



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Manual de prácticas de  
laboratorio de Mecánica de  
Rocas. (Parte I)**

**MATERIAL DIDÁCTICO**

Que para obtener el título de

**Ingeniero de Minas y Metalurgista**

**P R E S E N T A**

Pablo Daniel Vázquez Cordero

**ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO**

Ing. Javier Mancera Alejándrez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Enero 2019**





La educación es el pasaporte hacia el futuro,

El mañana pertenece a aquellos que se  
preparan para él en el día de hoy.

Malcolm X

El futuro tiene muchos nombres.

Para los débiles es lo inalcanzable.

Para los temerosos, lo desconocido.

Para los valientes es la oportunidad.

Víctor Hugo



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi padre Pablo Vázquez por todo su amor, enseñanzas y consejos, por todo su apoyo a lo largo de mi vida y siempre estar a mi lado alentándome a seguir adelante sin importar cuantas veces tropecé. Gracias por apoyarme en este proyecto que fue mi vida universitaria y sobre todo por siempre tener fe en mí.

A mi madre Mariana Cordero por su amor incondicional, por ser mi apoyo en cada momento difícil, por impulsarme cada día a ser una mejor persona, por creer en mí en todo momento. Pero sobre todo le agradezco por estar siempre ahí en cada paso que he dado en la vida.

A mi hermano Emmanuel Vázquez por siempre ver lo mejor en mí y llenarme de afecto sin importar la distancia que hoy nos separa, pero sobre todo por enseñarme que ningún esfuerzo es muy grande cuando se hace por tus seres queridos.

A mi tío Sergio Vázquez por su apoyo y cuidados a lo largo de los años, por sus consejos y palabras de aliento. Gracias por estar siempre pendiente de nosotros, por ser un ejemplo a seguir, por todo lo que me enseñó y por el apoyo que me dio para lograr esta meta en mi vida.

A Roberta Tovar por estar siempre a mi lado, por ayudarme a enfrentar cada reto en este proyecto, por brindarme todo su apoyo y cariño. Gracias por ser la persona tan especial que eres y por darme la fuerza para siempre seguir adelante. Gracias por ser mi inspiración.

A Tania Arroyo por brindarme su amistad, su tiempo, dedicación y guía en este proyecto. Gracias por brindarme tu apoyo, conocimientos y amistad.

Al ingeniero Javier Mancera, mi amigo y director de tesis por su guía, supervisión, orientación, amistad y paciencia a lo largo de la elaboración de este proyecto.

A Rgelio Arroyo y Elias Ramirez por toda su amistad y apoyo incondicional a lo largo de estos años



## ÍNDICE

ÍNDICE.....	8
INTRODUCCIÓN.....	12
PRÁCTICA 1. Características visuales y registro de muestras de roca .....	16
I.1 Introducción .....	16
I.2 Marco teórico .....	17
I.2.a. Conceptos básicos .....	17
I.2.b. Características visuales de la roca.....	18
I.2.c. Registro de muestras.....	20
I.3 Desarrollo de la práctica.....	22
I.3.a. Objetivo .....	22
I.3.b. Material .....	22
I.3.c. Procedimiento.....	22
I.3.d. Cuestionario .....	23
I.3.e. Resultados.....	23
I.3.f. Evaluación sugerida.....	25
I.4 Bibliografía.....	25
PRÁCTICA 2. Densidad y peso específico.....	27
II.1 Introducción .....	27
II.2 Marco teórico .....	28
II.2.a. Conceptos básicos .....	28
II.2.b. Correlación entre la densidad, el peso específico y otras propiedades de las rocas.....	29
II.3 Desarrollo de la práctica .....	35
II.3.a. Objetivo.....	35

II.3.b. Material .....	35
II.3.c. Procedimiento .....	36
II.3.d. Cálculos.....	38
II.3.e. Cuestionario .....	39
II.3.f. Resultados.....	40
II.3.g. Evaluación sugerida.....	40
II.4 Bibliografía .....	40
PRÁCTICA 3. Contenido de agua y porosidad.....	42
III.1 Introducción.....	42
III.2 Marco teórico.....	42
III.2.a. Conceptos básicos.....	42
III.2.b. Correlación entre la porosidad, el contenido de agua y otras propiedades de las rocas.....	43
III.3 Desarrollo de la práctica.....	49
III.3.a. Objetivo .....	49
III.3.b. Material.....	49
III.3.c. Procedimiento .....	50
III.3.d. Cálculos .....	52
III.3.e. Cuestionario .....	53
III.3.f. Resultados .....	54
III.3.g. Evaluación sugerida.....	54
III.4 Bibliografía.....	54
PRÁCTICA 4. Ensaye de carga puntual .....	56
IV.1 Introducción.....	56
IV.2 Marco teórico .....	56

IV.2.a. Conceptos básicos.....	56
IV.2.b. Prueba de carga puntual. Funcionamiento .....	57
IV.2.c. Correlación entre el valor de carga puntual y otras propiedades de las rocas ..	59
IV.3 Desarrollo de la práctica.....	63
IV.3.a. Objetivo .....	63
IV.3.b. Material .....	63
IV.3.c. Procedimiento.....	64
IV.3.d. Cálculos .....	67
IV.3.e. Cuestionario.....	70
IV.3.f. Resultados .....	70
IV.3.g. Evaluación sugerida .....	71
IV.4 Bibliografía.....	71
<b>PRÁCTICA 5. Ensaye con martillo Schmidt .....</b>	<b>73</b>
V.1 Introducción.....	73
V.2 Marco teórico.....	73
V.2.a. Conceptos básicos.....	73
V.2.b. Martillo Schmidt. Funcionamiento.....	74
V.2.c. Correlación entre el valor de rebote del martillo Schmidt y otras propiedades de las rocas .....	76
V.3 Desarrollo de la práctica .....	78
V.3.a. Objetivo.....	78
V.3.b. Material.....	78
V.3.c. Procedimiento .....	79
V.3.d. Cálculos .....	84
V.3.e. Cuestionario .....	90

V.3.f. Resultados .....	90
V.3.g. Evaluación sugerida.....	90
V.4 Bibliografía .....	90
PRÁCTICA 6. Resistencia al corte de las discontinuidades .....	92
VI.1 Introducción.....	92
VI.2 Marco teórico .....	92
V.2.a. Conceptos básicos.....	92
VI.2.b. Resistencia al corte de las discontinuidades.....	93
VI.3 Desarrollo de la práctica.....	100
VI.3.a. Objetivo .....	100
VI.3.b. Material .....	100
VI.3.c. Procedimiento.....	100
VI.3.d. Cálculos .....	107
VI.3.e. Cuestionario.....	114
VI.3.f. Resultados .....	114
VI.3.g. Evaluación sugerida .....	114
VI.4 Bibliografía.....	114
CONCLUSIONES .....	116
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....	118

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los retos más importantes que enfrenta la Ingeniería Geotécnica es la necesidad de contar con ingenieros cada vez mejor capacitados para atender problemas asociados con los diversos procesos que implican la modificación del estado actual del terreno con fines de ingeniería (Hudson, 2002), tales como la estabilidad de taludes, túneles y carreteras; o bien, el diseño y estabilización de tajos a cielo abierto, minas subterráneas, cimentaciones de presas, (Zhang, 2005), zonas de riesgos geológicos o fracturamiento hidráulico, entre otros.

Si bien es cierto, que en nuestro país se cuenta con una gran cantidad de profesionistas y posgraduados que se especializan en las áreas de Mecánica de Suelos y de Geología, el caso de la disciplina de Mecánica de rocas, es completamente distinto, ya que es una de las áreas menos desarrolladas en relación a la Ingeniería Geotécnica.

Tal deficiencia se debe fundamentalmente a la falta de laboratorios especializados en la disciplina de Mecánica de Rocas, y a la falta de material didáctico actualizado en el que los estudiantes se puedan apoyar para mejorar su aprendizaje, por lo que la formación de ingenieros dentro de esta área de la geotecnia resulta ser un gran reto para los docentes.

En el caso específico de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, el Laboratorio de Mecánica de Rocas (LRM) no está en funcionamiento, ya que se encuentra en un proceso de restauración liderado por el Ing. Javier Mancera Alejándrez, situación que ha generado un vacío en la formación de nuestros futuros ingenieros, y es que, al carecer de este conocimiento empírico, si bien es cierto que los egresados de nuestra facultad tienen la ventaja de contar con una formación sólida en términos teóricos, también es cierto que advierten grandes deficiencias en el terreno de la praxis, lo cual puede implicar una mayor dificultad para incorporarse al mercado laboral.

Advirtiendo entonces la necesidad de fortalecer la formación de nuestros ingenieros y de enriquecer la expertis de los egresados en el área de geotecnia, este trabajo parte del siguiente cuestionamiento: ¿Qué se puede hacer para reforzar y profundizar los conocimientos teóricos y prácticos de la materia de Mecánica de Rocas con el fin de que, en un ámbito más general, los estudiantes y egresados de la Facultad de Ingeniería se

encuentren mejor preparados para hacer frente a los retos que hallarán en el desarrollo de su vida profesional y, específicamente, en el ámbito de la ingeniería geotécnica?

Partiendo de dicho cuestionamiento hemos entonces formulado la hipótesis de que mediante el diseño y la elaboración de un manual que contenga prácticas de laboratorio referentes al tema de Mecánica de Rocas se ayudaría al estudiante a consolidar y reforzar los conocimientos referentes a las materias de Mecánica de Rocas y Geotecnia de Excavaciones; además, facilitaría al docente una herramienta didáctico-pedagógica que, en última instancia y en términos generales, fortalecería aún más la formación de los estudiantes de las licenciaturas de Ingeniería en Minas y Metalurgia e Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Con base en el planteamiento anterior este trabajo tendrá como objetivo preparar un manual de prácticas con ejemplos y ejercicios que permitan que el alumno eleve la calidad de su aprendizaje en torno a la asignatura de Mecánica de Rocas y materias afines, como Geotecnia de Excavación, Geología Estructural, Geología Aplicada a la Ingeniería Civil, Mecánica y Comportamiento de Materiales, Explotación de Minas a Cielo Abierto, Explotación de Minas Subterráneas y Temas Selectos de Geotecnia; puesto que mediante dicho manual podrá poner en práctica procedimientos y metodologías publicadas por organizaciones internacionales como las normas de la ASTM (*American Society of Testing Materials*) y los métodos sugeridos de la ISRM (*International Society of Rock Mechanics*).

En suma, este manual podrá facilitar que el alumno experimente la parte práctica para consolidar sus conocimientos teóricos, además brindará la oportunidad de aprender a usar equipo de laboratorio que de otra manera sólo podría ver en esquemas dentro del aula, es decir, podría enriquecer significativamente el conocimiento y la experiencia de la materia con el fin de generar ingenieros más preparados y competitivamente más aptos, facilitando así el desarrollo de su vida profesional.

Cabe mencionar que este manual de prácticas se encuentra fundamentado en los procedimientos y métodos que han sido propuestos por las siguientes sociedades y organismos nacionales e internacionales:

1. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. International Society for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods.*
2. *Annual book of ASTM standards. American Society for Testing and Materials Annual.*
3. *CFE Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. B.3.1 Pruebas de Laboratorio de Mecánica de Rocas: Sección B: Geotecnia Tema 2: Mecánica de Rocas Comisión Federal de Electricidad.*

Pese a lo anterior, es importante aclarar que en este manual, debido a los alcances que se propone, no logrará abordar el total de los temas del plan de estudio de la asignatura de Mecánica de Rocas, como tampoco logrará abordar el total de las pruebas que son propuestas por las sociedades y organismos que hemos mencionado; a su vez, habrá que tener en cuenta que en algunos casos, los alcances propuesto por el manual no serán posibles aún, debido a que en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM no se cuenta con el material y equipo necesario para la realización de varios de los ejercicios propuestos, por lo que se advierte como una imperiosa urgencia la adquisición del equipamiento referido.

Ahora bien, en cuanto al contenido del manual, debemos señalar que éste cuenta con seis prácticas. En la práctica uno se propone un repaso de los conocimientos y nociones previamente adquiridas y una introducción a la Mecánica de Rocas, en ésta se retoman conceptos básicos ya estudiados por el alumno con anterioridad y se propone la realización un ejercicio de registro de muestras.

Las prácticas dos y tres contemplan una serie de ejercicios que guían al alumno en el proceso de calcular cuatro de las principales propiedades índice de las rocas (densidad, peso específico, contenido de agua y porosidad) y, a su vez, muestran al alumno la estrecha relación que existe entre ellas.

Las prácticas cuatro y cinco ayudarán al estudiante a comprender mejor el concepto y cálculo de la resistencia a la compresión simple de la roca (RCS) por medio de dos diferentes herramientas, la prensa de carga puntual y el martillo Schmidt o esclerómetro, respectivamente.

Por último, la práctica seis será un ejercicio que combine el uso del martillo Schmidt y la prueba de inclinación (*tilt test*) para encontrar la resistencia al corte de una pared de discontinuidades por medio del criterio de Barton y Bandis.

## **PRÁCTICA 1. Características visuales y registro de muestras de roca**

PREGUNTA GUÍA: ¿Cuál es la importancia de llevar un registro de muestras de roca y cuáles son las principales características visuales que es posible identificar en la roca?

### **I.1 Introducción**

La identificación de las muestras de minerales y rocas, así como los procesos de obtención y registro de las mismas, son competencias que el alumno debe adquirir; de ahí que para entender la importancia que tiene el registro de muestras en Mecánica de Rocas se deba tener presente que el objetivo de un estudio geotécnico es predecir la respuesta del macizo rocoso al modificar los esfuerzos que se ejercen en él, es decir, “[...] Cuando se excava un macizo rocoso o se construyen estructuras sobre las rocas se modifican las condiciones iniciales del medio rocoso, el cual responde a estos cambios deformándose y/o rompiéndose. [...]” (González, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002). De esta manera, para poder predecir la respuesta del macizo rocoso se requiere obtener la mayor cantidad de información posible del mismo, así, el primer paso para obtener dicha información implica observar e interpretar los testigos de roca obtenidos en los sondeos, debido a que éstos nos proporcionarán datos en torno a: forma del yacimiento, ubicación espacial, tipo de rocas y minerales, concentración mineral, discontinuidades, presencia de agua, entre otros.

Asimismo, se debe tener presente que la característica principal del registro de muestras durante un sondeo es que es un informe que contiene información no sólo de la roca y el muestreo, sino también del entorno y el momento de obtención, puesto que su objetivo es proporcionar, a cualquiera que lo lea, información detallada de las condiciones, características y posibles alteraciones en la muestra.

Con esta información se podrá elaborar un programa de pruebas de laboratorio para conocer las diversas propiedades del material y su estructura, así como sus posibles anomalías, por ello, el registro de las muestras es tan importante, ya que si la información en este tipo de informe es incorrecta o la muestra ha sido alterada de alguna forma, la interpretación de los resultados también será errónea, lo que podría tener graves consecuencias, desde un fracturamiento en las estructuras construidas hasta el cierre de un proyecto minero.

## I.2 Marco teórico

Antes de iniciar la práctica, será necesario que los estudiantes se familiaricen con algunos conceptos básicos que son fundamentales tanto para la obtención de una muestra como para la realización de su registro; para posteriormente revisar las características visuales, así como el método de sondeo y registro de muestras.

