométrico de Carreteras (SCT, 2016).

Etapas de la exploración	Tipo de prueba que se puede realizar	Tipo de muestra	Cantidad o tamaño de la muestra
Reconocimiento exploratorio	Clasificación visual Contenido de agua Límites de plasticidad	Representativa	Muestras de posteadora, barrenos o de penetrómetros. También por pozos a cielo abierto o zanjas.
Exploración detallada	Límites de plasticidad Análisis granulométrico Peso específico relativo	Representativa	Alrededor de 1 dm ³ Alrededor de 50 kg. Alrededor de 1 dm ³
Pruebas menores	Contenido de agua Peso específico	Representativa, bien sellada	Se consideran adecuadas las muestras de 5 cm de diámetro aun cuando se aceptan ligeramente mayores. En pozos a cielo abierto se extraen muestras del orden de 30 cm de lado.
	Compresión simple Prueba directa de esfuerzo cortante	Inalterada	Para pruebas de esfuerzo cortante son deseables muestras de 10 cm de diámetro.
Exploración detallada	Permeabilidad Consolidación Compresión triaxial	Inalterada	Ocasionalmente muestras de 5 cm de diámetro, pero resultan más convenientes las de 10 y aun de 15 cm de diámetro
Pruebas mayores	Compresión múltiple; pruebas directas; pruebas especiales de esfuerzo cortante	Inalterada	Muestras de 10 cm de diámetro como mínimo; de preferencia de 15 cm de diámetro. En pozos a cielo abierto, muestras cúbicas de 30 o 40 cm de lado.

Ya que el método empleado suele ser el sísmico, la tabla 5.24 incluye una clasificación en función de la velocidad de propagación de ondas sísmicas para diferentes materiales donde se atiende su arabilidad tomando como base la velocidad de propagación de ondas sísmicas. Cabe aclarar que para la Secretaría, el término *arable* significa que el material puede atacarse con pala mecánica, escropa, entre otros, El término *intermedio* se refiere a aquellos casos en que se hace un uso limitado de explosivos, sea con fines de romper o aflojar una capa que después resulta arable o para disgregar fragmentos de tamaño muy grande. La palabra *explosivos* se aplica en aquellos casos en que el material ha de obtenerse con dicho medio.

En la tabla 5.25 se muestra un resumen de tal clasificación, expuesta en las normas para proyecto y construcción de carreteras, en su edición de 1984, donde se incluyen algunas

descripciones y métodos de extracción de tres materiales. Para representar el tipo de material en volúmenes de corte se utilizan porcentajes ordenados de manera alfabética. Siempre se indicarán los tres casos como se muestra a continuación y en la figura 5.11.

[A – B – C]

Sin embargo, en la práctica también es común encontrar material que no corresponde exclusivamente a un solo tipo, por lo que deberán considerarse los siguientes casos:

Tabla 5.24. Determinación de la arabilidad para varios materiales en función de la velocidad de propagación de ondas. Fuente: Manual para Proyecto Geométrico de Carreteras (SCT, 2016).

Material	Condición	Velocidad (km/s)	Arabilidad
Limos y arenas	Compactos	0.4 – 0.7	Arable
	Sueltos	0.2 – 0.4	Arable
Arcillas	Dura	0.6 – 1.0	Arable
	Blanda	0.2 – 0.3	Arable
Boleos y gravas		0.2 – 0.4	Arable
Granito	Sano	4.5 – 6.0	Explosivos
	Poco fracturado	1.5 – 4.5	Explosivos
	Muy fracturado	0.7 – 1.8	Explosivos
	Alterado	0.4 – 1.0	Explosivos o intermedio
Riolita y andesita	Poco fracturadas	3.8 – 5.0	Explosivos
	Muy fracturadas	1.5 – 3.8	Explosivos
	Alteradas	0.9 – 1.5	Arable
Basaltos	Sano	5.0 – 6.0	Explosivos
	Poco fracturados	1.4 – 5.0	Explosivos
	Muy fracturados	0.7 – 1.4	Explosivos
	Alterados	0.5 – 0.7	Intermedio o arable
Tobas	Sanas	1.4 – 1.8	Intermedio
	Poco fracturadas	1.2 – 1.6	Intermedio
	Muy fracturadas	0.4 – 1.2	Arable
	Alteradas	0.3 – 0.7	Arable
Calizas		1.5 – 4.0	Explosivos
Arenisca		0.8 – 2.5	Explosivos
		0.6 – 0.8	Arable
Aglomerados		0.2 – 0.9	Arable
Conglomerados		1.0 – 3.0	Generalmente explosivos
Lutita	Dura	1.2 – 4.0	Explosivos
	Blanda	0.6 – 1.4	Arable

a) Cuando haya material intermedio entre dos categorías, se expresará, de forma porcentual, es decir, si presenta mayor dificultad de extracción para un tipo pero no lo suficiente para considerarse parte de la próxima categoría la manera de representarlo será de acuerdo a la figura 5.12.

b) Cuando el volumen de corte presente los tres tipos de material y éstos se encuentren claramente divididos entre sí (por ejemplo, en forma de capas), se clasificarán, primero, por separado y después se asignarán porcentajes en función del volumen que representen en conjunto (ver figura 5.13).

c) Cuando la clasificación por separado sea imposible, se tendrá una clasificación representativa, considerando siempre los tres materiales (A, B y C).

Una nota adicional sobre el Material C cuando se encuentre en capas junto con otros materiales con dificultad de extracción menor pero éste represente un 75% del volumen total, se considera al conjunto como Material C. Sin embargo, en caso de poder emplear el procedimiento adecuado para extraer cada material por separado y aunque se tenga 75% del Material C, en la clasificación general se considerarán los tres tipos, tal como el caso b).

Tabla 5.25. Clasificación para materiales de corte de acuerdo a la SCT. Fuente: Libro 3 Normas para construcción e instalaciones, Parte 3.01 Carreteras y aeropistas, Título 3.01.01 Terrecerías, SCT. Elaboración propia.

Tipo de material	Descripción y materiales comunes	Material y equipo	Dimensiones
A	Blando o suelto. Poco cementados. Suelos agrícolas, limos y arenas.	Motoescropa de 90 a 110 HP sin auxilio de arados o tractores que empujen.	Partículas menores a 7.6 cm (3")
B	Rocas muy alteradas, conglomerados medianamente cementados, areniscas blandas y tepetates.	Tractor de orugas con cuchilla de inclinación variable, de 140 a 160 HP, sin el uso de arado o explosivos. Éstos últimos suelen usarse para aumentar la eficiencia.	Piedras sueltas entre 7.6 cm y 75 cm (3")
C	Rocas basálticas, areniscas y conglomerados fuertemente cementados, calizas, riolitas, granitos y andesitas sanas.	Únicamente mediante el empleo de explosivos	Piedras sueltas mayores a 75 cm

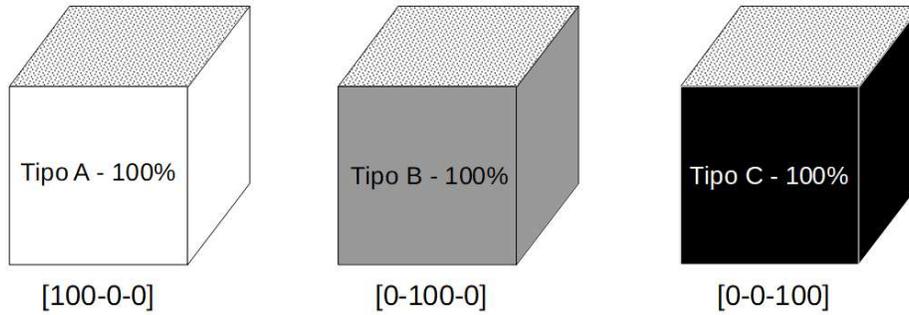


Figura 5.11. Diagrama que representa la clasificación de los diferentes tipos de materiales de corte. Fuente: Elaboración propia.

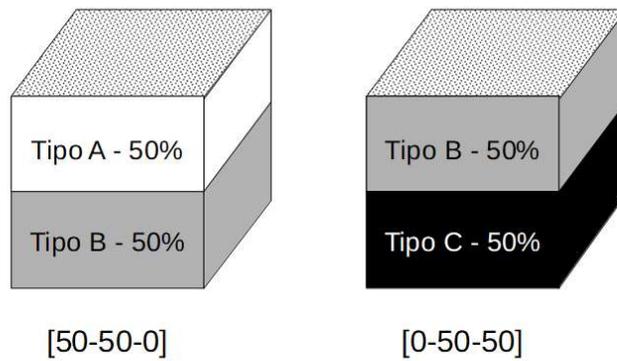


Figura 5.12. Diagrama que ejemplifica el caso de material intermedio. Fuente: Elaboración propia.

