



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Colegio de Ingeniería Civil

**“CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DEL MACIZO
ROCO SO DE CALIZA EN LA CIUDAD DE PUEBLA”**

TESIS

Que para obtener el grado de

LICENCIATURA EN INGENIERIA CIVIL

Presenta:

RAMOS ZÁRATE YOKO ZUKEIDI

Asesor:

M. I. Miguel Ángel Figueras Corte

Puebla, Pue.

Abril 2024

Índice

Introducción	4
Objetivos	6
Alcances	6
CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES DE MECÁNICA DE ROCAS	8
1.1 Materiales de origen natural	8
1.2 Fractura de rocas	10
1.3 Resistencia a tensión	14
1.4 Modelo de ruptura Hoek-Brown.....	14
CAPITULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	17
2.1 Tipo de discontinuidades.....	17
2.1.1 Discontinuidades lisas	18
2.1.2 Discontinuidades rugosas sin relleno	19
2.1.3 Discontinuidades rugosas con relleno.....	20
2.2 Orientación	22
2.3 Espaciado.....	24
2.4 Persistencia.....	26
2.5 Rugosidad	27
2.6 Abertura.....	29
2.7 Relleno	30
2.8 Resistencia de las paredes de la discontinuidad.....	31
2.9 Filtraciones	31
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATRIZ ROCOSA.....	33
3.1 Litología.....	33
3.2 Propiedades físicas	35
3.2.1 Porosidad	36
3.2.2 Peso volumétrico.....	37
3.2.3 Permeabilidad	38
3.2.4 Durabilidad	39
3.2.5 Ángulo de fricción interna	41
3.2.6 Cohesión	41
3.2.7 Absorción de agua.....	42

3.2.8 Hinchamiento	43
3.3 Propiedades mecánicas	44
3.3.1 Resistencia a compresión simple	44
3.3.3 Módulo de Young (E_m).....	47
CAPÍTULO 4. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA	49
4.1 Clasificación de Deere	51
4.2 Q de Barton	53
4.3 RMR de Bieniawski	57
CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE MACIZO ROCOSO DE CALIZA EN EL ORIENTE DE LA CIUDAD DE PUEBLA.....	60
5.1 Geología de la ciudad de Puebla	60
5.2 Antecedentes	63
5.3 Metodología.....	66
5.4 Macizo rocoso de caliza	69
5.5 Clasificación geomecánica	70
Conclusiones	89
Referencias.....	91
Anexos.....	93
Anexo A.....	93
Anexo B.....	103
Anexo C	108

Introducción

La mecánica de rocas forma parte de la ingeniería geotécnica, que estudia el comportamiento de todos los materiales de origen geológico por sí solos y en su interacción con estructuras. La geomecánica es quizás una de las ramas tecnológicas más antiguas de la humanidad, los griegos y egipcios en sus construcciones emplearon los macizos rocosos para obras; en las pirámides construidas en Egipto se emplearon bloques de caliza dura (Cartaya Pire, 2006).

La geomecánica es reconocida como ciencia hasta finales de los años 50, donde efectuó su llegada en el entonces, mundo crítico de las obras subterráneas. Históricamente se conoce que el Primer Congreso de Mecánica de Rocas se celebró en Portugal en 1996. El estado actual del conocimiento en mecánica de rocas, así como la definición, obtención de parámetros y adopción de modelos que representan el comportamiento real de los macizos rocosos, se encuentran en una fase de desarrollo inferior al de otras ramas de la ingeniería como pueden ser la mecánica de suelos. En consecuencia, resulta difícil establecer modelos analíticos del comportamiento del macizo rocoso que sean reflejo fiel de éste, cuando se trata de resolver problemas de estabilidad o dimensionamiento de obras a cielo abierto o subterráneas (López Jimeno, 1998 citado por Cartaya Pire, 2006).

En la naturaleza, las rocas se presentan frecuentemente atravesadas por varios agentes geológicos estructurales, sin olvidar la presencia de discontinuidades de distintos orígenes geológicos. Las rocas se pueden definir como agregados o conjunto de una o varias sustancias minerales que forman macizos y ocupan grandes extensiones de la corteza terrestre (Ramírez y Alejano, 2004).

La roca difiere de la mayoría de otros materiales utilizados en ingeniería, conteniendo discontinuidades de diferentes tipos, que hacen que su estructura sea discontinua. Asimismo, debido a los procesos geológicos que la han afectado entre el tiempo de su formación y la condición en la cual se encuentra en la actualidad, presenta heterogeneidades y propiedades variables. Todas estas características requieren ser evaluadas en forma permanente durante la realización de la obra, siendo forzoso distinguir el material rocoso (roca intacta) y lo que es el macizo (masa rocosa) (Ramírez y Alejano, 2004).

A principios de los años ochenta, en la ciudad de Puebla, al igual que en otras ciudades del país, los estudios de mecánica de suelos no eran práctica común, en particular para la ciudad, donde el subsuelo no representaba mayores problemas para la ingeniería de cimentaciones y vías terrestres. Fue a partir del crecimiento del área urbana en la zona sur, que muchas edificaciones acusaron un mal comportamiento por la presencia de arcillas expansivas; así como la fatal experiencia de los sismos de 1985, 1999 y 2017, que el gremio de la construcción ha ido tomando conciencia de la importancia que siempre debió haber tenido esta rama de la ingeniería civil (Azomoza et. al., 1998).

En Puebla existen diversos afloramientos de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, así como depósitos de suelos aluviales y lacustres en cada provincia fisiológicas. Con la zonificación geotécnica propuesta para el área urbana del valle de Puebla, destaca la presencia de los depósitos tobáceos como una formación basal del subsuelo, sobre la que yacen el resto de las unidades estratigráficas. En la geología de la ciudad, se encuentran tres tipos de roca: basalto, caliza y travertino, resaltando la caliza que tiene presencia en el subsuelo del oriente de la ciudad; ubicándose un importante afloramiento conocido como “La Calera”, de color gris, que constituye un lomerío suave, actualmente habitado en torno a una cantera de explotación de este material (Azomoza et. al., 1998).

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis, se realiza la caracterización física y mecánica del macizo rocoso para conocer el comportamiento en lo que concierne a sus propiedades y a los criterios de rotura, para ello se presentan las técnicas para obtener los parámetros de macizos rocosos según los trabajos desarrollados por los diversos investigadores.

Así pues, el macizo rocoso, especialmente de caliza, es un tema relevante debido a la gran extensión que abarca, en el sentido de conocer su caracterización, para ello se necesita realizar visitas de campo y toma de datos, ya que en la actualidad se cuenta con poca información sobre los mantos de roca; la escasez de conocimiento es a causa de su inherente complejidad y a las dificultades de la observación de los macizos. Para caracterizarlos, se debe conocer los parámetros básicos de la roca, discontinuidades y a su vez de la estructura del macizo. El macizo rocoso es el medio in-situ que contiene diferentes tipos de discontinuidades; dependiendo de cómo se presenten éstas dentro de la masa rocosa, van a tener un determinado comportamiento geotécnico.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar y clasificar, desde el punto de vista geomecánico, mediante diferentes parámetros físicos y mecánicos a las rocas calizas en el oriente de la ciudad de Puebla, Puebla.

Objetivos específicos

1. Describir las características del afloramiento y la mineralogía de la roca caliza.
2. Definir las propiedades de la matriz rocosa como litología, grado de fracturamiento, parámetros de resistencia, propiedades físicas y mecánicas.
3. Determinar las propiedades de las discontinuidades como su espaciado, persistencia, rugosidad, abertura, relleno y filtraciones.
4. Revisión, interpretación y procesamiento de los datos de campo.

Alcances

Se pretende aportar conocimiento sobre el macizo rocoso, debido a que se sabe poco de las propiedades que pueden presentar y la ubicación de la zona, ya que la ciudad de Puebla está en constante desarrollo de infraestructura.

En el primer capítulo se explican los conceptos generales de la mecánica de rocas y todo lo que conlleva esa ciencia, que trata sobre el comportamiento mecánico de las masas rocosas que se encuentran bajo la acción de fuerzas producidas por fenómenos naturales o por el hombre.

En el segundo capítulo la caracterización del macizo rocoso, algunas propiedades y discontinuidades presentes que lo definen, donde primero se estudia lo macro, es decir, el macizo rocoso, hacia lo micro que es la caracterización de la matriz rocosa, siendo este último término, el que se aborda en el tercer capítulo.

El cuarto capítulo se refiere a la clasificación geomecánica, donde se mencionan algunas clasificaciones utilizadas en los macizos rocosos.

Finalmente, se llega al punto práctico, donde se procede a describirlos, aportando información acerca de su ubicación, visitas de campo y toma de datos de la zona de estudio, que se localiza en el oriente de la ciudad de Puebla, con el objetivo de entender su comportamiento para después conocer la caracterización física y geomecánica de dicho manto rocoso de caliza contenido en el quinto capítulo.

La metodología que se desarrolla puede ser aplicada en la caracterización geomecánica de macizos rocosos, tanto en obras subterráneas como de superficie (Cartaya Pire, 2006).

Se presenta el orden de las etapas de trabajo:

1. Primera etapa: se establece el área de investigación y criterio de implementación de la metodología en macizos de diferente génesis y comportamiento en la zona de la región oriental de la ciudad de Puebla, Puebla. Asimismo, se hace la investigación bibliográfica, en la que se analiza el estado actual de la problemática en el país; los trabajos efectuados proporcionan información de aporte para caracterizar el objeto de estudio.
2. Segunda etapa: consta de visitas de campo y recolección de datos que permiten obtener los parámetros necesarios para la caracterización geomecánica, con los siguientes aspectos en general:
 - a) Se realizan visitas en campo y toma de fotografías a los materiales representativos del macizo rocoso.
 - b) Estudio y evaluación de las condiciones geológicas de los macizos rocosos.
 - c) Se ejecuta el análisis de los macizos rocosos, donde se incluyen las superficies de debilitamiento presentes en los mismos, se determina la abertura grietas, su espaciamiento, rugosidad, etc.
3. Tercera etapa: se ofrecen criterios geomecánicos y la estimación de la resistencia de la roca.
4. Cuarta etapa: se procede a la interpretación y procesamiento de la información, realizando la evaluación integral y diferenciada de los macizos rocosos, lo que permite efectuar su caracterización geomecánica, sobre lo cual se representa el comportamiento del macizo rocoso.

La caracterización apropiada de los macizos rocosos, además de ser la base para el diseño de obras, contribuye a la optimización del método constructivo, da vía al mejoramiento del macizo, evaluando técnicas como anclajes, inyecciones, drenaje, etc. (Duque, 2022).

La ciudad de Puebla ha tenido un desarrollo en la infraestructura, tal como en la explotación de recursos naturales, sin embargo, se sabe que en el subsuelo de la ciudad se encuentran macizos rocosos formados por roca caliza, esto con base en la carta de Zonificación Geotécnica para la ciudad de Puebla, publicada por Azomoza y colaboradores en 1998.

CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES DE MECÁNICA DE ROCAS

El problema del diseño estructural de las obras, ya sean subterráneas o a cielo abierto, que trata de resolver la mecánica de rocas es la predicción del comportamiento mecánico del macizo rocoso en una determinada construcción sujeta a las cargas que se le apliquen a lo largo de toda su vida (Brady y Brown, 1985).

La mecánica de rocas aplicada a la práctica de ingeniería civil parte de la ingeniería mecánica clásica y de la mecánica de medios continuos, pero la naturaleza variable de los materiales que analiza, le confieren un elevado número de factores específicos que la identifican como una disciplina diferente. (Ramírez y Alejano, 2004).

Diversos factores han contribuido a la reciente aparición de la mecánica de rocas como una tecnología de importancia. Quizá la causa de interés, sea la creciente dimensión de las obras civiles; a su vez, las enormes inversiones necesarias para llevar a cabo grandes proyectos han ido exigiendo mayores niveles de seguridad en su comportamiento a largo, medio plazo. La necesidad de realizar obras en ambientes poco favorables ha proporcionado un ímpetu significativo a la investigación en mecánica de rocas.

La caracterización geomecánica de los macizos rocosos facilita en forma significativa y hace confiable el pronóstico sobre el comportamiento del macizo rocoso, lo que disminuye la probabilidad de que se produzcan afectaciones de diferentes índoles que puedan atentar tanto la economía como la seguridad de las obras y trabajadores que se encuentran en ellas (Cartaya Pire, 2006).

1.1 Materiales de origen natural

Los materiales pétreos naturales utilizados como componente son las rocas. Éstas son agregados de partículas minerales grandes y sin forma determinada que se encuentran en la naturaleza (Villalba, 2010).

Las rocas se definen como un agregado sólido, formado por uno o varios minerales, que se encuentran ocupando grandes extensiones de la corteza terrestre (Ramírez y Alejano, 2004).

Las propiedades fundamentales al momento de emplear una roca son la dureza, porosidad, inercia química¹, resistencia mecánica, sobre todo su resistencia a compresión, siempre y cuando sean empleadas como elementos de construcción (FAUM, s.f.).

¹ La inercia química de un material de las rocas naturales denota la resistencia que tienen a ser atacadas por diferentes agentes químicos.

En mecánica de rocas, los materiales con los que se trabaja no pueden ser elegidos, sino ensayados, analizados y utilizados en la mejor manera posible para los fines deseados. Debido a su origen natural, estos materiales no tienen por qué ser homogéneos y constantes en sus propiedades y comportamientos. Como se ha indicado los macizos rocosos son, siguiendo la nomenclatura de Hudson (1995) “DIANEs”, es decir, discontinuo, heterogéneo, anisótropo e inelástico y no “CHILEs”, que significa, continuo, homogéneo, isótropo y linealmente elástico. Así pues, los macizos rocosos, que son el principal objeto de estudio y elemento de trabajo, consisten en una serie de bloques o partes de roca intacta y estructura formada por múltiples discontinuidades, comúnmente agrupadas en familias y otros caracteres estructurales. Su naturaleza y comportamiento dependerá, por tanto, de ambos, influyendo unas u otras en función de las características del macizo y sus propiedades (Ramírez y Alejano, 2004).

Un aspecto del comportamiento natural de los macizos rocosos, es en donde la mecánica de rocas entronca con la geología estructural, ciencia que estudia el comportamiento de las rocas de la corteza terrestre que son sometidas a esfuerzos y a las deformaciones que se producen. Para hacer los estudios de mecánica de rocas, es necesario conocer y entender su estructura, con lo cual, resulta fundamental, tener ciertas bases de dicha disciplina a fin de elaborar un análisis estructural como lo son, la presencia de fallas, pliegues, su origen, etc., de los mismos.

Las fallas son un fenómeno geológico y ocurren cuando se forma una quiebra producida por movimientos sísmicos del terreno, como se observa en la Figura 1.1, donde la falla, con el paso del tiempo se ha ido rellenando de material residual de la roca.



Figura 1.1 Falla en el macizo rocoso, cara norte, en Periférico Ecológico (Archivo personal)

1.2 Fractura de rocas

La palabra fractura proviene del latín fractus, que significa “quebrar” y se ha empleado para referirse a las superficies discretas que segmentan o dividen en bloques a rocas y minerales en la naturaleza; estas definen superficies de baja cohesión, y son el resultado del comportamiento quebradizo de los materiales (Romero, 2012).

Las fracturas se distinguen por los movimientos relativos que ocurren a lo largo de la superficie durante su formación y pueden ser abundantes en lugares donde existan heterogeneidades en la roca, como es, la presencia de fósiles, nódulos minerales, en clastos, huecos cársticos, burbujas por gas, ondulaciones en la base de la capa, entre otros puntos heterogéneos.

El fracturamiento corresponde a una pérdida de la continuidad entre dos partes del cuerpo rocoso (Figura 11.2). Además, implica la generación de una grieta y su propagación hasta que se presente la falla general o que se alcance un nuevo estado de equilibrio (Auvinet y Arias, 1991 citado por Romero, 2012).



Figura 1.2 Fractura de roca (Archivo personal)

Los procesos de rotura de rocas intactas implican mecanismos de fracturamiento como generación y crecimiento de grietas en un medio pseudo-continuo. Los campos tensionales que actúan comúnmente en el ámbito de la mecánica de rocas se encuentra predominantemente en el dominio de la compresión. Una complicación que se da en el caso de rocas sometidas a compresión tiene su origen en la fricción movilizada entre las superficies de las microfracturas, donde

se produce la iniciación del fracturamiento, y hace que la resistencia de la roca sea dependiente de la tensión de confinamiento (Ramírez y Alejano, 2004).

Romero (2012), indica los mecanismos que explican la génesis de las principales familias de fracturas:

1. Esfuerzos en la masa rocosa: para una determinada carga o fuerza, los esfuerzos generados superan la resistencia del material rocoso, alcanzando deformaciones inadmisibles y tiene lugar la rotura del mismo.
2. Pérdida de carga: cuando las rocas permanecen a profundidad, dentro de la litosfera y desde luego, a elevadas presiones, afloran y se descomprimen, debido a la pérdida de carga que se transmite a la roca, generando la ruptura de la misma.
3. Pérdida de volumen (compactación): cambios que pueden experimentar las rocas, como resultado del esfuerzo aplicado.
4. Enfriamiento: la ruptura de rocas por enfriamiento se acelera con la presencia de agua en comparación con un ambiente seco. Ocurre cuando el magma es expulsado por los volcanes; ya en la superficie y al contacto con la temperatura ambiental, se enfría rápidamente desarrollando pequeños cristales que forman rocas afaníticas.
5. Por efecto de la diagénesis: conjunto de procesos que transforman en rocas sedimentarias aquellos sedimentos que quedan depositados en las capas profundas y están sometidos a mayores presiones y temperaturas.
6. Actividad biológica: actúan en la disgregación mecánica de las rocas, por ejemplo, cuando las rocas ya presentan fisuras, éstas pueden ser ocupadas por las raíces de los árboles, que imprimen presión conforme crecen y aumentan de volumen.

Características de las rocas fracturadas

Las fracturas se identifican cuando existen rompimientos o separaciones en la masa de un volumen de roca, a lo largo de los cuales, la cohesión del material se ha perdido, y se registran como una separación perpendicular entre los planos o superficies de discontinuidad (Romero, 2012).

Cuando se aprecia un desplazamiento paralelo a lo largo del plano de fractura, precisamente cuando la roca ha tenido un movimiento relativo a lo largo del plano de fractura, se considera que ha sucedido una falla. Esta distinción es un tanto ambigua y depende de la escala de observación; en la práctica, la mayoría de las fracturas no muestran o es insignificante el desplazamiento.

Romero (2012) describe los siguientes tipos de fracturas:

1. Juntas: rompimiento 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 magmáticos durante el enfriamiento de las rocas ígneas y por contracción y expansión de las capas superficiales durante la erosión.
2. Diaclasas: fracturas que muestran pequeños desplazamientos normales a su superficie o muy pequeño paralelo a su superficie, por lo que su apertura es limitada y no contienen cemento cristalino. Se generan principalmente por esfuerzos tensionales y de cizalla, en respuesta a movimientos mayores de la corteza terrestre, también se desarrollan en la superficie y pueden ser resultado del intemperismo.
3. Pliegues: ondulaciones formados por el movimiento de rocas sometidos a presiones laterales que producen los movimientos tectónicos, los cuales causan esfuerzos de compresión. En las Figuras 1.3 y 1.4 se captan varios pliegues que son interrumpidos por una falla.



Figura 1.3 Pliegues situados en el macizo rocoso, cara norte, en Periférico Ecológico (Archivo personal)



Figura 1.4 Pliegues situados en el macizo rocoso, cara sur, en Periférico Ecológico (Archivo personal)

Morfología de fracturas

Un factor importante que determina en gran parte la porosidad y permeabilidad de las fracturas, es la morfología de los planos de fractura. La morfología relaciona la forma natural de las fracturas y por sus características, se han clasificado en fracturas abiertas, deformadas, rellenas de mineral y las fracturas por cavidades descritas resumidamente (Nelson, 2001 citado por Romero, 2012).

1. Fracturas abiertas: se caracterizan por no presentar material diagenético en el espacio entre las paredes de las fracturas, por tal razón no se encuentran cementadas y en consecuencia no contienen algún tipo de mineralización secundaria.
2. Fracturas deformadas: involucran a las que inicialmente fueron abiertas en su formación y han sido subsecuentemente alteradas por deformación.
3. Fracturas rellenas de mineral: son aquellas que han sido rellenas por una mineralización secundaria o diagenética, principalmente por cuarzo o calcita, o ambos; la cual puede llenar completa o parcialmente las fracturas.

1.3 Resistencia a tensión

Según Calla (2014), alude a la resistencia como el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones; función de las fuerzas cohesivas y friccionantes del material, además de otros factores extrínsecos al componente rocoso, como la magnitud de esfuerzos confinantes, la presencia de agua en los poros o la velocidad de aplicación de la carga de rotura.

La roca puede presentar resistencia a compresión y al esfuerzo cortante, en cambio, la de tensión puede despreciarse, como consecuencia, las estructuras que han experimentado tensiones no se construyen en material rocoso, sino, de otros materiales para ellos apropiados.

Las rocas se diferencian del resto de materiales utilizados comúnmente en ingeniería por su baja resistencia a la tensión. Las muestras de rocas ensayadas suelen fallar a niveles tensionales del orden de 10 veces menores que cuando se ensayan a compresión simple. La presencia de discontinuidades en los macizos rocosos hace que en la mayor parte de los casos no exista prácticamente resistencia alguna a la tensión.

Todo ello implica que, en el diseño de excavaciones, cuando se identifique mediante el análisis a una zona del macizo sometida a tensión, esa zona se distenderá y las tensiones se redistribuirán en el entorno de la misma; distensión que podrá originar la inestabilidad de la roca, que tendrá lugar como separación progresiva de unidades de roca del macizo (Ramírez y Alejano, 2004).

En la ingeniería práctica se sabe que las rocas ígneas son, en general, las más resistentes, aunque en ocasiones presentan un comportamiento frágil, y las rocas sedimentarias suelen ser blandas y de poca resistencia, por lo que muestran mayores complicaciones en el diseño y construcción de cualquier obra civil (Gallardo, 2012).