### I.2.a. Conceptos básicos

- Mineral: Un mineral es un compuesto, generalmente sólido, producido por procesos de naturaleza inorgánica, que posee una composición química definida y, si se crea en condiciones favorables también presentará una forma cristalina y otras propiedades físicas. (López, 2003).
- Roca: “Se define roca como un agregado sólido, formado por uno o varios minerales, que se encuentra ocupando grandes extensiones de la corteza terrestre. [...]” (Ramírez y Alejano, 2004).
- Muestra: “Parte o porción extraída de un conjunto por métodos que permiten considerarla como representativa de él.” Real Academia Española [RAE] (2018).
- Muestreo: “Acción de escoger muestras representativas de la calidad o condiciones medidas de un todo.” [RAE] (2018)
- Muestrear: “Colectar muestras de la mina para su ensaye.” (López, 2003)
- Roca intacta: “[...] la roca intacta se puede considerar como un continuo o sólido policristalino entre discontinuidades formadas por un agregado de minerales o granos. [...]” (Zhang, 2005).
- Macizo rocoso: “[...] el macizo rocoso es el medio *in situ* compuesto por bloques de roca intacta separados por discontinuidades como juntas, planos de estratificación, pliegues, zonas cortadas y fallas. [...]” (Zhang, 2005)
- Barrenación: “Grupo de barrenos perforados en una obra minera. Acción y efecto de barrenar.” (López, 2003)
- Fluido de perforación: “[...] estos fluidos no son más que un fluido base (aire, agua, aceite...) al que se le añaden una serie de aditivos para conferirle ciertas propiedades físicas y químicas que permitan optimizar las labores de perforación.” (Quimacer, 2013)

- Batería o tubo portatestigos: “[...] tubo de longitud variable entre 0.5 y 3 m que, situado en la sarta de perforación detrás de la corona, recoge la muestra cilíndrica de roca cortada por esta. [...]” (Bernaola, Castilla y Herrera, 2013)

### **I.2.b. Características visuales de la roca**

Uno de los pasos más importantes para un estudio geotécnico es obtener información de las propiedades de la roca intacta y del macizo rocoso, así, una de las formas más sencillas de lograr esto es por medio del uso de ciertos parámetros visuales que facilitan la identificación y clasificación de la roca. González et al. (2002) dividen tales parámetros en dos grupos:

- Descripción geológica de la roca: incluye su nombre, mineralogía, textura, tipo de cementación y grado de alteración
- Descripción petrográfica: se realiza por medio de la observación macroscópica de las muestras y el análisis microscópico, necesario para conocer la composición, textura, fábrica, microfracturación, porosidad, etc.

Es importante conocer tales parámetros visuales en tanto que permiten identificar características relevantes de la roca, por ejemplo, conocer la orientación de los cristales, su dureza y estructura cristalina permiten deducir la reacción de la roca frente a un esfuerzo creado por fuerzas externas en una obra ingenieril.

En el caso de esta práctica se pondrá especial interés en los siguientes parámetros visuales:

- Color: Se identifica el color general (Marrón, negro, gris, etc.). Aunque el color es una característica obvia de un mineral, a menudo es una propiedad diagnóstica poco fiable, debido a que ciertos minerales pueden llegar a presentar una diversidad de colores (coloración exótica) causada por la incrustación de impurezas, pese a ello, algunos minerales tienden a tener un color característico (coloración inherente) (Tarbuck y Lutgens, 1999). Para restar subjetividad a la asignación de color, se utiliza alguna tabla normalizada, en Ciencias de la Tierra es común usar la Tabla de Colores de Munsell.
- Tamaño de grano: Tamaño de los granos o cristales medido en mm.

- Distribución de los tamaños: Se determina si el tamaño o diámetro de todos los granos o cristales son iguales o existen variaciones (equigranular, heterogranular, irregular).
- Estructura: se considera como la “Distribución y orden de los cristales o clastos dentro de un cuerpo rocoso” (Castro, 1989); ésta puede ser homogénea o masiva, bandeada, bandeada curva, nodulosa, brechoide, etc.
- Peso específico: El peso específico es un número que representa el cociente entre el peso de un mineral y su volumen. En campo con un poco de práctica se puede llegar a calcular el peso específico general de una roca o mineral sosteniéndolo en la mano (denso o ligero). Por ejemplo, los minerales metálicos tienen un peso específico dos o tres veces mayor al de los minerales que constituyen las rocas comunes (Tarbuck y Lutgens, 1999).
- Textura: se le considera como el “Conjunto de las relaciones intergranulares de tamaño y forma de los cristales o clastos que forman una roca determinada. Las denominaciones texturales y los criterios utilizados varían según el tipo de roca considerada” (Castro, 1989); la textura puede ser secuencial, vítrea, clástica, cristaloblástica, deformada, etc.
- Exfoliación: En la estructura cristalina de un mineral algunos enlaces son más débiles que otros y la exfoliación es la tendencia de un mineral a romperse, a lo largo de dichos planos de enlaces débiles, al ser sometido a una tensión. No se debe confundir estructura cristalina con exfoliación, ya que la primera es la forma del mineral y la segunda la forma preferente como se romperá el mineral (Tarbuck y Lutgens, 1999).
- Fractura: En el caso de la fractura, Tarbuck y Lutgens (1999) señalan que: “[...] los minerales que no exhiben exfoliación cuando se rompen, como el cuarzo, se dice que tienen fractura. Los que se rompen en superficies curvas lisas que recuerdan a vidrios rotos tienen una fractura concoide. [...]”
- Dureza: es “[...] una medida de la resistencia de un mineral a la abrasión o al rayado. Esta propiedad se determina frotando un mineral de dureza desconocida contra uno de dureza conocida o viceversa. [...]” (Tarbuck y Lutgens, 1999). Para el cálculo de la dureza se han planteado diversas escalas, sin embargo, generalmente

se utiliza la escala de Mohs, la cual consiste en diez minerales de dureza conocida a los cuales se les asignó un valor del uno al diez empezando con el más blando, cuyo valor es 1, y terminando con el más duro, cuyo valor es 10; sin embargo, para esta práctica y considerando que son características observadas, sólo se tomarán los valores de dureza blando, normal y duro observados a criterio del alumno.

- **Fábrica:** es la “Orientación espacial de los cristales, clastos o agregados policristalinos no equidimensionales dentro de un cuerpo rocoso. [...]” (Castro, 1989); ésta se puede clasificar como linear, plano-linear, planar, o bien, isótropa.
- **Brillo:** “El brillo es el aspecto o la calidad de la luz reflejada de la superficie de un mineral. [...]” (Tarbuck y Lutgens, 1999). El brillo puede ser metálico, vítreo, perlado, sedoso, resinoso, terroso, etc.
- **Forma cristalina:** “[...] la forma cristalina es la expresión externa de un mineral que refleja la disposición interna ordenada de los átomos. [...]” (Tarbuck y Lutgens, 1999).
- **Porosidad:** “La porosidad es la relación entre el volumen ocupado por los huecos o poros en la roca y el volumen total” (González et al., 2002); ésta se puede clasificar como compacto, pumítica, espumosa, esferolítica, etc.

### **I.2.c. Registro de muestras<sup>1</sup>**

Las muestras geotécnicas son porciones representativas de las características y propiedades del terreno y pueden ser tomadas tanto en un sondeo como en excavaciones con el fin de efectuar ensayos de laboratorio, González et al. (2002) las clasifica en tres tipos diferentes:

- **Muestras inalteradas:** son aquellas que al ser extraídas no sufren alteración en su estructura ni en su contenido de humedad.
- **Muestras parafinadas:** son testigos de rocas procedentes de sondeos que se recubren con parafina inmediatamente después de su extracción a fin de no alterar sus condiciones naturales. Estas muestras son aptas para realizar cualquier tipo de ensayo de laboratorio.

---

<sup>1</sup> Para la elaboración de este apartado se tomaron como referencia los documentos: Castilla y Herrera. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid; Castilla y Herrera. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid

- Muestras alteradas: son muestras que sufren modificaciones en su estructura y contenido de humedad, pero conservan su composición mineralógica.

Es importante advertir que el proceso de registro de muestras y su manejo inicia desde el momento de la extracción de la muestra o testigo, y su objetivo es la preservación y conservación de toda la información posible de las características y propiedades del terreno sondeado.

En el caso especial de testigos obtenidos por perforación rotativa con obtención de testigo continuo estos deberán colocarse en cajas siempre siguiendo el mismo orden, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo conservando la posición, sentido, orientación y anotando la cota a la que fueron extraídos, así mismo se dispondrán separadores entre las diferentes maniobras realizadas (se considerará como una maniobra a cada una de las baterías o tubo porta testigos que se recuperaron del sondeo) tal como se muestra en la siguiente figura:

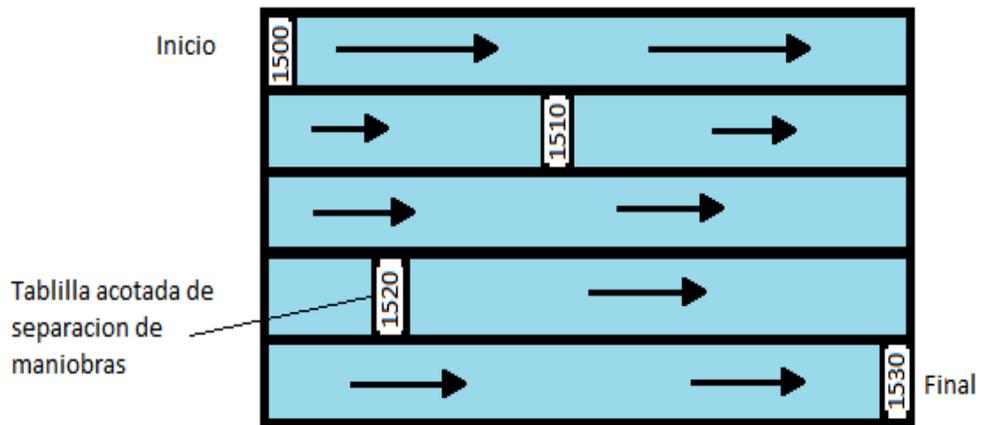


Figura 1.1. Acomodo de los testigos en una caja de sondeo

Debido a la importancia de conservar toda la información posible del sondeo y de la toma de muestras, es indispensable anotar todos los datos y *por menores* que se presenten para así poder distinguir si existe alguna alteración ocasionada por la extracción y transporte, por tal motivo se recomienda ocupar los siguientes apartados como base:

- Nombre de la obra o proyecto
- Fecha del muestreo

- Número de sondeo
- Localización del sondeo y muestra
- Cota (elevación) del sondeo y muestra
- Orientación de la muestra
- Método de muestreo
- Nombre del supervisor/cuadrilla
- Comentarios con respecto a posibles contaminaciones de la muestra ya sea durante la extracción o guardado de la misma
- Condiciones climáticas
- Observaciones generales

### **I.3 Desarrollo de la práctica**

#### **I.3.a. Objetivo**

Que el alumno aprenda el procedimiento de registro y caracterización de una muestra de roca para su uso en el laboratorio

#### **I.3.b. Material**

- Bata de laboratorio
- 3 muestras de roca
- Lupa
- Guantes

#### **I.3.c. Procedimiento**

- a) El primer paso será la selección de las tres muestras, ya sean testigos extraídos de un sondeo o rocas seleccionadas al azar en una ubicación determinada por el alumno. Dichas muestras no deberán presentar un grado de alteración o intemperismo alto, ya que esto modificaría considerablemente sus propiedades y estructura interna.
- b) Para realizar el registro de la muestra se recomienda seguir el orden preestablecido en los siguientes pasos con el fin de evitar confusiones, los datos obtenidos deberán ser capturados en una tabla de manera ordenada.

1. Registrar los datos del muestreo realizado (ubicación de la muestra, número de muestra, método de muestreo, condiciones climatológicas, presencia de agua, posibles alteraciones, etc.)
2. Describir las características geométricas del mineral (forma, tamaño de grano, distribución de los tamaños, estructura, fábrica, textura, forma cristalina, porosidad, etc.)
3. Describir las características ópticas del mineral (color, brillo, raya, diafanidad)
4. Describir las propiedades mecánicas del mineral (dureza, exfoliación, fractura)
5. Sosteniendo en una mano el mineral y teniendo en cuenta el volumen del mismo, interpretar el peso específico al determinar si el mineral es ligero o denso

#### **I.3.d. Cuestionario**

Para la evaluación de esta práctica el alumno deberá completar el siguiente cuestionario:

1. Menciona la composición mineralógica de cada una de las muestras de roca usadas en la práctica
2. Explica los principales tipos de muestreos o sondeos y refiere qué tipo de muestras (inalteradas, alteradas, etc.) obtienes de cada uno
3. De acuerdo a lo aprendido en la práctica y usando tus propias palabras, comenta por qué es importante el registro de muestras
4. Señala cuáles son los diámetros estándar de testigos cilíndricos

#### **I.3.e. Resultados**

El reporte deberá incluir fotografías de las observaciones realizadas en cada muestra de manera ordenada y por separado.

Así mismo, el registro de los resultados u observaciones se deberá hacer en una tabla de forma ordenada. A continuación se observa un ejemplo que el estudiante podrá tomar como referencia para desarrollar su propia tabla de registro de muestras:

Tabla 1.1 Ejemplo de tabla de registro de muestras



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Facultad de Ingeniería**  
**División de Ciencias de la Tierra**  
**Mecánica de Rocas**



<b>Registro de muestras</b>			
<b>Imagen de la muestra</b>	Nombre del proyecto		
	Sondeo #		
	Fecha		
	Localización (coordenadas)	x:	y:
	Supervisor		
	Elevación (cota)		z:
	Orientación de muestra		
	Método de muestreo		
	Condiciones climáticas		
	<b>Comentarios con respecto a posibles contaminaciones de la muestra al momento de la extracción</b>		
<b>Observaciones generales</b>			
<b>Características geométricas</b>			
Forma	Tamaño de grano		
Distribución de los tamaños	Estructura		
Fábrica	Textura		
Forma cristalina	Porosidad		
<b>Características ópticas</b>			
Color	Raya		
Diafanidad	Brillo		
<b>Propiedades mecánicas</b>			
Dureza	Exfoliación		
Fractura			

### **I.3.f. Evaluación sugerida**

Esta práctica se podrá realizar en equipos de 3 a 4 alumnos y para su evaluación se entregará un reporte escrito con el nombre de cada uno de los integrantes del equipo, el cual constará de la explicación y registro de cada uno de los pasos realizados en la práctica, así como los resultados obtenidos y el cuestionario.

### **I.4 Bibliografía**

Bernaola, J., Castilla, J. y Herrera J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Castilla, J. y Herrera, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Castro, A. (1989). *Petrografía básica: texturas, clasificación y nomenclatura de rocas*. Madrid, España: Paraninfo.

González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson educación.

Griem, W. (2017). 28 de junio de 2018. *Apuntes de geología general*. Chile: S/E.

Herrera, J. y Castilla J. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. (1978). *Suggested Method for Petrographic Description of Rocks*. Gran Bretaña, Reino Unido

López, V. (2003). *Fundamentos para la explotación de minas*. D.F., México: Facultad de ingeniería UNAM.

Muñoz, M., Guardiola, J., Belda, A., Cañaveras, J., Ordoñez, S. y Rodríguez, M. (2016). *Elaboración de fichas de autoaprendizaje para el estudio de minerales y rocas*. Alicante, España; Departamento de ciencias de la tierra y medio ambiente, Universidad de Alicante.

Quimacer (2013). *Aditivos para fluidos de perforación*. Alcora, España.

Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: S/E.

Real Academia Española (27 de junio de 2018). Diccionario de la lengua española.

Tarbuck, E. y Lutgens, F. (1999). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Prentice Hall.

Zhang, L. (2005). *Engineering properties of rocks*. Lexington, USA: Elsevier.

## **PRÁCTICA 2. Densidad y peso específico**

PREGUNTA GUÍA: ¿Cuál es la importancia de los conceptos de densidad y peso específico y qué utilidad tienen en mecánica de rocas?

### **II.1 Introducción**

La densidad y el peso específico son propiedades que se encuentran relacionadas entre sí y que resultan ser de gran importancia para la minería, geología y mecánica de rocas, principalmente por la gran cantidad de aplicaciones que tienen en cada una de estas disciplinas, de ahí que el alumno se encuentre obligado a comprender estas propiedades a fondo.