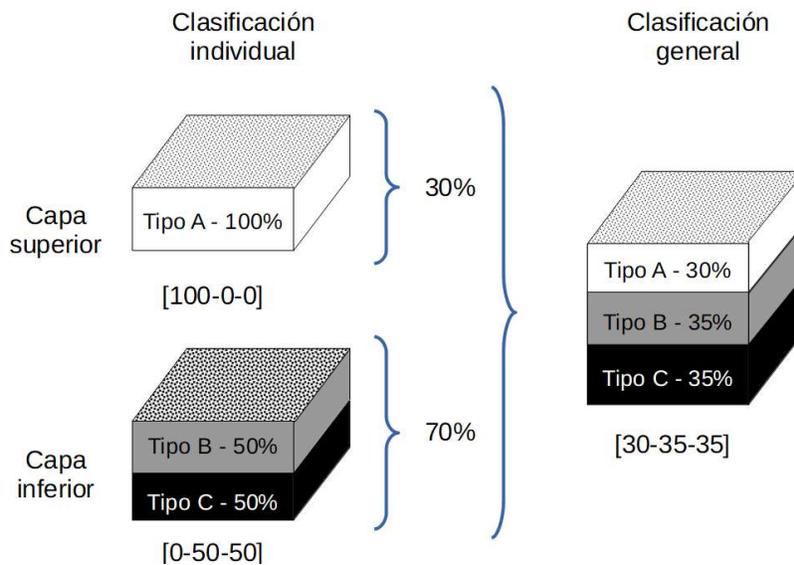


Figura 5.13. Diagrama que representa el proceso para clasificar volúmenes de cortes que presentan los tres tipos de material. Fuente: Elaboración propia.

5.14. Análisis de los métodos expuestos

Si bien, existe una respetable variedad en cuanto a los métodos para clasificar los materiales del terreno a partir de su excavabilidad, sería precipitado asumir que sólo uno cuenta con la verdad absoluta, puesto que tal aseveración ignoraría el contexto y las limitaciones de cada método descrito en las secciones previas además de inflexibilidad ante el refinamiento de cada uno de ellos o aportaciones por parte de las próximas generaciones. En la tabla 5.26 se muestra de forma general un resumen (complemento en algún que otro caso particular) de los métodos ya expuestos.

Tabla 5.26. Cuadro resumen de los métodos expuesto para determinar la excavabilidad de los materiales.
Fuente: Elaboración propia.

Método	Descripción general	Parámetros de decisión	Exploración	Muestra
RIP (Caterpillar)	Desarrollado en 1958. Método numérico. Inclusión de equipo y/o maquinaria. Aplicación en proyectos carreteros y mineros.	Velocidad de ondas sísmicas, V .	Método de refracción sísmica.	Determinación de propiedades en laboratorio. Trabajo con rocas y suelos. Muestra fresca, de mínimo 10"x10"x10"
Atkinson	Desarrollado en 1971. Método gráfico. Asociación con equipo y/o maquinaria.	Resistencia a la compresión uniaxial, RCU .	No aplica	Trabajo con rocas y suelos.
Franklin	Desarrollado en 1971. Método gráfico. Asociación con equipo y/o maquinaria. Aplicación en proyectos carreteros, estabilidad de taludes.	Índice de espaciado entre fracturas, I_f . Índice de resistencia bajo carga puntual, I_s .	Acceso a registros geológicos y mecánicos.	Determinación de propiedades principalmente en campo. El uso de laboratorio se deja en caso de exigencias superiores.
Weaver	Desarrollado en 1975. Sistema de valoración numérica. Asociación con equipo y/o maquinaria. Adaptación del sistema de Bieniawsky. Primero en incluir más de dos parámetros en la evaluación.	Velocidad de onda sísmica. Dureza de roca. Alteración de roca. Espaciado entre juntas. Continuidad de juntas. Relleno. Orientación de la dirección y buzamiento.	Método de refracción sísmica. Mapas geológicos y fotografías aéreas.	Las muestras son propias de Sudáfrica. Determinación de propiedades en campo de manera visual (siguiendo lo indicado por Bieniawsky).

Tabla 5.26. Continuación.

Método	Descripción general	Parámetros de decisión	Exploración	Muestra
Kirsten	Desarrollado en 1982. Método analítico. Sistema de valoración numérica. Asociación con equipo y/o maquinaria. Análogo al sistema de clasificación noruego para la estabilidad y soporte de túneles. Primero en incluir parámetros relacionados con las discontinuidades.	Índice de excavabilidad, N . Factor de carga o de consistencia, M_s . Índice de calidad, RQD . Índice por grupos de juntas, J_n . Índice de rugosidad, relleno y continuidad de las discontinuidades, J_r . Índice por alteración de las juntas, J_a . Factor de estructura relativa al terreno, J_s .	No aplica	Determinación de propiedades en campo ya sea mediante inspección visual o pruebas rigurosas estandarizadas.
Abdullatif Cruden	Desarrollado en 1983. Método gráfico. Aplicado en canteras. Se basa en las propuestas de Franklin, Bieniawski y Barton. Dificultad para establecer límites claros.	Índice de espaciado entre fracturas, I_f . Índice de resistencia bajo carga puntual, I_s . Índice de calidad RQD . Índice de calidad Q .	Técnica de mapeo con fotografías compuestas por tomas de cada macizo rocoso y aéreas de canteras.	Muestras provenientes de Inglaterra. Determinación de propiedades en campo mediante inspección visual y pruebas estandarizadas. Lo anterior se complementa con los datos proveídos por el Engineering Group Working Party.
Scoble y Muftuoglu	Desarrollado en 1984. Método analítico. Sistema de valoración numérica (basado en el de Weaver). Siete niveles en función de su excavabilidad, asociándolos con la maquinaria requerida pero ignora voladura. Aplicación en minas cuando el medio está estratificado. Dificultad para establecer límites en su escala.	Alteración por meteorización, W . Resistencia a la compresión simple, S . Separación entre juntas, J Espesor de los estratos, B .	Excavaciones subterráneas Sondeos geofísicos.	Análisis de 10 muestras. Determinación de propiedades en campo o en laboratorio mediante pruebas estandarizadas.
Hadjigeorgiou y Scoble	Desarrollado en 1988. Sistema de valoración numérica (basado en el trabajo anterior de Scoble). No asocia ningún tipo de maquinaria ni equipo.	Índice de resistencia bajo carga puntual, I_s . Índice de tamaño de bloque, B_s . Índice de alteración, W Índice de disposición estructural relativa, J_s .	Excavaciones subterráneas y a cielo abierto.	Determinación de propiedades en campo mediante inspección visual y pruebas de laboratorio.

Tabla 5.26. Continuación

Método	Descripción general	Parámetros de decisión	Exploración	Muestra
Singh	Desarrollado en 1989. Aplicación en carreteras. Asociación únicamente con tractores de oruga sin equipamiento. Primero en incluir la abrasividad del macizo rocoso.	Resistencia a la tracción. Grado de alteración. Grado de abrasividad. Espaciamiento entre discontinuidades.	No aplica	Muestras provenientes de Gran Bretaña y Turquía. Determinación de propiedades en campo mediante inspección visual y pruebas de laboratorio.
Karpuz	Desarrollado en 1990. Método analítico. Aplicación en minas. Primero en incluir parámetros relacionados con el rendimiento de la maquinaria. Asociación con equipo y/o maquinaria.	Resistencia a la compresión uniaxial, $I_{s(50)}$. Espacio entre discontinuidades promedio. Velocidad de ondas sísmicas, V_p . Alteración. Dureza (<i>SHV</i> , Schmidt Hardness Value).	Empleado método de refracción sísmica.	284 muestras que provienen de minas turcas agrupadas para su análisis en 78. Principalmente rocas marga, algunos conglomerados, toba volcánica y caliza. Determinación de propiedades en campo, mediante inspección visual, y laboratorio, basándose en pruebas sugeridas por la ISRM.
Pettifer y Fookes	Desarrollado en 1994. Método gráfico basado en el de Franklin. Asociación con equipo y/o maquinaria.	Índice de espaciado entre fracturas, I_f . Índice de resistencia bajo carga puntual, I_s .	Acceso a registros geológicos y mecánicos.	Muestras obtenidas en África, Hong Kong y Reino Unido. Determinación de propiedades en campo, mediante inspección visual, y laboratorio., basándose en pruebas sugeridas por el ISRM.
Romana	Desarrollado en 1993. Aplicación en túneles y estabilización de taludes. Asociación con tuneladoras, rozadoras, martillos y palas.	Índice de Calidad, <i>RQD</i> . Resistencia a la compresión uniaxial, R_c . Abrasividad (en función del contenido de cuarzo).	No aplica	Determinación de propiedades mediante pruebas de laboratorio.
SCT	Publicación más reciente corresponde al año 2016 por la Dirección General de Servicios Técnicos. Aplicación en carreteras.	En caso de emplear el método sísmico en la fase de exploración, el parámetro de decisión es la velocidad de ondas sísmicas.	Principalmente mediante el método sísmico con sondeos a cada 500 metros aunque se puede emplear cualquier otro método geofísico autorizado por la SCT. Se aplica cuando la altura de corte supera los 7 metros. Pozos a cielo abierto.	Muestras en corte y terraplén hasta de 7 metros de altura. Puede ser representativa o inalterada Determinación de propiedades mediante pruebas de laboratorio. Para la clasificación por tipo A, B y C, el ingeniero geotecnista se encarga de esta labor.

Tal como se observa, el orden cronológico en que dichos métodos se han expuesto, permite apreciar una evolución en los mismos, pero más importante aún, varios de éstos se pueden agrupar de acuerdo a los parámetros y consideraciones con que cada uno fue pensado. Desde esta perspectiva, se tienen tres enfoques principales, cuyas premisas iniciales fueron heredadas en subsecuentes propuestas, eso sí, sin alcanzar la exclusión sino la inclusión entre sí al momento de su aplicación.