1.4 Modelo de ruptura Hoek-Brown

Un criterio de rotura es una relación entre tensiones que permite predecir la resistencia de una roca sometida a un campo tensional. En general, los criterios de rotura se refieren a la resistencia de pico, aunque también se pueden emplear para la resistencia residual. Uno de los criterios de rotura utilizados en mecánica de rocas es el de Hoek-Brown (1980).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la resistencia de pico σ_p es el esfuerzo máximo que se puede alcanzar, se produce para una cierta deformación a la que se denomina deformación de pico. La resistencia residual σ_r es el valor al que cae la resistencia de algunas rocas para deformaciones elevadas. Se produce después de sobrepasar la resistencia de pico (González de Vallejo, 2004). La Figura 1.5 exhibe la curva completa tensión-deformación con los valores correspondientes a la resistencia de pico y a la resistencia residual.

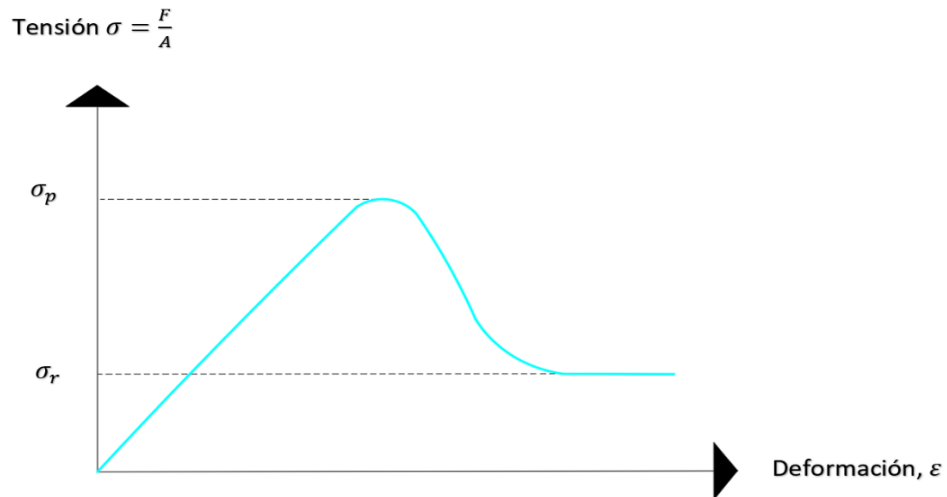


Figura 1.5. Curva completa tensión-deformación (González de Vallejo, 2004)

El criterio de rotura de Hoek-Brown fue propuesto al principio para ser utilizado en el diseño de excavaciones subterráneas en macizos rocosos resistentes.

Las propiedades de las rocas que se incluyen en el mismo cuando se aplica para determinar su resistencia en los ensayos de laboratorio, son:

1. Resistencia a compresión simple σ_{ci} o resistencia uniaxial es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio, y es expresada por la Ecuación 1.1.

$$\sigma_{ci} = \frac{F_c}{A} = \frac{\text{Fuerza compresiva aplicada}}{\text{Área de aplicación}} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

2. Constante de material rocoso m_i depende de las propiedades de la roca y del grado de fracturación antes de someterla a las tensiones de rotura e influye en la resistencia al corte de material.

Cuando se trata de macizos rocosos en lugar de rocas, a esos dos parámetros se le añade otros dos más, incluso un tercero cuando el macizo rocoso ha sido alterado por voladuras o por relajación tensional.

El criterio de rotura de Hoek-Brown a los macizos rocosos sólo se puede aplicar al material rocoso intacto o a los macizos rocosos fracturados que puedan ser considerados homogéneos e isótropos. El criterio funciona bien en aquellos cuya resistencia está controlada por bloques angulares de rocas duras encastradas. No se debe aplicar en macizos rocosos cuyas propiedades estén controladas por una sola familia de discontinuidades como estratificados.

Cuando aparecen dos familias muy marcadas de discontinuidades se debe utilizar, con cierta prudencia, así estaría bien aplicado en el caso de que ninguna de las dos familias tenga un efecto dominante sobre la otra. En caso contrario, por ejemplo, si una de las familias de juntas tiene un relleno de arcilla y es manifiestamente más débil que la otra, no se debe usarlo.

En la Figura 1.6 se muestran de manera gráfica las condiciones del macizo rocoso bajo las cuales se puede utilizar este criterio.

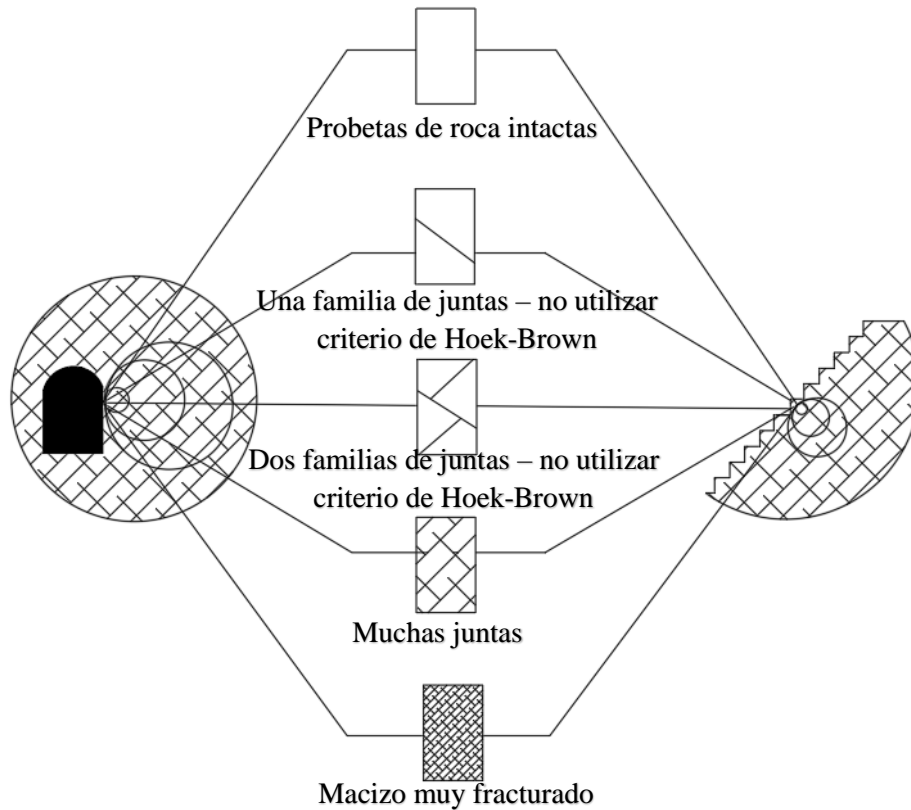


Figura 1.6. Condiciones de aplicabilidad (Hoek et. al., 1995)

CAPITULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

González de Vallejo (2004) alude que las masas rocosas aparecen en la mayoría de los casos afectadas por discontinuidades o superficies de debilidad que separan bloques de matriz rocosa o “roca intacta” constituyendo en conjunto los macizos rocosos. Se presentan en la naturaleza afectadas por una serie de planos de discontinuidad o debilidad. Para el estudio del comportamiento mecánico del macizo rocoso deben estudiarse las propiedades tanto de la matriz como de las discontinuidades.

Esta estructura “en bloques” confiere una naturaleza discontinua a los conjuntos rocosos en cuanto a sus propiedades y a su comportamiento. La presencia de discontinuidades sistemáticas con determinada orientación, como los planos de estratificación o superficies de laminación, implica un comportamiento anisótropo, es decir, las propiedades mecánicas cambian según la dirección considerada; otra característica de los macizos rocosos es su heterogeneidad o variabilidad de propiedades físicas y mecánicas en distintas zonas del macizo. El estudio de la estructura geológica y las discontinuidades es un aspecto fundamental en mecánica de rocas; los planos de debilidad preexistentes controlan los procesos de deformación y rotura en los macizos a cotas superficiales, donde se realizan la gran mayoría de las obras de ingeniería (González de Vallejo, 2004).

2.1 Tipo de discontinuidades

Una discontinuidad² es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. Generalmente la resistencia a la tensión de los planos de discontinuidad es muy baja o nula. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte o, en su caso, por la del material de relleno.

El término discontinuidad hace referencia a cualquier plano de separación en el macizo rocoso, pudiendo tener origen sedimentario, como las superficies de estratificación o laminación, diagenético o tectónico como las diaclasas o las fallas. Éstos condicionan de una forma definitiva sus propiedades y comportamiento resistente, deformacional e hidráulico, tienen carácter discontinuo y anisótropo a los macizos, haciéndolos deformables y débiles, lo que supone una gran dificultad para evaluar el comportamiento mecánico de los mismos frente a las obras de ingeniería (González de Vallejo, 2004).

² Discontinuidad: la presencia de discontinuidades rompe la continuidad de las propiedades mecánicas de los bloques rocosos, confiriendo un comportamiento geomecánico e hidráulico discontinuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad.

Las discontinuidades representan planos referentes de alteración, meteorización y fractura, y permiten el flujo de agua. Se muestran agrupadas en familias que se caracterizan por sus valores representativos de orientación, características físicas y resistentes como las siguientes:

Sistemáticas planares: diaclasas, planos de estratificación³, esquistosidad, laminación⁴.

Sistemáticas lineales: intersección de discontinuidades planares, lineaciones.

Singulares planares: son fallas, diques, discordancias las que se describen brevemente a continuación:

1. Fallas: son discontinuidades singulares que corresponden a planos de rotura o fracturación con desplazamiento relativo entre los bloques, la extensión de las fallas puede variar entre algunos metros y kilómetros.
2. Diques: estructuras tabulares de origen magmático, las rocas de diques pertenecen al grupo de rocas intrusivas.
3. Discordancias: es una relación geométrica entre capas de sedimentos que representa un cambio en las condiciones en que se produjo ese proceso de deposición.

Singulares lineales: ejes de pliegue

2.1.1 Discontinuidades lisas

Ramírez y Alejano (2004), aluden que al suponer una discontinuidad totalmente lisa, sin relleno y cementada. Si se talla un bloque de la misma y se realiza un ensayo de corte, con tensión constante, del tipo que se muestra en la Figura 2.1 y se representa su evolución con ayuda de la Figura 2.1 a), se va a obtener una gráfica como la que se ilustra en Inciso b). Para este ensayo se habrá atribuido perpendicularmente a la discontinuidad una tensión.

³ Los planos de estratificación se dividen en capas o estratos a las rocas sedimentarias. Son discontinuidades sistemáticas con persistencia elevada, cuyo espaciado oscila entre unos pocos centímetros y varios metros.

⁴ Planos de foliación se forman entre las capas de las rocas metamórficas dando la apariencia de hojas o laminas.

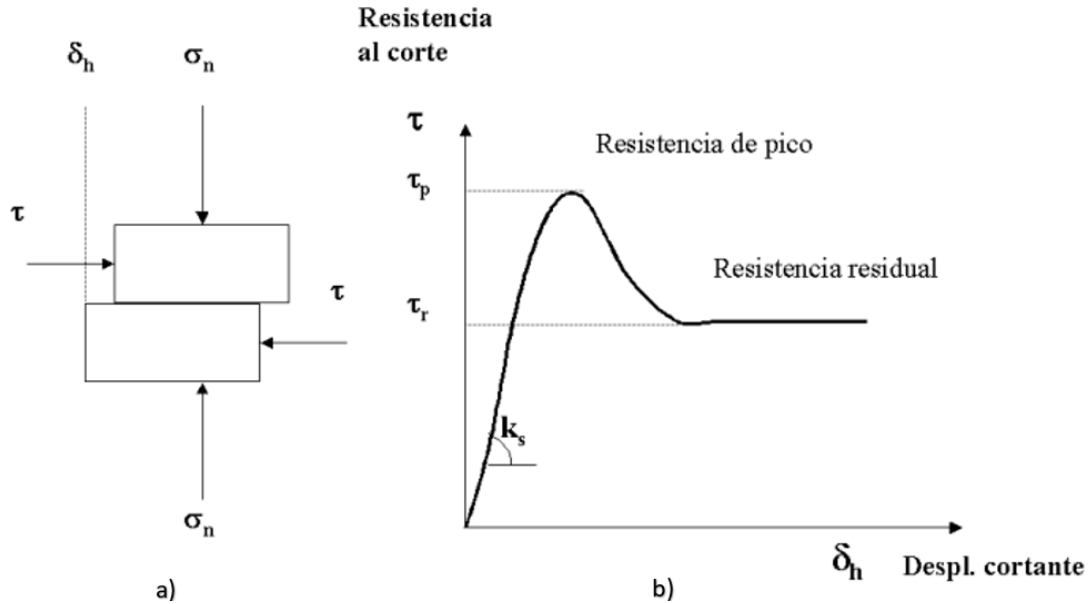


Figura 2.1 Ensayo de corte (a) Respuesta clásica de una discontinuidad plana (b) (Ramírez y Alejano, 2004)

En la Figura 2.1, comenzar a aplicar la tensión, se va produciendo un ligero desplazamiento cortante “elástico” que irá aumentando de manera proporcional a ésta, hasta alcanzar su valor máximo que se denomina resistencia al corte de pico de la discontinuidad, τ_p . La pendiente de esta línea será la denominada rigidez cortante.

Una vez alcanzado el máximo, la respuesta tensional de la discontinuidad irá disminuyendo hasta alcanzar un valor mínimo en el que se produce el deslizamiento indefinido del bloque superior de la discontinuidad sobre el inferior. Este valor será denominado resistencia al corte residual de la discontinuidad, τ_r . (Ramírez y Alejano 2004).

2.1.2 Discontinuidades rugosas sin relleno

Si se tuviera una discontinuidad rugosa con asperezas totalmente regulares y con un ángulo de inclinación “i”, como la que se muestra en la Figura 2.2, resulta fácil comprender que el ensayo es inicialmente equivalente al de la discontinuidad inclinada, por lo que el efecto que produce una rugosidad regular sobre la resistencia al corte de una discontinuidad es un aumento del ángulo de fricción en una cantidad igual a “i” (Figura 2.2 a). Esto hará que el desplazamiento tenga una componente normal y no sólo cortante, efecto asociado con la dilatación de la discontinuidad que se analizará más adelante (Ramírez y Alejano 2004).

Para tensiones normales más elevadas, la resistencia del material intacto será alcanzada, dando lugar a un comportamiento resistente relacionado con la resistencia del material rocoso intacto que con la de las superficies (Figura 2.2 b).

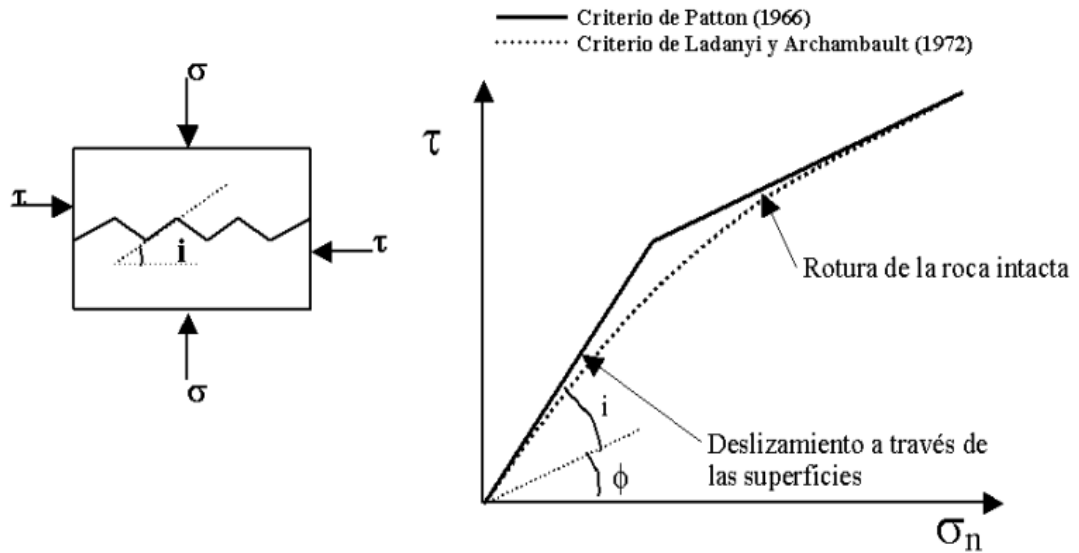


Figura 2.2 Ensayo de corte sobre una discontinuidad rugosa con asperezas totalmente regulares con un ángulo de inclinación “i” (a) y criterios de rotura (b) (Ramírez y Alejano, 2004)

2.1.3 Discontinuidades rugosas con relleno

En superficies planas, como los planos de estratificación característicos de rocas sedimentarias, una fina capa de arcilla dará lugar a una disminución significativa de su resistencia al corte. En una junta muy rugosa u ondulada, el espesor del relleno tendrá que ser mayor que la amplitud de la ondulación para que la resistencia al corte de la junta se reduzca hasta aquella del material de relleno. En este sentido, Goodman (1983) propuso que el comportamiento de la discontinuidad rellena sería diferente en función de la relación entre la amplitud de la aspereza máxima que se encuentre en una discontinuidad y el espesor de relleno máximo.

Así cuando esta relación es muy elevada, esto es, con un relleno muy fino para gran rugosidad, el comportamiento se aproximaría al descrito mediante las técnicas de Barton. A medida que esta relación disminuye el comportamiento resistivo de la discontinuidad va disminuyendo del previsto por Barton y se iría acercando al del material de relleno, de manera que cuando esta relación se hace uno, la rotura tendrá lugar en su totalidad a través del material de relleno, por lo que en ese momento y para valores mayores de dicha relación, los parámetros resistentes de la junta serán los del material de relleno aunque su espesor no sea superior a la máxima altura de las asperezas (Ramírez y Alejano 2004).

Las observaciones de Goodman (1983) se ilustran en la Figura 2.3.

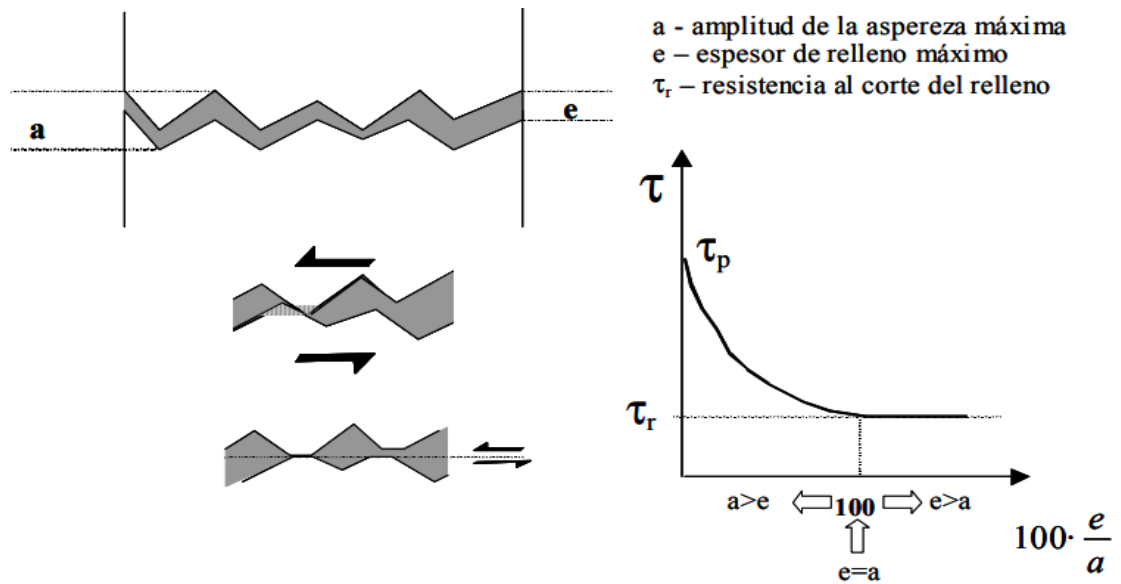


Figura 2.3 Comportamiento resistente esquematizado y presentado en forma gráfica de una discontinuidad rugosa con relleno (Ramírez y Alejano, 2004)

Barton (1974) llevó a cabo una recopilación bibliográfica y una revisión detallada del comportamiento resistente de las discontinuidades con relleno. A partir de esta revisión, se presenta en la Tabla 2.1 un resumen de los valores de resistencia al corte de los materiales de relleno de discontinuidades más comunes.

Tabla 2.1 Resistencia al corte de discontinuidades rellenas y materiales de relleno según Barton 1974 (Modificado de Ramírez y Alejano, 2004)

Roca	Descripción	c' (kg/cm ²) de pico	ϕ ° de pico
Arcillas	Sobreconsolidadas, deslizamientos, juntas y cizallamientos menores	0 - 1.835	12 - 18.5
Lutita arcillosa	Ensayos triaxiales	0.0612	32
Lutita en carbón	Capas de arcilla milónítica, 10-25 mm	0.122	16
Basalto	Brecha basáltica arcillosa, amplia variación del contenido en arcilla y basalto	2.447	42
Caliza	Capa de 6 mm de arcilla	1.02	13 - 14

Roca	Descripción	c' (kg/cm ²) de pico	ϕ ° de pico
	10-20 mm de relleno arcilloso <1 mm relleno de arcilla	0.509 - 2.039	17-21
Caliza, marga y lignito	Capas de lignito interestratificadas	0.815	38
	Contacto marga / lignito	1.02	10
Caliza	Juntas margosas, 20 mm de espesor	0	25
Dolomía	Capa de lutita alterada	0.407	14.5
Montmorillonita y arcilla bentonítica	Capas de 80 mm de bentonita	3.671	14
Esquisto, cuarcita, y esquisto silíceo	Relleno arcilloso de 10-15 mm	0.305 - 0.815	32
	Estratificación con arcilla en capas finas	6.22 - 7.546	41
	Estratificación con arcilla en capas gruesas	3.875	31

2.2 Orientación

La orientación de una discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección de buzamiento la cual es la dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte y por su buzamiento que es la inclinación respecto a la horizontal de dicha línea; su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro o con el diaclasímetro. La dirección de buzamiento se mide siguiendo la dirección de las agujas del reloj desde el norte y varía entre 0° y 360° mediante el clinómetro, con valores entre 0° capa horizontal y 90° la capa vertical (González de Vallejo, 2004).