La utilidad de ambas propiedades es muy amplia, por ejemplo, la densidad nos puede ayudar en la identificación de los minerales presentes en un yacimiento por métodos geofísicos de sismología, ya que ésta es una propiedad intensiva y siempre será la misma para cada tipo de roca o mineral; la densidad y el peso específico también serán de gran utilidad en el cálculo de la fuerza necesaria para mover pulpas a través de tuberías y para el cálculo de las pérdidas o remanentes en las mismas; otro ejemplo de la utilidad de estas propiedades en la minería es que ayudan a definir la selección del tipo de explosivos que se utilizarán para obtener el fracturamiento requerido en la roca, ya que es necesario conocer la densidad o peso específico de la roca para poder elegir entre los diferentes tipos de explosivos (ANFO<sup>2</sup>, explosivo de alta velocidad, etc.), pues de lo contrario el explosivo podría dejar fragmentos muy grandes de roca o llevar a un alto grado de fracturamiento a la misma.

Ahora bien, en el caso específico de la Mecánica de Rocas juegan un papel realmente importante, ya que al estar relacionadas con varias de las propiedades índice de la roca, como la dureza o porosidad, a través de ellas se puede determinar la resistencia de la roca, lo cual es un factor muy importante al momento de predecir el comportamiento del macizo rocoso al realizar una excavación o construir una estructura.

---

<sup>2</sup> ANFO del inglés *Ammonium Nitrate & Fuel Oil* y que normalmente se usa como explosivo de baja velocidad

## II.2 Marco teórico

Antes de iniciar la práctica, es necesario que los estudiantes se familiaricen con algunos conceptos básicos que son fundamentales para el desarrollo de la misma; para, posteriormente evaluar la relación entre la densidad y el peso específico con otras propiedades de las rocas.

### II.2.a. Conceptos básicos

- Densidad: “Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, y cuya unidad en el sistema internacional es el kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )” Real Academia Española [RAE] (2018).
- Peso específico: “El peso específico o peso unitario de la roca depende de sus componentes, y se define como el peso por unidad de volumen. Sus unidades son las de fuerza (kilopondio, newton, tonelada de fuerza, etc.) por volumen. [...]” (González, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002).
- Volumen: “Magnitud física que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones, largo, ancho y alto, y cuya unidad en el sistema internacional es el metro cúbico ( $\text{m}^3$ ).” [RAE] (2018).
- Masa: “Es una magnitud física que determina la cantidad de materia que tiene un cuerpo” (La guía metas, 2005). y cuya unidad en el sistema internacional es el kilogramo (kg).
- Peso: “Fuerza ( $W$ ) con la que la tierra atrae a una masa. Es proporcional a la masa ( $m$ ) del cuerpo, siendo la constante de proporcionalidad la intensidad del campo gravitacional (es decir, la aceleración de la caída libre). [...]” (La guía metas, 2005). Su unidad en el sistema internacional es el Newton (N).
- Densidad global: “La densidad global (a veces también denominada densidad aparente) es la masa por unidad de volumen de un material en su estado natural, incluyendo poros y todo tipo de espacios abiertos [...]” (Villegas, s/f), debido a esta condición la densidad de los materiales es fuertemente variable.
- Densidad relativa: “La densidad relativa ( $\delta_r$ ), de una sustancia es la razón de la densidad de una sustancia ( $\delta_x$ ) respecto a la densidad de una sustancia estándar ( $\delta_p$ ).

El estándar generalmente es el agua (a 4°C) para sólidos y líquidos [...]” lo cual da como resultado una magnitud sin unidades. (Bueche y Hetch, 2007).

- Densidad seca: “Cuando la muestra de roca se ha secado previamente en una estufa a una temperatura de 110°C, su densidad se denomina seca” (Ramírez y Alejano, 2004).

## II.2.b. Correlación entre la densidad, el peso específico y otras propiedades de las rocas

La densidad es una propiedad intensiva que se define como la cantidad de materia o masa (kg) en un determinado volumen (m<sup>3</sup>), generalmente se utiliza la letra griega delta “ $\delta$ ” para simbolizarla y se dice está relacionada con la estructura molecular del cuerpo. Zhang (2005) menciona que puesto que una roca contiene tanto granos (material de la matriz sólida) como vacíos se debe tomar en cuenta varias densidades que están relacionadas con diferentes partes o componentes de la roca.

La densidad está definida por la ecuación:

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Donde  $\delta$  es la densidad;  $m$  es la masa; y  $V$  el volumen

En la siguiente tabla se puede observar la definición de varios términos de densidad dados por Stacey et al (como se citó en Zhang, 2005):

Tabla 2.1 Definición de varios términos de densidad (Zhang, 2005).

Término	Fórmula	Observaciones
Densidad o densidad aparente	$\delta = \frac{m}{V}$	Determinación de la masa con contenido natural de agua
Densidad seca	$\delta_d = \frac{m_s}{V}$	La masa se refiere sólo a los sólidos. Todas las humedades de los poros serán sacadas

<b>Densidad saturada</b>	$\delta_{sat} = \frac{m_{sat}}{V}$	La masa se refiere a los sólidos más el agua que llena completamente los vacíos
<b>Densidad de grano o densidad solida</b>	$\delta_s = \frac{m_s}{V_s}$	Ambos, la masa y el volumen, se refieren a los granos (sólidos) únicamente
<p><b>Nota:</b> <math>m = m_s + m_w</math> y <math>V = V_s + V_v</math> en donde <math>m</math> es la masa de la muestra a granel; <math>m_s</math> es la masa de los granos (sólidos); <math>m_w</math> es la masa de agua en los vacíos; <math>V</math> es el volumen de muestra a granel; <math>V_s</math> es el volumen de los granos (sólidos); y <math>V_v</math> es el volumen de los vacíos.</p>		

El peso específico es una propiedad extensiva, es decir, depende de la cantidad de materia presente, González et al. (2002) nos dice que: “El peso específico o peso unitario depende de sus componentes y se define como el peso por unidad de volumen. Sus unidades son las de fuerza (kilopondio, newton, tonelada-fuerza, etc.) por volumen [...]” (p.128). Generalmente, se utiliza la letra griega rho “ $\rho$ ” para simbolizarlo.

El peso específico está definido por la ecuación:

$$\rho = \frac{P}{V} \quad (2.2)$$

Donde  $\rho$  es el peso específico;  $P$  es el peso; y  $V$  el volumen

#### a) **Densidad y peso específico**

Aunque muchos autores consideran el mismo valor para el peso específico y la densidad, en realidad, son propiedades diferentes con características diferentes, esto se puede ver claramente al explicar la principal diferencia entre la densidad y el peso específico, y es que la densidad será siempre la misma, es decir, permanecerá invariable para un objeto sin importar el lugar dónde se realice la medición, en cambio el valor del peso específico dependerá del lugar donde sea medido.

Sin embargo, aunque es cierto que son propiedades diferentes, se encuentran íntimamente relacionadas entre sí debido a la relación del peso y la masa. Para su análisis

se debe recordar que el peso es igual a la masa de un material multiplicada por la aceleración de la gravedad, la fórmula del peso específico es:

$$\rho = \frac{P}{V} \quad (2.3)$$

Aunque también se puede desarrollar al sustituir el valor del peso por el valor de la multiplicación de la masa por la aceleración de la gravedad:

$$\rho = \frac{mg}{V} \quad (2.4)$$

Finalmente, ésta se puede simplificar recordando que la fórmula de la densidad es igual a la masa por unidad de volumen, quedando de la siguiente manera:

$$\rho = \delta g \quad (2.5)$$

Con esto se puede concluir que el peso específico es igual a la densidad por la aceleración gravitacional, lo que explica por qué el valor del peso específico depende del lugar de donde sea tomado, ya que el valor de la aceleración de la gravedad varía de un lugar a otro, por ejemplo, la densidad de un material o cuerpo será la misma sin importar que sea medido en la tierra o en marte y, en cambio, el valor del peso específico de un material o cuerpo será diferente al nivel del mar que en el monte Everest.

### **b) Densidad y porosidad**

La porosidad  $n$  es la relación entre el volumen de vacíos o volumen de poros dentro de una roca y el volumen total de la misma:

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100 = \frac{V - V_s}{V} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Donde  $n$  es la porosidad;  $V_v$  es el volumen de vacío o volumen de poros;  $V$  es el volumen total de la muestra; y  $V_s$  es el volumen de sólidos.

En el caso de la porosidad y su relación con la densidad, González et al. (2002) afirma que:

La porosidad 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. Los poros, en el caso de rocas cristalinas, ígneas o metamórficas, pueden ser microfisuras o grietas en la matriz rocosa. La porosidad, en general, decrece con la profundidad.

En suma, la densidad y la porosidad están íntimamente relacionadas, Zhang (2005) expresa esta relación por medio de la ecuación:

$$\delta = (1 - n)\delta_s + n[S_f\delta_f + (1 - S_f)\delta_g] \quad (2.7)$$

Donde  $\delta_s$  es la densidad de granos o sólidos;  $\delta_f$  y  $\delta_g$  son respectivamente la densidad de los fluidos y gases en los vacíos; y  $S_f$  es el grado de saturación de los vacíos que se define por:

$$S_f = \frac{V_f}{V_v} \quad (2.8)$$

Donde  $V_f$  es el volumen de los fluidos en los vacíos; y  $V_v$  es el volumen total de los vacíos en la muestra.

Para una roca saturada  $S_f = 1$  por lo que la ecuación original se puede reescribir como:

$$\delta = \delta_s - n(\delta_s - \delta_f) \quad (2.9)$$

Dado que la densidad de los fluidos en los vacíos es menor que la de los granos o sólidos, la densidad de las rocas disminuye con la porosidad.

### c) Densidad y velocidad de ondas *P*

Las ondas sísmicas son la propagación de vibraciones en la tierra que se producen por una rápida liberación de energía, generalmente son producidas por el movimiento de la corteza terrestre. Dicho de manera sencilla, las ondas sísmicas son energía elástica que irradia en todas direcciones desde un foco; dichas ondas pueden dividirse en dos grupos: las ondas superficiales y las ondas cuerpo, estas últimas a su vez pueden dividirse en ondas primarias o P y ondas secundarias o S. (Tarbuck y Lutgens, 1999).

Las ondas primarias u ondas P “[...] son ondas que empujan (comprimen) y tiran (expanden) de las rocas en la dirección de propagación de la onda [...]” (Tarbuck y Lutgens, 1999).

Las ondas secundarias u ondas S “[...] sacuden las partículas en ángulos rectos con respecto a la dirección en la que viajan [...]” (Tarbuck y Lutgens, 1999).

Con respecto al caso de la relación entre la densidad y la propagación de ondas en las rocas, únicamente se aplica en el caso de las ondas P, debido al tipo de movimiento que estas realizan (comprimir y expandir), ya que son movimientos que ejercen un esfuerzo directamente en la roca.

La velocidad de la onda aumenta de manera directamente proporcional con el aumento de la densidad, González et al. (2002) confirman lo anterior al mencionar que “La velocidad de propagación de las ondas elásticas al atravesar la roca depende de la densidad y de las propiedades elásticas del material [...]”, esto debido al hecho de que al aumentar la densidad disminuyen los espacios o vacíos entre la roca lo que permite un mejor desplazamiento de las ondas a través del material.

Para el caso óptimo de que la roca no contara con poros o huecos entre sí, Ramírez y Alejano (2004) afirman que la velocidad de propagación de una onda P estaría en función de las constantes elásticas y de la densidad de la roca bajo la relación:

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\delta} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (2.10)$$

Donde  $E$  es el modulo elástico de la roca;  $\mu$  es el coeficiente de Poisson de la roca; y  $\delta$  es la densidad de la roca.

De ahí que, muchos investigadores hayan formulado de manera empírica la correlación que existe entre la densidad y la velocidad de ondas  $P$ , en la siguiente tabla se muestra algunas de ellas:

Tabla 2.2 Correlación entre la velocidad de ondas  $P$  ( $v_p$ ) y la densidad ( $\delta$ ). (Zhang, 2005)

Correlación	Tipo de roca	Referencia
$v_p = 2.76\delta - 0.98$	Rocas ígneas	Birch (1961)
$v_p = 2.33 + 0.08\delta^{3.63}$	Basaltos	Christensen & Salisbury (1975)
$v_p = 2.67\delta - 1.08$	Rocas ígneas	Volarovich & Bajuk (1977)
$v_p = 3.10\delta - 2.98$	Rocas plutónicas, granito, dioritas	Marle (1978) & Kopf (1978, 1980)
$v_p = 2.30\delta - 0.91$	Rocas volcánicas, porfirita, diabasa, basalto	Marle (1978) & Kopf (1978, 1980)
$v_p = 3.66\delta - 4.46$	Calizas-Mudstone (tipo I) <sup>3</sup>	Gaviglio (1989)
$v_p = 3.66\delta - 4.80$	Calizas-Mudstone (tipo III)	Gaviglio (1989)
$v_p = 3.66\delta - 4.87$	Calizas-Mudstone (tipo IV)	Gaviglio (1989)
$v_p = 3.66\delta - 4.11$	Calizas-Wackestone (tipo V)	Gaviglio (1989)
$v_p = 2.61\delta - 1.0 \pm 0.4$	Rocas del manto	Henkel et al. (1990)
$v_p = 5.00\delta - 8.65$ ( $r = \sqrt{0.55}$ )	Rocas cristalinas	Starzec (1990)
$v_p = 4.32\delta - 7.51$ ( $r = \sqrt{0.81}$ )	Rocas carbonatadas	Yasar & Erdogan (2004b)
<b>Nota: <math>v_p</math> está en unidades de Km/s y la densidad en unidades de g/cm<sup>3</sup>; y <math>r</math> es el coeficiente de determinación.</b>		

#### d) Densidad y valor de rebote del martillo Schmidt

El martillo Schmidt es una herramienta que se utiliza generalmente para medir la calidad del concreto y las rocas. El martillo Schmidt o esclerómetro mide la resistencia al rebote de una superficie rocosa lo que permite obtener un índice correlacionable con la resistencia a la compresión simple. (González et al., 2002).

El número de rebote del martillo Schmidt aumenta de manera directamente proporcional al aumento de la densidad. Yasar y Erdogan (como se citó en Zhang, 2005)

<sup>3</sup> Las Calizas-Mudstone tipo I, III y IV, y las Calizas-Wackestone tipo V, se refiere al experimento realizado por Gaviglio en un afloramiento al oeste de Provenza (Francia). Donde selecciono cuatro tipos diferentes de calizas definidas con base en las variaciones en composición y textura.

desarrollaron la siguiente correlación empírica entre el número de rebote del martillo Schmidt y la densidad basados en los resultados de la prueba en seis tipos diferentes de rocas: piedra caliza Ceyhan, mármol barbaros, antigua piedra caliza crema, mármol Osmaniye, Basaltos Toprakkale y arenisca Handere.

$$R_{n(L)} = 3.0e^{1.066\delta} \quad (r = \sqrt{0.84}) \quad (2.11)$$

Donde  $R_{n(L)}$  es valor de rebote del martillo Schmidt de tipo  $L$ ;  $\delta$  es la densidad en  $\text{g/cm}^3$ ; y  $r$  es el coeficiente de determinación.

### **II.3 Desarrollo de la práctica**

#### **II.3.a. Objetivo**

El alumno reafirmará los conceptos teóricos de densidad y peso específico, así mismo aprenderá a realizar el cálculo de ambos y sus aplicaciones para la minería, geología y mecánica de rocas.

#### **II.3.b. Material**

- Cuatro muestras de roca (dos muestras por sección)
- Probeta graduada
- Balanza o báscula de laboratorio con capacidad para determinar la masa a 0.001g
- Equipo de molienda para reducir la muestra a un tamaño menor a  $150\mu\text{m}$
- Agua
- Mercurio
- Tamiz de  $150\mu\text{m}$
- Un horno capaz de mantener una temperatura de  $105^\circ\text{C}$  con una variación de  $3^\circ\text{C}$  por 24 horas
- Desecador
- Matraz volumétrico
- Émbolo
- Contenedores de muestra de material no corrosible incluyendo tapas herméticas
- Bata de laboratorio
- Un cepillo suave de pelo de camello o suavidad similar

- Lentes de seguridad
- Guantes de seguridad

### II.3.c. Procedimiento<sup>4</sup>

La realización de esta práctica se dividirá en dos secciones, en la primera se realizará la medición de la densidad aparente ( $\delta_a$ ) por el método de desplazamiento de mercurio y, en la segunda, se realizará la medición de la densidad real ( $\delta_r$ ) por medio del método de desplazamiento de un volumen de agua en una probeta graduada.