Dentro del primer enfoque se encuentran aquellos que consideran a la velocidad de propagación ondas sísmicas como la base de su análisis, siendo la compañía Caterpillar (1958) pionera en esta línea de investigación. La principal crítica sobre únicamente emplear la velocidad de ondas sísmicas es que no se pueden inferir otras características más relevantes, como el grado de alteración. Inclusive, a grandes profundidades, causa confusión la detección de ondas puesto que hay estratos inferiores cuyos espesores son menores a 1/3 de los superiores además de que existen materiales con velocidades de onda muy similares que podrían considerarse como arables cuando no lo son, por ejemplo, podría confundirse arenisca con granito, eso sin mencionar que para el caso de Caterpillar los cuadros propuestos suelen ser más optimistas, llegando a clasificar de esta forma a los materiales no ripables como si lo fueran (McGragor et al, 1994) (ver figura 5.1). Cabe mencionar que en el caso de México, la SCT se ha apegado a este enfoque dada su practicidad.

El segundo enfoque se basa en el empleo de gráficos para obtener referencias rápidas mediante parámetros que pueden ser obtenidos al realizarse pruebas sencillas en campo y el primero en proponerlo, Franklin et al (1971), relaciona la carga puntual con el espaciamiento entre discontinuidades y dicha relación resulta la piedra angular de quienes adoptaron este enfoque. Aunque Abdullatif y Cruden (1983) al retomar el planteamiento de Franklin y compararlo con la relación entre los índices *RQD-Q*, ya apuntaban insuficiencias de la relación carga-espaciamiento respecto a su propuesta pero no fue sino hasta que Pettifer y Fookes (1994) reajustaron y actualizaron los datos, límites y clasificación original al considerar muestras de varios lugares del planeta, dando así pie a un método que no se apega a un tipo de material (sea suelo o roca) sino al que prevalece en el terreno. Una versión basada en el índice *RQD*, resistencia y abrasividad (enfocado a trabajos de túneles) es destacada por Romana que, de cierta forma, podría incluirse en el tercer y último enfoque.

Luego del trabajo de Franklin, Weaver (1975), al seguir trabajando con la velocidad de ondas sísmicas, reconoce las carencias que de ello resulta como evaluación de la excavabilidad, por lo que, basándose en el sistema *RMR* de Bieniawski (1973), propone otros parámetros que dan lugar a un tercer enfoque basado en sistemas de valoración donde a cada parámetro que se mide de forma cuantitativa o cualitativa se le asigna un porcentaje de participación. Las nuevas características incluyen características de la roca (dureza y alteración) así como otras tantas de sus juntas (espaciado, continuidad, relleno y orientación) en un esfuerzo por combinar las bondades de los primeros dos enfoques. Más tarde, Kirsten (1982), Scoble y Muftuoglu (1984), Hadjigeorgiou y Scoble (1988), Singh (1989) y Karpuz (1990) trabajaron sobre la misma línea, proponiendo un índice de excavabilidad o de ripabilidad además de asignar, con mayor precisión, la selección de maquinaria.

En general, los tres enfoques descritos coinciden en que la aplicación de cada método se debe asumir como una aproximación y no una precisión dadas las peculiaridades de cada proyecto y cada terreno, principalmente, por la variedad e irregularidad con la que la naturaleza suele hacerse presente.

6. Maquinaria y equipo para excavación

Tal como se mostró en el capítulo anterior, varios son los métodos que relacionan la excavabilidad del material con la maquinaria y equipo óptimos, por lo que este capítulo muestra las características más generales de aquellos mencionados y, en algunos casos, el proceder con los mismos.

6.1. Tractores

En la Industria de la construcción, principalmente en las actividades de excavación, se puede considerar que el tractor es una máquina que casi siempre estará presente en este tipo de trabajos por su versatilidad, ya que el movimiento de tierras se realiza a través de tres actividades principales, como son: excavar, acarrear y colocar los materiales que han sido atacados en su estado natural (Chavárri, M., 2007). También llamados dozers, son máquinas con una hoja acoplada en el frente para empujar material además de convertir la energía mecánica, producto de su motor, en energía de tracción con la que son capaces de realizar los trabajos antes descritos.

Clasificación por su medio de movimiento

De forma genérica, se puede clasificar en dos tipos de acuerdo al mecanismo en el que se basa su desplazamiento por el terreno (ver figura 6.1). Por un lado, los que utilizan orugas son máquinas que trabajan a tracción mediante bandas especiales con las que se desplaza, lo que resulta en una disminución en la fuerza de la que dispone para trabajar debido, principalmente, a dos factores asociados con este mecanismo: alto coeficiente de fricción y el peso que soportan las ruedas.

Un aspecto importante a destacar es el conocimiento previo del terreno en el cual serán utilizados, ya que en suelos blandos se recomiendan tractores con configuración Low Ground Pressure, (LGP, por sus siglas en inglés) y dada la presión que ejercen, evitan el estancamiento en el lugar, aunque estos mismos se deben evitar en suelos duros o rocosos pues se reduciría su vida útil frente a condiciones para las cuales no está optimizado. Sin embargo, para cualquier situación donde se requieran trabajos con gran esfuerzo tractivo sin duda son la mejor opción.



Figura 6.1. Tractores a base de orugas (izquierda) y a base de neumáticos (derecha). Fuentes: Komatsu, Caterpillar

De manera contraria, los tractores que operan a base de neumáticos presentan una clara desventaja frente a los del tipo ya explicado cuando se trata de desempeño en trabajos de empuje, ya que dicha competencia se ve mermada a cambio de mayor movilidad pues sus cuatro llantas son suficientes para alcanzar velocidades hasta de 30 mph (48.2 km/h), en algunos modelos. Otro punto a considerar es que los neumáticos presentan una importante desventaja en algunas superficies, pues, se corre el riesgo de que alguno gire sin desplazarse y por lo tanto reducir considerablemente el esfuerzo que aporta al trabajo para el cual es seleccionado. Independientemente del tipo de mecanismo con el que se mueven, los tractores cuentan con una amplia gama de aditamentos que facilitan sus tareas asignadas pero a continuación se explicará aquel que permite a la máquina realizar trabajos de escarificación.

Desgarrador o Riper

Los tractores a base de orugas pueden ser equipados con desgarradores los cuales son delgados, con punta afilada y fabricados para aprovechar tanto la potencia como la fuerza de tracción (debida al gran peso de aquellos) al perforar el terreno hasta cierta profundidad para empujarlo, causando el rompimiento del suelo o roca. Éstos a su vez cuentan con piezas que ayudan a cumplir su labor de forma eficiente, como protectores del mismo diente y puntas ajustables, cuando se requieren. Se pueden identificar tres tipos de desgarradores:

- Desgarrador en paralelogramo ajustable: El operador puede ajustar el ángulo de la punta del desgarrador en función del tipo de material con la finalidad de mejorar la

penetración a cualquier profundidad de desgarramiento, lo que aumenta la producción. (ver figura 6.2a).

- *Desgarrador en paralelogramo fijo:* Permite la conexión entre la viga y el diente para mantener un cierto ángulo entre la punta y el suelo esencialmente constante e independientemente de la profundidad del diente. Este tipo de desgarrador tiene ventajas sobre el desgarrador radial cuando el escarificado ocurre por encima de la profundidad máxima, pero no provee el ángulo agresivo que el diente necesita para materiales difíciles de penetrar (ver figura 6.2b).

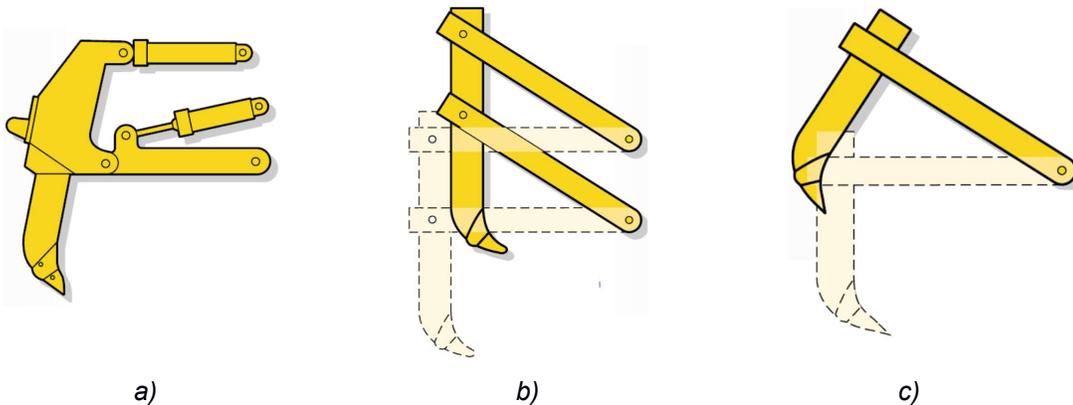


Figura 6.2. Tipos de desgarradores: a) paralelogramo ajustable; b) paralelogramo fijo; c) radial.
Fuente: Handbook of ripping (Caterpillar).