La dirección del plano y la dirección del buzamiento forman un ángulo de 90°, como en la Figura 2.4.

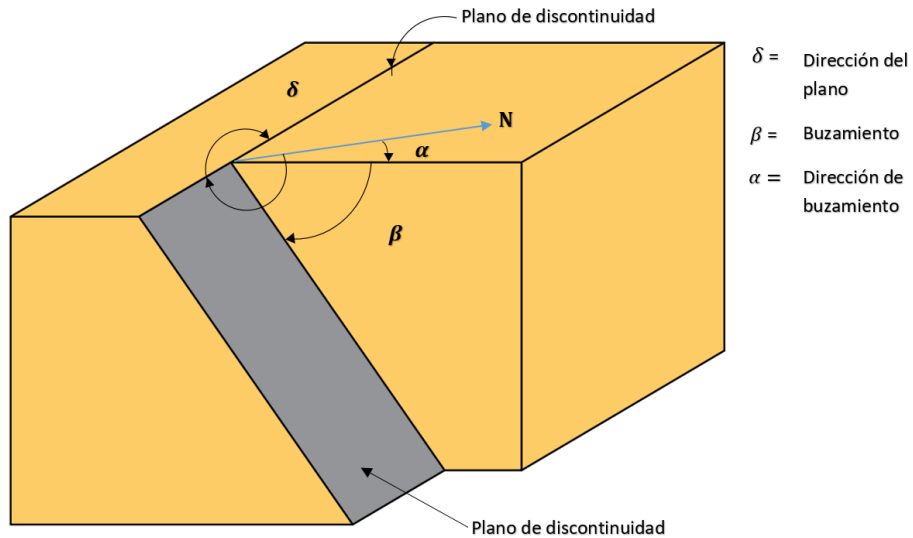


Figura 2.4 Medida de la orientación de discontinuidades (González de Vallejo, 2004)

Se aconseja medir un número suficiente de orientaciones de discontinuidades para definir adecuadamente cada familia. El número de medidas dependerá de la dimensión de la zona estudiada, de la aleatoriedad de las orientaciones de los planos y del detalle de análisis.

González de Vallejo (2004) comenta que la representación gráfica de la orientación de las diferentes familias de discontinuidades puede realizarse mediante la proyección estereográfica⁵, bloques de diagrama⁶ (Figura 2.5) y símbolos en mapas geológicos⁷.

⁵ La proyección estereográfica representa los polos o planos con valores medios de las diferentes familias.

⁶ Los bloques de diagrama permiten una visión general de las familias y sus respectivas orientaciones.

⁷ Los símbolos en mapas geológicos indican los valores medios de dirección y valor de buzamiento para los diferentes tipos de discontinuidades.

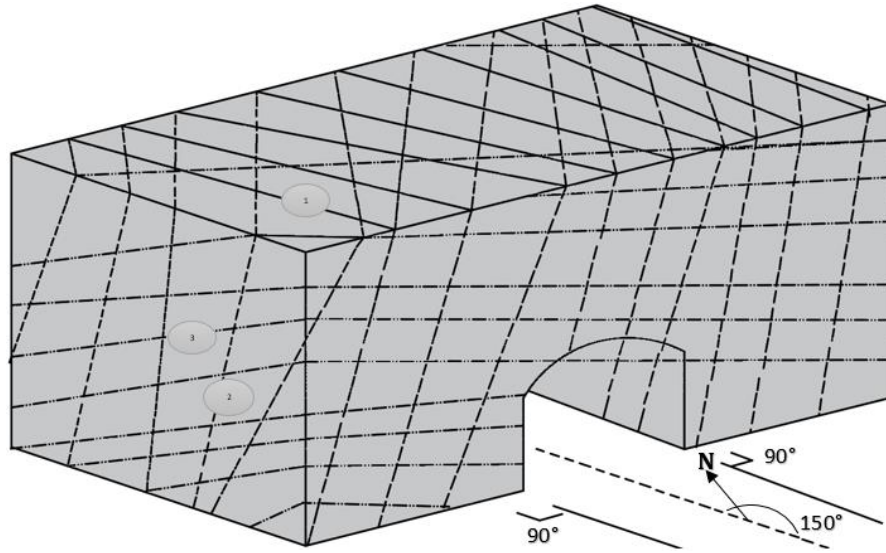


Figura 2.5 Representación de familias de discontinuidades mediante un bloque diagrama ISRM 1981 (González de Vallejo, 2004)

2.3 Espaciado

El espaciado es la distancia media perpendicular entre los planos de discontinuidad de una misma familia. Influye en el comportamiento global de macizo rocoso y define el tamaño de los bloques de matriz rocosa que forman las diferentes familias.

La medida del espaciado se realiza con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de las discontinuidades, al menos de 3 metros (Figura 2.6). La longitud de medida debe ser unas 10 veces superior al espaciado; la cinta debe colocarse perpendicularmente a los planos, registrándose la distancia entre discontinuidades adyacentes.

En macizos rocosos con espaciados grandes, de varios metros, en los procesos de deformación y rotura prevalecerán las propiedades de la matriz rocosa o de los planos de discontinuidad según la escala de trabajo considerada y la situación de la obra de ingeniería con respecto a las discontinuidades; si los espaciados son menores, de varios decímetros a 1 o 2 metros, el comportamiento del macizo lo determinarán los planos de debilidad; por último si los espaciados son pequeños, la resistencia del macizo rocoso disminuye de forma considerable, pudiendo, en casos extremos, presentar un comportamiento isótropo asimilable al de materiales granulares sin cohesión (González de Vallejo, 2004).



Figura 2.6 Espaciado de una familia de discontinuidades (Bazán Santa Cruz, et. al., 2012)

La Figura 2.7 representa una cara de un afloramiento en la que únicamente se pueden medir los espacios aparentes de tres familias de discontinuidades.

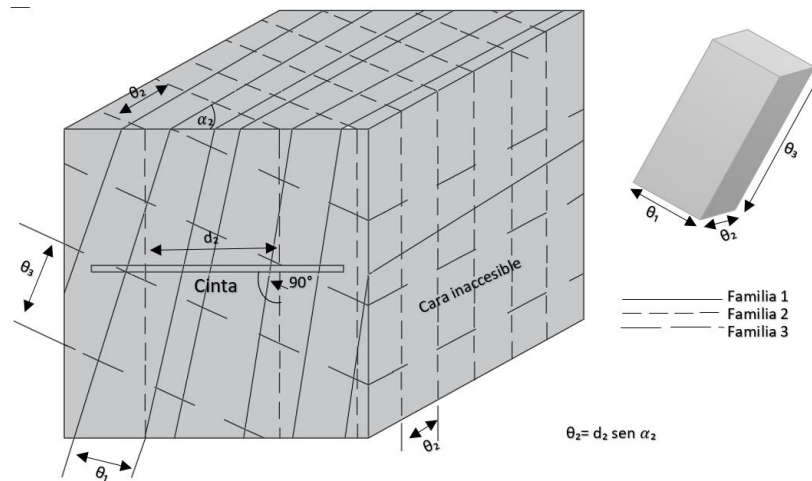


Figura 2.7 Medida del espaciado en una cara expuesta del afloramiento ISRM 1981 (González de Vallejo, 2004)

Las superficies expuestas de los afloramientos rocosos no permiten realizar las medidas del espaciado en la dirección perpendicular a las superficies, y lo que se miden son espaciados aparentes, debiéndose aplicar las correcciones necesarias para obtener el espaciado real.

De acuerdo a la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM por sus siglas en inglés), los espaciamientos se clasifican como:

1. Extremadamente cerca <20 mm
2. Muy cercanas de 20 a 60 mm
3. Cercanas de 60 a 200 mm
4. Moderadamente espaciadas de 200 a 600 mm
5. Espaciadas de 600 a 2000 mm
6. Muy espaciadas de 2000 a 6000 mm
7. Extremadamente espaciadas mayores a 6000 mm

2.4 Persistencia

La continuidad o persistencia es la extensión superficial del plano de discontinuidad, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Define en gran parte si la matriz rocosa va a estar involucrada o no en los procesos de rotura del macizo rocoso, y en qué grado condiciona los parámetros resistentes globales del mismo (Figura 2.8).

La medida de la continuidad se realiza con una cinta métrica; si el afloramiento permite la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección y del buzamiento. Es importante destacar las familias continuas, ya que por lo general serán éstas las que condicionen principalmente los planos de rotura del macizo rocoso (González de Vallejo, 2004).

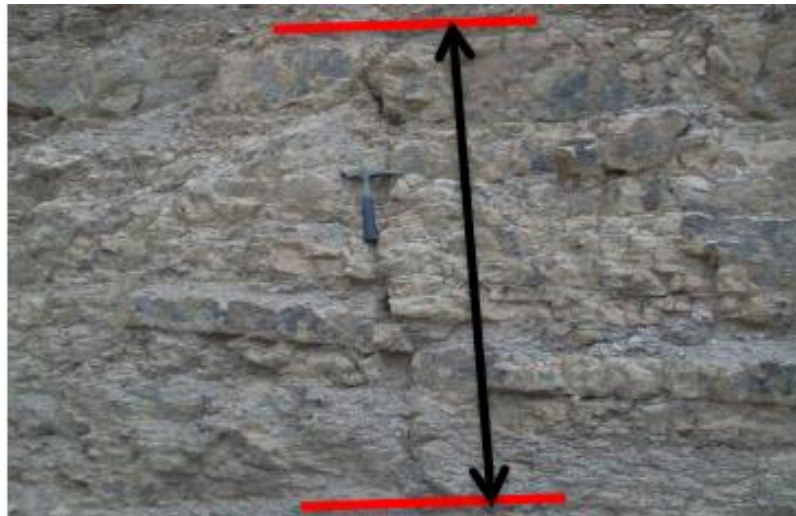


Figura 2.8 Persistencia de una discontinuidad en un macizo rocoso (Bazán Santa Cruz et. al., 2012)

La clasificación de la persistencia se describe en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Descripción de la persistencia ISRM 1981 (Modificado de González de Vallejo, 2004)

Descripción de la continuidad		
Clase	Continuidad	Longitud
I	Muy baja continuidad	< 1 m
II	Baja continuidad	1 - 3 m
III	Continuidad media	3 - 10 m
IV	Alta continuidad	10 - 20 m
V	Muy alta continuidad	>20 m

La continuidad se puede presentar mediante esquemas o diagramas como los que aparecen en la Figura 2.9.

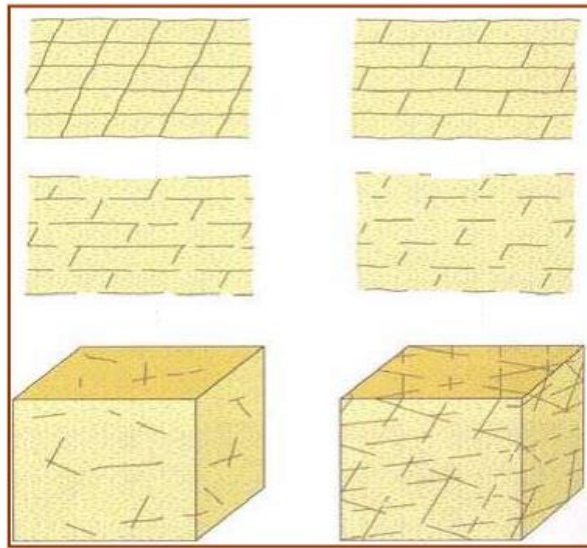


Figura 2.9 Diagramas de modelos de persistencia de varias familias de discontinuidades ISRM 1981 (González de Vallejo, 2004)

2.5 Rugosidad

La rugosidad de un plano de discontinuidad determina su resistencia al corte. A mayor rugosidad mayor es la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor del relleno. La presencia de irregularidades dificulta el movimiento durante los procesos de desplazamiento tangencial por corte a favor de las discontinuidades. Se emplea en sentido amplio para hacer referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidad, como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala de los planos, definidas en ocasiones como de 1° y 2° orden respectivamente (González de Vallejo, 2004).

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM por sus siglas en inglés) propone una clasificación con dos escalas para determinar la descripción de la rugosidad como se muestra en la Figura 2.10 donde la escala decimétrica o

métrica es para la ondulación de las superficies: superficies planas, onduladas o escalonadas; mientras que la escala milimétrica y centimétrica para la rugosidad o irregularidad que son las superficies pulidas, lisas o rugosas.

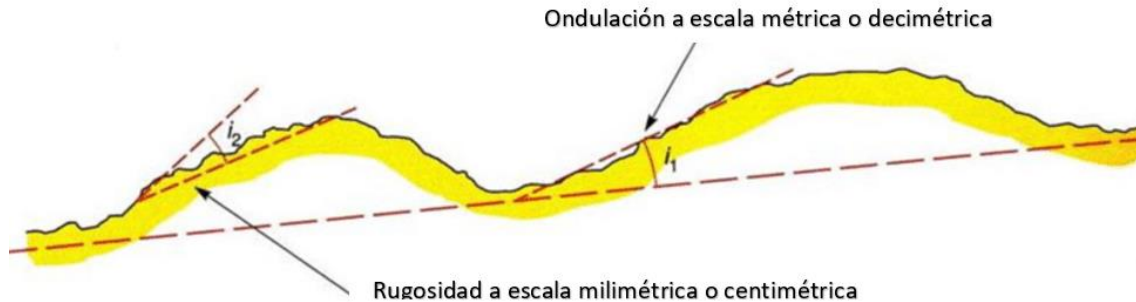


Figura 2.10 Ondulación y rugosidad de una superficie de discontinuidad (González de Vallejo, 2004)

El método sencillo y rápido es la comparación visual de la discontinuidad con los nueve perfiles estándar de rugosidad propuestos por Barton (1987) en la Figura 2.11.

Descripción	Perfil
Rugosa	
Lisa	
Pulida	
	Escalonada
Rugosa	
Lisa	
Pulida	
	Ondulada
Rugosa	
Lisa	
Pulida	
	Plana

Figura 2.11 Perfiles de rugosidad (González de Vallejo, 2004)

2.6 Abertura

Según González de Vallejo (2004), la abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede sufrir gran variación en diferentes zonas del macizo rocoso: mientras que en superficie la abertura puede ser elevada, al aumentar la profundidad ésta se reduce, pudiendo llegar a cerrarse. La influencia de la abertura en la resistencia al corte es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes (Figura 2.12).



Figura 2.12 Abertura de una discontinuidad (Bazán Santa Cruz et. al., 2012)

Su medida se realiza directamente con una regla graduada en milímetros. Cuando la separación es pequeña se puede emplear un calibre que se introduce en la abertura; debe indicarse si la abertura de una discontinuidad presenta variaciones, realizándose medidas a lo largo al menos de 3 metros. La descripción se realiza según la terminología de la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Clasificación de la abertura ISRM 1981 (Modificado de González de Vallejo, 2004)

Descripción de abertura		
Clase	Abertura	Descripción
I	< 0.1 mm	Muy cerrada
II	0.1 - 0.25 mm	Cerrada
III	0.25 - 0.5 mm	Parcialmente abierta
IV	0.5 - 2.5 mm	Abierta
V	2.5 - 10 mm	Moderadamente ancha
VI	>10 mm	Ancha
VII	1 - 10 cm	Muy ancha
VIII	10 - 100 cm	Extremadamente ancha
IX	> 1 m	Cavernosa

2.7 Relleno

En ocasiones las discontinuidades aparecen con relleno de materiales blandos arcillosos o con material rocoso de naturaleza distinta a la de las paredes. Las propiedades físicas y mecánicas del relleno, en el afloramiento son su resistencia al corte, deformabilidad, permeabilidad, naturaleza, espesor o anchura pueden ser variables, y controlan el comportamiento de la discontinuidad; en el caso de materiales blandos o alterados, la resistencia puede sufrir variaciones importantes a corto plazo si varía el contenido en agua del relleno o si tiene lugar desplazamiento a lo largo de las juntas (González de Vallejo, 2004).

La Figura 2.13 una falla, que con el paso del tiempo se ha rellenado de material residual de la roca.



Figura 2.13 Discontinuidad rellena (Irveen, 2010)

Existen gran cantidad de materiales de relleno con diferentes propiedades, en la Tabla 2.4 se mencionan algunos tipos.

Tabla 2.4 Tipos de relleno en las discontinuidades (González de Vallejo, 2004)

Código	Descripción
N	Sin relleno
ST	Limo
CL	Arcilla
CA	Calcita
PY	Pirita
SF	Sulfatos
QZ	Cuarzo
FG	Relleno ferruginoso

2.8 Resistencia de las paredes de la discontinuidad

La resistencia a compresión simple de la pared de una discontinuidad, que depende del tipo de matriz rocosa, de la existencia o no de relleno y del grado de alteración de las paredes, influye en la resistencia al corte y en la deformabilidad del plano de discontinuidad, sobre todo si no presentan relleno. Esta resistencia suele ser menor que la de la roca intacta por la alteración superficial (González de Vallejo, 2004).

En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma de la matriz rocosa, pero generalmente es menor debido a la meteorización de las paredes: los procesos de alteración afectan en mayor grado a los planos de discontinuidad que a la matriz rocosa. En consecuencia, junto a la medida de la resistencia de las paredes de la discontinuidad debe ser estimado el grado de meteorización de la matriz rocosa. Puede estimarse en campo con el martillo Schmidt (Figura 2.14), aplicándolo directamente sobre la discontinuidad o a partir de los índices de campo. Las medidas deben realizarse sobre paredes representativas del estado de alteración de las discontinuidades frecuentes o significativas en el macizo rocoso.



Figura 2.14 Ensayo in situ con el martillo Schmidt o esclerómetro (Mora, 2014)

2.9 Filtraciones

El agua presente en los macizos rocosos reduce su resistencia, genera presiones en el interior de los mismos y altera sus propiedades, dificultando las excavaciones superficiales y subterráneas.

Para evaluar la influencia del agua deben estudiarse las características de permeabilidad y el flujo en los macizos rocosos. Las propiedades del medio

rocoso deben evaluarse teniendo en cuenta las condiciones del agua subterránea (González de Vallejo, 2004).

El agua puede afectar al comportamiento mecánico de los dos componentes del macizo rocoso: matriz rocosa y discontinuidades.

Las observaciones conforme a las filtraciones en las discontinuidades, tanto si se presentan rellenas o limpias, pueden seguir las descripciones de la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Clasificación de filtraciones en discontinuidades según ISRM 1981 (González de Vallejo, 2004)

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

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LA MATRIZ ROCOSA

De acuerdo con el Glossary of Geology (1974), se define como matriz rocosa a un material formado naturalmente, compuesto de dos o más minerales, teniendo un grado de constancia mineralógica y química en un área de cierta extensión de la corteza terrestre. La Figura 3.1 ilustra el concepto de la matriz rocosa.

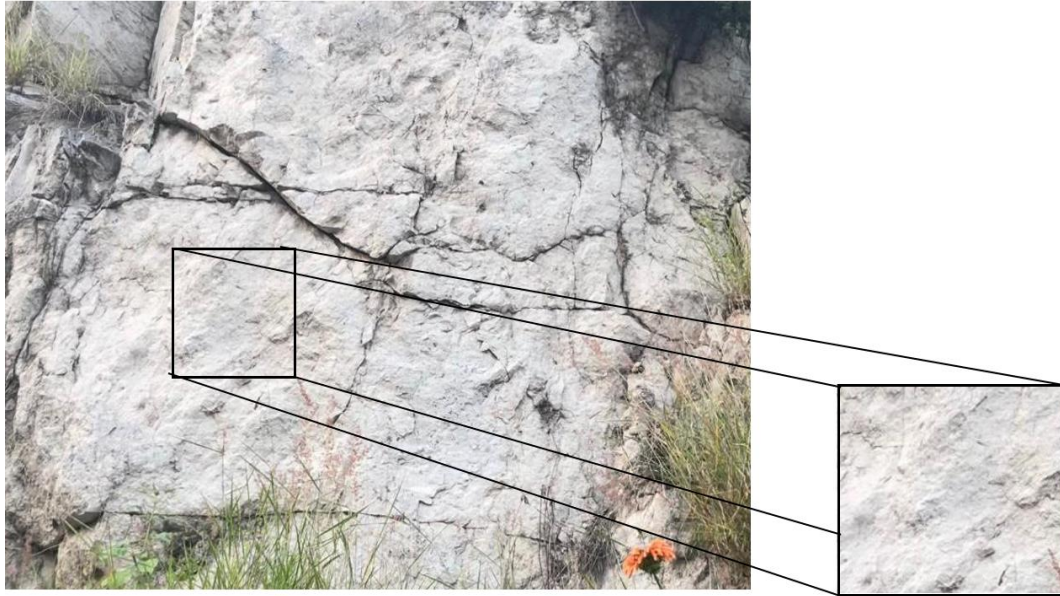


Figura 3.1 Matriz rocosa (Archivo personal)

El estudio e identificación de la matriz rocosa, que se hace mediante el análisis petrográfico puede parecer innecesario, pero en muchas ocasiones es la única manera de poder averiguar con exactitud qué roca es la presente en un emplazamiento (Plaza, s.f.).

3.1 Litología

En la descripción de macizos rocosos es de vital importancia la identificación de la litología correspondiente a la matriz rocosa, ya que, puede estar representada por los tres tipos de rocas que se conocen en geología, es decir, rocas ígneas⁸, rocas sedimentarias⁹ o rocas metamórficas¹⁰ (Servicio Geológico Mexicano, 2001).

⁸ Las rocas ígneas son aquellas que se han formado por solidificación de un material rocoso, caliente y móvil denominado magma; este proceso, llamado cristalización, resulta del enfriamiento de los minerales y del entrelazamiento de sus partículas.

⁹ Rocas sedimentarias se forman por la precipitación y acumulación de materia mineral de una solución o por la compactación de restos vegetales y/o animales que se consolidan en rocas duras.