#### 1) Densidad aparente ( $\delta$ )

- El tamaño de la muestra utilizada en esta prueba de laboratorio deberá ser por lo menos 10 veces el máximo tamaño de grano dentro de la misma o su masa deberá ser de por lo menos de 50g.
- Lo primero para realizar esta prueba será registrar la masa de la muestra haciendo uso de la balanza, se debe recordar calibrar la balanza antes de usarla. Las muestras deberán ser cepilladas cuidadosamente para eliminar el material suelto, una vez que la muestra esté limpia se colocará en la balanza y se registrará la masa.

$$\text{masa (m)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- El volumen de mercurio que se utilizará debe ser suficiente para sumergir la muestra de roca por completo. El mercurio se depositará en un matraz volumétrico lo suficientemente grande para albergar el volumen de mercurio y la muestra de roca.
- Cuando el mercurio se deposite en el matraz volumétrico se deberá registrar su volumen  $V_i$ , posteriormente, se depositará la muestra en el matraz lo que desplazará el volumen de mercurio, esta nueva medida será registrada como el volumen  $V_f$  y la diferencia de éstas dos será el volumen aparente de la muestra.

$$V_a = V_i - V_f \tag{2.12}$$

---

<sup>4</sup> Para la elaboración de este apartado se tomó como referencia el documento: *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. (1977). Suggested Method for Determining Water content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties.*

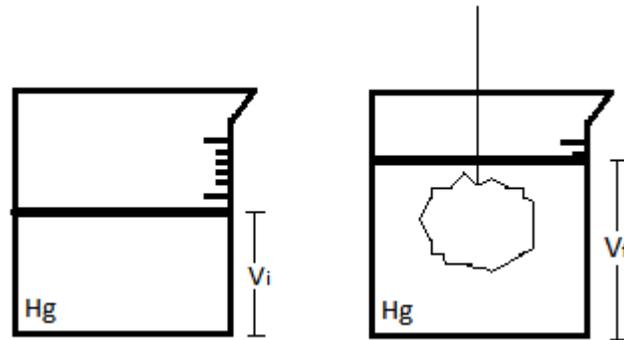


Figura 2.1 procedimiento para la medición del volumen de una roca con mercurio (Hg).

e) El procedimiento se repetirá con la siguiente muestra.

\*nota: Se utiliza mercurio porque es intensamente no mojanete y, por consiguiente, no ingresa en el espacio poral.

2) Densidad real ( $\delta_r$ )

- a) Para la medición de la densidad en esta sección se debe iniciar triturando la muestra a un grado de finura elevado, por lo cual se hará uso del equipo de molienda para reducirla hasta un tamaño que pase por un tamiz de  $150\mu\text{m}$
- b) Una vez reducida la muestra de tamaño, se utilizará el horno para secarla hasta alcanzar una masa constante, es decir, que la masa registrada por la muestra al entrar y salir del horno después de secar sea la misma.
- c) Se vaciará un volumen conocido ( $V_i$ ) de agua en la probeta graduada. Para el ensayo se utilizará una fracción de 50g de la muestra triturada seca, que será medida haciendo uso de la balanza. Esta muestra de 50g se vaciará en la probeta graduada haciendo uso de un émbolo, se debe tener mucho énfasis en cuidar que no sea derramada parte de la muestra y que los 50g de la muestra triturada sean depositados.
- d) Se agitará ligeramente la probeta graduada para evitar que parte de la muestra quede pegada en las paredes.
- e) Una vez que el líquido quede en reposo, se medirá el volumen nuevamente ( $V_f$ ). La diferencia de estos volúmenes será el volumen de la muestra.

$$V_r = V_i - V_f \quad (2.13)$$

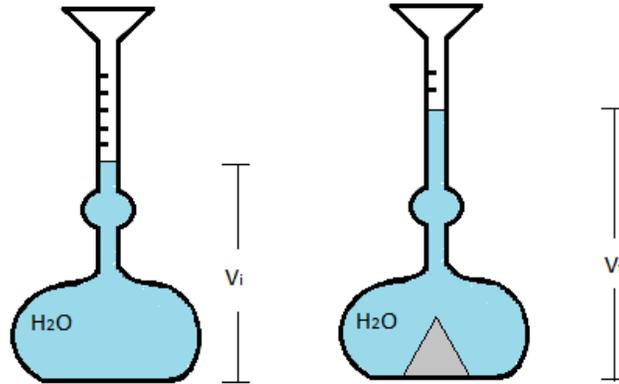


Figura 2.2 procedimiento para la medición del volumen de una roca.

f) El procedimiento se repetirá con la siguiente muestra.

### II.3.d. Cálculos

Para el cálculo de la densidad aparente y el peso específico aparente, se utilizarán las medidas de la masa y el volumen aparente obtenidos en la primera sección del “procedimiento” de esta práctica:

$$\text{masa } (m) = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$V_a = V_i - V_f = \underline{\hspace{2cm}}$$

Estos valores se sustituirán en la fórmula de la densidad aparente.

$$\delta_a = \frac{m}{V_a} \quad (2.14)$$

$$\text{densidad aparente } (\delta_a) = \underline{\hspace{2cm}}$$

Una vez que se cuenta con la densidad aparente, es muy sencillo calcular el peso específico aparente, una opción es calcular el peso de la muestra usando la fórmula:

$$P = mg \quad (2.15)$$

Con el valor del peso se puede sustituir directamente en la fórmula del peso específico aparente y así obtener su valor:

$$\rho_a = \frac{P}{V_a} \quad (2.16)$$

**peso específico aparente** ( $\rho_a$ ) = \_\_\_\_\_

En el caso de la densidad real y peso específico real se hará uso de los valores de masa y volumen real tomados en la segunda sección del “procedimiento”:

*masa* ( $m$ ) = \_\_\_\_\_

$V_r = V_i - V_f =$  \_\_\_\_\_

Con estos valores se podrá calcular el valor de la densidad real haciendo uso de la fórmula:

$$\delta_r = \frac{m}{V_r} \quad (2.17)$$

**densidad real** ( $\delta_r$ ) = \_\_\_\_\_

Otra forma de calcular el peso específico real es directamente multiplicar la densidad real por la aceleración de la gravedad como muestra la fórmula:

$$\rho_r = \delta_r g \quad (2.18)$$

**peso específico real** ( $\rho_r$ ) = \_\_\_\_\_

### II.3.e. Cuestionario

Para la evaluación de esta práctica el alumno deberá completar el siguiente cuestionario:

1. Con la información obtenida de la densidad o el peso específico, el alumno deberá identificar el tipo de roca de cada una de las muestras utilizadas en la práctica.
2. Explica cuál es la principal diferencia entre los dos procedimientos de medición de la densidad presentados en la práctica (por qué uno proporciona la densidad aparente y el otro la densidad real).
3. Calcula el peso específico para cada una de las muestras si éstas hubieran sido tomadas en los siguientes lugares:
  - a) Nivel del mar
  - b) Monte Everest
  - c) La luna

4. De acuerdo a lo aprendido en la práctica y usando tus propias palabras, comenta por qué es importante la densidad y el peso específico

### **II.3.f. Resultados**

El reporte deberá incluir fotografías de las observaciones y procedimientos realizados en cada muestra de manera ordenada y por separado.

Así mismo, el registro de los resultados u observaciones se deberá hacer de forma ordenada y en el orden en que se realizaron los cálculos anteriormente.

### **II.3.g. Evaluación sugerida**

Esta práctica se podrá realizar en equipos de 4 a 5 alumnos y para su evaluación se entregará un reporte escrito con el nombre de cada uno de los integrantes del equipo, el cual constará de la explicación y registro de cada uno de los pasos realizados en la práctica, así como los resultados obtenidos y el cuestionario.

### **II.4 Bibliografía**

- Andreu, C., Saval, J., Baeza, F. y Tensa, A. (2008). *Prácticas de materiales de construcción I.T. Obras públicas*. Universidad de Alicante.
- Bueche, F. y Hetch, E. (2007). *Física general*. D.F., México. McGraw-Hill/Interamericana editores S.A. de C.V.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson educación.
- International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. (1977). *Suggested Method for Determining Water content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties*. Gran Bretaña, Reino Unido
- MetAs & Metrólogos asociados. (Abril 2005). *Masa (unidad, definición, prototipo)*. La Guía MetAs. 5(4), 1-4.
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: S/E
- Real Academia Española (15 de julio de 2018). Diccionario de la lengua española.
- Saldarriaga, J., Pablos, A., Aguayo, A., Aguado, R., Olazar, M. (2014). Determinación de la densidad de partícula mediante porosimetría de mercurio para el estudio

fluidodinámico de biomasa en lechos móviles. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5 (2), 63-71.

Tarbutck, E. y Lutgens, F, (1999). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Prentice Hall.

Villegas, K. (s/f). *Densidad de las rocas*. S/E

Zhang, L. (2005). *Engineering properties of rocks*. Lexington, USA: Elsevier.

## **PRÁCTICA 3. Contenido de agua y porosidad**

PREGUNTA GUÍA: ¿Cuál es la importancia de los conceptos de contenido de agua y porosidad y qué utilidad tienen en mecánica de rocas?

### **III.1 Introducción**

La porosidad y el contenido de agua son propiedades que se encuentran íntimamente relacionadas entre sí y ambas resultan ser de gran importancia para la mecánica de rocas, principalmente porque estas propiedades afectan directamente a otras propiedades de la roca, de su condición puede depender la diferencia entre una roca sana y resistente y una intemperizada y débil, por lo que el alumno se encuentra obligado a comprender estas propiedades a fondo.

La presencia de estas propiedades influye significativamente en la estabilidad del macizo rocoso, por ejemplo, la presencia de la porosidad puede producir microfracturas y zonas de debilidad, en tanto que la presencia de agua en las fallas geológicas puede llegar a lubricar las familias de discontinuidades con lo que podrían generarse deslizamientos de roca.

### **III.2 Marco teórico**

Para iniciar la práctica, los estudiantes primero deberán familiarizarse con algunos conceptos básicos que son fundamentales para el desarrollo de la misma; para posteriormente, evaluar la relación entre la porosidad y el contenido de agua con otras propiedades de las rocas.

#### **III.2.a. Conceptos básicos**

- Porosidad: “La porosidad de una roca está constituida por los espacios vacíos en los cuales no existe sustancia sólida. Generalmente se expresa como el porcentaje de ‘huecos’ respecto al porcentaje de ‘sólidos’ [...]” (López, 2003).
- Porosidad eficaz: “La porosidad eficaz es la relación entre el volumen de poros interconectados y el volumen de la muestra [...]” (González, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002).
- Grado de saturación: Es el porcentaje del volumen de poros ocupado por un volumen de agua. (Ramírez y Alejano, 2004).

- Permeabilidad: es la propiedad de algunas rocas de permitir el paso de algunos fluidos a través de ellos sin modificar su estructura interna. En su mayoría, las rocas tienen permeabilidades bajas o muy bajas. La filtración y flujo de agua dentro de la matriz rocosa es a través de los poros o fisuras, dependiendo de la interconexión entre ellos. (González et al., 2002).
- Adsorción: “La adsorción puede definirse como la tendencia de un componente del sistema a concentrarse en la interfase, donde la composición interfacial es diferente a las composiciones correspondientes al seno de las fases.” (Viades, 2003).
- Absorción: A diferencia del fenómeno de adsorción, en la absorción existe una penetración física de una fase en la otra. (Viades, 2003).
- Capilaridad: “Fenómeno por el cual la superficie de un líquido en contacto con un sólido se eleva o desciende según aquel moje o no a éste” Real Academia Española [RAE] (2018).

### **III.2.b. Correlación entre la porosidad, el contenido de agua y otras propiedades de las rocas**

La porosidad ( $n$ ) de una roca es el porcentaje del volumen de los vacíos o poros con respecto al volumen total de la roca:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 = \frac{V - V_s}{V} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde  $n$  es la porosidad;  $V_v$  es el volumen de vacíos o volumen de poros ( $V_p$ );  $V$  es el volumen total de la roca; y  $V_s$  es el volumen de granos o sólidos.

Para poder comprender mejor el concepto de la porosidad se debe considerar que es una propiedad de las rocas que surge como resultado de procesos geológicos y la acción del intemperismo en la roca. Con respecto a su génesis, Zhang (2005) menciona que: “La porosidad es el resultado de varios procesos geológicos, físicos y químicos y varía significativamente incluso para el mismo tipo de roca debido a diferentes factores como la distribución y el tamaño de grano, la forma de grano y la profundidad y presión [...]”.

Desde el punto de vista petrográfico, la porosidad es un componente más de la roca. Incluso se le considera como una fase única (formada por los espacios vacíos),

constituyendo junto con el resto de las fases minerales el volumen total de la roca. Además, como cualquier otro componente, posee características texturales: tamaño, forma, distribución (orientación, homogeneidad, etc.), que forman junto con el resto de los componentes a la textura de la roca. (Alonso, 2006).

La porosidad, en general, disminuye al aumentar la profundidad, la presión y la edad de las rocas. Schön (como se citó en Zhang, 2005) desarrolló una relación entre ellos que puede expresarse mediante una función exponencial o una función logarítmica:

$$n = n_0 e^{-Az} \quad (3.2)$$

$$n = n_0 - B \log z \quad (3.3)$$

Donde  $n_0$  es la porosidad inicial a la profundidad  $z = 0$ ; y  $A$  y  $B$  son factores empíricos dependiendo de la compresibilidad de las rocas.

La porosidad es una propiedad que puede definir la respuesta del macizo rocoso y su utilidad en excavaciones o construcciones debido a que es la propiedad que más afecta las características resistentes y mecánicas de la roca, siendo inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a la deformabilidad, ya que su existencia e interconexión puede generar zonas de debilidad. (González et al., 2002).

El contenido de agua en la roca es la relación de la masa de agua contenida en la roca con respecto a su masa total, generalmente se expresa en porcentaje:

$$w = \frac{m_w}{m_t} \times 100 = \frac{m_t - m_s}{m_t} \times 100 \quad (3.4)$$

$$w = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100 \quad (3.5)$$

Donde  $w$  es el contenido de agua;  $m_w$  la masa de agua en la roca;  $m_t$  la masa total de la roca;  $m_s$  la masa del sólido o masa de granos;  $V_w$  es el volumen de agua en la roca;  $V_t$  es el volumen total de la roca; y  $V_s$  es el volumen de sólidos o de granos.

Algunos autores la mencionan también como grado de saturación, entre ellos, Ramírez y Alejano (2004) advierten que el porcentaje de poros ocupado por el agua se denomina grado de saturación, así:

$$S_r = \frac{V_H}{V_p} \times 100 \quad (3.6)$$

Donde  $S_r$  es el grado de saturación;  $V_H$  el volumen ocupado por el agua; y  $V_p$  es el volumen total de poros

Cuando la roca está seca  $S_r = 0$  y cuando está saturada  $S_r = 100$ .

#### **a) Porosidad y contenido de agua**

La porosidad y el contenido de agua en la roca están íntimamente relacionadas, ya que el agua se aloja precisamente en los poros o espacios vacíos de la roca, Alonso (2011) plantea cuatro estados del agua en la roca:

##### 1. Agua de constitución, cristalización o hidratación

Esta agua se caracteriza por formar parte del sólido o de la estructura cristalina en los minerales, se trata de agua químicamente combinada que no puede eliminarse sin alterar el sólido. Las sales (carbonatos, sulfatos, nitratos...) son los principales compuestos que tienen este tipo de comportamiento. Se necesita para su extracción temperaturas alrededor de 300-500°C.

##### 2. Agua de adsorción molecular

La absorción molecular se produce en las paredes de los poros que retienen las moléculas de agua en su superficie. La cantidad de este tipo de agua que pueden contener las rocas depende de las características del sólido (la configuración de su sistema poroso), de la temperatura y de la humedad ambiente. Esta agua es retenida en poros comprendidos entre 0.0003 y 0.1µm.