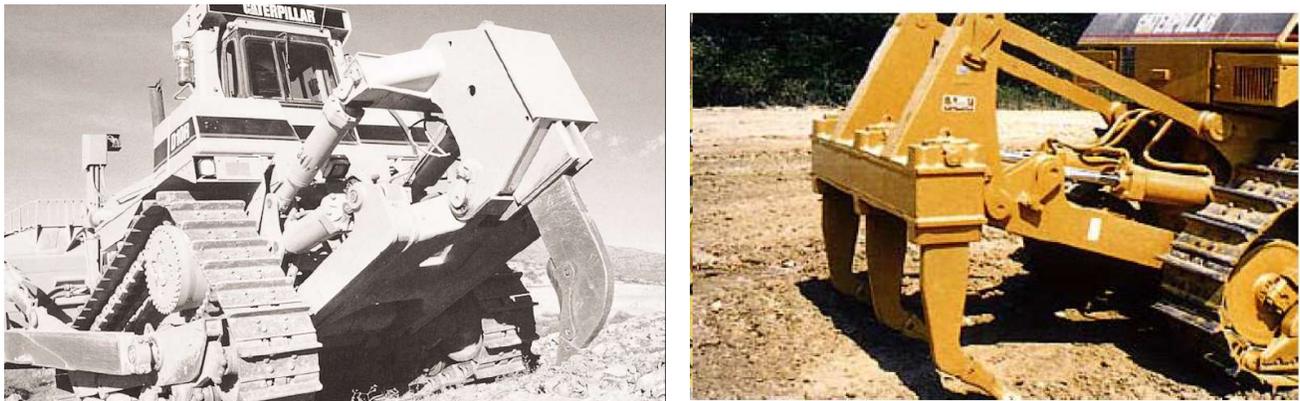


Figura 6.3. Distintos arreglos de desgarradores: de un sólo diente (izquierda) y multidiente (derecha).

- *Desgarrador radial:* La conexión entre la viga y el diente gira alrededor de un punto fijo de la parte trasera del tractor. Mientras el diente perfora el suelo y penetra a la máxima profundidad, el ángulo de la punta cambia constantemente. Dicho ángulo entra de

forma agresiva pero no puede ser ajustado para compensar condiciones variables del terreno (ver figura 6.2c).

Cabe aclarar que todos los tractores grandes, al menos los que ofrece Caterpillar, usan el primero de los desgarradores descritos, ya sea mediante el arreglo de un solo diente o multidiente (ver figura 6.3) y ante ambas opciones surge la pregunta ¿cuándo usar alguna de las dos opciones? Los modelos de un solo diente son fabricados para trabajos de arado más difíciles donde penetración y profundidad máximas son requeridas. Por otro lado, el arreglo de multidientes aceptará hasta tres dientes, usados sobre materiales fáciles de escarificar.

6.2. Excavadoras hidráulicas

A veces conocidas como retroexcavadoras, son máquinas que pertenecen al grupo de las palas, las cuales presentan en la parte frontal brazos por los que transmiten energía para soportar y mover un cucharón con tal de excavar a distancias alejadas ya sea en por debajo o por encima del nivel de la máquina. La potencia hidráulica ha sido la clave de su desempeño desde los años 70, década donde se alcanzó suficiente madurez y confianza en su aplicación al movimiento de tierras. Dentro de las bondades que ofrecen estas máquinas se encuentran: tiempos de ciclo más rápidos, control preciso de componentes extra y facilidad en su operación.

Clasificación por su medio de movimiento

De manera similar al tractor, las excavadoras pueden estar montadas sobre ruedas u orugas y la decisión de adoptar cada tipo dependerá de diversos factores. Para el caso de las excavadoras montadas sobre llantas, éstas son generalmente veloces cuando el terreno es medianamente uniforme o que permite el tránsito y la implementación de dispositivos a base de cilindros hidráulicos (ver figura 6.4). Suelen ser pequeñas y por ende sus componentes seguirán esta proporción, por lo que tampoco se recomiendan cuando se trabaja con volúmenes muy grandes.

Por otro lado, cuando el terreno presente superficies de material tosco o suelto y/o además el equipo no requiera de movilidad constante sino de instalación fija, la recomendación es montar el equipo sobre orugas (par de cintas paralelas y dentadas de forma perpendicular, con movimiento independiente entre sí para maniobras de viraje en lugares estrechos),

como lo muestra la figura 6.4. En condiciones óptimas (terreno firme, parejo, seco y sin llevar carga adicional), pueden subir por pendientes hasta de 67%.



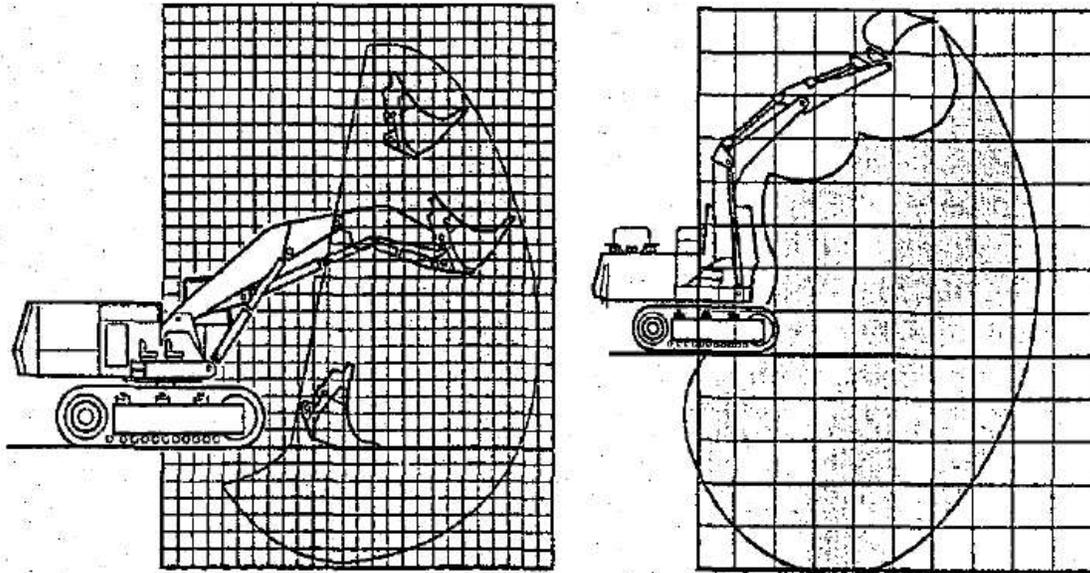
Figura 6.4. Excavadoras marca Komatsu sobre ruedas (izquierda) y sobre orugas (derecha).

Clasificación por labor de desempeño

Como se mencionó anteriormente, esta máquina cumple con dos labores principales dependiendo del nivel de la excavación respecto al de la maquinaria. El primer caso ocurre cuando el trabajo se desarrolla por debajo del nivel de piso (ver figura 6.5a). En general, el cucharón ejerce la fuerza necesaria para acarrear material frente a la máquina mientras el fondo del cucharón se balancea, formando un arco ascendente; luego, la máquina requiere de un lugar elevado en la misma dirección de la trayectoria descrita donde deposite el material.

El segundo caso ocurre cuando la excavación sucede sobre el nivel de piso donde la máquina trabaja con un cucharón frontal. El cucharón se coloca frente a la excavadora de manera invertida (ver figura 6.5b) al caso anterior por lo que al balancearse se encuentra con material debajo de esta. Para emplear este tipo de excavadoras se deberán considerar los siguientes aspectos:

- Profundidad máxima de excavación
- Radio máximo de trabajo requerido para excavar y descargar
- Máxima altura de descarga
- Máxima capacidad de levantamiento



a) b)
 Figura 6.5. Movimiento de excavación en excavadoras hidráulicas. a) Arco formado por cucharón frontal; y b) Arco formado por cucharón. Fuente: Construction Planning, Equipment and Methods (Peurifoy, Schexnayder, Shapira y Schmit, 2011).

6.3. Perforación y voladura

La perforación de las rocas dentro del campo de las voladuras es la primera operación que se realiza y tiene como finalidad abrir unos huecos dentro de los macizos, con la distribución y geometría adecuada, para alojar las cargas de explosivos y sus accesorios iniciadores. Aunque existe una gran variedad de sistemas de penetración, los mecánicos cubren la aplicación en obras mineras y carreteras, entre los cuales se pueden encontrar tres tipos: percusión, rotación y rotopercusión, donde los últimos dos son más usados. Independientemente de la elección, éstos tienen como componentes principales la perforadora, una fuente de energía mecánica, varillaje, medio de transmisión de esa energía, boca (elemento que ejerce sobre la roca dicha energía) y el fluido de barrido, ejecutor de la limpieza y evacuación del material removido.

Perforación rotopercutiva

El principio de perforación del equipo empleado se basa en el impacto de una pieza de acero (pistón) que golpea a un elemento, que a su vez transmite la energía al fondo del barreno por

medio de un elemento final (boca). De forma general, el proceso incluye las acciones de percusión por el golpe del pistón, rotación de la boca, empuje de la punta y barrido del fluido que permite extraer el material desde el fondo. Durante el proceso, se aplastan las rugosidades de la roca, lo cual provoca grietas en las paredes de la perforación y pulveriza la roca bajo la cuña, al mismo tiempo que fragmentos aledaños a ésta se desprenden y todo ello para ser evacuado el material (ver figura 6.6).

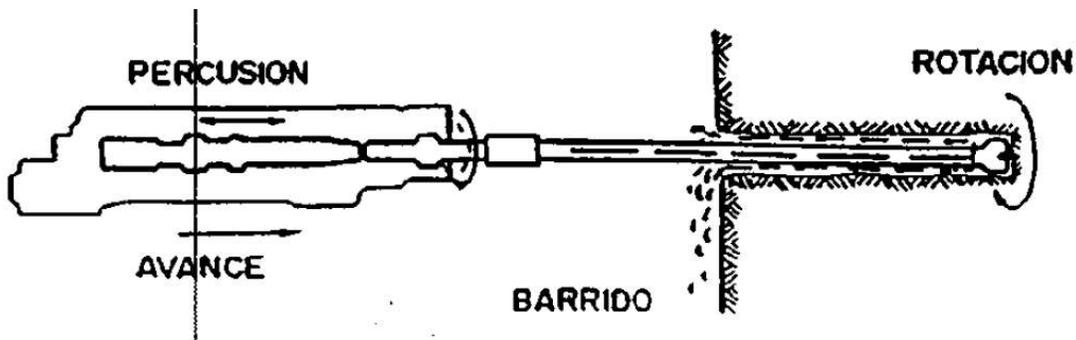


Figura 6.6. Acciones básicas en la perforación rotopercutiva. Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas (Pernia, López, Ortiz y López, 1987).