¹⁰ Rocas metamórficas resultan de la transformación de rocas preexistentes que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones físicas o químicas o una combinación de ambas.

González de Vallejo (2004), sostiene que la identificación de una roca se establece a partir de su composición y de su textura o relaciones geométricas de sus minerales.

Las observaciones prácticas son la composición mineralógica, forma y tamaño de los granos, el color y la dureza que son explicadas:

Composición mineralógica

La composición mineralógica permite clasificar litológicamente la roca. Los minerales más comunes que la forman se pueden identificar a nivel de muestra con una lupa. La identificación detallada de los minerales requiere un estudio petrográfico mediante lámina delgada que se realizará siempre que existan dudas en la identificación de los mismos. Una vez descritos los minerales, se nombra y clasifica la roca.

La textura

Es la apariencia física general la matriz rocosa, incluyendo las características geométricas de los cristales o granos minerales constituyentes, y sus relaciones espaciales.

El tamaño de grano

Hace referencia a las dimensiones medias de los minerales o fragmentos de roca que componen la matriz rocosa. En rocas de grano fino es útil la ayuda de una lupa de mano; el tamaño de las partículas que la componen puede ser homogéneo o presentar ciertas variaciones.

Los intervalos de tamaño del grano utilizados se indican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación del tamaño de grano de las rocas (González de Vallejo, 2004)

Descripción	Tamaño del grano	Equivalencia con los tipos de suelos
Grano grueso	> 2 mm	Gravas
Grano medio	0.06 - 2 mm	Arenas
Grano fino	< 0.06 mm	Limos y arcillas

El color

El color de una roca depende de los minerales que la componen, algunos minerales tienen un tono distintivo, pero frecuentemente contienen sustancias o impurezas que lo modifican. Puede describirse dando un tono de coloración principal seguido de uno secundario e indicando, por último, la intensidad que

presenta. Esta observación debe realizarse sobre la roca fresca, una vez retirada la capa superficial de alteración.

La dureza

Esta propiedad está directamente relacionada con la resistencia, ya que, depende de la composición mineralógica y del grado de alteración que afecte a la roca. Su descripción es cualitativa, generalmente se adoptan como criterios la densidad y la resistencia de la roca, estableciéndose el grado 1 para la roca menos densa y resistente y el grado 14 para la más densa y resistente. Para evaluarla, se emplea la escala de Mohs que se presenta a continuación en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Escala de dureza de Mohs (Bazán Santa Cruz et. al., 2012)

Dureza	Mineral	Comentario
1	Talco	Se puede rayar fácilmente con la uña
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más dificultad
3	Calcita	Se puede rayar con una moneda de cobre
4	Fluorita	Se puede rayar con un cuchillo de acero
5	Apatito	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo
6	Ortosa	Se puede rayar con una lija para acero
7	Cuarzo	Raya el vidrio
8	Topacio	Rayado por herramientas de carburo de wolframio
9	Corindón	Rayado por herramientas de carburo de silicio
10	Diamante	El más duro, no se altera con nada, excepto por otro diamante

3.2 Propiedades físicas

Las propiedades índices de las rocas permiten caracterizar a una roca dentro de un grupo cuyas propiedades sean similares y compararlas con otras para evaluar su comportamiento; éste mismo puede estudiarse tanto microscópicamente cuando se analizan las propiedades de los minerales que componen la roca, como macroscópicamente cuando se analiza ya en conjunto sin importar la cantidad o porción de minerales que se tengan (Gallardo, 2012).

Las propiedades físicas son de carácter cualitativo y con ellas se busca caracterizar a una roca de manera superficial y detallada, entre éstas se pueden encontrar: la porosidad, el peso específico, la permeabilidad, durabilidad, entre otros.

3.2.1 Porosidad

La porosidad de una roca es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra (Ecuación 3.1), expresada en porcentaje.

$$n = \frac{V_v}{V_m} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

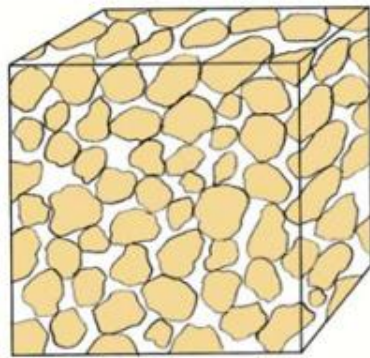
n = porosidad

V_v = volumen de vacíos

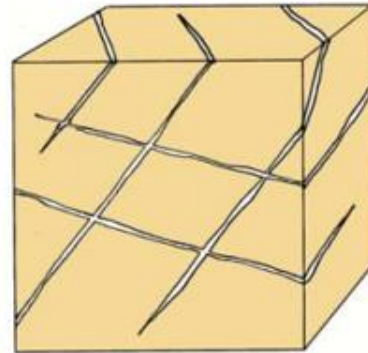
V_m = volumen total de la muestra

Es la propiedad que más afecta a las características resistentes y mecánicas, siendo inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a la deformabilidad, ya que la existencia de huecos puede dar lugar a zonas de debilidad. La porosidad en general, decrece con la profundidad y con la edad de las rocas (González de Vallejo, 2004).

Se consideran dos tipos de porosidad, la porosidad absoluta y la porosidad por fisuración, las cuales están en la Figura 3.2. Para establecer la diferencia, cuando se dice que las grietas alargadas dan origen a la “porosidad por fisuración” y el total de huecos a la “porosidad absoluta”.



Porosidad absoluta



Porosidad por fisuración

Figura 3.2 Porosidad absoluta y por fisuración (Sánchez, 2020)

Las rocas sedimentarias y las rocas ígneas extrusivas alcanzan valores altos de porosidad, mientras que las rocas ígneas intrusivas muy bajos (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Valores de porosidad de las rocas. Datos seleccionados a partir de Goodman, 1989, Rahn, 1986, Walthan 1999 y Farmer 1968 (en González de Vallejo, 2004)

Roca	Porosidad (%)
Andesita	10 – 15
Arenisca	5 – 25
Basalto	0.1 – 2
Caliza	5 - 20
Carbón	10
Cuarcita	0.1 - 0.5
Creta	30
Diabasa	0.1
Dolomia	0.5 – 10
Esquisto	3
Gabro	0.1 - 0.2
Gneiss	0.5 - 1.5
Granito	0.5 - 1.5
Grauvaca	3
Mármol	0.3 - 2
Lutita	2 – 15
Pizarra	0.1 – 1
Riolita	4 – 6
Sal	5
Toba	14 – 40
Yeso	5

3.2.2 Peso volumétrico

El peso volumétrico del material en estado natural se define como la relación que existe entre el peso de la muestra y el volumen total de la misma (Ecuación 3.2) considerando las tres fases del suelo.

$$\gamma = \frac{W}{v} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

γ = peso específico

W = Peso de la muestra

v = volumen total de la muestra

En general un alto peso volumétrico corresponde con las rocas más resistentes (Tabla 3.4), excepto cuando las rocas poseen características anisotrópicas y se debe obtener en condiciones saturada y seca.

Tabla 3.4 Peso volumétrico de rocas según Attewell y Farmer, 1976 (IMTA, 2001)

Roca	Peso volumétrico T/m ³
Granito	2.6 – 2.9
Dolerita	2.7 – 3.05
Riolita	2.4 – 2.6
Andesita	2.2 – 2.3
Gabro	2.8 – 3.1
Basalto	2.8 – 2.9
Arenisca	2.0 – 2.6
Lutita	2.0 - 2.4
Caliza	2.2 – 2.6
Dolomita	2.5 - 2.6
Gneiss	2.8 – 3.0
Mármol	2.6 – 2.7
Cuarcita	2.6 – 2.7
Pizarra	2.6 – 2.7

3.2.3 Permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad de algunos materiales de permitir el paso de fluidos a través de las rocas. Se considera permeable cuando permite el paso de una cantidad medible de fluido en un período de tiempo finito (González, 1986).

La filtración y el flujo de agua a través de la matriz rocosa se produce a favor de los poros y fisuras, dependiendo la permeabilidad de la interconexión entre ellos y de otros factores, como la temperatura, estructura, estratificación, existencia de cavidades, etc. Se obtiene mediante ensayos de laboratorio en un aparato llamado permeámetro y se mide por el coeficiente de permeabilidad o de conductividad hidráulica (Ecuación 3.3), k , que se expresa en m/s o m/día.

$$k = K \left(\frac{\gamma_w}{\mu} \right) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

K = es la permeabilidad intrínseca dependiente únicamente de las características del medio físico

γ_w = peso específico del agua

μ = es la viscosidad del agua

Existen dos tipos de permeabilidad, la primaria y la secundaria que se puede ver en la Figura 3.3. La primera tiene que ver con la porosidad propia de la roca, y el grado de absorción, y la segunda es debida a las fracturas o discontinuidades que tiene el macizo rocoso.

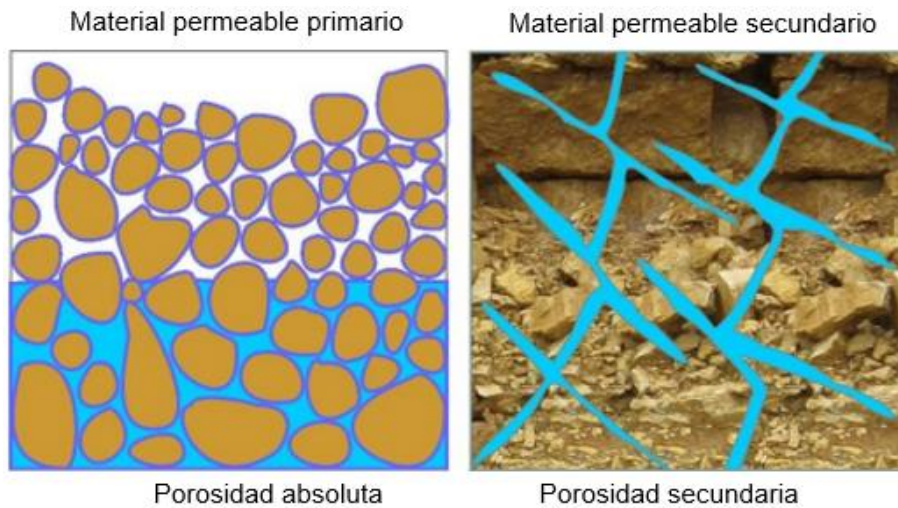


Figura 3.3 Permeabilidad primaria y secundaria (Velázquez, 2016)

Ante la dificultad en la estimación y valoración de este parámetro, sus valores se indican en ordenes de magnitud. Se incluyen los datos del coeficiente de permeabilidad de diferentes rocas en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Datos típicos de permeabilidad de la matriz rocosa (González de Vallejo, 2004)

Roca	k (m/s)
Arenisca	$10^{-5} - 10^{-10}$
Caliza y dolomía	$10^{-6} - 10^{-12}$
Esquisto	$10^{-7} - 10^{-8}$
Pizarra	$10^{-11} - 10^{-13}$
Granito	$10^{-9} - 10^{-12}$
Lutita	$10^{-9} - 10^{-13}$
Rocas metamórficas	$10^{-9} - 10^{-12}$
Rocas volcánicas	$10^{-9} - 10^{-12}$
Sal	$<10^{-11} - 10^{-13}$

3.2.4 Durabilidad

La durabilidad es la resistencia que la roca presenta ante los procesos de alteración y desintegración, propiedad a la que también se alude como alterabilidad, definiéndose en este caso como la tendencia a la rotura de los componentes o de las estructuras de la roca.

Ésta aumenta con la densidad y se reduce con el contenido de agua, se evalúa mediante el ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento, o ensayo de durabilidad de la roca¹¹(SDT por sus siglas en inglés).

El índice de durabilidad, I_D (Ecuación 3.4), define el porcentaje de roca, en peso seco, que queda retenido en el tambor después de uno o dos ciclos de desmoronamiento (I_{D1}, I_{D2}), y puede variar entre 0% y 100% (Tabla 3.6).

$$I_D(\%) = \frac{\text{Peso seco despues de uno o dos ciclos}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Tabla 3.6 Valores de durabilidad (González de Vallejo, 2004)

Durabilidad	% peso retenido después de 2 ciclos
Muy alta	> 98
Alta	95-98
Media-alta	85-95
Media	60-85
Baja	30-60
Muy baja	< 30

La Figura 3.4 se expone el aparato para ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento SDT.



Figura 3.4 Aparato de ensayo (González de Vallejo, 2004)

¹¹ SDT consiste en someter al material, previamente fragmentado, a ciclos estándar de humedad-sequedad-desmoronamiento de 10 minutos de duración en el laboratorio.

3.2.5 Ángulo de fricción interna

El ángulo de fricción interna, ϕ , es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca, para la mayoría de las rocas, este ángulo varía entre 25° y 45° (Tabla 3.7). La fuerza friccional depende del ángulo de fricción y del esfuerzo normal σ actuando sobre el plano considerado.

Tabla 3.7 Valores típicos de ϕ para roca sana a partir de Walthan, 1999, Rahn 1986, Goodman 1989, Farmer 1968, Jiménez Salass y Justo Alpañes 1975 (en González de Vallejo, 2004)

Roca	Ángulo de fricción ϕ (grados)
Andesita	45
Arenisca	30-50
Basalto	48-55
Caliza	35-50
Cuarcita	40-55
Diabasa	40-50
Diorita	50-55
Esquisto	25-30* 20-30*
Gabro	35
Gneiss	30-40
Granito	45-58
Grauvaca	45-50
Mármol	35-45
Lutita	40-60
Pizarra	15-25* 40-55 15-30*
Yeso	30

(*) En superficies de laminación o esquistosidad

3.2.6 Cohesión

La cohesión, c , es la fuerza de unión entre partículas minerales que forman la roca. Incluso en rocas aparentemente isótropas y homogéneas, su valor puede variar según el grado de cementación o variaciones en la composición mineralógica, como se observa en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Valores típicos de c para roca sana a partir de Walthan, 1999, Rahn 1986, Goodman 1989, Farmer 1968, Jiménez Salass y Justo Alpañes 1975 (González de Vallejo, 2004)

Roca	Cohesión c (kg/cm ²)
Andesita	280
Arenisca	80-350
Basalto	200-600
Caliza	50-400
Caliza margosa	10-60
Cuarcita	250-700
Diabasa	900-1,200
Diorita	150
Dolomía	220-600
Esquistos	250
	20-150*
Gabro	300
Gneiss	150-400
Granito	150-500
Grauvaca	60-100
Mármol	150-350
Lutita	30-350
Pizarra	100-500
	< 100*
Toba	7

(*) En superficies de laminación o esquistosidad

3.2.7 Absorción de agua

Es la relación entre el peso del agua contenida en una roca y el peso de su fase sólida. Suele expresarse como un porcentaje y es definida por la Ecuación 3.5.

$$w (\%) = \frac{w_w}{w_s} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

En donde:

w = absorción de agua

w_w = peso del agua

w_s = peso de los sólidos

Es un hecho probado que la resistencia de prácticamente todas las rocas disminuye al aumentar el contenido de agua, disminución que puede llegar al 50%. Esta reducción de resistencia puede ser debida a la disminución de la energía superficial que se produce como consecuencia de la absorción de agua en las superficies de las microgrietas (Seedsman, 1993 citado por Ramírez y Alejano, 2004).

3.2.8 Hinchamiento

Se denomina hinchamiento al aumento del volumen de una roca producido por un incremento del contenido de agua, favorecido por una modificación del estado tensional, normalmente una distensión o relajación. La compresión necesaria para impedir que dicho hinchamiento tenga lugar puede ser grande.

Este fenómeno se debe generalmente a la fijación de agua por los minerales hidrófilos contenidos en las rocas, principalmente arcillas de tipo montmorillonita¹²; también pueden tener lugar por cambios químicos, por ejemplo, al transformarse la anhidrita en yeso (Ramírez y Alejano, 2004).

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM por sus siglas en inglés), propone tres ensayos de laboratorio para caracterizarlo:

- 1 Medida de la presión axial de hinchamiento a volumen constante.
- 2 Medida de la deformación axial de hinchamiento en una muestra de roca confinada lateralmente y sometida a cargas axiales constantes.
- 3 Medida de la deformación de hinchamiento libre en dirección axial y radial.

Se recomienda hacer un número suficiente de ensayos de hinchamiento, ya que se ha constatado que la dispersión de los resultados obtenidos es grande. El potencial de hinchamiento de una roca puede variar según se mida en dirección paralela o perpendicular a los planos de estratificación, por lo que conviene realizar los ensayos por lo menos en estas dos direcciones para poder caracterizarla correctamente (Ramírez y Alejano, 2004).

Los ensayos uno y dos se realizan con el aparato que se indica en la Figura 3.5.

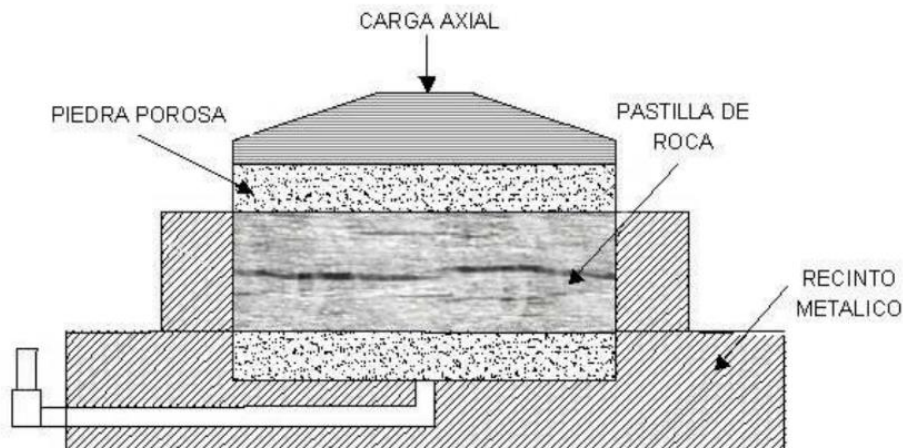


Figura 3.5 Muestra de roca para ensayo de hinchamiento confinado (Ramírez y Alejano, 2004)

¹² Las montmorillonitas son minerales arcillosos que se encuentran en muchas rocas sedimentarias: lutitas, limolitas, margas, etc.; también se suelen hallar en las milonitas de fallas, en los rellenos kársticos y en los productos de alteración de rocas magmáticas o metamórficas.

Otro ensayo recomendado por ISRM es el de durabilidad (SDT por sus siglas en inglés), que permite determinar la resistencia de la roca a la alteración y desintegración al estar sometida a ciclos sucesivos de inmersión en agua y secado. Para realizar el ensayo se introduce la muestra de roca en un cilindro metálico cuya superficie lateral es de rejilla de alambre, con una abertura de malla de 2 mm. El cilindro tiene una longitud de 100 mm y un diámetro de 140 mm y debe estar preparado para soportar temperaturas de 105°C durante 12 horas, sin sufrir deformación. El cilindro se sitúa en una cubeta, quedando a una distancia de 40 mm entre la rejilla lateral y la base de la cubeta, la cual se encuentra unida a una superficie fija (Figura 3.6).

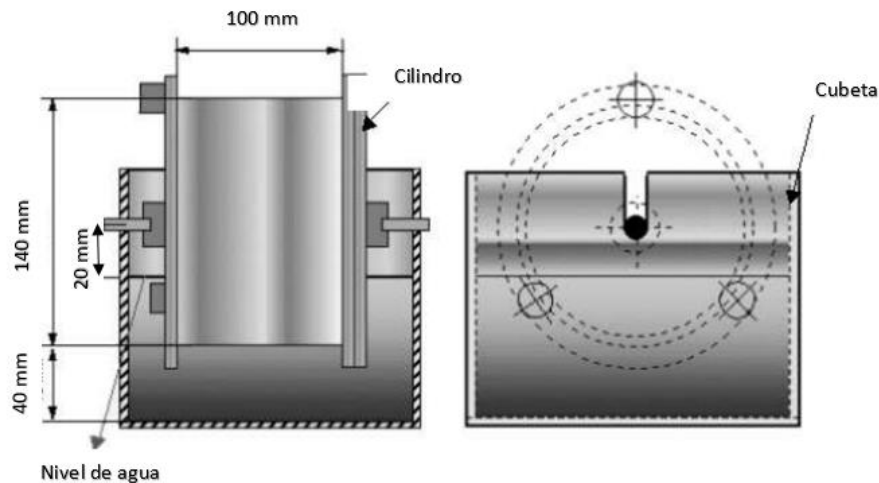


Figura 3.6 Esquema del cilindro y de la cubeta (Ramírez y Alejano, 2004)

3.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son de tipo cuantitativo, son las que alimentan a los modelos de predicción matemática para conocer el comportamiento de las estructuras que se construyen sobre macizos rocosos.

3.3.1 Resistencia a compresión simple

La prueba a compresión uniaxial consiste en la aplicación de un esfuerzo axial de compresión a una muestra no confinada lateralmente, la cual puede tener diversas formas pero que generalmente es cilíndrica (Figura 3.7). Es una prueba sencilla para determinar la resistencia de la roca intacta, sin embargo, los núcleos de roca requieren de una preparación cuidadosa que sólo en laboratorio se pueden realizar (IMTA, 2001). La Ecuación 3.6 define la resistencia a compresión simple.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{\text{Fuerza compresiva aplicada}}{\text{Área de la muestra}} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

σ_c = resistencia a compresión simple

P = carga de compresión máxima aplicada al momento de la falla

A = área de la muestra

Los factores externos son aquellos que no dependen de la naturaleza de la roca y son:

1. Fricción entre platina y superficie de la roca
2. Geometría de la probeta: forma, relación de esbeltez y tamaño
3. Velocidad de carga
4. Temperatura ambiente



Figura 3.7 Ensayo de resistencia a compresión simple (UPM, 2011)

La Tabla 3.9 contiene las clases de rocas según su resistencia a compresión simple.