##### 3. Agua de condensación capilar

Cuando la adsorción molecular tiene lugar a alta humedad y la roca posee poros de tamaño adecuados se producen fenómenos de condensación capilar. Así mismo, si el

material se encuentra en contacto directo con agua, estos poros capilares se saturan rápidamente, hablando entonces de absorción capilar.

Las fuerzas de capilaridad se desarrollan en la interface sólido-líquido, como consecuencia de la curvatura que presenta el agua en los poros formando meniscos. Esta agua corresponde aproximadamente a la retenida en poros comprendidos entre 0.1 y 10 $\mu\text{m}$ .

#### 4. Agua gravitacional o libre

La presencia de este tipo de agua es propia de medios con poros de gran tamaño saturados de agua; su movimiento es debido a presiones externas y forma parte de los fenómenos de conductividad hidráulica o permeabilidad. Se distingue entre “agua de flujo lento” cuando discurre lentamente por poros de entre 10 y 50 $\mu\text{m}$ , y “agua de flujo rápido” si circula por poros superiores a 50 $\mu\text{m}$ .

#### b) Porosidad, contenido de agua y densidad

La densidad  $\delta$  es la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo. Está definida por la ecuación:

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (3.7)$$

Donde  $\delta$  es la densidad;  $m$  es la masa de la roca; y  $V$  es el volumen total de la muestra.

La densidad, el contenido de agua y la porosidad están íntimamente relacionadas, Zhang (2005) expresa esta relación por medio de la ecuación:

$$\delta = (1 - n)\delta_s + n[S_f\delta_f + (1 - S_f)\delta_g] \quad (3.8)$$

Donde  $\delta_s$  es la densidad de granos o sólidos;  $\delta_f$  y  $\delta_g$  son respectivamente la densidad de los fluidos y gases en los vacíos; y  $S_f$  es el grado de saturación de los vacíos que se define por:

$$S_f = \frac{V_f}{V_v} \quad (3.9)$$

Donde  $V_f$  es el volumen de los fluidos en los vacíos; y  $V_v$  es el volumen total de los vacíos en la muestra.

Para una roca saturada  $S_f = 1$ , por lo que la ecuación original se puede reescribir como:

$$\delta = \delta_s - n(\delta_s - \delta_f) \quad (3.10)$$

En suma, dado que la densidad de los fluidos en los vacíos es menor que la de los granos o sólidos, la densidad de las rocas disminuye con la porosidad y el contenido de agua.

### c) Porosidad, contenido de agua y velocidad de ondas $P$

Al romperse las rocas, generalmente por el movimiento de la corteza terrestre, se generan ondas o vibraciones en la tierra que se propagan tanto en la superficie como en su interior. Las ondas que se propagan en el interior de la tierra pueden dividirse en dos tipos: ondas primarias o  $P$  y ondas secundarias o  $S$ . Para cuestión de este trabajo y debido a su afectación de las características elásticas de las rocas, sólo se pondrá énfasis en las ondas primarias u ondas  $P$ .

Hablando de las características de las ondas  $P$  o primarias se puede mencionar que: son compresionales, lo cual significa que la roca será altamente comprimida y dilatada en la dirección de la propagación de las mismas. Las ondas  $P$  son más rápidas que las ondas  $S$  y, a diferencia de estas últimas, las ondas  $P$  pueden viajar a través de cualquier tipo de material. La velocidad media aparente de propagación de las ondas  $P$  oscila entre 8 y 13 km/s. (Duque, 2017).

Sabiendo que la velocidad de las ondas  $P$  está influenciada por las propiedades del macizo rocoso, la porosidad y las propiedades del fluido en los huecos, Wyllie et al. (como se citó en Zhang, 2005) desarrolló la siguiente relación empírica para la roca porosa saturada:

$$\frac{1}{v_p} = \frac{1-n}{v_{ps}} + \frac{n}{v_{pf}} \quad (3.11)$$

Donde  $v_p$ ,  $v_{ps}$  y  $v_{pf}$  son las velocidades de las ondas  $P$  en la roca, los granos y el fluido en los vacíos respectivamente; y  $n$  es la porosidad.

Tabla 3.1 Velocidad de propagación de las ondas longitudinales en rocas. (González et al., 2002).

Roca sana	Velocidad de propagación de las ondas $v_p$ (m/s)
<b>Arenisca</b>	1,400 – 4,200
<b>Basalto</b>	4,500 – 6,500
<b>Caliza</b>	2,500 – 6,000
<b>Conglomerado</b>	2,500 – 5,000
<b>Cuarcita</b>	5,000 – 6,500
<b>Diabasa</b>	5,500 – 7,000
<b>Dolerita</b>	4,500 – 6,500
<b>Dolomía</b>	5,000 – 6,000
<b>Gabro</b>	4,500 – 6,500
<b>Gneiss</b>	3,100 – 5,500
<b>Granito sano</b>	4,500 – 6,000
<b>Lutita</b>	1,400 – 3,000
<b>Marga</b>	1,800 – 3,200
<b>Mármol</b>	3,500 – 6,000
<b>Pizarra</b>	3,500 – 5,000
<b>Sal</b>	4,500 – 6,000
<b>Yeso</b>	3,000 – 4,000

#### d) Porosidad e índice de carga puntual

Uno de los métodos más usados para conocer la resistencia a la compresión simple (RCS) es el ensayo de resistencia a carga puntual o PLT (por sus siglas en inglés). Este ensayo permite obtener el índice de carga puntual  $I_{S(50)}$  mediante la aplicación de una carga a una muestra cilíndrica de roca concentrada en dos puntas cónicas metálicas.

Hablando de la relación entre la porosidad y el índice de carga puntual, Gupta y Rao (como se citó en Zhang, 2005) mencionan que al aumentar la porosidad, el índice de carga puntual disminuye, de hecho, la relación entre ambos se puede generalizar como negativa exponencialmente. Expresado en otras palabras mientras mayor sea la porosidad en una roca menor será la carga necesaria en este ensayo para llevar la roca a su punto de ruptura.

#### **e) Porosidad y valor de rebote del martillo Schmidt**

El martillo Schmidt es una herramienta que se utiliza generalmente para medir la calidad del concreto y las rocas. El martillo Schmidt o esclerómetro mide la resistencia al rebote de una superficie rocosa lo que permite obtener un índice correlacionable con la resistencia a la compresión simple. (González et al., 2002).

El número de rebote del martillo Schmidt disminuye de manera inversamente proporcional al aumento de la porosidad. Yasar y Erdogan (como se citó en Zhang, 2005) desarrollaron la siguiente correlación empírica entre el número de rebote del martillo Schmidt y la porosidad basados en los resultados de la prueba en seis tipos diferentes de rocas: piedra caliza Ceyhan, mármol barbaros, antigua piedra caliza crema, mármol Osmaniye, Basaltos Toprakkale y arenisca Handere.

$$R_{n(L)} = 56.08 - 5.00n \quad (r = \sqrt{0.80}) \quad (3.12)$$

Donde  $R_{n(L)}$  es el número de rebote del martillo Schmidt de tipo  $L$ ;  $n$  es la porosidad en %; y  $r$  es el coeficiente de determinación.

### **III.3 Desarrollo de la práctica**

#### **III.3.a. Objetivo**

El alumno reafirmará los conceptos teóricos de porosidad y contenido de agua, aprenderá a realizar el cálculo de ambos y sus aplicaciones tanto en minería como geología.

#### **III.3.b. Material**

- Cuatro muestras de roca (dos muestras por sección)
- Vernier
- Balanza o báscula de laboratorio con capacidad para determinar la masa a 0.001g

- Agua
- Equipo de saturación de vacío tal que las muestras puedan sumergirse en agua bajo vacío de al menos 800Pa (6torr)
- Un horno capaz de mantener una temperatura de 105°C con una variación de 3°C por 24 horas
- Desecador
- Bata de laboratorio
- Un cepillo suave de pelo de camello o suavidad similar
- Lentes de seguridad
- Guantes de seguridad

### III.3.c. Procedimiento<sup>5</sup>

La realización de esta práctica se dividirá en dos secciones, en la primera se realizará la medición del contenido de agua ( $w$ ) y, en la segunda, se realizará la medición de la porosidad ( $n$ ).

#### 1) Contenido de agua ( $w$ )

- a) El tamaño de la muestra utilizada en esta prueba de laboratorio deberá ser por lo menos 10 veces el máximo tamaño de grano dentro de la misma o su masa deberá ser de por lo menos de 50g.
- b) Para realizar esta prueba previamente se deberá limpiar y secar el contenedor con tapa hermética donde se almacenará la muestra.
- c) Una vez que dicho contenedor (esto incluye la tapa hermética) se encuentre en las condiciones adecuadas se usará la balanza, recordando que se debe calibrar antes de usarla para poder registrar su masa.

$$\text{masa del contenedor } (m_a) = \underline{\hspace{10em}}$$

- d) Para poder realizar la prueba de determinación de contenido de agua de un macizo rocoso se deberá tomar una muestra *in situ*, la cual deberá ser almacenada en el contenedor y sellada con la tapa hermética, cuando se realice

---

<sup>5</sup> Para la elaboración de este apartado se tomó como referencia el documento: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. (1977). *Suggested Method for Determining Water content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties.*

el muestreo, transporte y almacenamiento de la muestra se deberá cuidar que las pérdidas en el contenido de agua no sean mayores al 1%.

- e) El siguiente paso será registrar la masa de la muestra y con el contenedor (esto incluye la tapa hermética) colocándolos en la balanza previamente calibrada.

*masa del contenedor y muestra ( $m_b$ ) = \_\_\_\_\_*

- f) A continuación se retirará la tapa hermética y la muestra será secada en el horno a una temperatura de 105°C por un periodo de una hora.
- g) Posteriormente se dejará enfriar por un periodo de 30 minutos en el desecador.
- h) Se colocará nuevamente la tapa hermética y haciendo uso de la balanza se registrará la masa de la muestra seca y el contenedor.

*masa del contenedor y muestra seca ( $m_c$ ) = \_\_\_\_\_*

## 2) Porosidad ( $n$ )

- a) El tamaño de la muestra utilizada en esta prueba deberá ser por lo menos 10 veces el máximo tamaño de grano dentro de la misma o su masa deberá ser de por lo menos de 50g, la forma de las muestras deberá ajustarse lo más posible a un cilindro.
- b) El volumen aparente deberá calcularse a partir de un promedio de varias lecturas con el Vernier (por lo menos 10) para cada dimensión. Cada lectura deberá tener una precisión de  $\pm 0.1$ mm.
- c) La muestra será saturada por inmersión en agua en vacío de al menos 800Pa (6torr) por un periodo de una hora y con agitación periódica para eliminar el aire atrapado.

\*nota: en caso de no contar con el equipo necesario para la inmersión en agua en vacío, se podrá sumergir la muestra en agua por un periodo de 24 horas con agitación periódica para lograr la saturación de la misma.

- d) La muestra será retirada del agua y se secará su superficie con un paño húmedo, teniendo cuidado de sólo retirar el agua de la superficie asegurándose de que no se pierdan fragmentos de la muestra.
- e) En este punto se hará uso de la balanza para registrar la masa saturada de superficie seca  $m_{sat}$ .

*masa saturada de superficie seca ( $m_{sat}$ ) = \_\_\_\_\_*

- f) A continuación se secará la muestra a una temperatura de 105°C y se dejará enfriar por un periodo de 30 minutos en el desecador.
- g) Una vez que se enfrió la muestra se usará la balanza para registrar la masa seca ( $m_s$ ) de la muestra.

$$\text{masa seca } (m_s) = \underline{\hspace{2cm}}$$

### III.3.d. Cálculos

Para el cálculo del contenido de agua, se utilizarán las medidas de la masa obtenidas en la primera sección del “procedimiento” de esta práctica:

$$\text{masa del contenedor } (m_a) = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{masa del contenedor y muestra } (m_b) = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{masa del contenedor y muestra seca } (m_c) = \underline{\hspace{2cm}}$$

Estos valores se sustituirán en la fórmula del contenido de agua:

$$\text{Contenido de agua } (w) = \frac{\text{masa de agua de poros } (m_p)}{\text{masa de grano } (m_s)} = \frac{m_b - m_c}{m_c - m_a} \times 100 \quad (3.13)$$

$$\text{contenido de agua } (w) = \underline{\hspace{2cm}} (\%)$$

En el caso de la porosidad se hará uso de los valores de masa tomados en la segunda sección del “procedimiento”:

$$\text{masa saturada de superficie seca } (m_{sat}) = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{masa seca } (m_s) = \underline{\hspace{2cm}}$$

Se deberá calcular el volumen de la muestra de forma cilíndrica, para ello se calculará el promedio de las 10 mediciones realizadas con el Vernier en cada una de las dimensiones de la muestra.

Tabla 3.2 Datos tomados con el Vernier



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Facultad de Ingeniería**  
**División de Ciencias de la Tierra**  
**Mecánica de Rocas**



<i>Registro de Datos</i>		
Dato	Altura	Radio
<b>1</b>		
<b>2</b>		
<b>3</b>		
<b>4</b>		
<b>5</b>		
<b>6</b>		
<b>7</b>		
<b>8</b>		
<b>9</b>		
<b>10</b>		

Para continuar se calculará el volumen de la muestra con el promedio de los valores obtenidos haciendo uso de la fórmula del volumen de un cilindro:

$$volumen (V) = \underline{\hspace{10em}}$$

Con los valores de la masa saturada con superficie seca, la masa seca y la densidad se podrá obtener el volumen de poros  $V_p$  como se ve en la siguiente fórmula:

$$V_p = \frac{m_{sat} - m_s}{\delta} \times 100 \tag{3.14}$$

Por último, se debe hacer uso del volumen de poros  $V_p$  y el volumen de la muestra para calcular la porosidad por medio de la ecuación 3.1

$$porosidad (n) = \underline{\hspace{10em}}(\%)$$

### III.3.e. Cuestionario

Para la evaluación de esta práctica el alumno deberá completar el siguiente cuestionario:

1. Explica cuál es la porosidad efectiva y no efectiva.
2. Realiza un esquema del sistema poral.

3. Realiza un esquema que explique la diferencia entre absorción y adsorción de agua en la roca.
4. Explica y anota la clasificación de Choquette y Pray (1970) para la porosidad.

### **III.3.f. Resultados**

El reporte deberá incluir fotografías de las observaciones y procedimientos realizados en cada muestra de manera ordenada y por separado.

Así mismo, el registro de los resultados u observaciones se deberá hacer de forma ordenada y en el orden en que se realizaron los cálculos anteriormente.

### **III.3.g. Evaluación sugerida**

Esta práctica se podrá realizar en equipos de 4 a 5 alumnos y para su evaluación se entregará un reporte escrito con el nombre de cada uno de los integrantes del equipo, el cual constará de la explicación y registro de cada uno de los pasos realizados en la práctica, así como los resultados obtenidos y el cuestionario.

### **III.4 Bibliografía**

Alonso, F. (2006). *La porosidad como componente petrográfico: la porosidad de las rocas carbonatadas*. Oviedo, España. Universidad de Oviedo.

Alonso, F. (2010). *La porosidad como propiedad física: propiedades densidad y porosidad*. Oviedo, España. Universidad de Oviedo.

Alonso, F. (2011). *El agua en los materiales rocosos*. Oviedo, España. Universidad de Oviedo.

Duque, G. (2017). *Manual de geología para ingenieros*. Manizales, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson educación.

International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. (1977). *Suggested Method for Determining Water content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties*. Gran Bretaña, Reino Unido

López, V. (2003). *Fundamentos para la explotación de minas*. D.F., México: Facultad de ingeniería UNAM.

Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: S/E

Real Academia Española (15 de julio de 2018). Diccionario de la lengua española.

Tarbuck, E. y Lutgens, F, (1999). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Prentice Hall.

Viades, J. (2013). *Fenómenos de superficie. Adsorción*. D.F., México: Facultad de Química UNAM.