Perforación rotativa

En la práctica, se suele emplear este sistema con triconos, lo cual, le brinda una característica de versatilidad que le permite así abarcar una amplia gama de rocas, desde las muy blandas hasta las muy duras. Sus componentes más relevantes son: la fuente de energía (diesel o electricidad), una batería de barras o tubos (ya sean individuales o conectados en serie para transmitir el peso), la rotación y el aire de barrido a una boca con dientes de acero o insertos de carburo de tungsteno que actúa sobre la roca.

Básicamente, y de forma similar a los tractores, hay dos sistemas de montaje: sobre orugas o neumáticos. La conveniencia de cada uno dependerá de la superficie del terreno, por ejemplo, la presencia de fuertes pendientes, desniveles o baja capacidad portante supondrá el empleo de montaje sobre orugas proporcionará la máxima estabilidad y maniobrabilidad, pero a costa de escasa movilidad.

Tal como su nombre lo indica, la rotación es parte fundamental del funcionamiento de este sistema así que, para lograr que las barras transmitan el par, las perforaciones llevan un

sistema de rotación montado generalmente sobre un bastidor que se desliza a lo largo del mástil de la perforadora, por lo que no es de extrañarse encontrarlo en dos variantes:

Directo: Se requiere de motor eléctrico para máquinas grandes e hidráulico para máquinas pequeñas o medianas. En el caso de éste último, un circuito cerrado con una bomba de presión constante y un convertidor de par, con el que se logra variar la velocidad de rotación del motor hidráulico, situado en la cabeza de la sarta de perforación (ver figura 6.7a).

Indirecto: Su funcionamiento es mecánico y destacan: la Mesa de Rotación y la Falsa Barra Kelly (ver figuras 6.7b y 6.7c, respectivamente).

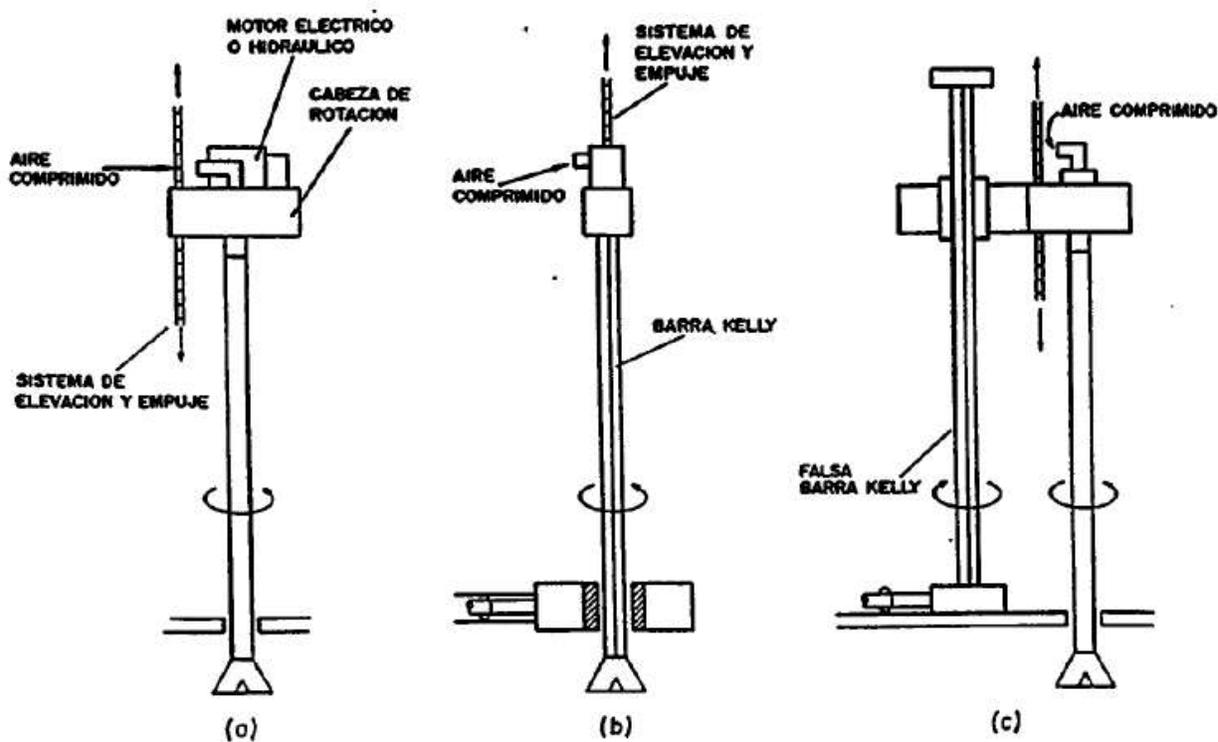


Figura 6.7. Sistemas de rotación: a) directo; b) mesa de rotación; y c) Falsa Barra Kelly. Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas (Pernia, López, Ortiz y López, 1987).

Explosivos

El objetivo esencial de la utilización de un explosivo en el arranque de rocas consiste en disponer de una energía concentrada químicamente, situada en el lugar apropiado y en cantidad suficiente, de forma que liberada de un modo controlado en tiempo y espacio, pueda lograr la fragmentación del material rocoso.

La explosión es la repentina expansión de los gases en un volumen mucho más grande que el inicial, acompañada de ruidos y efectos mecánicos violentos. Los explosivos comerciales no son otra cosa que una mezcla de sustancias, unas combustibles y otras oxidantes, que, iniciadas debidamente, dan lugar a una reacción exotérmica muy rápida que genera una serie de productos gaseosos a alta temperatura, químicamente más estables, y que ocupan un mayor volumen.

Los explosivos químicos según las condiciones a que estén sometidos, pueden ofrecer un comportamiento distinto del propio de su carácter explosivo. Los procesos de descomposición de una sustancia explosiva son:

Combustión: Puede definirse como toda reacción química capaz de desprender calor, pudiendo ser (o no) percibido por nuestros sentidos.

Deflagración: Es un proceso exotérmico en el que la transmisión de la reacción de descomposición se basa principalmente en la conductividad térmica. Es un fenómeno superficial en el que el frente de deflagración se propaga por el explosivo en capas paralelas a una velocidad baja y, generalmente, no supera los 1000 m/s.

Detonación: Es un proceso físico-químico caracterizado por su gran velocidad de reacción y formación de gran cantidad de productos gaseosos, a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva. En los explosivos detonantes la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que lo transmiten por choque, deformándola y produciendo su calentamiento y explosión adiabática con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un movimiento ondulado que afecta a toda la masa explosiva y se denomina onda de choque.

La energía de iniciación puede ser suministrada de varias formas, según el explosivo de que se trate. En los explosivos deflagrantes o pólvoras, basta con la energía de una llama, mientras que en los explosivos detonantes se necesita una energía generalmente en forma de onda de choque. En la figura 6.8 se muestra un diagrama que resume el proceso descrito.

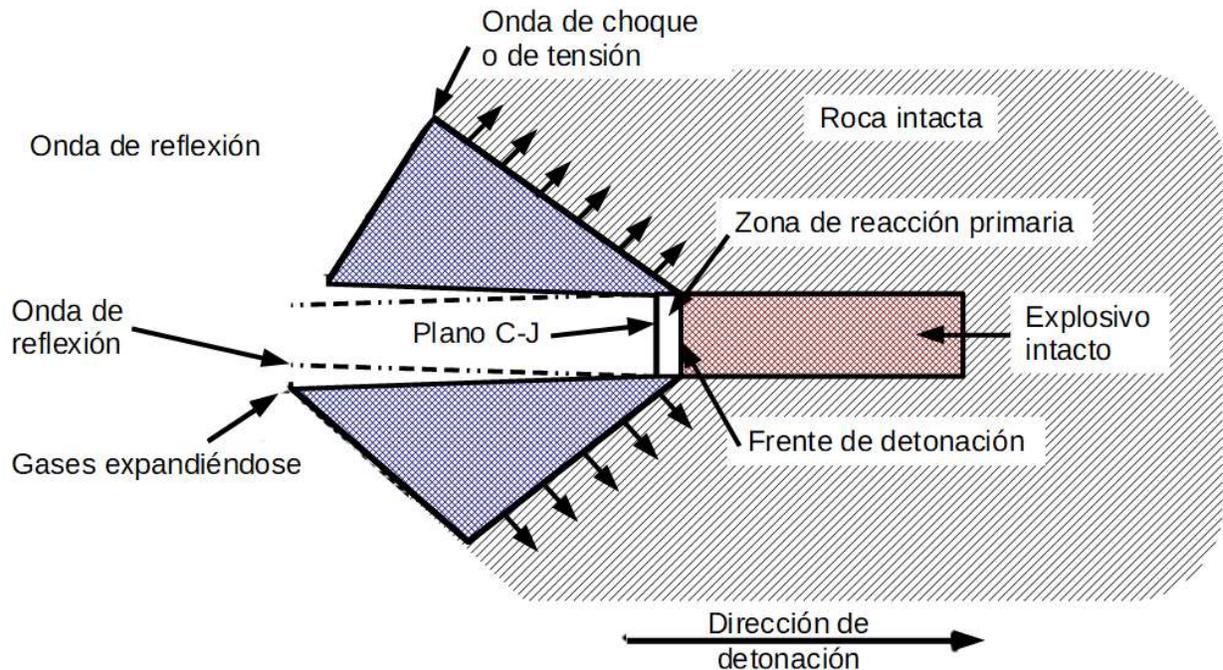


Figura 6.8. Proceso de detonación de una carga explosiva. Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas (Pernía, López, Ortiz y López, 1987). Edición propia.