Tabla 3.9 Clasificación de Deere y Miller (1966)

Clase	Descripción	σ_c (kg/cm ²)
A	Resistencia muy alta	> 2.200
B	Resistencia alta	1.100-2.200
C	Resistencia media	550-1.100
D	Resistencia baja	280-550
E	Resistencia muy baja	< 280

También se puede estimar de forma aproximada a partir de índices obtenidos en sencillos ensayos de campo in-situ, como el ensayo de carga puntual (PTL, por sus siglas en inglés) o el martillo Schmidt.

Ensayo Brasileño

La prueba consiste en someter a compresión diametral un espécimen cilíndrico de roca produciendo así esfuerzos de tensión y de compresión, a pesar de que el esfuerzo de tensión inducido es menor que el de la compresión el espécimen falla a lo largo del eje vertical debido a su menor resistencia a la tensión (IMTA, 2001). Se calcula con la Ecuación 3.7.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

P = carga que provoca la rotura

D = diámetro

L = la longitud de la probeta

La Tabla 3.10 señala la resistencia a tensión de la matriz rocosa.

Tabla 3.10 Valores de resistencia a tensión seleccionados a partir de Rahn 1986, Walthan 1999, Obert y Duvall 1967 y Farmer 1968 (Modificado de González de Vallejo, 2004)

Roca sana	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)
Andesita	70
Anfibolita	230
Anhidrita	60-120
Arenisca	50-200
Basalto	50-250
Caliza	40-300
Cuarcita	100-300
Diabasa	550
Diorita	80-300
Dolomía	50-250
Esquisto	20-55
Gabro	140-300
Gneiss	50-200
Granito	70-250
Grauvaca	55-150
Limolita	27
Lutita	15-100
Mármol	65-200
Pizarra	70-200
Toba	10-40
Yeso	10-25

3.3.3 Módulo de Young (E_m)

El módulo de Young o módulo elástico estático es la relación entre el esfuerzo y la deformación en la dirección de aplicación de los esfuerzos, desarrollado en la Ecuación 3.8.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ax}} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

σ = esfuerzo aplicado

ε_{ax} = deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo

Para conocer las deformaciones de la roca bajo cargas, es necesario evaluar el módulo de deformación. Para una misma roca, se tienen diferentes módulos dependiendo de la formación geológica, del tipo de roca, porosidad, tamaño de

sus partículas, contenido de agua y su origen. Algunos ejemplos de rocas intactas con valores dinámicos y estáticos (ver Tabla 3.11), donde el módulo de Young dinámico es mayor que el estático $E_d > E$.

El efecto de anisotropía de las rocas provoca que el módulo de Young sea mayor cuando se determina en sentido perpendicular a la estratificación, que en el sentido paralelo y puede aumentar considerablemente mediante la inyección de lechadas¹³ (Gallardo, 2012).

Tabla 3.11 Constantes elásticas en roca intacta seleccionados a partir de Rahn 1986, Johnson y De Graff 1988, Goodman 1989, Walthan 1999 y Duncan 1999 (Modificado de González de Vallejo, 2004)

Roca intacta	Módulo de elasticidad estático, E kg/cm ² (x10 ⁵)	Módulo de elasticidad dinámico E _d kg/cm ² (x10 ⁵)
Anfibolita	1.3 - 9.2	4.6 - 10.5
Arenisca	0.3 - 6.1	0.5 - 5.6
Basalto	3.2 - 10	4.1 - 8.7
Caliza	1.5 - 9.0	0.8 - 9.9
Diabasa	6.9 - 9.6	6.0 - 9.8
Diorita	0.2 - 1.7	2.5 - 4.4
Dolomía	0.4 - 5.1	2.2 - 8.6
Gneiss	1.7 - 8.1	2.5 - 10.5
Granito	1.7 - 7.7	1.0 - 8.4
Grauvaca	4.7 - 6.3	2.3 - 10.7
Limolita	5.3 - 7.5	0.7 - 6.5
Lutita	0.3 - 2.2	1.0 - 7.0
Marga	0.4-3.4	1.0-4.9

¹³ Las inyecciones de lechada son procedimientos que se aplican al subsuelo, mediante las cuales se introduce en los poros del medio a tratar, un producto líquido, que se solidifica adquiriendo una resistencia determinada a través del tiempo.

CAPÍTULO 4. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

Los macizos rocosos, como medios discontinuos, presentan un comportamiento geomecánico complejo que, de una forma simplificada, puede ser estudiado y caracterizado en función de su aptitud para distintas aplicaciones.

Las clasificaciones geomecánicas aportan índices de calidad¹⁴ relacionados con los parámetros geomecánicos del macizo y sus características frente a los sostenimientos de túneles, taludes y excavabilidad de las rocas (Alonso, 2007).

Las características de los macizos rocosos que se consideran en las distintas clasificaciones son las siguientes:

- 3 Resistencia del material rocoso
- 4 Índice de calidad de roca (RQD por sus siglas en inglés)
- 5 Espaciado, orientación y condiciones de las discontinuidades
- 6 Estructura geológica y fallas
- 7 Filtraciones y presencia de agua
- 8 Estado tensional

Las clasificaciones geomecánicas utilizadas actualmente son RMR y Q, las cuales, fueron desarrolladas para estimar sostenimientos. La clasificación Q se aplica casi exclusivamente para túneles, mientras que la segunda, la RMR se ha ido consolidando como un índice geomecánico, se emplea para la caracterización de los macizos rocosos y sus propiedades para su aplicación en túneles.

La principal ventaja de estas clasificaciones es que proporcionan una estimación inicial de los parámetros mecánicos del macizo a bajo costo y de forma sencilla. No obstante, debe ser considerada la excesiva simplificación que supone trabajar con macizos rocosos blandos, tectonizados y alterados, que, por lo general, sobrevaloran las propiedades mecánicas y resistentes, sin tener en cuenta aspectos importantes como la deformabilidad de los macizos. Estas limitaciones deben ser consideradas al aplicarlas, debiendo interpretar los resultados con criterio y siempre con base en el conocimiento de las propiedades y del comportamiento geomecánico de los diferentes tipos de macizos rocosos. Constituyen un procedimiento de los macizos a partir de datos de afloramientos y sondeos, y se aplican principalmente a los túneles, dada la dificultad del estudio de estos macizos en profundidad, y el uso generalizado de las clasificaciones RMR y Q desde la década de los setenta, es una prueba evidente de su utilidad (González de Vallejo, 2004).

¹⁴ Los índices de calidad permiten estimar la resistencia de forma aproximada, al establecer correlaciones entre las clases de roca y los parámetros resistentes.

Para llevarlas a cabo, es necesario realizar una serie de observaciones y mediciones en campo, que constituyen la base y sistemática práctica de las clasificaciones, como se indica en la Figura 4.1.

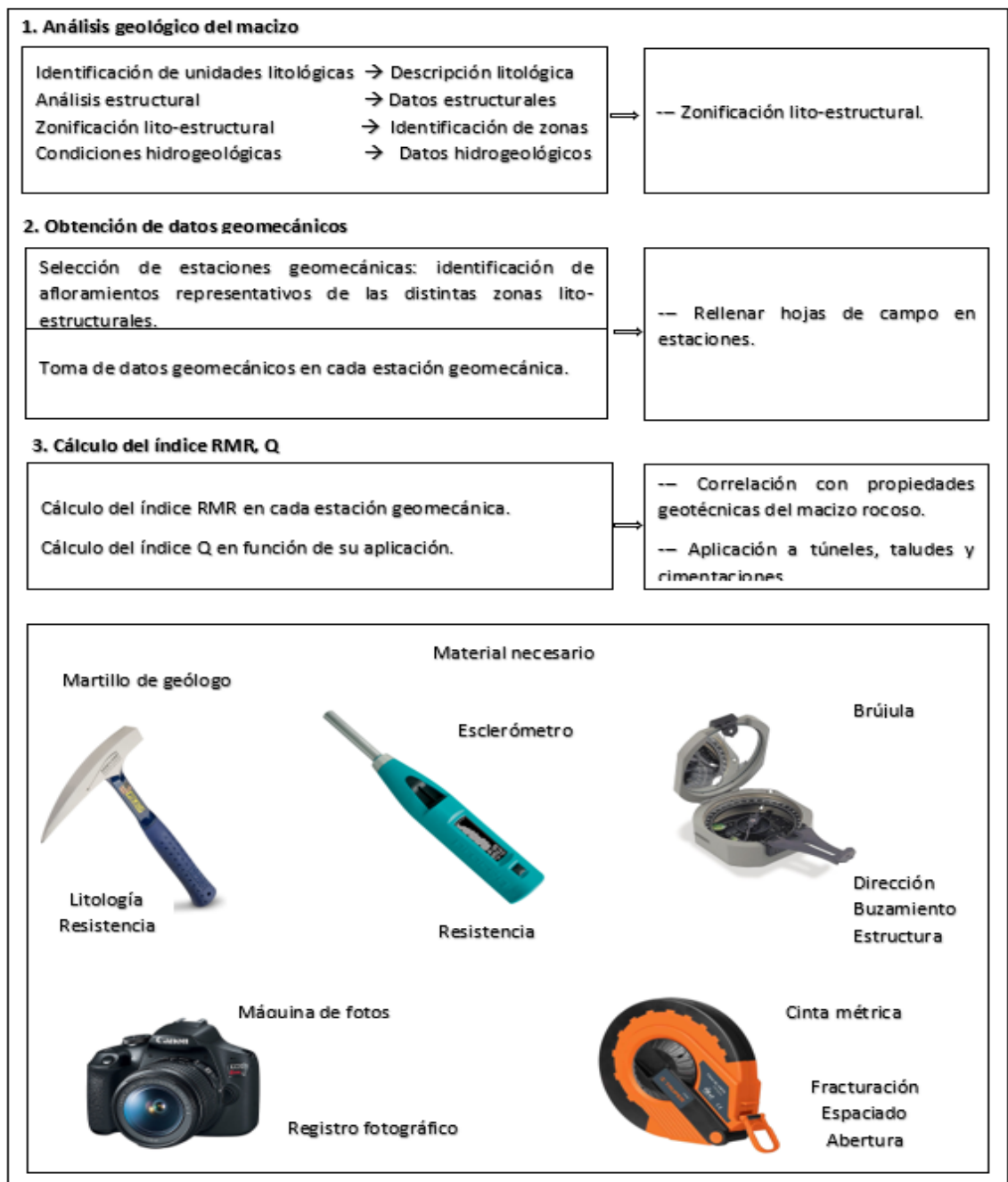


Figura 4.1 Sistemática en la aplicación de clasificaciones geomecánicas (Modificado de González de Vallejo, 2004)

En la actualidad, estas clasificaciones se emplean de forma generalizada en ingeniería para hacer una predicción del comportamiento de los macizos rocosos frente a excavaciones, principalmente subterráneas, aunque también a cielo abierto.

4.1 Clasificación de Deere

La clasificación geomecánica de Deere propone un sistema de diseño de sostenimiento basado en el Índice de Calidad de Roca (RQD por sus siglas en inglés), que fue desarrollado por Deere et al., en 1967; este parámetro indica la calidad del macizo rocoso in situ a partir del grado de fracturación.

El RQD se fundamenta en cuantificar la calidad del macizo rocoso con base en la longitud de los testigos recuperados en sondeos (Figura 4.2). Se define como el porcentaje de testigo recuperado en el sondeo de longitud mayores de 10 cm respecto a la longitud total del sondeo. (Ecuación 4.1)

$$RQD = \frac{\text{Longitud de trozos de testigos} > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total del sondeo}} \times 100\% \quad (\text{Ec. 4.1})$$

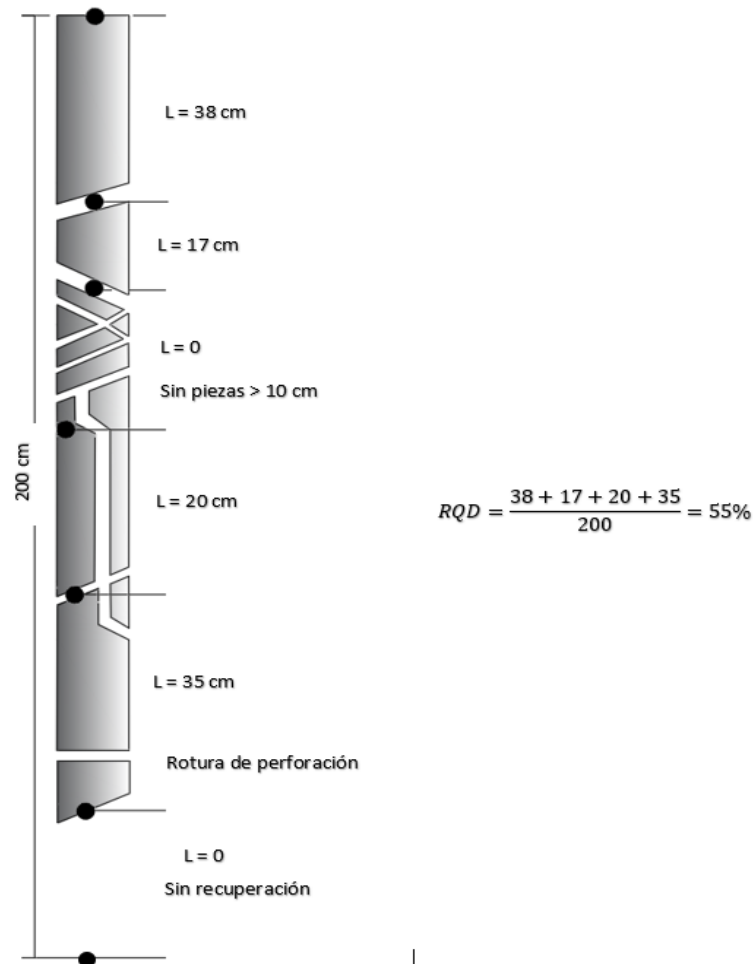


Figura 4.2 Medida y cálculo del RQD (Practical Rock Engineering, Hoek, 2007)

Según la clasificación de Deere et al., los macizos rocosos se clasifican en cinco categorías de acuerdo al valor del índice RQD mostradas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Clasificación geomecánica RQD (Noguera, 2021)

RQD	Calidad de la roca
< 25 %	Muy pobre
25 - 50 %	Pobre
50 - 75 %	Aceptable
75 - 90 %	Buena
> 90 %	Excelente

El valor del RQD depende no sólo de la fracturación del macizo rocosos sino también de otros factores, como la técnica del sondeo, de la máquina utilizada, del diámetro, habilidad del sondista y de la dirección del sondeo (Figura 4.3), cuyo valor cambia significativamente en función de la orientación del mismo respecto a las familias de discontinuidades.

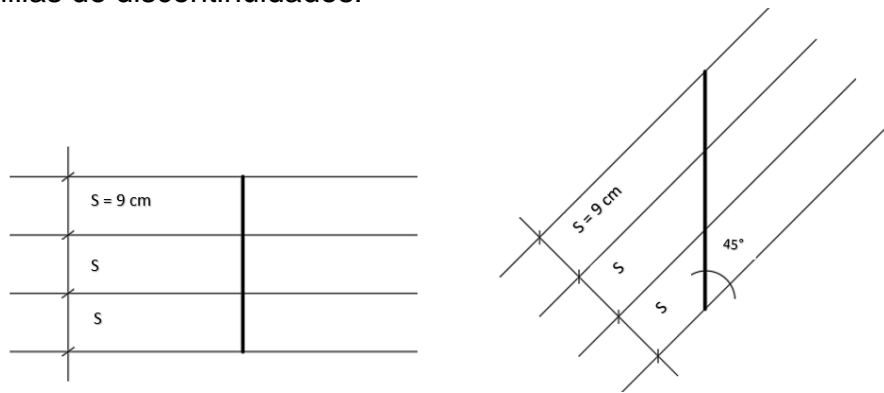


Figura 4.3 Influencia de la dirección del sondeo en la estimación del índice RQD (Noguera, 2021)

A veces, hay que estimar el RQD a partir de datos en afloramientos en superficie, al no disponer de sondeos, una manera indirecta de estimar el RQD es la utilización del índice volumétrico de juntas (J_v). En estos casos, se puede utilizar la Ecuación 4.2 (Palmstrom, 2005), aunque su precisión no es superior a la que puede proporcionar una mera estimación visual.

$$RQD = 110 - 2.5 \cdot J_v \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

J_v = es el número de juntas por m^2 , dando una idea del tamaño del bloque en función de J_v en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Clasificación del tamaño de bloque en función de espaciados de juntas y número de familias observadas en campo según Deere 1967(Ramírez y Alejano, 2004)

Tamaño de bloque	Valor de Jv
Bloques muy grandes	< 1.0
Bloques grandes	1-3
Bloques medios	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	> 30

4.2 Q de Barton

Es desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974, a partir del estudio de un amplio número de túneles. Constituye un sistema de clasificación, que permite estimar parámetros geotécnicos del macizo y diseñar sostenimientos para túneles y cavernas subterráneas (González de Vallejo, 2004).

El índice Q se popularizó rápidamente, llegando en la actualidad a constituir una referencia esencial, junto con el índice RMR de Bieniawski, en el diseño de toda obra subterránea, el rango de Q oscila entre 0.001 y 1.000, correspondiendo los valores bajos a roca excepcionalmente mala y los altos a roca excepcionalmente buena.

El índice Q se basa en la evaluación numérica de seis parámetros dados por la Ecuación 4.3.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

J_n = índice de diaclasado que indica el grado de fracturación del macizo rocoso.

J_r = índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas.

J_a = índice que indica la alteración de las discontinuidades.

J_w = coeficiente reductor por la presencia de agua.

SRF = coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Los tres factores de la expresión representan:

$\left(\frac{RQD}{J_n}\right)$: tamaño de los bloques

$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$: la resistencia al corte entre los bloques

$\left(\frac{J_w}{SRF}\right)$: la influencia del estado tensional

En la Tabla 4.3, se indican los criterios de valoración de estos parámetros.

Tabla 4.3 Valores de parámetros característicos del índice Q, Barton 2000 (González de Vallejo, 2004)

1. Calidad del testigo RQD		RQD (%)
A	Muy mala	0-25
B	Mala	25-50
C	Media	50-75
D	Buena	75-90
E	Excelente	90-100
Notas:		
i) Cuando se obtienen valores del RQD inferiores o iguales a 10, se toma un valor de 10 para calcular el índice Q.		
ii) Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.		

2. Índice de diaclasado		J_n
A	Roca masiva, sin diaclarar o con fisuración escasa	0.5-1.0
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15
J	Roca triturada, terrosa	20
Notas:		
i) En intersecciones de túneles se utiliza la expresión (3J _n)		
ii) En las bocas de los túneles se utiliza la expresión (2J _n)		

3. Índice de rugosidad de las discontinuidades		J_r
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad.		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm.		
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares	3
C	Diaclasas onduladas, lisas	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas	1.5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares	1.5
F	Diaclasas planas, lisas	1.0
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas	0.5
Nota:		
i) Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden.		
c) No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante.		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad	1.0
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad	1.0
Notas:		
i) Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m, se debe aumentar el índice J _r en una unidad		
ii) En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas alineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor J _r = 0.5.		

Tabla 4.3 Valores de parámetros característicos del índice Q (Continuación)

4. Índice de alteración de las discontinuidades		ϕ_r	J_a
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios).			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo.	---	0.75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas.	25°-35°	1.0
C	Planos de discontinuidad ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	2.0
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda).	20°-25°	3.0
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica.	8°-16°	4.0
	También clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas.		
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm (minerales de relleno en pequeños espesores).			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	25°-30°	4.0
G	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm).	16°-24°	6.0
H	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5 mm).	12°-16°	8.0
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorilonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5 mm). El valor de J_a depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas.	6-12°	8-12
c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de gran espesor).			
K	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H, y J para la descripción de las condiciones de las arcillas).	6°-24°	6.8 ó 8-12
L			
M			
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles.	---	5.0
O	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clases G, H, y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas).	6°-24°	10, 13 ó 13-20
P			
R			
Nota: los valores expresados para los parámetros J_r y J_a se aplican a las familias de diaclasas o discontinuidades que son menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al corte (esta resistencia puede evaluarse mediante la expresión: $T \approx \sigma_n t g^{-1}(J_r/J_a)$)			
5. Factor de reducción por la presencia de agua		Presión de agua (kg/cm²)	J_w
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5/min, de forma localizada	< 1	1.0
B	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades	1-2.5	0.66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno	2.5-10	0.5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas	2.5-10	0.33
E	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo	> 10	0.2-0.1
F	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable	> 10	0.1-0.05
Notas:			
i) Los valores de las clases C, D, E y F son meramente estimativos. Si se acometen medidas de drenaje, puede incrementarse el valor J_w .			
ii) No se han considerado los problemas especiales derivados de la formación de hielo.			