Zhang, L. (2005). *Engineering properties of rocks*. Lexington, USA: Elsevier.

## **PRÁCTICA 4. Ensaye de carga puntual**

PREGUNTA GUÍA: ¿Cuál es la importancia de la resistencia a la compresión simple y cuáles son las ventajas de usar la prueba de carga puntual para su cálculo?

### **IV.1 Introducción**

Uno de los parámetros más importantes a considerar, para la mecánica de rocas, en un macizo rocoso es la resistencia a la compresión, ya que este parámetro proporciona información acerca de la carga o esfuerzo a la que puede ser sometido un macizo rocoso antes de llegar a la rotura y la deformación que tal macizo presentará en dicho punto.

Cuando la resistencia es medida usando probetas de roca sin confinar (núcleos) es llamada resistencia a la compresión simple (RCS) y su valor puede ser usado para la clasificación geotécnica de las rocas.

La prueba de carga puntual o PLT, por sus siglas en inglés, es una de las pruebas índice más usadas para la determinación de la RCS debido al hecho de que la prensa puede ser usada *in situ* o en el laboratorio, además de que requiere muy poca o nula preparación de las muestras para la prueba.

### **IV.2 Marco teórico**

Antes de iniciar la práctica, es necesario que los estudiantes se familiaricen con algunos conceptos básicos que son fundamentales para el desarrollo de la misma; para posteriormente, realizar un análisis del funcionamiento de la prueba de carga puntual y, por último, evaluar la relación entre el valor carga puntual con otras propiedades de las rocas.

#### **IV.2.a. Conceptos básicos**

- Resistencia a la compresión simple; “Es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio” (González, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002).
- Esfuerzo: “Los esfuerzos se definen en términos de fuerzas que actúan sobre un punto o sobre una superficie” (Hoek y Brown, 1985).

- Rotura: La rotura es un fenómeno que se produce cuando la roca no puede soportar las fuerzas aplicadas, alcanzando el esfuerzo un valor máximo correspondiente a la resistencia pico del material. (González et al., 2002).
- Resistencia: “La resistencia se define como el esfuerzo que la roca puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación [...]” (González et al., 2002).
- Fractura: “[...] la fractura es la formación de planos de separación en la roca, rompiéndose los enlaces de las partículas para crear nuevas superficies. Se pierden las fuerzas cohesivas y permanecen únicamente las friccionales.” (González et al., 2002).
- Compresión: “Presión a la que está sometido un cuerpo por la acción de fuerzas opuestas que tienden a disminuir su volumen” Real Academia Española [RAE] (2018).
- Dureza: “[...] es una medida de la resistencia de un mineral a la abrasión o al rayado. Esta propiedad se determina frotando un mineral de dureza desconocida contra uno de dureza conocida o viceversa. [...]” (Tarbuck y Lutgens, 1999).
- Anisotropía: “Sustancia o cuerpo que posee propiedades físicas distintas según la dirección en que se mide” [RAE] (2018).

#### **IV.2.b. Prueba de carga puntual. Funcionamiento**

La prueba de carga puntual (PLT), también conocida como ensayo Franklin, es un procedimiento en el que una probeta cilíndrica o un fragmento irregular de roca es sometida a una carga a través de dos puntas cónicas, accionadas por una prensa portátil, hasta alcanzar el punto de rotura de la roca.

Este procedimiento se lleva a cabo por medio de una prensa portátil, la cual según indica la International Society of Rock Mechanics (ISRM) consta de tres sistemas:

- 1) Sistema de carga: este sistema es el encargado de generar y aplicar la carga a la que será sometida la roca, la versión portátil (que es la versión más utilizada y para la que se realizó este apartado) generalmente está comprendida por una bomba hidráulica, un marco de carga, las puntas cónicas y el ariete.
  - Bomba hidráulica: es una de las partes más importantes del sistema de carga, ya que es la encargada de generar la fuerza o carga que se aplicará en el

ensayo, por lo cual deberá tener la capacidad de carga suficiente para romper los especímenes más grandes y fuertes en los que se realice el ensayo.

- Puntas cónicas: son elementos mediante los que se aplica la carga de manera puntual en la roca, estas deberán tener la forma geométrica de un cono de  $60^\circ$  y su punta deberá ser una esfera con un radio de 5mm, tal como se muestra en la figura 4.1, además de tener la resistencia suficiente para no sufrir deformación durante aplicaciones repetidas de la carga de prueba máxima, por lo que deberán ser de material duro como carburo de tungsteno o acero endurecido.

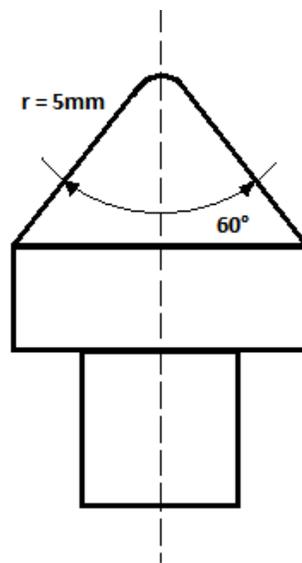


Figura 4.1 Diagrama de una punta cónica

- Marco de carga: este elemento es el que sujeta y permite el desplazamiento ascendente y descendente de las puntas cónicas durante el ensayo, este marco tiene un rango de apertura ajustable de los 15 a 100mm en el que se acomodarán los testigos de roca, además de lo mencionado anteriormente, este marco tiene la tarea de impedir el desplazamiento lateral o el deslizamiento de las puntas cónicas durante el ensayo, sobre todo en el caso de rocas irregulares o del ensayo diametral donde la superficie de la roca no es plana.
- Ariete: es la pieza de metal que recibe la energía de la bomba hidráulica y la transmite al marco de carga.

2) Sistema de medición de carga: ya sea un medidor de presión hidráulica o un transductor conectado al ariete, su función deberá ser la determinación de la carga de falla  $P$  requerida para romper las muestras de roca. Este sistema deberá cumplir con los siguientes requisitos:

- Las mediciones deberán hacerse con una precisión de  $\pm 5\%$ , independientemente del tamaño o la resistencia del espécimen ensayado.
- El sistema debe ser resistente a golpes hidráulicos y vibraciones para que la precisión de las lecturas no se vea afectada adversamente.
- La falla es generalmente repentina y a una carga máxima, por lo que el dispositivo deberá retener el valor de falla para que pueda ser registrado.

3) Sistema de medición de distancia: ya sea una escala de lectura directa o un transductor de desplazamiento, tiene como función el permitir medir la distancia  $D$  entre los puntos de contacto de las puntas cónicas. Este sistema deberá cumplir con los siguientes requisitos:

- Las mediciones de  $D$  deberán hacerse con una precisión de  $\pm 2\%$  o menor, independientemente del tamaño de la muestra ensayada.
- El sistema debe ser resistente a golpes hidráulicos y vibraciones para que la precisión de las lecturas no se vea afectada adversamente.
- El sistema de medición deberá permitir el manejo del valor “cero desplazamiento” cuando las dos puntas cónicas están en contacto y, preferiblemente, deberán incluir un ajuste cero.

Será necesario una regla de acero o un Vernier para medir el ancho  $W$  de las muestras, con excepción de la prueba diametral.

#### **IV.2.c. Correlación entre el valor de carga puntual y otras propiedades de las rocas**

El ensayo de carga puntual es una de las pruebas más usadas en la actualidad para calcular la resistencia de la roca, principalmente, debido a que es portátil y fácil de usar. Zhang (2005) explica que el ensayo de carga puntual es una prueba en la que se aplica una carga de compresión a través de dos puntas cónicas hasta lograr que la tensión rompa la roca entre estos dos puntos. Si la carga de ruptura es  $P$ , el índice de carga puntual,  $I_s$ , puede ser determinado por:

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (4.1)$$

Donde  $D$  es el diámetro del espécimen si la carga es aplicada en la dirección diametral de un núcleo. En los demás casos  $D = 2\sqrt{A/\pi}$ , donde  $A$  es el área mínima de sección transversal de la muestra para un plano a través de los puntos de contacto de las puntas cónicas.

El tamaño de la muestra afecta el valor de  $I_s$  que aumenta a medida que  $D$  aumenta. Para considerar el efecto del tamaño, es muy común convertir el  $I_s$  medido en el correspondiente a  $D = 50\text{mm}$ :

$$I_{s(50)} = I_s K_{PLT} \quad (4.2)$$

Donde  $K_{PLT}$  es el factor de corrección de tamaño, que puede determinarse por:

$$K_{PLT} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} \quad (4.3)$$

#### a) Índice de carga puntual y porosidad

La porosidad ( $n$ ) de una roca es el porcentaje del volumen de los vacíos o poros con respecto al volumen total de la roca:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 = \frac{V - V_s}{V} \times 100 \quad (4.4)$$

Donde  $n$  es la porosidad;  $V_v$  es el volumen de vacíos;  $V$  es el volumen total de la roca; y  $V_s$  es el volumen de granos o sólidos.

Hablando de la relación entre la porosidad y el índice de carga puntual, Gupta y Rao (como se citó en Zhang, 2005) mencionan que al aumentar la porosidad, el índice de carga puntual disminuye, de hecho, la relación entre ambos se puede generalizar como negativa exponencialmente. Expresado en otras palabras mientras mayor sea la porosidad en una roca, menor será la carga necesaria en este ensayo para llevar la roca a su punto de ruptura.

La siguiente es la correlación empírica entre el índice de carga puntual y la porosidad derivada de Palchik y Hatzor (2004) (como se citó en Zhang, 2005) para tizas porosas

$$I_{s(50)} = 7.74e^{-0.039n} \quad (r = \sqrt{0.84}) \quad (4.5)$$

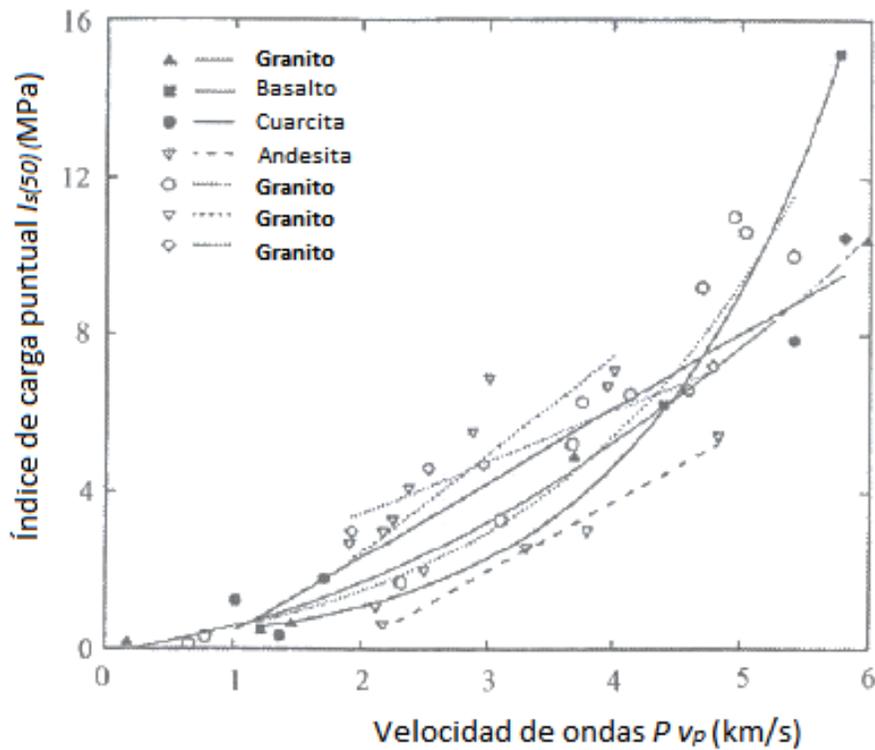
Donde  $I_{s(50)}$  está en la unidad de MPa;  $n$  esta en %; y  $r^2$  es el coeficiente de determinación.

#### **b) Índice de carga puntual y velocidad de ondas $P$**

Las ondas sísmicas son la propagación de vibraciones en la tierra que se producen por una rápida liberación de energía, generalmente son producidas por el movimiento de la corteza terrestre. Dicho de manera sencilla, las ondas sísmicas son energía elástica que irradia en todas direcciones desde un foco; estas ondas pueden dividirse en dos grupos: las ondas superficiales y las ondas cuerpo, estas últimas a su vez pueden dividirse en ondas primarias o  $P$  y ondas secundarias o  $S$ . (Tarbuck y Lutgens, 1999).

Debido a sus propiedades, se dice que las ondas  $P$  son ondas longitudinales, lo cual significa que la roca será altamente comprimida y dilatada en la dirección de la propagación de las mismas. Las ondas  $P$  pueden viajar a través de cualquier tipo de material.

La siguiente gráfica muestra la variación del índice de carga puntual con respecto a la velocidad de la onda  $P$  para rocas cristalinas erosionadas. En general, el índice de carga puntual aumenta a medida que aumenta la velocidad de la onda  $P$ . (Zhang, 2005).



Gráfica 4.1 Variación del índice de carga puntual con respecto a la velocidad de ondas  $P$ . (Zhang, 2005).

### c) Índice de carga puntual y valor de rebote del martillo Schmidt

El martillo Schmidt es una herramienta que se utiliza generalmente para medir la calidad del concreto y las rocas. El martillo Schmidt o esclerómetro mide la resistencia al rebote de una superficie rocosa lo que permite obtener un índice correlacionable con la resistencia a la compresión simple. (González et al., 2002).

La siguiente gráfica muestra la variación del índice de carga puntual con respecto al valor de rebote del martillo Schmidt de tipo  $L$  para rocas cristalinas frescas y erosionadas. Según se puede observar, el índice de carga puntual aumenta a medida que aumenta el valor de rebote del martillo Schmidt. (Zhang, 2005).

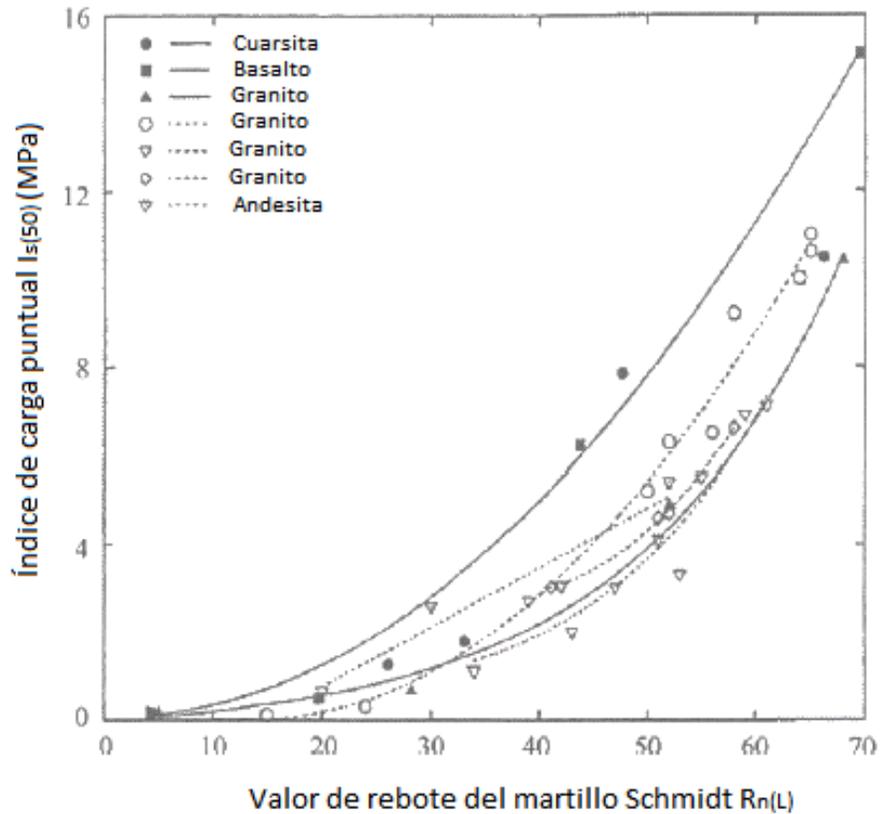


Gráfico 4.2 Variación del índice de carga puntual con respecto al valor de rebote del martillo Schmidt. (Zhang, 2005).