Voladura

Durante la detonación de una carga de explosivo en el interior de la roca, las condiciones de sollicitación que se presentan están caracterizadas por dos fases de acción:

- 1) Se produce un fuerte impacto debido a la onda de choque, vinculada a la energía de tensión, durante un corto periodo de tiempo.
- 2) Actúan los gases producidos detrás de la zona de reacción que a alta presión y temperatura son portadores de la energía termodinámica o de burbuja.

Al fragmentarse los materiales que componen los terrenos mediante explosivos, intervienen al menos ocho mecanismos de rotura, con mayor o menor responsabilidad pero partícipes todos en los resultados de las voladuras.

Trituración de la roca: En los primeros instantes de la detonación, la presión en el frente de la onda de choque que se expande de forma cilíndrica alcanza valores que superan ampliamente la resistencia dinámica a compresión de la roca, provocando la destrucción de su estructura intercrystalina e intergranular.

Agrietamiento radial: Durante la propagación de la onda de choque, la roca circundante al barreno es sometida a una intensa compresión radial que induce componentes de tracción en los planos tangenciales del frente de dicha onda. Cuando las tensiones superan la resistencia dinámica a tracción de la roca se inicia la formación de una densa zona de grietas radiales alrededor de la zona triturada que rodea al barreno.

Reflexión: Cuando la onda de choque alcanza una superficie libre se generan dos ondas, una de tracción y otra de cizallamiento. Esto sucederá cuando las grietas radiales no se hayan propagado más que una distancia equivalente a un tercio de la que existe desde la carga a esa superficie.

Extensión y apertura de las grietas: Después del paso de la onda de choque, la presión de los gases provoca un campo de tensiones cuasi-estático alrededor del barreno, durante o después de la formación de las grietas radiales por la componente tangencial de tracción de tensiones en los extremos de las mismas.

Fracturación por liberación de carga: Antes de que la onda de choque alcance el frente libre efectivo, la energía total transferida a la roca por la compresión inicial varía entre el 60 y 70% de la energía de la voladura. Después del paso de la onda de compresión, se produce un estado de equilibrio cuasi-estático seguido de una caída súbita de presión en el barreno, debida al escape de los gases a través del retacado, de las fracturas radiales y al desplazamiento de la roca. La energía de tensión almacenada se libera rápidamente, generándose sollicitaciones de tracción y cizallamiento que provocan la rotura del macizo.

Fracturación por cizallamiento: En formaciones rocosas sedimentarias cuando los estratos presentan distintos módulos de elasticidad o parámetros geomecánicos, se produce la rotura en los planos de separación al paso de la onda de choque por las tensiones diferenciales o cortantes en dichos puntos.

Rotura por flexión: Durante y después de los mecanismos de agrietamiento radial y descostramiento, la presión ejercida por los gases de explosión sobre el material situado frente a la columna de explosivos hace que la roca actúe como una viga doblemente empotrada en el fondo del barreno y en la zona de retacado, produciéndose la deformación y el agrietamiento de la misma por los fenómenos de flexión.

Rotura por colisión: Los fragmentos de roca creados por los mecanismos anteriores y acelerados por los gases son proyectados hacia la superficie libre colisionando entre sí y dando lugar a una fragmentación adicional, que se ha puesto de manifiesto en estudios con fotografías ultrarápidas.

Como último párrafo del capítulo, cabe resaltar que lo expuesto en el presente queda sujeto a las exigencias del proyecto; las condiciones del terreno (sea plano, con lomas o montañoso), su extensión, el acceso a éste o la velocidad a la que demande el avance de la obra son sólo algunos ejemplos que deben considerarse además de la propia tecnología.

Conclusiones

Tal como se expuso, cada uno de los métodos para determinar la excavabilidad de los materiales contenidos en esta obra, conlleva la consideración de distintos parámetros, desde los más sencillos de obtener en laboratorio como la resistencia a la compresión hasta aquellos propios del campo. Luego de la obtención de datos, el aspecto más relevante de cada método es justamente la interpretación de los mismos, por lo que se tendrán que involucrar varios aspectos dentro de la toma de decisión para, finalmente, decantarse por uno u otro.

Los métodos investigados involucran algunos o varios de los siguientes parámetros:

- Velocidad de propagación de ondas sísmicas
- Características geomecánicas de la roca
- Características de las discontinuidades
- Características de la maquinaria

De acuerdo al análisis del capítulo quinto, los métodos pueden ser agrupados bajo los enfoques de la velocidad de ondas sísmicas, empleo de gráficos o uso de sistemas de valoración. Decidirse por alguno, está ligado a la fase de planeación por lo que los estudios de campo y las pruebas de laboratorio, más que excluirse, se complementan.

El principal problema al usar alguno de los métodos está en la definición de sus límites. En ciertos casos, alguno de estos podría indicar que las condiciones del terreno favorecen su escarificación, mientras que otro aludiría al uso directo de voladura con explosivos, por lo cual, recomiendo que, al referirse a la excavabilidad, se hable en términos de rangos en lugar de hacerlo en valores fijos; esto permite considerar una gama más amplia de alternativas ante condiciones favorables y desfavorables.

Cabe mencionar, que la particularidad de cada proyecto acarrea sus propios problemas, puesto que las condiciones del terreno pueden variar a unos cuantos metros de las exploraciones. Por ello, para el caso específico de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en México, recomiendo que se incorporen los métodos aquí descritos a la normativa, con el objetivo de reducir riesgos y costos en la obra pública.

Referencias

- Aduvire, O., Quinteros, J. y Mazadiego, L. (2013). *Aplicación de los índices geomecánicos en el arranque de rocas mediante excavación o voladura*. SVS Ingenieros S.A.C., Golder Associates Perú S.A. y Universidad Politécnica de Madrid.
- Álvarez, A. (2003). *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*. Sanfandilla, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Bachiller, G. (2004). *Análisis de factibilidad de excavación mecánica como alternativa al método convencional*. Tesis de licenciatura. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Badillo, J. y Rodríguez, R. (2005). *Mecánica de suelos 1: Fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Bañón, L. y Bevíá, J. (2000). *Manual de carreteras: Construcción y mantenimiento (Vol. 2)*. Alicante, España: Ortiz e Hijos, Contrastista de Obras, S.A.
- Belandra, N. y Bongiorno, F. (2012). *Clasificaciones geomecánica de los macizos rocosos según: Bieniawski, Barton, Hoek y Brown, y Romana*. Mérida, Venezuela: Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.
- Bolívar, J. M. (s. f.). *Apuntes geología aplicada*. México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Brinkkemper S. (1996). *Method engineering: engineering: engineering of information systems development methods and tools*. Information and Software Technology. (38), 275-280.
- Carillo, M., Linkimer, L., Rodríguez, A. y Zúñiga, H. (2002). *Clasificación geomecánica y análisis estabilidad de taludes del macizo rocoso Coris, Cartago, Costa Rica*. Revista Geológica de América Central, 26, 91-96.
- Caterpillar. (2000). *Manual de rendimiento Caterpillar (ed. 31)*. Illinois, Estados Unidos de América: Autor.

- ----- (2016). *Caterpillar performance handbook* (ed. 46). Illinois, Estados Unidos de América: Autor.
- ----- (s.f.). *Handbook of ripping*, (ed. 12th). Illinois, Estados Unidos de América: Autor.
- Chávarri, C. M, (s.f.). *Cargadores y retro excavadoras en la construcción*. México: Fundación para la enseñanza de la construcción A. C.
- ----- (s.f.). *Tractores en la construcción*. México: Fundación para la enseñanza de la construcción A. C.
- Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M., Ledesma-Vallvè., M., Costantino, D., Cid, M. y Guerra, G. (2018). Tema 1: La Ciencia Geofísica. En *Cátedra de Geofísica Aplicada*. (1-20). Chubut, Argentina: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- ----- (2017). Tema 2: Prospección gravimétrica. En *Cátedra de Geofísica Aplicada*. (1-22). Chubut, Argentina: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- ----- (2017). Tema 3: Gravimetría, instrumental y aplicaciones. *En Cátedra de Geofísica Aplicada*. (1-16). Chubut, Argentina: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- ----- (2017). Tema 4: Prospección Magnetométrica. *En Cátedra de Geofísica Aplicada*. (1-18). Chubut, Argentina: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- ----- (2017). Tema 5: Magnetrometría, instrumental y aplicaciones. En *Cátedra de Geofísica Aplicada*. (1-12). Chubut, Argentina: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- Clark, P. B. (1996). Rock mass and rippability evaluation for a proposed open pit mine at Globe-Progress, near Reefton. Tesis de maestría. Universidad de Canterbury, Christchurch, Nueva Zelanda.
- Das, B. M. (2011). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. (7a. ed.) México: Cengage Learning.