Tabla 4.3 Valores de parámetros característicos del índice Q, Barton 2000 (Continuación)

6. Condiciones tensionales de la roca		SRF		
a) Las zonas débiles intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando.				
A	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad).	10		
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación ≤ 50 m).	5		
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50 m).	2.5		
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad).	7.5		
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación ≤ 50 m).	5.0		
F	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de excavación > 50 m).	2.5		
G	terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad).	5.0		
Nota:				
i) Se reducen los valores expresados del SRF entre un 20-50% si las zonas de fracturas sólo ejercen cierta influencia, pero no intersectan a la excavación.				
b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas.		σ_c/σ_1	σ_o/σ_c	SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas.	> 200	< 0.01	2.5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables.	200-10	0.01-0.3	1
K	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales.	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas.	5-3	0.5-0.65	5-50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas.	3-2	0.65-1	50-200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas.	< 2	> 1	200-400
Notas:				
i) Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisotrópicos: cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, se disminuye el parámetro σ_c hasta $0.75\sigma_c$; si $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, se tomará el valor $0.5\sigma_c$. σ_c es resistencia a compresión simple, σ_1 y σ_3 son las tensiones principales mayor y menor y σ_o es la tensión tangencial máxima, estimada a partir de la teoría de la elasticidad.				
ii) En los casos en que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación, se sugiere aumentar el valor del factor SRF entre 2.5 y 5 unidades (véase clase H).				
c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas.		σ_o/σ_c	SRF	
O	Presión de deformación baja.	1-5	5-10	
P	Presión de deformación alta.	> 5	10-20	
Nota:				
i) Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades: $H > 350 Q^{1/3}$ (Singh et al., 1992). La resistencia a compresión de macizo rocoso puede estimarse mediante la expresión: $q(\text{Mpa}) \approx 7 \cdot \gamma \cdot Q^{1/3}$, donde γ es la densidad de la roca en g/cm^3 (Singh, 1993).				
d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.		SRF		
R	Presión de expansión baja	5-10		
S	Presión de expansión alta	10-15		
$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$				

El índice Q obtenido de la evaluación numérica de los seis parámetros mencionados anteriormente, puede variar entre los valores de 0.001 y 1.000 (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Variaciones del macizo rocoso (González de Vallejo, 2004)

entre 0.001 y 0.01	roca excepcionalmente mala
0.01 y 0.1	roca extremadamente mala
0.1 y 1	roca muy mala
1 y 4	roca mala
4 y 10	roca media
10 y 40	roca buena
40 y 100	roca muy buena
100 y 400	roca extremadamente buena
400 y 1.000	roca excepcionalmente buena

4.3 RMR de Bieniawski

Fue desarrollada por Bieniawski en 1973, teniendo actualizaciones en 1979 y 1989. Permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo, excavación y sostenimiento en túneles, teniendo en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

1. Resistencia uniaxial de la matriz rocosa
2. Grado de fracturación en términos del RQD
3. Espaciado y condiciones de las discontinuidades
4. Condiciones hidrogeológicas
5. Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación

González de Vallejo (2004), menciona que la incidencia de esos parámetros en el comportamiento de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR, que varía de 0 a 100.

Para poder aplicar la clasificación RMR, se divide el macizo rocoso en zonas o tramos que presenten características geológicas más o menos uniformes de acuerdo con las observaciones hechas en campo, donde se realiza la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades.

El índice RMR correspondiente a cada una de las zonas, se calcula a través del procedimiento que se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Clasificación geomecánica RMR, Bieniawski 1989 (González de Vallejo, 2004)

Parámetros de clasificación									
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (Mpa)		
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 %-100 %	75 %-90 %	50 %-75 %	25 %-50%	< 25 %		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	< 0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4		Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	24-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	

Una vez obtenidas las puntuaciones que resultan de aplicar los cinco parámetros de clasificación, se efectúa la corrección por orientación de discontinuidades y se obtiene un valor numérico con el que se clasifica finalmente el macizo rocoso.

Tabla 4.5 Clasificación geomecánica RMR, Bieniawski 1989 (Continuación)

Corrección por la orientación de las discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Clasificación

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20

Características geotécnicas

Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8 m de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2.5 m de vano	30 minutos con 1 m de vano
Cohesión	> 4 Kp/cm ²	3-4 Kp/cm ²	2-3 Kp/cm ²	1-2 Kp/cm ²	< 1 Kp/cm ²
Ángulo de rozamiento	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

Orientación de las discontinuidades en el túnel

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20° Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	Buz. 45-90	Buz. 20-45	
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

La RMR distingue cinco clases, cuyo significado geotécnico se ve expresado en la Tabla 4.6, donde a cada clase le asigna una calidad y características geotécnicas.

Tabla 4.6 Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR (González de Vallejo, 2004)

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100-81	> 4 kg/cm ²	> 45°
II	Buena	80-61	3-4 kg/cm ²	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm ²	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm ²	15°-25°
V	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm ²	< 15°

CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE MACIZO ROCOSO DE CALIZA EN EL ORIENTE DE LA CIUDAD DE PUEBLA

5.1 Geología de la ciudad de Puebla

El estado de Puebla queda comprendido dentro de las provincias geológicas denominadas: Sierra Madre Oriental, que penetra por el noroeste y llega hasta las inmediaciones de Teziutlán; Llanura Costera del Golfo Norte, en la porción boreal; el Eje Neovolcánico, en el este, centro y oeste; y la Sierra Madre del Sur en toda la zona austral (INEGI, 1987).

La ciudad de Puebla se ubica en el altiplano central de México, en la parte centro-oeste del Estado, sobre la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico que abarca gran porción del centro y noroeste del Estado de Puebla, a una altitud de 2.150 m respecto al nivel medio del mar, en una zona de lomeríos suaves constituidos por aparatos volcánicos. Al norte se limita por cañadas labradas por los escurrimientos que descienden de la Malinche; al poniente por la Sierra Nevada; al sur y al oriente por las cuencas Atlixco-Izúcar y Oriental, respectivamente, como se muestra en la Figura 5.1. (Azomoza G. et. al., 1998).

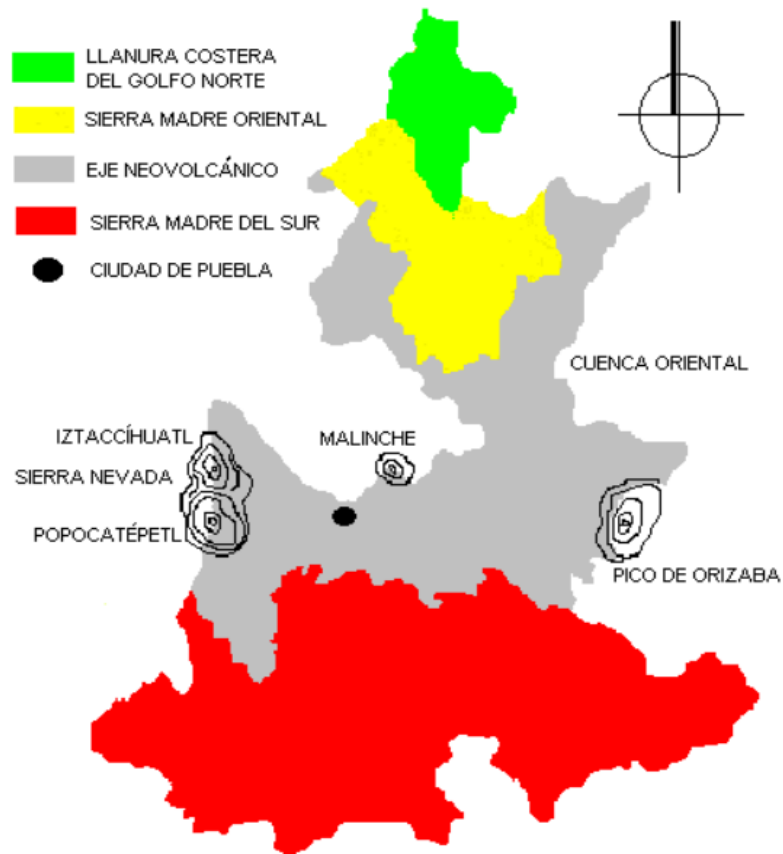


Figura 5.1 Ubicación de la Ciudad de Puebla en la provincia del Eje Neovolcánico (Azomoza G. et. al., 1998)

La composición petrográfica que conforman el Eje Neovolcánico es una enorme franja de rocas volcánicas de diversos tipos y texturas, con abundantes derrames y productos piroclásticos de composición andesítica (INEGI, 1987).

Atendiendo a su sismicidad, el sitio en estudio se ubica en la Zona C de la Regionalización Sísmica de la República Mexicana, tercera en orden de actividad creciente de las cuatro en que se divide el país (Figura 5.2).

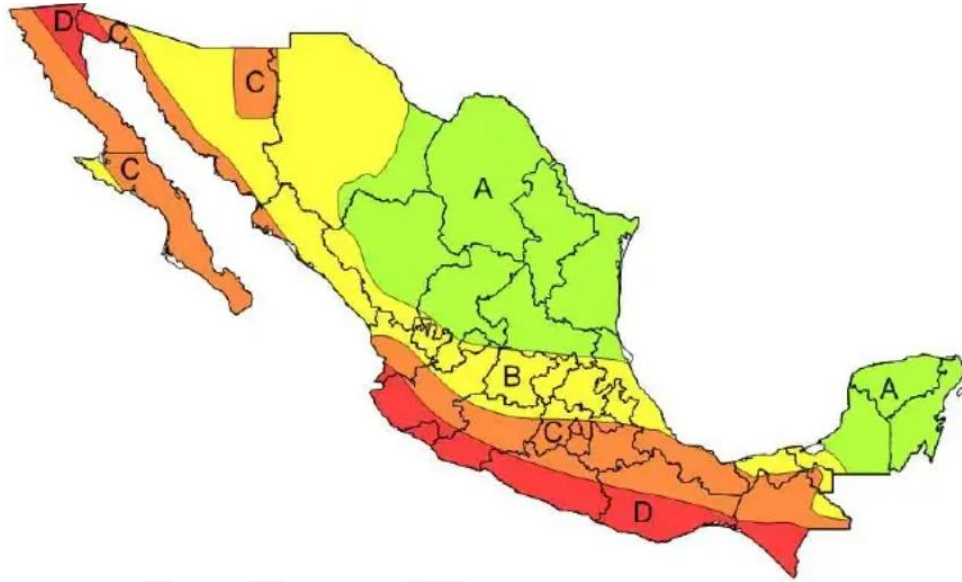


Figura 5.2 Regionalización sísmica de la República Mexicana (CFE, 2015)

El peligro sísmico en la ciudad de Puebla y sus alrededores por la ocurrencia de grandes temblores, dio origen a la elaboración y aplicación de nuevas normas técnicas, las cuales se han incluido en el Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla.

De acuerdo a la zonificación geotécnica para el área urbana del Valle de Puebla (Figura 5.3), en la ciudad se encuentra una gran variedad de afloramientos de rocas ígneas y sedimentarias, tales como depósitos de suelos tobáceos, tobas y rocas andesitas y basálticas, sobre las que yacen en depósitos de materiales cuyos orígenes son fluviales, aluviales y lacustres (Azomoza G. et. al., 1998).

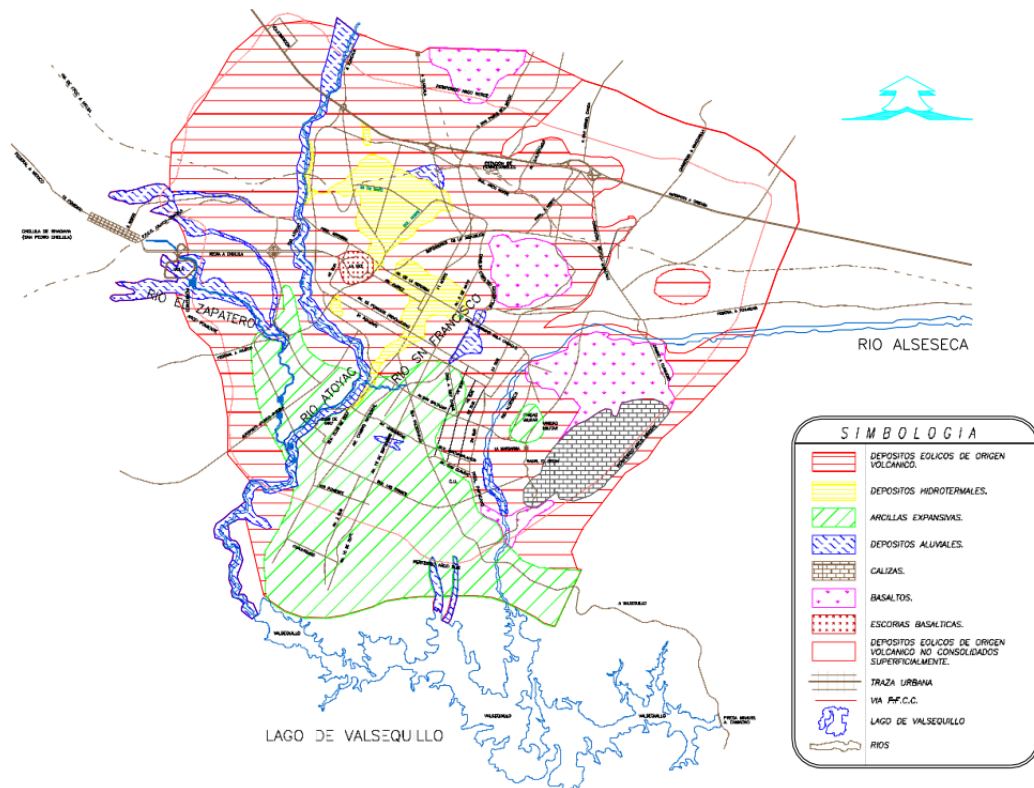


Figura 5.3 Zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla (Azomoza G. et. al., 1998)

Con base en la zonificación, la geología superficial del sitio corresponde a la formación de suelos eólicos de origen volcánico (cenizas volcánicas consolidadas) y sedimentarios, constituidos por rocas calizas, fracturadas, cubiertos en ambos casos, por depósitos aluviales de espesor variable (ICD, 2016 citado por Flores, 2019).

Existen afloramientos de roca caliza al oriente de la ciudad, perteneciente al periodo Cretácico¹⁵ donde se tiene noción de la sedimentación de materiales calcáreos y que debido a movimientos de tipo orogénico produjo su posterior emersión. Son de origen sedimentario, tienen textura de grano fino, cristalina, se compone primordialmente de calcita y dolomita. Su estructura generalmente es sana masiva y estratificada (Flores, 2019).

En seguida, se describe una de las rocas de interés que está presente en la zona de la ciudad de Puebla.

De acuerdo al Servicio Geológico Mexicano (2001), las rocas calizas que forman parte del Cinturón de Pliegues y Fallas son las más antiguas, de edad Cretácica, y se encuentran caracterizadas macroscópicamente en este sitio por roca caliza

¹⁵ El periodo cretácico duró aproximadamente 79 millones de años, iniciando hace 145 millones de años y terminando hace 66 millones de años.

estratificada de la Formación Morelos¹⁶, de color gris y tono oscuro a la intemperie o tono gris rosáceo claro al fresco (Figura 5.4).

En pocas ocasiones las calizas se encuentran en un alto grado de pureza, sin embargo, generalmente están mezcladas con impurezas, tales como óxidos y carbonatos de magnesio, aluminio, fósforo y hierro, arcilla sílice, manganeso, yeso, sustancias bituminosas, potasio, sodio, pirita y materias orgánicas (Zemanate y Zapata, 2015).



Figura 5.4 Roca caliza (Archivo personal)

5.2 Antecedentes

En el año 1976, el Dr. Gabriel Auvinet presentó en la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, efectuada en la ciudad de Guanajuato, Gto., la primera propuesta de zonificación geotécnica para la ciudad de Puebla. Esta gran aportación, sin embargo, es muy generalizada, limitada por el reducido número de estudios que fue posible recopilar en esa época, alrededor de 50. El gran crecimiento de la mancha urbana a partir de ese entonces, ha sobrepasado notablemente el área de zonificación propuesta.

En 1998, Azomoza y colaboradores realizaron la zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla a partir de 400 estudios ejecutados para dicha propuesta, la cual fue publicada en la XIX Reunión Nacional de Mecánica de

¹⁶ Formación Morelos es propuesta por Carl Fries en 1960 para designar una gran secuencia de horizontes de calizas y dolomitas, de edad cretácica que afloran en gran parte del estado de Morelos y zonas circunvecinas.

Suelos. La formación de esta roca se encuentra fracturada, lajeada en espesores variables y cubierta por una arcilla tipo expansiva de poco espesor.

En 2019, Flores obtuvo, de acuerdo a los sondeos realizados al sur-oriental de la ciudad de Puebla (Figura 5.5) donde las masas de roca caliza se encuentran debajo de una capa vegetal de 30 cm aproximadamente hasta una profundidad explorada de 2.4 m, una estructura sana muy fracturada, con lajeados en espesores de 10 a 50 cm con ángulo de fricción mayor a 32° y un módulo de elasticidad mayor a 3500 t/m^2 con un índice de calidad de roca de malo a muy malo.

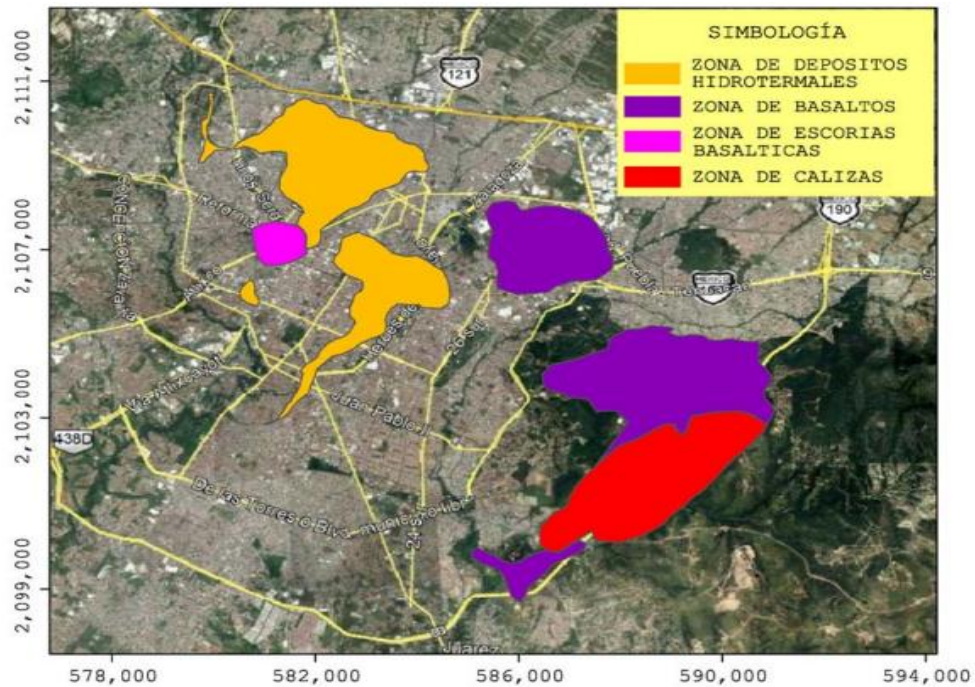


Figura 5.5 Formaciones rocosas en la ciudad de Puebla (Flores, 2019)

El lugar donde descansan estos macizos rocosos es en la periferia de la zona metropolitana, en la junta auxiliar de San Francisco Totimehuacán, sobre la carretera Periférico Ecológico y posteriormente la prolongación anillo periférico que lleva directamente al sitio requerido (Figura 5.6).

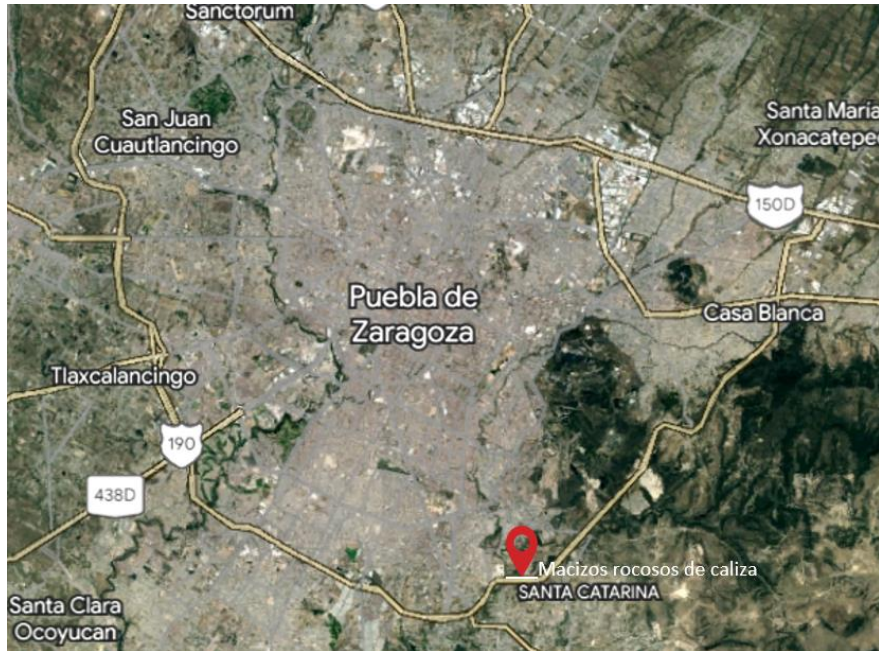


Figura 5.6 Macro-localización de los macizos de roca caliza (Google Earth, 2023)

En la Figura 5.7 se identifica una micro-localización del sitio de estudio, tratándose de una zona en San Francisco Totimehuacán, que colinda con el fraccionamiento Punta del Sol residencial, así también con una gasolinera de franquicia Mobil, frente al Anillo Periférico Ecológico-Carretera Internacional, se realiza el recorrido a pie de la zona de estudio; el cual cuenta en la cara norte con una distancia de 450.83 m y la cara sur con 411.19 m.

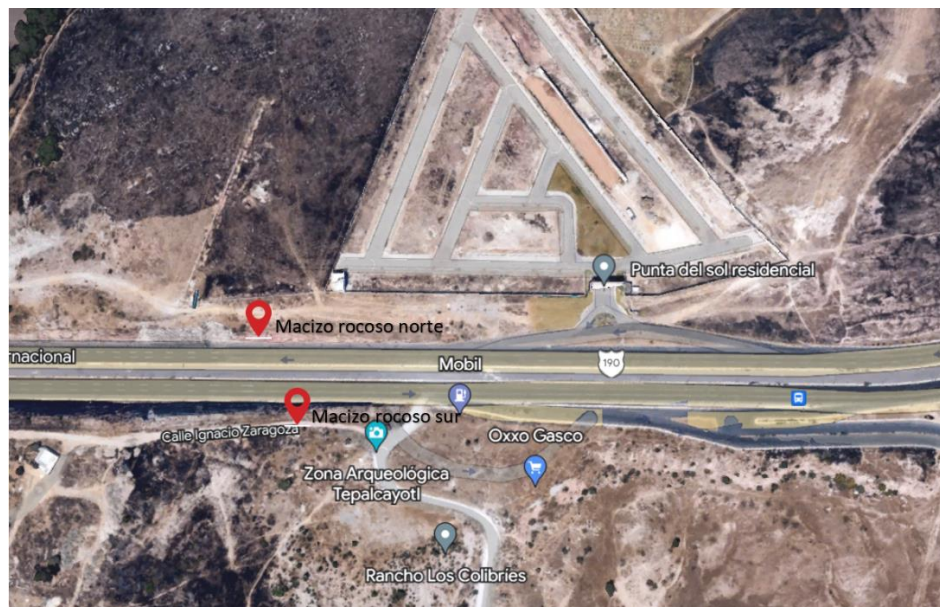


Figura 5.7 Micro-localización del macizo (Google Earth, 2023)

5.3 Metodología

La metodología por aplicar se basa en un reconocimiento geológico efectuado para evaluar las condiciones litológicas y estructurales del macizo rocoso. El reconocimiento se realizó al oriente de la ciudad de Puebla, sobre la carretera Anillo Periférico Ecológico y a un costado del fraccionamiento Punta del Sol Residencial.