### IV.3 Desarrollo de la práctica

#### IV.3.a. Objetivo

El alumno reafirmará el concepto teórico de resistencia a la compresión simple (RCS) y desarrollará la habilidad para realizar el cálculo de la misma por medio de la toma de datos a través de la prueba de carga puntual.

#### IV.3.b. Material

- Versión portátil de la prensa PLT
- muestras (núcleo o bloque)
- Guantes de seguridad
- Lentes de seguridad
- Bata de laboratorio

### IV.3.c. Procedimiento<sup>6</sup>

Para la realización de esta práctica se expondrán los tres tipos de ensayo de carga puntual, por lo tanto el procedimiento se dividirá en tres secciones, en la primera se realizará la medición del valor de carga puntual en el ensayo diametral; en la segunda, se realizará la medición del valor de carga puntual en el ensayo axial; en la tercera se realizará la medición del valor de carga puntual en bloques de roca. Sin embargo se deja a criterio del docente si los alumnos realizaran solo un tipo o más de los ensayos expuestos.

#### 1) Ensayo diametral

- a) Para realizar este tipo de prueba lo primero será seleccionar el tipo de muestra adecuada, dichas muestras deberán ser testigos cilíndricos de roca y cumplir con la relación longitud/diámetro mayor que 1, es decir, la longitud del testigo cilíndrico deberá ser mayor que el diámetro del mismo.
- b) Para poder realizar un estudio completo de una zona determinada o área de trabajo deberán ser por lo menos 10 testigos de roca y más si el área de trabajo es heterogénea o anisotrópica.
- c) Para iniciar el ensayo, el testigo deberá ser colocado en la prensa PLT, las puntas cónicas de la prensa deberán juntarse hasta hacer contacto con un diámetro del testigo, se deberá revisar que la distancia  $L$  entre el punto de contacto y la base libre más cercana sea por lo menos 0.5 veces el diámetro  $D$  del testigo.
- d) Se deberá registrar la distancia  $D$  con un rango de error de  $\pm 2\%$ .
- e) La carga será aplicada bombeando en forma constante de manera que la falla ocurra dentro de los 10 a 60 segundos de iniciada la carga.
- f) En el momento en el que ocurra la falla se deberá registrar el valor mostrado como el valor de la carga de ruptura de  $P$ .
- g) Se deberán repetir los pasos del c al f para las muestras restantes.

---

<sup>6</sup> Para la elaboración de este apartado se tomó como referencia el documento: International Society of Rock Mechanics (1985). *ISRM Suggested Method for Determining Point Load Strength*.

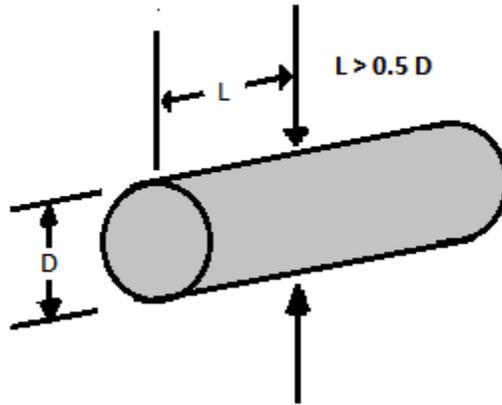


Figura 4.2 Requisitos de forma para el ensayo diametral.

## 2) Ensayo axial

- a) Para realizar este tipo de prueba lo primero será seleccionar el tipo de muestra adecuada, dichas muestras deberán ser testigos cilíndricos de roca y deberán cumplir con la relación longitud/diámetro de 0.3 a 1 para que sean adecuados, es decir, la longitud del testigo cilíndrico deberá ser igual o hasta tres veces menor el diámetro del mismo.
- b) Para poder realizar un estudio completo de una zona determinada o área de trabajo deberán ser por lo menos 10 testigos de roca y más si el área de trabajo es heterogénea o anisotrópica.
- c) El testigo es colocado en la máquina de ensayo y las puntas cónicas deben juntarse hasta hacer contacto a lo largo de una línea perpendicular a las caras finales del núcleo.
- d) Se deberá registrar la distancia  $D$  entre los puntos de contacto de las puntas cónicas con un rango de error de  $\pm 2\%$ , junto con el ancho de la muestra  $W$  perpendicular a la dirección de carga con un rango de error máximo de  $\pm 5\%$ .
- e) La carga será aplicada bombeando en forma constante de manera que la falla ocurra dentro de los 10 a 60 segundos de iniciada la carga.
- f) En el momento en el que ocurra la falla se deberá registrar el valor mostrado como el valor de la carga de ruptura  $P$ .
- g) Se deberán repetir los pasos del c al f para las muestras restantes.

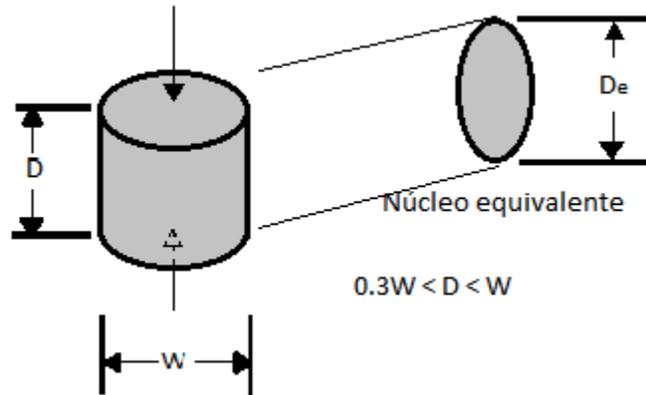


Figura 4.2 Requisitos de forma para el ensayo axial.

- 3) Bloques y pedazos irregulares de roca
- a) Para realizar este tipo de prueba lo primero será seleccionar el tipo de muestra adecuada, dichas muestras deberán ser bloques de roca o pedazos irregulares de roca y deberán cumplir con un tamaño de  $50 \pm 35\text{mm}$ , ser lo más parecidas posible a la forma que se muestra en la figura 4.3 y cumplir la relación  $D/W$  de 0.3 a 1, mientras más cercana la relación a uno mejor.
  - b) Se deberán seleccionar ejemplares del tamaño y forma antes mencionados si están disponibles, en caso contrario se podrán preparar las muestras recortando pedazos más grandes de roca con sierra o cincel.
  - c) Para poder realizar un estudio completo de una zona determinada o área de trabajo deberán ser por lo menos 10 muestras de roca, y más si el área de trabajo es heterogénea o anisotrópica.
  - d) La muestra será colocada en la máquina de ensayo y las puntas cónicas deben juntarse hasta hacer contacto con la más pequeña de las dimensiones del bloque o del trozo irregular de roca, lejos de los bordes y las esquinas, de hecho la distancia  $L$  del punto de contacto a las caras finales deberá de ser por lo menos de 0.5 veces  $D$ , como se muestra en la figura 4.3.
  - e) Se deberá registrar la distancia  $D$  entre los puntos de contacto de las puntas cónicas con un rango de error de  $\pm 2\%$ , junto con el ancho más pequeño de la muestra que será  $W$ , deberá encontrarse orientado de manera perpendicular a la dirección de carga, con un rango de error máximo de  $\pm 5\%$ . En el caso de

pedazos irregulares de roca donde los lados no son paralelos  $W$  deberá calcularse como:

$$W = \frac{W_1 + W_2}{2} \quad (4.6)$$

- f) La carga será aplicada bombeando en forma constante de manera que la falla ocurra dentro de los 10 a 60 segundos de iniciada la carga.
- g) En el momento en el que ocurra la falla se deberá registrar el valor mostrado como el valor de la carga de ruptura  $P$ .
- h) Se deberán repetir los pasos del d al g para las muestras restantes.

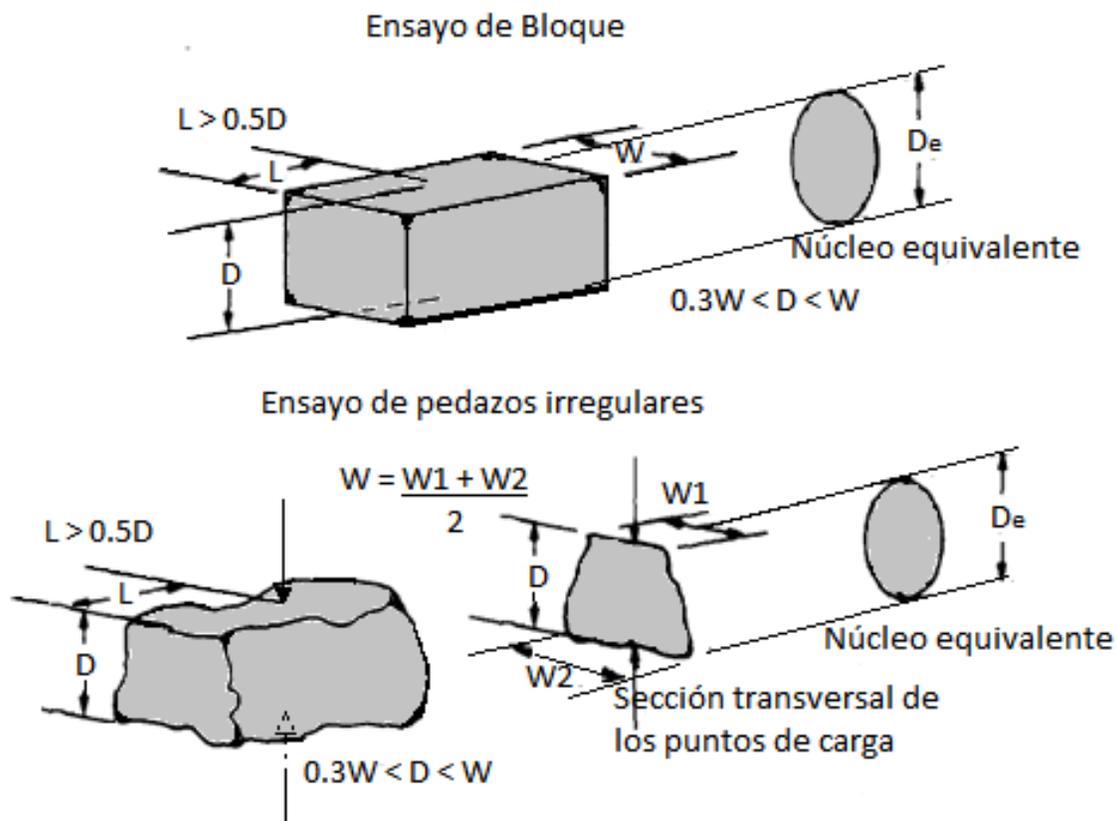


Figura 4.3 Requisitos de forma para el ensayo de bloques y de pedazos irregulares.

#### IV.3.d. Cálculos

Para el cálculo de la RCS por medio de la prueba de carga puntual, primero se utilizarán las dimensiones de las muestras y la carga de falla para calcular el índice de carga puntual no corregida:

La resistencia a la carga puntual o índice de carga puntual no corregido se calcula como:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (4.7)$$

Donde  $I_s$  es el índice de carga puntual;  $P$  la carga de falla; y  $D_e$  es el diámetro del núcleo equivalente.

Para calcular el valor del diámetro del núcleo equivalente se deberá tomar en cuenta el tipo de prueba que se haya realizado en cada muestra, ya que de esto dependerá la asignación de valores, tal es el caso:

- $D_e^2 = D^2$  para pruebas diametrales.
- $D_e^2 = 4A/\pi$  para pruebas axiales, de bloques y de pedazos irregulares. Donde  $A = WD$  = área mínima de la sección transversal de un plano a través de los puntos de contacto de las puntas cónicas.

El índice de carga puntual no corregido o  $I_s$  es un valor que se encuentra en función de  $D$  para la prueba diametral y en función de  $D_e$  para las pruebas axial, de bloques y de pedazos irregulares, por lo que es necesario realizar una corrección de tamaño para obtener un valor único u homogéneo para las muestras de roca.

El índice de carga puntual corregido o  $I_{s(50)}$  es definido como el valor de  $I_s$  si este hubiera sido medido en una prueba diametral con un  $D = 50\text{mm}$ .

El método más confiable de corrección de tamaño es probar la muestra en un rango de valores de  $D$  y  $D_e$  distintos de 50mm y trazar gráficamente la relación  $P$  y  $D^2$  en un gráfico log-log, y con una regresión lineal se puede determinar el valor de  $I_{s(50)}$ . Sin embargo, cuando esta opción no es viable, por ejemplo cuando se prueba un testigo de roca o núcleo de un solo tamaño con un diámetro diferente de 50mm el ISRM recomienda la utilización de la ecuación 4.2.

Donde  $I_{s(50)}$  es el índice de carga puntual corregido;  $K_{PLT}$  ó  $F$  es el factor de corrección; e  $I_s$  es el índice de carga puntual no corregido. El factor de corrección se puede obtener haciendo uso del gráfico 4.3 o con la expresión:

$$F = \left( D_e / 50 \right)^{0.45} \quad (4.8)$$

En caso de usar el gráfico 4.3 para calcular el factor de corrección, la forma de utilizarlo es la siguiente:

- 1) Se tomará como punto de partida el valor que, en el eje de las abscisas, coincida con el valor de  $D_e$ .
- 2) Una vez colocado en tal posición se trazará una recta perpendicular al eje de las abscisas que corte la línea del gráfico.
- 3) En el punto de intersección se iniciará una línea horizontal que cortará el eje de las ordenadas, donde dicha recta se interseque con el eje de las ordenadas se encontrará el valor de  $F$ .

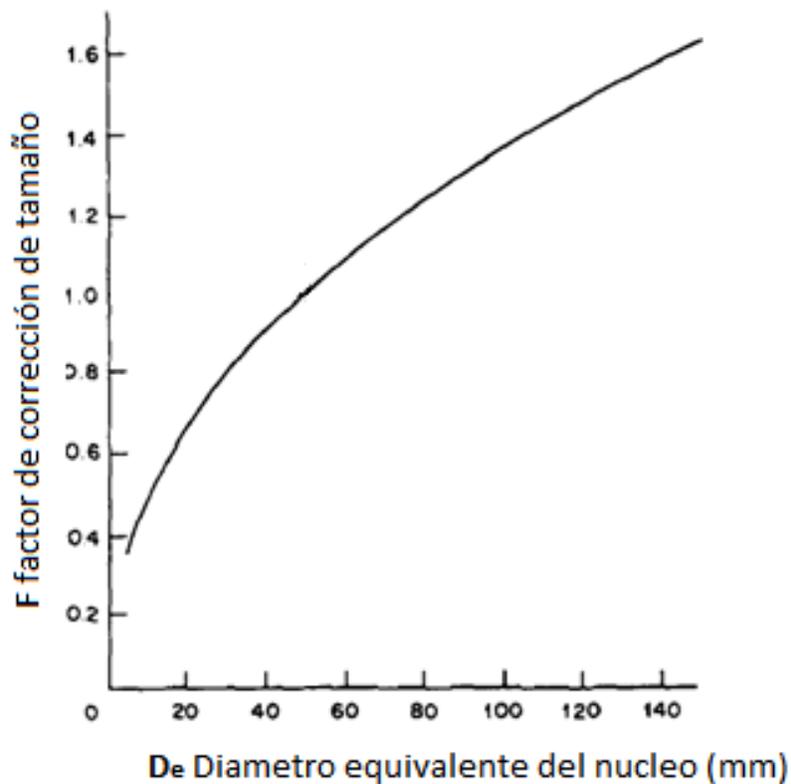


Gráfico 4.3 Relación entre el diámetro equivalente y el factor de corrección de tamaño.  
(ISRM, 1985).

Una vez obtenido el índice de carga puntual corregido para cada muestra, se deberá calcular el valor medio de dichos valores, para realizar dicho procedimiento primero se eliminarán los dos valores más altos y los dos valores más bajos, con los valores restantes se calculará el valor medio de  $I_{s(50)}$ .