- ----- (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica. (4a. ed.) México: Thomson Learning.
- Day, D. A. y García R. (1978). *Maquinaria para construcción*. México: Limusa.
- Del Valle, E. (1984). Apuntes de introducción a la geofísica. México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers. (1983). Engineering and design: Rock mass classification data requirements for rippability (1110-2-282). Recuperado de: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a403536.pdf>
- Duque, G. (2013). Manual de geología para ingenieros. (2a. ed.). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. (s.f.). *El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas*. España: Autor.
- Fell, R. (1988) *Engineering geophysics: A civil engineer's viewpoint*. Australian Geomechanics, (15), 63-68.
- Franklin, J., Broch, E. y Walton, G. (1971). *Logging the mechanical character of rock*. Transactions of the Institution Mining and Metallurgy, Sec. A.: Mining industry 80, p. A1-9.
- Gallardo, M. (2013). *Cimentaciones en roca*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, L. I. (2002) *Ingeniería Geológica*. España: Pearson Educación.
- Haaz, H. S. (2015). Cap. 2 Geomateriales. En *Apuntes de la clase de geología*. México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- ----- (2015). Cap. 6 Exploración y muestreo de los geomateriales. En *Apuntes de la clase de geología*. México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Herbert, L. y Nichols, Jr. (1975). *Movimiento de tierras. Manual de excavaciones*. (4a. ed.) Greenwich, Connecticut, Estados Unidos de América: Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V.
- Hernández, N. (2015). *Procedimiento para la elección del método de arranque de las rocas en canteras para áridos*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.
- Hernández, N., Rosario, Y., Almaguer, Y. y Otaño, J. (2014). *Árbol de excavabilidad para elegir método de arranque en canteras de áridos de la construcción: yacimiento El Cacao*. *Minería y Geología*. 30(3), 67-84.
- Instituto de Geociencias, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Universidad Complutense de Madrid. (s.f.). *Clasificación de las rocas*. Madrid, España: Autor.
- International Society of Rock Mechanics. (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 5, 319-368.
- ----- (1985). Suggested method for determining point load strength. En R. Ulusay & J.A. Hudson (Ed.) del libro *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. (pp. 53-60). Elsevier.
- ----- (2015). Suggested method for determining the abrasivity of rock by the CERCHAR abrasivity test. En R. Ulusay (Ed.) del libro *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*. (pp. 101-106). Springer.
- Jennings, J. E. y Robertson, A. (1970). The stability of slopes cut into natural rock. En *Proceedings, Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Ciudad de México, México.
- Karpuz, C. (1990). *A classification system for excavation of surface coal measures*. *Mining Science and Technology* 11(2): 157–163.

- Kaya, A. y Bulut, F. (2011). *Applicability of excavatability classification systems in underground excavations: A case study*. Scientific. Research and Essays. 6(25), 5331-5341.
- Kirsten, H. A. D. (1982). *A classification system for excavation in natural materials*. The Civil Engineer in South Africa, 24, 293-308.
- López, J., et al. (1997). *Manual de Túneles y Obra Subterránea*. Entorno Gráfico. Madrid. 1082 pp.
- Luengo, F., González S. (2005). *Definición racional de ripabilidad o volabilidad de los macizos rocosos: Factores económicos y técnicos*. Oviedo, España: Unión Española de Explosivos, S. A.
- MacGregor, F. (1993). *The rippability of rock*. Tesis de doctorado en filosofía. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Nueva Gales del Sur, Sídney, Australia.
- Maerz, N. H. y Germain, P. (1996). Block size determination around underground openings using simulations. En *Fragblast-5 Workshop on measurement of blast fragmentation*. (pp. 215-223). Quebec, Canadá.
- McLean, A. C. y Gribble, C. D. (1985). *Geology for civil engineers*. (ed. 2a). Londres, Inglaterra: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Mendoza E. R. (1975). *Métodos de construcción en terracerías: Excavaciones en roca a cielo abierto y excavaciones subterráneas*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Muñoz, L. M. y González, L. I. (1987). *Aplicación de las clasificaciones geomecánicas al estudio de excavaciones subterráneas*. Henares, Revista Geológica, 1, 71-76.
- Muyideen, S. y Shaib, S. (2014). *Assessment of excavation method of Obajana and Ewekoro limestone deposits*. Earth Science. 3(2), 42-49.
- Palmström, A. (2000). On classification systems. En *Reliability of classification systems. Conferencia Internacional GeoEng2000*, Melbourne, Victoria, Australia.
- Pérez, R. (2016). *Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas: Tema 4 – Clasificación de los terrenos en función de su excavabilidad*. Universidad de Cataluña, España.

- Pernia, J. M., López C., Ortiz, F. y López, E. (1987). *Manual de perforación y voladura de rocas*. España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Peurifoy, R. Schexnayder, C., Shapira, A. y Schmit, R. (2011). *Construction planning, equipment and methods*. (8a. ed.). Estados Unidos: McGraw Hill.
- Plaza, O. (s. f.) *Geología aplicada*. Madrid, España: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas, Universidad Politécnica de Madrid.
- Puig, J. B. (s. f.). *Geología aplicada a la ingeniería civil y fotointerpretación*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Ramírez, P. y Alejano L. (2004) *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid.
- Ramirez, P. y Cornejo, L. (1988). *La importancia de los ensayos en la adecuada elección de las máquinas de ataque puntual como método de excavación*. Revista de obras pública, 951-957.
- Rico, A. y Castillo, H. (1995). *Ingeniería de suelos en las vías terrestres*. México: Limusa, Grupo Noriega.
- Romero, E. L. (2011). *Importancia de las fracturas en diferentes aplicaciones de la geología*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ruiz, M. y González, S. (2004) *Geología para ingenieros civiles*. México: Limusa, Grupo Noriega.
- Saavedra, O. (2013). *Análisis de ondas sísmicas en entorno Matlab*. Tesis de licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1984). *Normas para construcción e instalaciones. Carreteras y aeropistas. Terracerías*. México: Autor.
- ----- (2007). *Proyecto geométrico. Carreteras. Estudio. Estudios Topográficos. Aerofotogramétricos para Carreteras*. México: Autor.

- ----- (2011). *Normas para construcción. Carreteras. Conceptos de obra. Terracerías*. México: Autor.
- ----- (2016). *Manual para proyecto geométrico de carreteras*. México: Autor.
- Singh, B. y Goel, R. (1999). *Rock Mass Classification: A practical approach in civil engineering*. Oxford, Reino Unido: Elsevier.
- Singhal, B.B.S. y Gupta R. P. (2010). Cap 2: Fractures and discontinuities. *En Applied hydrogeology of fractured rocks*. (13-33). Berlín, Alemania: Springer.
- Spalleti, L. A. (2007). Meteorización (Intemperismo). *En Cátedra de sedimentología*. Simposio o conferencia llevado a cabo en Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Styles P. (2012). *Environmental geophysics. Everything you ever wanted (needed!) to know but were afraid to ask!* Houten, Netherlands: European Association of Geoscientists & Engineers.
- Suana, M. y Peters, T. (1982). *The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography*. *Rock Mechanics*, 15, 1-7.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., y Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*. (8a. ed.). Madrid, España: Pearson Educación.
- Tonnizam, E., Anuar, K y Komoo, I. (2005). *An overview of existing rock excavatability assessment techniques*. *Jurnal Kejuruteraan Awam*. 17(2), 46-59.
- U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service. (1989). *Rock quality designation (RQD) after twenty years*. Recuperado de: <https://www.nrc.gov/docs/ML0037/ML003749192.pdf>
- Vega, L. (2015). *Elección del método de arranque de las rocas en la cantera de áridos Los Caliches*. *Ciencia & Futuro*. 5(2), 2-14.
- Weaver, J. M. (1975). *Geological factors significant in the assessment of rippability*. *Civil Engineering in South Africa*, 17, 313–316.

Anexo

Deducción de la fórmula para calcular la profundidad del estrato de acuerdo al método de exploración sísmico de refracción.

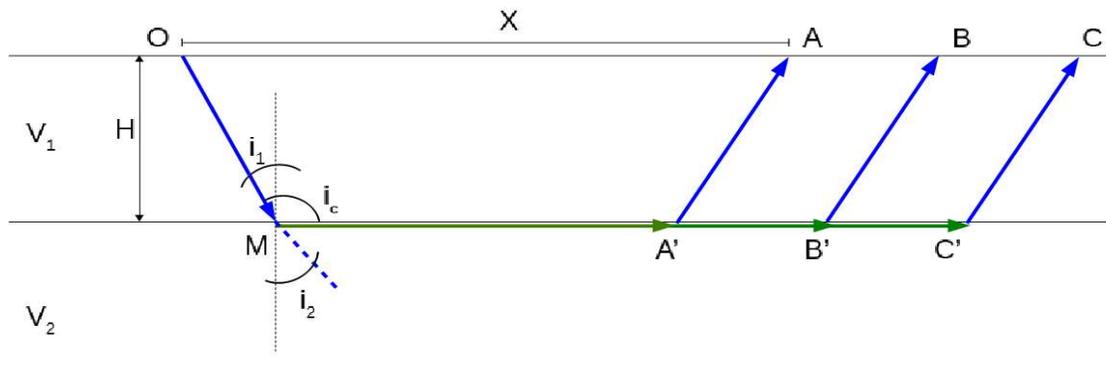


Figura A.1. Diagrama de propagación de ondas sísmicas entre dos estratos diferentes. Fuente: *Métodos de construcción en terracerías: Excavaciones en roca a cielo abierto y excavaciones subterráneas* (Mendoza, 1975). Edición propia.

El objetivo es determinar la profundidad de los diferentes estratos con la información proporcionada por el método sísmico de refracción. En la figura A.1, se muestran varias flechas azules que representan la dirección en la que se propagan las ondas sísmicas en el estrato superior mientras que las flechas verdes muestran el mismo fenómeno pero en el estrato inferior. Los puntos \$A\$, \$B\$ y \$C\$ representan a los distintos receptores ubicados en la superficie del terreno y el punto \$O\$ la fuente de la onda.