Las etapas de esta investigación se resumen en la Figura 5.8.

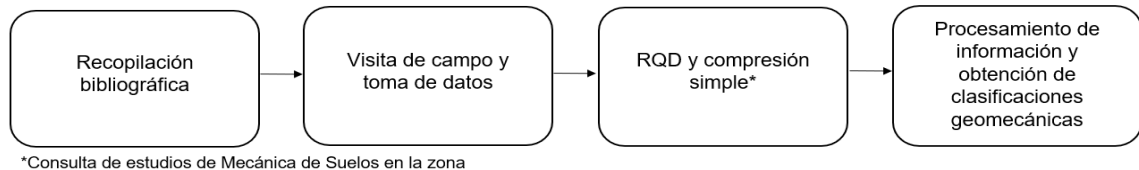


Figura 5.8 Metodología de trabajo (Modificado de Flores, 2019)

Las visitas a la zona de estudio se efectuaron en diversas ocasiones en compañía del M. I. Miguel Ángel Figueras Corte, recorriendo las inmediaciones de los tramos de interés.

1. Recopilación bibliográfica:

Para dar inicio a la caracterización, se incluye la recopilación bibliográfica, se consulta y seleccionan documentos para efectuar la revisión de las características del suelo que contengan información geotécnica, de igual forma se ubica geográficamente en el valle de la ciudad de Puebla, apoyándose con el software Google Earth, en la Figura 5.9 se puede apreciar la zona de estudio.

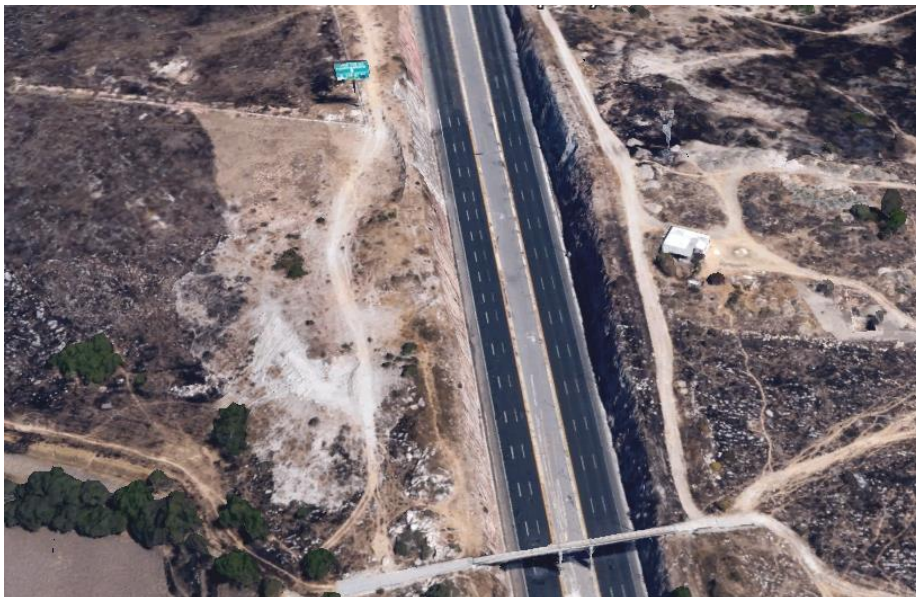


Figura 5.9 Ubicación exacta del macizo rocoso de caliza en la ciudad de Puebla (Google Earth, 2023)

2. Visitas de campo y toma de datos:

Los trabajos de campo consisten en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas a fin de medir directa e indirectamente sus propiedades índice y mecánicas; refiriendo a los procedimientos que comúnmente se utilizan en la ciudad, a partir de los cuales se interpretan las características y propiedades de la masa rocosa.

Se hacen visitas a la masa rocosa de caliza, haciendo los primeros recorridos de manera general en las zonas aledañas por ambos sentidos de la carretera, lo que permitió observar y obtener datos litológicos y estructurales a partir de los afloramientos del terreno natural existentes en los cortes carreteros y caminos de acceso; después se llevó a cabo otras visitas de estudio para confirmar los datos recabados, tomar fotografías, medir los buzamientos de las discontinuidades existentes en la roca, utilizando una brújula, conocer el estado de alteración, así como identificar las principales familias, su orientación, apertura, espaciamiento, persistencia, la existencia de rellenos y de cavidades cársticas, etc. (Ver Anexo A).

3. Índice RQD y resistencia a compresión simple:

En tanto a los parámetros del Índice de Calidad de Roca (RQD por sus siglas en inglés) y compresión simple, se emplearon los valores a partir de los sondeos por penetración estándar (SPT) con base en la Norma ASTM-1586 combinándolo con barriles dobles giratorios provistos con broca de diamante en depósitos conteniendo roca, gravas y/o boleas, realizados por la empresa ICD S.A. de C.V. en la ciudad de Puebla. En las Tabla 5.1, 5.2 y 5.3 se presentan los valores de RQD y compresión simple, donde se pueden observar diferentes perforaciones cercanas al sitio de estudio, calificando su estado físico, midiendo su respectivo RQD y resistencia a compresión simple.

Tabla 5.1 RQD y resistencia a compresión simple (ICD, 2014-a)

Muestra	Profundidad media (m)	Estado físico	RQD (%)	Resistencia a compresión simple (kg/cm ²)
SPT 1 - 1	7.40	Bueno	42	60.11
SPT 1 - 2	14.30	Regular	31	25.91
SPT 1 - 3	14.30	Regular	35	31.19
SPT-2 - 1	1.80	Muy bueno	65	275.00
SPT-2 - 2	9.50	Regular	41	95.73

Tabla 5.2 RQD y resistencia a compresión simple (ICD, 2014-b)

Muestra	Profundidad media (m)	Estado físico	RQD (%)	Resistencia a compresión simple (kg/cm ²)
SPT 1 - 1	7.65	Malo	56	52.95
SPT 1 - 2	9.35	Bueno	92	91.82
SPT 2 - 1	3.15	Regular	15	70.88
SPT 2 - 2	4.55	Malo	40	58.61
SPT 3 - 1	5.40	Bueno	58	416.84
SPT 3 - 2	6.00	Malo	50	151.00

Tabla 5.3 RQD y resistencia a compresión simple (ICD, 2014-c)

Muestra	Profundidad media (m)	Estado físico	RQD (%)	Resistencia a compresión simple (kg/cm ²)
SPT 1 - 1	5.10	Regular	25	32.65
SPT 2 - 1	3.90	Regular	30	28.42
SPT 3 - 1	7.30	Regular	18	22.63
SPT 4 - 1	8.43	Bueno	48	65.48

4. Procesamiento de información y obtención de clasificaciones geomecánicas:

En esta etapa se dispone a hacer un trabajo de gabinete, es decir, se revisa toda la información llevando un orden, empezando por la cara norte sección 1 y así sucesivamente hasta llegar al corte 5, terminando con la cara sur; la razón de dividir en cinco secciones ambas caras se basa en la intención de obtener las clasificaciones geomecánicas de una manera más particular y así representar, de mejor manera, la clasificación geomecánica del macizo rocoso.

Las visitas de campo, los datos recabados, las mediciones, fotografías donde se ilustran las propiedades de las discontinuidades y también retomando los valores de RQD y compresión simple se vuelven a analizar para complementar las condiciones de las clasificaciones geomecánicas y obtener las características más representativas en cada sección propuesta.

Finalmente, una vez realizada la recopilación y procesamiento de la información, se realiza la clasificación de Deere, Q de Barton y RMR de Bieniawski. Los resultados de las clasificaciones geomecánicas se resumen en tablas que señalan la calidad de roca, dando como resultado una propuesta de clasificación de los macizos rocosos de caliza en cada una de las secciones.

5.4 Macizo rocoso de caliza

Al sur-orientado de la ciudad se localiza un importante afloramiento de roca caliza, es conocida como “La Calera”, de color gris, constituyen un lomerío suave, actualmente habitado en torno a una cantera de explotación de este material y en sus alrededores terreno de cimentación de un fraccionamiento. Se ubica en las zonas aledañas a las colonias La Margarita, Lomas del Mármol y sobre el Periférico Ecológico.

La Figura 5.10 es tomada desde el puente peatonal y muestra al mismo tiempo la vista de las dos caras de los macizos rocosos de caliza, del lado izquierdo se encuentra la cara norte, mientras que del lado derecho la cara sur.



Figura 5.10 Vistas de la cara norte (izquierdo) y sur (derecho) (Archivo personal)

Conforme al Servicio Geológico Mexicano (2001), ésta región se encuentra enmarcada por una secuencia de rocas calizas, estratificadas y plegadas con intercalaciones arcillosas, que descansan en el sector oriental sobre un basamento precámbrico, paleozoico y depósitos continentales de edad Triásico-Jurásico. Esta estructura está cubierta por una secuencia de rocas sedimentarias tipo Flysch del Cretácico.

Se encuentra totalmente fracturada debido a los esfuerzos tectónicos producidos por la Orogenia Laramide¹⁷, en el caso de fracturamiento están ligeramente abiertos, cerrándose a pocos centímetros de profundidad; algunas de estas fracturas están selladas por calcita y/o rellenas con material predominantemente arcilloso con materia orgánica (Servicio Geológico Mexicano, 2001).

5.5 Clasificación geomecánica

El recorrido que se eligió para las dos caras fue de Este-Oeste; el macizo de cara norte, en dirección Galaxia La Calera-IPETH; mientras para la cara sur, fue al contrario del tráfico. (Figura 5.11)



Figura 5.11 Dirección de los recorridos (Modificado de Google Earth, 2023)

Para elaborar las tres clasificaciones seleccionadas, se optó por dividir a los macizos por secciones, debido a la extensión y heterogeneidad que presentan; tomando en cuenta que la cara norte tiene una longitud de 450.83 m y la cara sur 411.19 m.

¹⁷ Orogenia Larámide es un proceso de formación de montañas que se produjo en el oeste de Norteamérica y comenzó en el Cretácico superior hace unos 70 a 80 millones de años atrás.

Sección 1 cara norte



Figura 5.12 Fotografías de la sección 1 cara norte (Archivo personal)

Sección 2 cara norte



Figura 5.13 Fotografías de la sección 2 cara norte (Archivo personal)

Sección 3 cara norte



Figura 5.14 Fotografías de la sección 3 cara norte (Archivo personal)

Sección 4 cara norte



Figura 5.15 Fotografías de la sección 4 cara norte (Archivo personal)

Sección 5 cara norte

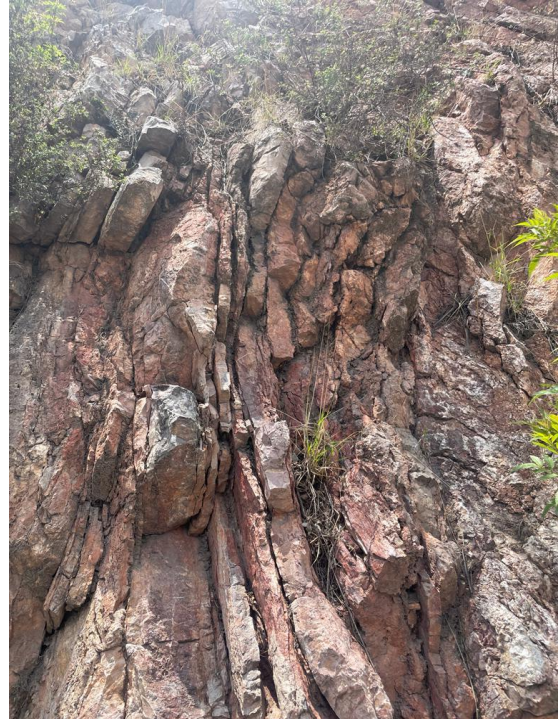


Figura 5.16 Fotografías de la sección 5 cara norte (Archivo personal)

Sección 1 cara sur



Figura 5.17 Fotografías de la sección 1 cara sur (Archivo personal)

Sección 2 cara sur



Figura 5.18 Fotografías de la sección 2 cara sur (Archivo personal).

Sección 3 cara sur



Figura 5.19 Fotografías de la sección 3 cara sur (Archivo personal)

Sección 4 cara sur

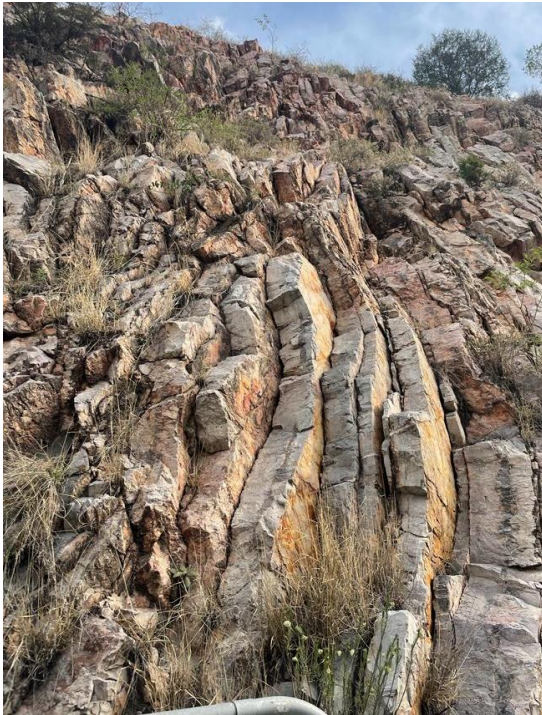


Figura 5.20 Fotografías de la sección 4 cara sur (Archivo personal)

Sección 5 cara sur



Figura 5.21 Fotografías de la sección 5 cara sur (Archivo personal)

En las Figuras 5.22 y 5.23 se presentan los macizos rocosos divididos en las cinco secciones antes mencionadas.



Figura 5.22 Macizo rocoso cara norte (Archivo personal)



Figura 5.23 Macizo rocoso cara sur (Archivo personal)

Clasificación de Deere

Debido a que no fue posible hacer perforaciones y disponer de sondeos, existe otra metodología para obtener el RQD. El método consiste en la utilización del índice de juntas J_v , el cual estima de manera indirecta el índice RQD, y se realiza visualizando y midiendo las discontinuidades en un 1 m² de un afloramiento expuesto en la superficie (Figura 5.24).

El cálculo se hizo contando la cantidad de discontinuidades en 1 m² en las caras norte y sur de los taludes, dando un total de 10 cuadrados, es decir, cinco cuadrados por cara (Anexo B). Su valor fue determinado usando la fórmula empírica propuesta por Palmstrom (2005):

$$RQD = 110 - 2.5 J_v \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

RQD = Índice de calidad de roca

J_v = es el número de juntas por m²



Figura 5.24. Cuadrado del macizo rocoso (Archivo personal)

Los valores de J_v fueron obtenidos de acuerdo con el número de juntas contenidas en un metro cuadrado de cada sección por cada cara, teniendo como un J_v máximo de 28 en la cara norte y de 27 en la cara sur; el J_v mínimo de 17 en cara norte y 18 en cara sur, queriendo dar a entender que los tamaños de los bloques en función de J_v son de medios a pequeños (Tabla 5.4).

Tabla 5.4 Valores de Jv

M. R. Cara Norte		M. R. Cara Sur	
Sección	Jv	Sección	Jv
1	19	1	20
2	22	2	27
3	23	3	21
4	28	4	24
5	17	5	18

La clasificación de Deere dio como resultado en la cara norte del macizo un RQD de calidad aceptable en las secciones 1 con 62.5%, 2 con 55%, 3 con 52.5% y 5 con 67.5%, siendo este último valor el máximo, mientras que en la sección faltante tiene como RQD de 40% siendo una calidad pobre. En la cara sur, el RQD aceptable se encuentra en las secciones 1 con 60%, 3 con 57.5% y 5 con 65%, en cambio, las secciones 2 con 42.5% y 4 con 50% resultando una roca de calidad pobre. (Tabla 5.5)

Tabla 5.5 RQD por sección

M. R. Cara Norte			M. R. Cara Sur		
Sección	RQD %	Calidad	Sección	RQD %	Calidad
1	62.5	Aceptable	1	60	Aceptable
2	55	Aceptable	2	42.5	Pobre
3	52.5	Aceptable	3	57.5	Aceptable
4	40	Pobre	4	50	Pobre
5	67.5	Aceptable	5	65	Aceptable

Q de Barton

En las Tablas 5.6 a 5.11 se presentan los datos recopilados de los afloramientos para cada sección de los macizos rocosos.

La Tabla 5.6 contiene los valores del RQD en porcentaje para cada sección. La cara norte tiene un RQD máximo en la sección 3 con 50% lo que significa que la calidad del testigo es mala y mínimo de 15% en la sección 4 con calidad de testigo muy mala. En la cara sur el valor máximo es de 65% con una calidad de testigo media y mínimo de 15% en la sección 2 dando una calidad muy mala.

Tabla 5.6 Calidad de testigo RQD

1. Calidad del testigo RQD			
M. R. Cara Norte		M. R. Cara sur	
Sección	RQD (%)	Sección	RQD (%)
1	40	1	40
2	25	2	15
3	50	3	30
4	15	4	65
5	30	5	30

La Tabla 5.7 indica el índice de diaclasado para cada cara de los macizos rocosos, teniendo primero en las secciones 2 y 4 un J_n de 6, esto quiere decir que hay dos familias y algunas diaclasas aleatorias y un J_n menor de 3 (una familia y algunas diaclasas aleatorias) en la cara norte. En la cara sur, su dato de J_n mayor es de 6 en las secciones 1 y 3, también un J_n mínimo de 3 en las secciones 2, 4 y 5.

Tabla 5.7 Índice de diaclasado

2. Índice de diaclasado			
M. R. Cara Norte		M. R. Cara sur	
Sección	J_n	Sección	J_n
1	3	1	6
2	6	2	3
3	3	3	6
4	6	4	3
5	3	5	3

La Tabla 5.8 califica el índice de rugosidad de las discontinuidades en las masas rocosas; en las secciones 1, 2 y 3 se cuenta con un J_r máximo de 3 (este valor indica que hay presencia de diaclasas onduladas, rugosas o irregulares) y el mínimo de 1.5 (diaclasas planas, rugosas o irregulares) en la sección 5 de la cara norte. En la cara sur, el J_r mayor es también de 3 en las secciones 1, 3, 4 y 5; por lo contrario, el J_r menor es de 1.5 en la sección 2.

Tabla 5.8 Índice de rugosidad de las discontinuidades

3. Índice de rugosidad de las discontinuidades			
M. R. Cara Norte		M. R. Cara sur	
Sección	J_r	Sección	J_r
1	3	1	3
2	3	2	1.5
3	3	3	3
4	2	4	3
5	1.5	5	3

La Tabla 5.9 ubica el índice de alteración en las discontinuidades, en la cara norte se dispone de un Ja mayor de 8.0 (sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, relleno de minerales arcillosos) en la sección 5 y un Ja menor de 1.0 (contiene planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas) en la sección 1. La cara sur cuenta con Ja mayor de 8.0 en las secciones 1 a la 4 y en la sección 5 con un valor pequeño de 6.0 (fuertemente sobreconsolidado, con rellenos de minerales arcillosos blandos).

Tabla 5.9 Índice de alteración de las discontinuidades

4. Índice de alteración de las discontinuidades			
M. R. Cara Norte		M. R. Cara sur	
Sección	Ja	Sección	Ja
1	1.0	1	8.0
2	2.0	2	8.0
3	4.0	3	8.0
4	4.0	4	8.0
5	8.0	5	6.0

La Tabla 5.10 se presentan los factores de reducción por la presencia de agua en las dos caras. En la cara norte, las secciones 1, 2 y 5 tienen un J_w de 1.0 (excavaciones secas o pequeñas afluencias), en tanto las secciones 3 y 4 con J_w de 0.66 (afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de discontinuidades). La cara sur también cuenta con un J_w de 1.0 en las secciones 1, 2 y 4, mientras el valor mínimo es de 0.66 en las secciones 3 y 5.

Tabla 5.10 Factor de reducción por la presencia de agua

5. Factor de reducción por la presencia de agua			
M. R. Cara Norte		M. R. Cara sur	
Sección	J_w	Sección	J_w
1	1.0	1	1.0
2	1.0	2	1.0
3	0.66	3	0.66
4	0.66	4	1.0
5	1.0	5	0.66

De la Tabla 5.11, las condiciones tensionales de las rocas que forman a los macizos norte y sur están dados por valores SRF de 7.5 que es el mayor (son múltiples zonas de fractura en roca competente, roca de contorno suelta) en la sección 3, el menor de 5 (zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente) en las secciones sobrantes. Al contrario que en la cara sur, está un SRF máximo de 5 y un mínimo de 2.5 (zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente) en las secciones 1, 3 y 4.

Tabla 5.11 Condiciones tensionales de la roca

6. Condiciones tensionales de la roca			
M. R. Cara Norte		M. R. Cara sur	
Sección	SRF	Sección	SRF
1	5	1	2.5
2	5	2	5
3	7.5	3	2.5
4	5	4	2.5
5	5	5	5

Para conocer los datos de Q, los valores de las Tablas 5.6 a 5.11 se sustituyeron en la Ecuación 5.2.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{Ec.5.2})$$

RQD = índice de calidad de roca

J_n = índice de diaclasado que indica el grado de fracturación

J_r = índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas

J_a = índice que indica la alteración de las discontinuidades

J_w = coeficiente reductor por la presencia de agua

SRF = coeficiente que tiene en cuenta el estado tensional

Finalmente, se llega a la Tabla 5.12, la cual muestra que en el macizo rocoso cara norte, el índice Q mayor es de 8 que tiene una calidad de roca media en la sección 1, y un Q menor de 0.17 significando la existencia de roca muy mala en la sección 4. El macizo rocoso cara sur, su Q superior es de 3.25 dando una roca mala en la sección 4 y un inferior de 0.19 significando roca muy mala en la sección 2.