La primera observación es que el tiempo que tardaría en viajar la onda sobre el estrato 1, \$t_{OA}\$, será menor que cualquier otro recorrido diferente a este a través de los diferentes estratos. Por ejemplo, el tiempo que le tomaría a una onda que siga el recorrido \$O-M-A'-A\$ sería:

$$t_{OA} \leq t_{OM} + t_{MA'} + t_{A'A} \quad \text{--- (1)}$$

Sin embargo, dicho tiempo resulta desconocido por lo que habrá que adecuar la ecuación anterior a lo que se conoce, es decir, expresarla en términos de velocidad y distancia:

$$t_{OA} = \frac{X}{V_1} \quad ; \quad t_{OM} = \frac{\overline{OM}}{V_1} \quad ; \quad t_{MA'} = \frac{\overline{MA'}}{V_2} \quad ; \quad t_{A'A} = \frac{\overline{A'A}}{V_1}$$

Sustituyendo las relaciones previas en la ecuación (1):

$$\frac{X}{V_1} \leq \frac{\overline{OM}}{V_1} + \frac{\overline{MA'}}{V_2} + \frac{\overline{A'A}}{V_1}$$

Otra observación importante es que la distancia OM es igual a la distancia $A'A$ además que ambas pertenecen al mismo estrato por lo que se puede simplificar como:

$$\frac{X}{V_1} \leq 2 \frac{\overline{OM}}{V_1} + \frac{\overline{MA'}}{V_2} \text{ --- (2)}$$

Hasta este momento la ecuación (2) presenta como variables las distancias OM y MA' así que para continuar es necesario recurrir a la figura A.2, la cual permite apreciar de manera más clara lo que sucede durante el recorrido de una onda respecto a las distancias.

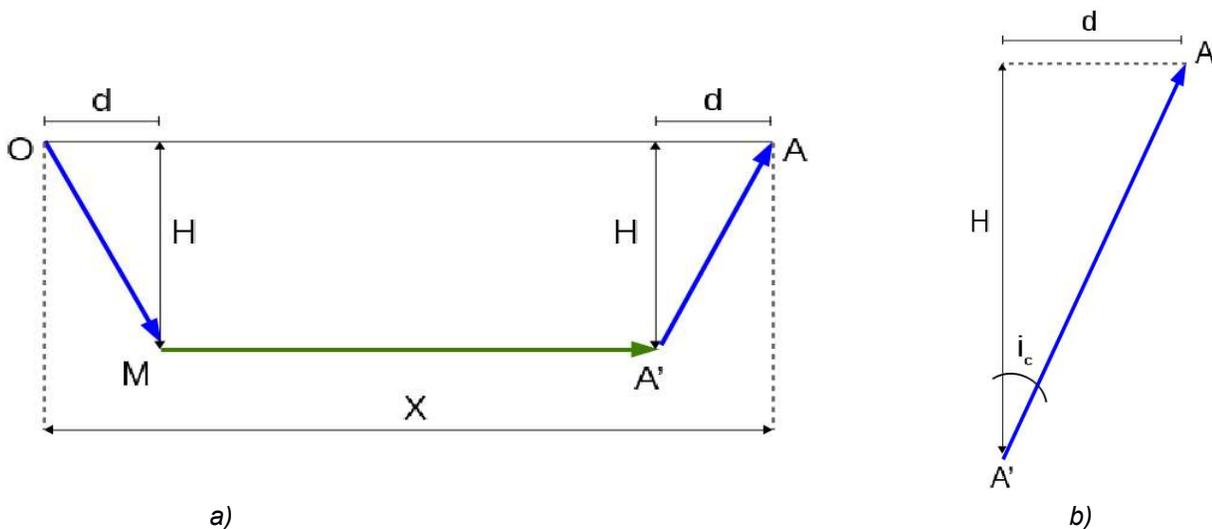


Figura AP-2.. a) Trayectoria del rayo refractado desde la fuente hasta el receptor; b) Detalle de un segmento en de dicha trayectoria. Fuente: Elaboración propia.

De la figura A.2a se observa que la distancia X podría interpretarse como la suma de las distancias d y la que hay entre M y A' . Además, estas distancias horizontales d (tanto la que hay del punto O al M como la de A' hasta A) son las mismas, por lo que la ecuación resultante queda definida como:

$$X = 2d + \overline{MA}$$

Al despejar a MA :

$$\overline{MA} = X - 2d \text{ --- (3a)}$$

La distancia d sigue siendo una incógnita. Al observar la figura A.2b es posible establecer dos relaciones muy importantes tomando en cuenta el ángulo crítico. En primer lugar:

$$\tan(i_c) = \frac{d}{h}$$

Al despejar d :

$$d = H \cdot \tan(i_c)$$

Pero se sabe que:

$$\tan(i_c) = \frac{\text{sen}(i_c)}{\text{cos}(i_c)}$$

Por lo tanto:

$$d = H \cdot \frac{\text{sen}(i_c)}{\text{cos}(i_c)} \text{ --- (3b)}$$

Sustituyendo (3b) en (3a):

$$\overline{MA} = X - 2H \cdot \frac{\text{sen}(i_c)}{\text{cos}(i_c)} \text{ --- (3)}$$

La segunda relación de interés es:

$$\text{cos}(i_c) = \frac{H}{\overline{OM}}$$

Al despejar H :

$$\overline{OM} = \frac{H}{\text{cos}(i_c)} \text{ --- (4)}$$

De esta forma, es posible sustituir (3) y (4) en (2):

$$\frac{X}{V_1} \leq 2 \frac{\frac{H}{\text{cos}(i_c)}}{V_1} + \frac{X - 2H \cdot \frac{\text{sen}(i_c)}{\text{cos}(i_c)}}{V_2}$$

$$\frac{X}{V_1} \leq \frac{X}{V_2} + \frac{2H}{\text{cos}(i_c)} \left[\frac{1}{V_1} - \frac{\text{sen}(i_c)}{V_2} \right] \text{ --- (5)}$$

De acuerdo a la ley de Snel sobre refracción:

$$\frac{\sin(i_1)}{\cos(i_2)} = \frac{V_1}{V_2}$$

Dado que $i_1 = i_c$ e $i_2 = 90^\circ$

$$\text{sen}(i_c) = \frac{V_1}{V_2} \text{ --- (6)}$$

Sustituyendo (6) en (5) y desarrollando:

$$\frac{X}{V_1} \leq \frac{X}{V_2} + \frac{2H}{\cos(i_c)} \cdot \left[\frac{1}{V_1} - \frac{\text{sen}(ic)}{V_2} \right]$$

$$\frac{X}{V_1} \leq \frac{X}{V_2} + \frac{2H}{\cos(i_c)} \cdot \left[\frac{1}{V_1} - \frac{V_1}{V_2^2} \right] \text{ --- (7)}$$

Al despejar H de (7):

$$\frac{X}{V_1} - \frac{X}{V_2} \leq \frac{2H}{\cos(i_c)} \cdot \left[\frac{1}{V_1} - \frac{V_1}{V_2} \right]$$

$$\frac{H}{\cos(i_c)} \cdot \left[\frac{1}{V_1} - \frac{V_1}{V_2^2} \right] \geq \frac{X}{2} \cdot \left[\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right]$$

$$\frac{H}{\cos(i_c)} \geq \frac{\frac{X}{2} \cdot \left[\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right]}{\left[\frac{1}{V_1} - \frac{V_1}{V_2^2} \right]}$$

$$H \geq \frac{X}{2} \cdot \left[\frac{V_2 \cdot (V_2 - V_1)}{(V_2^2 - V_1^2)} \right] \cdot \cos(i_c) \text{ --- (8)}$$

El término $\cos(i_c)$ puede ser fácilmente sustituido por otra relación previamente utilizada, sin embargo, se requiere de la aplicación de la siguiente identidad trigonométrica:

$$\sin^2(i_c) + \cos^2(i_c) = 1$$

Al despejar $\cos^2(i_c)$ de la identidad:

$$\cos^2(i_c) = 1 - \sin^2(i_c) \text{--- (9)}$$

Antes de sustituir (9) en (8) se elevan a la segunda potencia ambos lados de esta última ecuación:

$$H^2 \geq \frac{X}{2} \cdot \left[\frac{V_2 \cdot (V_2 - V_1)}{(V_2^2 - V_1^2)} \right]^2 \cdot \cos^2(i_c)$$

$$H^2 \geq \left(\frac{X}{2} \right)^2 \cdot \left[\frac{V_2 \cdot (V_2 - V_1)}{V_2^2 - V_1^2} \right]^2 \cdot (1 - \sin^2(i_c)) \text{--- (10)}$$

Sustituyendo (6) en (10):

$$H^2 \geq \left(\frac{X}{2} \right)^2 \cdot \left[\frac{V_2 \cdot (V_2 - V_1)}{(V_2^2 - V_1^2)} \right]^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right]$$

$$H^2 \geq \left(\frac{X}{2} \right)^2 \cdot \left[\frac{(V_2 - V_1)^2}{(V_2 + V_1) \cdot (V_2 - V_1)} \right]$$

$$H^2 \geq \left(\frac{X}{2} \right)^2 \cdot \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \text{--- (10)}$$

Por último, obteniendo la raíz cuadrada de ambos lados en (10):

$$H \geq \frac{X}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \text{--- (11)}$$