Tabla 5.12 Valores de Q de Barton

M. R. Cara Norte			M. R. Cara Sur		
Sección	Q	Calidad	Sección	Q	Calidad
1	8.00	Roca media	1	1.00	Roca mala
2	1.25	Roca mala	2	0.19	Roca muy mala
3	1.10	Roca mala	3	0.49	Roca muy mala
4	0.17	Roca muy mala	4	3.25	Roca mala
5	0.38	Roca muy mala	5	0.66	Roca muy mala

RMR de Bieniawski

En la clasificación de Bieniawski, la Tabla 5.13, presenta los cinco diferentes criterios que se tomaron al calcularlo en la cara norte junto con sus respectivas puntuaciones; en el caso del criterio 1 se ocuparon los valores de ensayo a compresión simple, en el criterio 2 los diferentes RQD para cada sección, en el 3 la separación de diaclasas, el 4 con las propiedades de las discontinuidades y por último el 5 con el agua freática, ya que dependen de la toma de datos que se recolectaron. Lo mismo pasa con la Tabla 5.14, pero ahora se concentra la información de los cinco parámetros con su puntuación del macizo rocoso cara sur.

Tabla 5.13 Parámetros de la cara norte

Parámetros de clasificación			Macizo Rocoso Cara Norte									
			Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 4		Sección 5	
			Dato	Puntuación	Dato	Puntuación	Dato	Puntuación	Dato	Puntuación	Dato	Puntuación
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo a compresión simple (Mpa)	5.75	2	3.20	1	14.81	2	6.95	2	2.79	1
2	RQD		40	6	25	6	50	6	15	3	30	6
3	Separación entre diaclasas		32 cm	10	33 cm	10	21 cm	10	21 cm	10	19 cm	8
4	Longitud de la discontinuidad		4 m	2	5 m	2	6 m	2	2 m	4	2 m	4
	Abertura		7 mm	0	8 mm	0	11 mm	0	8 mm	0	6 mm	0
	Rugosidad		Rugosa	5	Ligeramente rugosa	3	Ligeramente rugosa	3	Rugosa	5	Ondulada	1
	Relleno		Relleno blando	2	Relleno blando	2	Relleno blando	2	Relleno blando	2	Relleno blando	2
	Alteración		Moderadamente alterada	3	Muy alterada	1	Muy alterada	1	Moderadamente alterada	3	Ligeramente alterada	5
5	Agua freática		Seco	15	Ligeramente húmedo	10	Ligeramente húmedo	10	Ligeramente húmedo	10	Ligeramente húmedo	10

Tabla 5.14 Parámetros de la cara sur

Parámetros de clasificación			Macizo Rocosos Cara Sur									
			Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 4		Sección 5	
			Dato	Puntuación	Dato	Puntuación	Dato	Puntuación	Dato	Puntuación	Dato	Puntuación
1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo a compresión simple	5.75	2	6.95	2	2.79	1	26.97	4	2.79	1
2	RQD		40	6	15	3	30	6	65	13	30	6
3	Separación entre diaclasas		34 cm	10	13 cm	8	25 cm	10	17 cm	8	21 cm	10
4	Longitud de la discontinuidad		4 m	2	2.2 m	4	3.5 m	2	1.9 m	4	2.30 m	4
	Abertura		8 mm	0	4 mm	1	8 mm	0	18 mm	0	6 mm	0
	Rugosidad		Ligeramente rugosa	3	Ligeramente rugosa	3	Rugosa	5	Ondulada	1	Muy rugosa	6
	Relleno		Relleno blando	0	Relleno blando	2	Relleno duro	2	Relleno duro	4	Relleno duro	2
	Alteración		Ligeramente alterada	5	Ligeramente alterada	5	Muy alterada	1	Ligeramente alterada	5	Moderadamente alterada	3
5	Agua freática		Ligeramente húmedo	10	Ligeramente húmedo	10	Ligeramente húmedo	10	Seco	15	Seco	15

Los buzamientos calculados se colocaron en la Tabla 5.15, exponiendo la orientación de las discontinuidades, donde en la cara norte su buzamiento mayor fue en la sección 4 y 5 de 58°, el menor de 48° en la sección 3. En la cara sur el grande es de 84° en la sección 5 y un pequeño de 49° en la sección 4.

Tabla 5.15 Datos de buzamiento

M. R. Cara Norte		M. R. Cara Sur	
Sección	Buzamiento	Sección	Buzamiento
1	50	1	60
2	56	2	69
3	48	3	72
4	58	4	49
5	58	5	84

Los resultados de las valoraciones RMR de esta tercera y última clasificación se encuentran en las Tablas 5.16 y 5.17. Concluyendo que, tanto en la cara norte como en la sur, la calidad de roca es de muy mala (clase V) a mala (clase IV).

Tabla 5.16 RMR del M. R. Cara Norte

M. R. Cara Norte			
Sección	Valoración RMR	Calidad	Clase
1	20	Muy Mala	V
2	10	Muy mala	V
3	11	Muy Mala	V
4	14	Muy Mala	V
5	12	Muy mala	V

Tabla 5.17 RMR del M. R. Cara Sur

M. R. Cara Sur			
Sección	Valoración RMR	Calidad	Clase
1	13	Muy mala	V
2	13	Muy Mala	V
3	12	Muy mala	V
4	29	Mala	IV
5	22	Mala	IV

A continuación, se presentan los resultados de las tres clasificaciones comparándolas en las Tablas 5.18 y 5.19. Se sostiene que en el macizo rocoso de caliza, en la cara norte, sobresale Deere con calidad promedio de roca de 55.5%; en la sección 1, 2, 3 y 5 con aceptable, en la sección 4 con pobre, por lo tanto, los valores resultantes son mayores a comparación con los demás, eso se atribuye a la sencillez del método, ya que no toma en cuenta otros factores, solamente depende del índice Jv.

En Q de Barton, en la primer sección con el valor Q de 8, el cual es el resultado mayor que las otras secciones, presenta una calidad media, mientras que en las secciones 2 y 3 una calidad de roca mala y, en las últimas secciones una roca muy mala. Su calidad promedio es de 2.18 significando roca mala.

En la clasificación RMR, todas las secciones de la cara norte, presentan valores bajos y eso significa que la roca es de una calidad muy mala. Su valoración promedio es de 13.4, conservando la misma calidad de sus secciones.

Concluyendo que las tres concuerdan en la sección 4 con calidad pobre en Deere, roca mala en Barton y muy mala por Bieniawski, en las dos últimas clasificaciones tienen calidades parecidas en las secciones 2, 3, 4 y 5 con la existencia de roca mala a muy mala en el sitio.

Tabla 5.18 Comparación de valores del macizo rocoso cara norte

Macizo rocoso cara norte						
Sección	Clasificaciones					
	Deere		Q de Barton		RMR de Bieniawski	
	RQD (%)	Calidad	Q	Calidad	RMR	Calidad
1	62.5	Aceptable	8	Roca media	20	Muy mala
2	55	Aceptable	1.25	Roca mala	10	Muy mala
3	52.5	Aceptable	1.1	Roca mala	11	Muy mala
4	40	Pobre	0.17	Roca muy mala	14	Muy mala
5	67.5	Aceptable	0.38	Roca muy mala	12	Muy mala
Calidad promedio	55.5	Aceptable	2.18	Roca mala	13.4	Muy mala

La Tabla 5.19 corresponde al macizo rocoso cara sur, empezando por Deere, cuenta con calidad aceptable en las secciones 1, 3 y 5, y calidad pobre en las secciones 2 y 5; por último, resultando su calidad promedio de 55% siendo aceptable. La segunda clasificación ofrece en las secciones 1 y 4 roca mala, en secciones 2, 3 y 5 roca muy mala, consiguiendo una calidad promedio de 1.12, significando roca mala. En la tercera clasificación, las tres primeras secciones son de roca muy mala y en las últimas dos de roca mala, promediando su calidad en 17.8 con roca muy mala.

Tabla 5.19 Comparación de valores del macizo rocoso cara sur

Macizo rocoso cara sur						
Sección	Clasificaciones					
	Deere		Q de Barton		RMR de Bieniawski	
	RQD (%)	Calidad	Q	Calidad	RMR	Calidad
1	60	Aceptable	1.00	Roca mala	13	Muy mala
2	42.5	Pobre	0.19	Roca muy mala	13	Muy mala
3	57.5	Aceptable	0.49	Roca mu mala	12	Muy mala
4	50	Pobre	3.25	Roca mala	29	Mala
5	65	Aceptable	0.66	Roca muy mala	22	Mala
Calidad promedio	55	Aceptable	1.12	Roca mala	17.8	Muy mala

En resumen, sigue siendo diferente Deere, puesto que solamente hay roca pobre en la sección 2 (norte) y 4 (norte y sur), puede decirse que en la sección 4, de ambas caras, concuerdan que tengan calidades malas en las tres clasificaciones. Sin embargo, Q y RMR siguen siendo parecidas y más completas que Deere.

La diferencia que se aprecia en cada clasificación es significativa, debido a que con Deere resulta que la calidad de roca es aceptable en la mayoría y coincidiendo la sección 4 en las dos caras con roca pobre; por el contrario, en las otras dos geclasificaciones, como roca mala a muy mala en las caras norte y sur, estos resultados dependen de la cantidad de parámetros que se toman en cuenta al momento de calificarla.

Conclusiones

Actualmente, en cualquier parte del estado de Puebla, las ciudades se están expandiendo, ya sea para ocupar el territorio en la edificación de viviendas, en explotar espacios para materiales de construcción, etc., siempre y cuando se tenga conocimiento de las zonas que vayan a emplear cuenten con estudios realizados donde les muestren la calidad de roca con la que se pueden encontrar. Sin embargo, en el oriente de la ciudad de Puebla, la información acerca de los macizos rocosos de caliza presentes en el subsuelo es mínima.

Cuando se cuenta con escasos datos acerca de las masas rocosas, el uso del sistema de clasificación de macizos puede ser considerablemente beneficioso, ya que dan la ventaja de facilitar una estimación de parámetros geomecánicos a bajo costo, de forma sencilla y práctica. Recalcando la importancia de entender que la utilización de las clasificaciones no puede reemplazar a algunos procedimientos de diseño más elaborados para un mejor criterio, sin olvidar la relevancia a la exploración de los mantos para una mejor valoración de la roca existente en la zona.

Gracias a los datos recabados por la empresa ICD S. A. de C. V. que proporcionó archivos particulares con información del parámetro RQD y compresión simple de los macizos rocosos de la ciudad de Puebla, a las visitas de campo y los datos recabados de los afloramientos, se lograron hacer las clasificaciones de Deere, Q de Barton y RMR de Bieniawski, donde los puntos importantes fueron mostrar los diferentes grados de calidad, resistencia y el comportamiento de roca en función de las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, con el propósito de advertir a los ingenieros al momento de alguna elaboración de obras ingenieril.

La clasificación de Deere se realizó gracias al índice J_v que consiste en medir la cantidad de discontinuidades en 1 m^2 del talud. En la mayoría de las secciones de las dos caras se clasificó a la roca como aceptable, en la sección 2 (cara sur) y 4 (cara norte y sur) roca pobre por un J_v mayor. Los valores altos de RQD dependen solamente del número de juntas, es decir, entre menos discontinuidades se encuentren, mayor es la probabilidad que la calidad de roca sea aceptable, dejando afuera las características de la masa rocosa.

Para el sistema de clasificación Q si se considera las propiedades y características del macizo rocoso, entonces, al tomar los seis factores que la determinan: RQD, índice de diaclasado, la rugosidad, la alteración de las discontinuidades, la presencia de agua y las condiciones tensionales de las rocas, se tiene como consecuencia la clasificación de roca ubicada en el macizo rocoso norte, empezando con calidad media (sección 1), siguiendo roca mala (sección 2 y 3) y terminando con roca muy mala, en las últimas secciones; en el macizo sur determina calidad mala (sección 1 y 4), muy mala (sección 2, 3 y 5). Los valores determinantes que hacen que la calidad de la roca aumente a roca buena serían un RQD más alto (de bueno a excelente), un menor número de diaclasado (si fuera una roca sin diaclasar o una familia de diaclasas), mayor rugosidad en las

discontinuidades, que tengan mínima alteración, que el factor de reducción por la presencia de agua sea superior (por ejemplo excavaciones secas o pequeñas afluencias) o si el SRF disminuye.

La clasificación RMR de Bieniawski se considera la más completa, porque engloba mayores parámetros dentro del macizo rocoso que Q de Barton, es decir, el índice RQD, la compresión simple, si hay separación entre las diaclasas, la longitud de las discontinuidades, las aberturas, su rugosidad, la existencia de relleno o no, su alteración y, por último, el agua freática, aunque también se considera la medida del buzamiento que conlleva a una corrección por la orientación de las discontinuidades. En la cara norte, a causa de los resultados de 20 (sección 1), 10 (sección 2), 11 (sección 3), 14 (sección 4) y 12 (sección 5), se sostiene una valoración RMR de calidad muy mala perteneciente a la clase V. Por otra parte, en la cara sur, los valores fueron de 13 (sección 1 y 2), 12 (sección 3), 29 (sección 4) y 22 (sección 5), determinando calidad muy mala clase V en las primeras tres secciones y malas en las últimas dos con clase IV. Para que una roca al clasificarla sea muy buena, buena o media, tendrían que ser elevados los datos del afloramiento para que al momento de realizar la corrección por buzamiento, que es donde se le resta a la suma de los parámetros, resulte una cantidad considerable entre 41 a 100.

Los resultados de las clasificaciones demostraron que los macizos de roca caliza en la clasificación de Deere, en el macizo rocoso norte presenta un RQD promedio de 55.5% y la cara sur con 55% ubicándose entre los valores de 50-75% indicando que la calidad de la roca se encuentra "aceptable". Para la segunda clasificación Q de Barton, los datos para la zona norte fue un promedio Q de 2.18 y en la zona sur de 1.12, dando a entender que las rocas disponibles en ese lugar se encuentran entre los valores de 1 a 4, por lo que se consideran "rocas malas". Y por último, la clasificación RMR de Bieniawski concluyó que la valoración promedio de RMR para la cara norte es de 13.4, la cara sur con 17.8, estando en la valoración de <20 a una roca de clase V con una calidad "muy mala".

Referencias

- Alonso, F. (2007). *Caracterización de macizos rocosos*. Madrid: Pretince Hall.
- Azomoza G., Vera A. y Reyes L. (1998). "Zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla", Memorias del XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Publicación SMMS, Puebla, Pue.
- Bazán Santa Cruz et al., (2012). Caracterización del macizo rocoso (PDF). Recuperado de: <https://1library.co/document/ozlv6xgy-caracterizacion-del-macizo-rocoso.html>
- Calla, J. (2014). *Mecánica de rocas: Resistencia y deformabilidad (Presentación PowerPoint)*. Recuperado de: <https://pdfslide.net/documents/resistencia-y-deformabilidad-de-rocapptx.html>
- Cartaya Pire, M. (2006). Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental de país. (Resumen de tesis doctoral / 2001). *Minería y geología*, 22(3).
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por sismo. México 2015.
- Duque, G. (2022). Cap. 12 Macizo Rcoso. *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales.
- FAUM. (s.f.). Materiales básicos: Agregados de la construcción (PDF). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Recuperado de: <https://hctarelo.weebly.com/uploads/4/6/9/7/46979447/agregados.pdf>.
- Flores, J. (2019). Clasificación de macizos rocosos de travertino en la ciudad de Puebla. (Tesis). BUAP. México.
- Gallardo, M. (2012). Cimentaciones en roca. (Tesis). UNAM: México.
- González de Vallejo, L. Ferrer, M., Orduño, L. y Oteo C. (2004). "Ingeniería Geológica". España: PEARSON EDUCATION.
- González, I. (1986). La geología aplicada a la ingeniería civil. (Tesis de Licenciatura). UNAM. México.
- Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering. Recuperado de: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>
- INEGI. (1987). *Síntesis Geográfica, Nomenclator y Anexo Cartográfico del Estado de Puebla*. Puebla.
- Ingeniería Civil en Desarrollo (ICD S.A de C.V). (2014-a). Archivo Particular, Puebla, Puebla.
- Ingeniería Civil en Desarrollo (ICD S.A de C.V). (2014-b). Archivo Particular, Puebla, Puebla.
- Ingeniería Civil en Desarrollo (ICD S.A de C.V). (2014-c). Archivo Particular, Puebla, Puebla.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2001). *Geotecnia en Ingeniería de Presas*. México: IMTA.
- Irveen (2010). Tipos de discontinuidades (jpg). Recuperado de <https://es.slideshare.net/Irvenn/mecanica-de-rocas>
- Merritt, F., Loftin, M. y Ricketts, J. (2017). Ingeniería Geotécnica. En *Manual del Ingeniero Civil* (págs. 7.2-7.16). México: McGRAW-HILL

- Montoto, M. y Esbert, R. (1999). Petrofísica de la roca matriz. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo, España.
- Mora, R. (2014). Evaluación del peligro por caída de rocas alrededor del (jpg). Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Ensayos-in-situ-con-el-martillo-Schmidt_fig1_335241763
- Noguera, J. (2021). Clasificación geomecánica de Deere. Índice RQD (1967). Parte 1ª. Recuperado de: <https://eadic.com/blog/entrada/clasificacion-geomecanica-de-deere-indice-rqd-1967-parte-1a/#:~:text=La%20clasificaci%C3%B3n%20geomec%C3%A1nica%20de%20Deere,partir%20del%20grado%20de%20fracturaci%C3%B3n>
- Plaza, O. (s.f.). Geología aplicada (PDF). Universidad Politécnica de Madrid. Ingeniería Técnica de Obras Públicas.
- Pazos, D. (2020). Inyecciones de consolidación en túneles utilizando lechadas de cemento estables. Trabajo de grado. Universidad Santo Tomás: Bogotá.
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de taludes. España: Red DESIR.
- Romero, E. (2012). Importancia de las fracturas en diferentes aplicaciones de la geología. (Tesis de Licenciatura). UNAM. México.
- Servicio Geológico Mexicano (2001).
- Sánchez, J. (2020). Conceptos fundamentales de Hidrogeología. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca, España.
- Universidad Politécnica de Madrid. (2011). Ensayos mecánicos: Materiales de construcción (jpg). Recuperado de: <http://www2.caminos.upm.es/Departamentos/construccion/Materiales/webmat/Ensayos%20mec%C3%A1nicosF.htm>
- Velázquez, A. (2016, 14 de marzo). El oasis subterráneo (PDF). Cienciorama UNAM. Recuperado de: http://www.cienciorama.unam.mx/a/pdf/457_cienciorama.pdf
- Villalba, H. (2010). Tecnología Industrial I. Materiales Pétreos y Cerámicos (PDF). Recuperado de: https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2010/03/materiales_petreos-y-ceramicos1.pdf.
- Zemanate, C. y Zapata, F. (2015). Estudios de las características de rocas calcáreas típicas utilizadas para la producción de cales en el municipio de Vijes. (Tesis). Universidad del Valle.

Anexos

Anexo A

En las siguientes fotografías de las zonas norte y sur, se muestra la medición de espaciamiento, buzamiento, aberturas, relleno y rugosidades que presentan las distintas secciones del macizo rocoso.

Zona norte – sección 1



Zona norte – sección 2



Zona norte – sección 3



Zona norte – sección 4



Zona norte – sección 5



Zona sur – sección 1



Zona sur – sección 2



Zona sur – sección 3



Zona sur – sección 4



Zona sur – sección 5



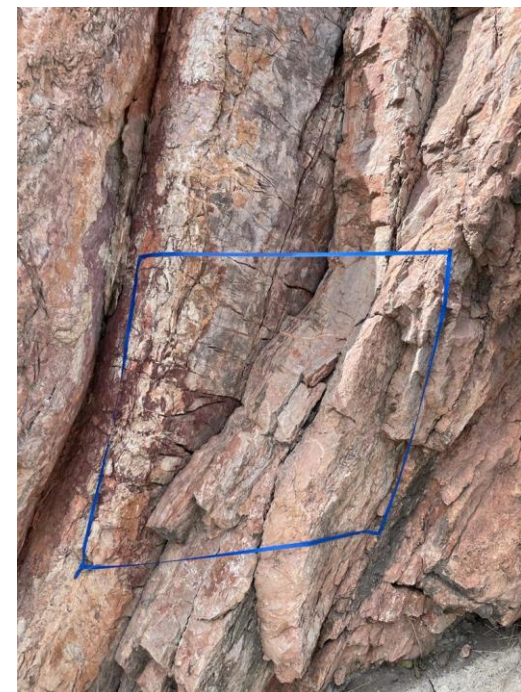
Anexo B

Se muestra la ejecución de los cuadrados para la clasificación de Deere. Las fotografías presentan la realización de 1 m² por cada sección en la cara norte y sur del macizo, las cuales fueron utilizadas para definir el RQD, de acuerdo con la cantidad de discontinuidades localizadas dentro de él.

Zona norte – sección 1 cuadrado 1



Zona norte – sección 2 cuadrado 2



Zona norte – sección 3 cuadrado 3



Zona norte – sección 4 cuadrado 4



Zona norte – sección 5 cuadrado 5



Zona sur – sección 1 cuadrado 1



Zona sur – sección 2 cuadrado 2



Zona sur – sección 3 cuadrado 3



Zona sur – sección 4 cuadrado 4



Zona sur – sección 5 cuadrado 5



Anexo C

Las siguientes fotografías presentan la realización de un sondeo en el macizo rocoso cara sur, donde se utilizó una perforadora Long Year obteniendo una muestra a profundidad de 0.00 – 1.00 m, a partir del nivel de terreno natural, ya que la recuperación de las muestras posteriores fue nula.