Para poder obtener el valor de la RCS a partir del índice de carga puntual corregido  $I_{s(50)}$  se deberá utilizar la siguiente relación:

$$RCS = 23 \times I_{s(50)} \quad (4.9)$$

#### **IV.3.e. Cuestionario**

Para completar la evaluación de esta práctica el alumno deberá responder el siguiente cuestionario:

1. Explica los modos de falla válidos e inválidos para cada tipo de prueba de carga puntual.
2. Explica el procedimiento de la prueba de carga puntual para rocas anisotrópicas.
3. Explica el índice de anisotropía de resistencia a la carga puntual.
4. ¿Cuál es la relación entre el ensayo de carga puntual y el ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño)?

#### **IV.3.f. Resultados**

El reporte deberá incluir fotografías de las observaciones realizadas en cada muestra de manera ordenada y por separado.

Así mismo, el registro de los resultados u observaciones se deberá hacer en una tabla de forma ordenada. A continuación se observa un ejemplo que el estudiante podrá tomar como referencia para desarrollar su propia tabla de registro de muestras:

Tabla 4.1 Ejemplo de tabla de registro de muestras



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Facultad de Ingeniería**  
**División de Ciencias de la Tierra**  
**Mecánica de Rocas**



Registro de muestras									
Nombre del proyecto:									
Fecha:									
Localización:			x:			y:			
Tipo de roca:									
Contenido de agua									
# de muestra	Tipo de prueba	W (mm)	D (mm)	P (kN)	$D_e^2$ (mm <sup>2</sup> )	$D_e$ (mm)	$I_s$	F	$I_{s(50)}$
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

**IV.3.g. Evaluación sugerida**

Esta práctica se podrá realizar en equipos de 4 a 5 alumnos y para su evaluación se entregará un reporte escrito de manera individual, el cual constará de la explicación y registro de cada uno de los pasos realizados en la práctica, así como los resultados obtenidos y el cuestionario.

**IV.4 Bibliografía**

González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson educación.

Hoek, E. y Brown, E. (1985). *Excavaciones subterráneas en roca*. Londres, Inglaterra. McGraw Hill.

International Society of Rock Mechanics (1985). *ISRM Suggested Method for Determining Point Load Strength*. Gran Bretaña, Reino Unido

Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: S/E

Real Academia Española (15 de julio de 2018). Diccionario de la lengua española.

Tarbuck, E. y Lutgens, F, (1999). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Prentice Hall.

Zhang, L. (2005). *Engineering properties of rocks*. Lexington, USA: Elsevier.

## **PRÁCTICA 5. Ensaye con martillo Schmidt**

PREGUNTA GUÍA: ¿Cuál es la importancia de la resistencia a la compresión simple y cuáles son las ventajas de usar el martillo Schmidt para su cálculo?

### **V.1 Introducción**

Uno de los parámetros más importantes a considerar, para la mecánica de rocas, en un macizo rocoso es la resistencia a la compresión, ya que este parámetro proporciona información acerca de la carga o esfuerzo a la que puede ser sometido un macizo rocoso antes de llegar a la rotura y la deformación que tal macizo presentará en dicho punto.

Cuando la resistencia es medida usando probetas de roca sin confinar (núcleos) es llamada resistencia a la compresión simple (RCS) y su valor puede ser usado para la clasificación geotécnica de las rocas.

Debido al hecho de ser portátil, fácil de usar y económico el martillo Schmidt o esclerómetro, actualmente, es una de las herramientas o aparatos índice más usados ya que permite realizar pruebas no destructivas, además, el valor de dureza proporcionado por el martillo Schmidt es quizá el índice más utilizado en la práctica de mecánica de rocas para el cálculo estimado de la RCS y el módulo de elasticidad (E) de roca intacta, tanto en laboratorio como *in situ*. (Aydin, 2009).

### **V.2 Marco teórico**

Antes de iniciar la práctica, es necesario que los estudiantes se familiaricen con algunos conceptos básicos que son fundamentales para el desarrollo de la misma; para posteriormente, realizar un análisis del funcionamiento del martillo Schmidt o esclerómetro y, por último, evaluar la relación entre el valor de rebote del martillo Schmidt con otras propiedades de las rocas.

#### **V.2.a. Conceptos básicos**

- Resistencia a la compresión simple (RCS): “Es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio” (González, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002).

- Cohesión: “[...] es la fuerza que une las partículas minerales que forman la roca” (Ayala, 1989).
- Esfuerzo: “Los esfuerzos se definen en términos de fuerzas que actúan sobre un punto o sobre una superficie” (Hoek y Brown, 1985).
- Ángulo de fricción interna: “[...] es el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento (resistencia al corte), a lo largo de un plano, y la fuerza normal aplicada a dicho plano. (Borselli, 2017).
- Roca elástica: “[...] una roca elástica es aquella en la cual las deformaciones no sólo son totalmente recuperables, sino que también son directamente proporcionales o relacionadas linealmente a los esfuerzos que las causan.” (Hoek y Brown, 1985).
- Deformación: “La deformación indica el cambio en la forma o configuración de un cuerpo, correspondiéndose con los desplazamientos que sufre la roca al soportar la carga [...]” (González et al., 2002).
- Rotura: La rotura es un fenómeno que se produce cuando la roca no puede soportar las fuerzas aplicadas, alcanzando el esfuerzo un valor máximo correspondiente a la resistencia pico del material. (González et al., 2002).
- Resistencia: “La resistencia se define como el esfuerzo que la roca puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación [...]” (González et al., 2002).
- Fractura: “[...] la fractura es la formación de planos de separación en la roca, rompiéndose los enlaces de las partículas para crear nuevas superficies. Se pierden las fuerzas cohesivas y permanecen únicamente las friccionales.” (González et al., 2002).

### **V.2.b. Martillo Schmidt. Funcionamiento**

El martillo Schmidt o esclerómetro es una herramienta originalmente diseñada para determinar la calidad y resistencia del concreto, sin embargo, a lo largo de su desarrollo se logró que algunos modelos fueran capaces de estimar la compresión uniaxial y el módulo de elasticidad de la roca, dichos modelos son conocidos como martillos tipo L y N.

El martillo Schmidt es un dispositivo mecánico usado para realizar ensayos no destructivos que proporcionan un valor indirecto de un parámetro resistente del terreno. (Ayala, 1989). Su funcionamiento consiste básicamente en un pistón de resorte que se

libera cuando el émbolo se presiona contra una superficie. El impacto del pistón en el émbolo, transfiere la energía al material. La medida en que se recupera esta energía depende de la dureza (o la relación penetración/ resistencia al daño por impacto) del material, el cual se expresa como un porcentaje de la longitud máxima estirada del resorte antes de que se libere el pistón con respecto a su longitud después del rebote. (Aydin, 2009).

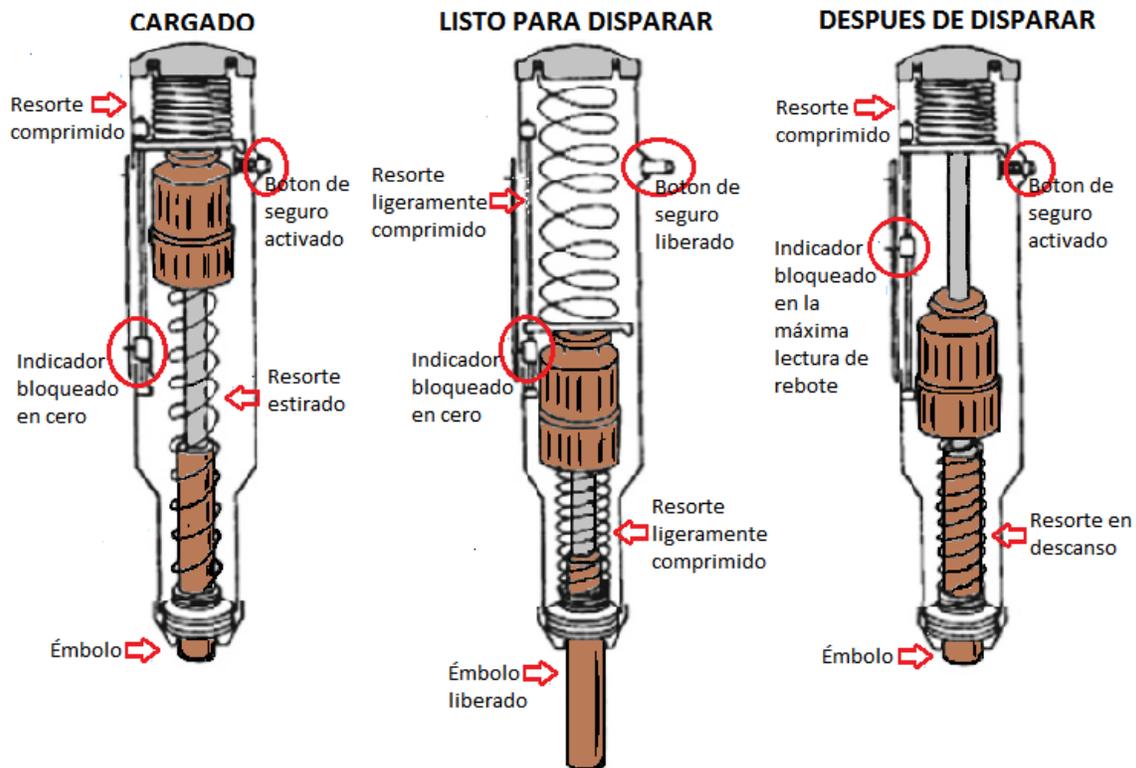


Figura 5.1 esquema del funcionamiento del martillo Schmidt en cada una de las etapas de la prueba de dureza. (Aydin, 2009).

Hablando de los tipos de martillo utilizados para ensayar roca, ambos proporcionan un valor único de impacto, tal es el caso del martillo tipo *L* el cual proporciona una energía de impacto de 0.735Nm la cual representa sólo un tercio del valor de la energía de impacto del tipo *N*.

Además de las energías de impacto, se deben tener en cuenta ciertas características de cada tipo de martillo, como el diámetro del émbolo y el radio de la curvatura del mismo, así, el martillo tipo *N* es menos sensible a las irregularidades superficiales (por lo que sirve

más para volúmenes mayores de material y se logra una penetración más profunda y amplia) lo que vuelve ideal para aplicaciones en campo; en cambio el martillo tipo *L* debido a su baja energía de impacto otorga mejores resultados cuando se prueba en rocas débiles, porosas y erosionadas. (Aydin, 2009).

### **V.2.c. Correlación entre el valor de rebote del martillo Schmidt y otras propiedades de las rocas**

Gracias al hecho de ser portátil y fácil de usar, el martillo Schmidt es una herramienta ideal para determinar las propiedades mecánicas de la roca, a ello responde justamente su creciente cantidad de aplicaciones prácticas y su popularidad. El valor de dureza de rebote del martillo Schmidt (*R*) es tal vez la propiedad índice más utilizada actualmente en la práctica de mecánica de rocas para estimar la RCS o uniaxial de la roca y el módulo de Young o de elasticidad (*E*) de la roca intacta. (Aydin, 2009).

#### **a) Valor de rebote del martillo Schmidt y porosidad**

La porosidad (*n*) de una roca es el porcentaje del volumen de los vacíos o poros con respecto al volumen total de la roca:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 = \frac{V - V_s}{V} \times 100 \quad (5.1)$$

Donde *n* es la porosidad; *V<sub>v</sub>* es el volumen de vacíos; *V* es el volumen total de la roca; y *V<sub>s</sub>* es el volumen de granos o sólidos.

El valor de rebote del martillo Schmidt es inversamente proporcional a la medida en que aumenta la porosidad. Yasar y Erdogan (como se citó en Zhang, 2005) desarrollaron la siguiente correlación empírica entre el número de rebote del martillo Schmidt y la porosidad basados en los resultados de la prueba en seis tipos diferentes de rocas: piedra caliza Ceyhan, mármol barbaros, antigua piedra caliza crema, mármol Osmaniye, Basaltos Toprakkale y arenisca Handere.

$$R_{n(L)} = 56.08 - 5.00n \quad (r = \sqrt{0.80}) \quad (5.2)$$

Donde *R<sub>n(L)</sub>* es el número de rebote del martillo Schmidt de tipo *L*; *n* es la porosidad en %; y *r* es el coeficiente de determinación.

### **b) Valor de rebote del martillo Schmidt y la densidad**

La densidad es una propiedad intensiva que se define como la cantidad de materia o masa (kg) en un determinado volumen ( $m^3$ ). Zhang (2005) menciona que, puesto que una roca contiene tanto granos (material de la matriz sólida) como vacíos, se deberán tomar en cuenta las diferentes densidades que están relacionadas con las diferentes partes o componentes de la roca.

La densidad está definida por la ecuación:

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (5.3)$$

Donde  $\delta$  es la densidad;  $m$  es la masa; y  $V$  el volumen.

El número de rebote del martillo Schmidt aumenta de manera directamente proporcional al aumento de la densidad. Yasar y Erdogan (como se citó en Zhang, 2005) desarrollaron la siguiente correlación empírica entre el número de rebote del martillo Schmidt y la densidad basados en los resultados de la prueba en seis tipos diferentes de rocas: piedra caliza Ceyhan, mármol barbaros, antigua piedra caliza crema, mármol Osmaniye, Basaltos Toprakkale y arenisca Handere.

$$R_{n(L)} = 3.0e^{1.066\delta} \quad (r = \sqrt{0.84}) \quad (5.4)$$

Donde  $R_{n(L)}$  es valor de rebote del martillo Schmidt de tipo  $L$ ;  $\delta$  es la densidad en  $g/cm^3$ ; y  $r$  es el coeficiente de determinación.

### **c) Valor de rebote del martillo Schmidt y velocidad de ondas $P$**

Las ondas sísmicas son la propagación de vibraciones en la tierra que se producen por una rápida liberación de energía, generalmente son producidas por el movimiento de la corteza terrestre. Dicho de manera sencilla, las ondas sísmicas son energía elástica que irradia en todas direcciones desde un foco; estas ondas pueden dividirse en dos grupos: las ondas superficiales y las ondas cuerpo, estas últimas a su vez pueden dividirse en ondas primarias o  $P$  y ondas secundarias o  $S$ . (Tarbuck y Lutgens, 1999).

Debido a sus propiedades se dice que las ondas  $P$  son ondas longitudinales, lo cual significa que la roca será altamente comprimida y dilatada en la dirección de la propagación de las mismas. Las ondas  $P$  pueden viajar a través de cualquier tipo de material.

Con respecto a la relación de la velocidad de propagación de las ondas  $P$  y al valor de rebote del martillo Schmidt, Kahraman (como se citó en Zhang, 2005) desarrolló la siguiente relación empírica:

$$v_p = 0.11R_{n(N)} - 4.41 \quad (r = \sqrt{0.689}) \quad (5.5)$$

Donde  $v_p$  está en la unidad de  $Km/s$  y  $r$  es el coeficiente de determinación.

### **V.3 Desarrollo de la práctica**

#### **V.3.a. Objetivo**

El alumno reafirmará el concepto teórico de resistencia a la compresión simple (RCS) y desarrollará la habilidad para realizar el cálculo de la misma por medio de la toma de datos con el martillo Schmidt en testigos.

#### **V.3.b. Material**

- Martillo Schmidt
- Base para núcleos de metal
- Soporte para martillo Schmidt
- Muestra (núcleo o bloque) por equipo
- Guantes de seguridad
- Lentes de seguridad
- Bata de laboratorio
- Marcador permanente
- Regla o flexómetro

### V.3.c. Procedimiento<sup>7</sup>

La realización de esta práctica se dividirá en dos secciones, en la primera se realizará la medición del valor de rebote de martillo Schmidt en roca intacta y, en la segunda, se realizará la medición del valor de rebote de martillo Schmidt en paredes de discontinuidades. Sin embargo se deja a criterio del docente si los alumnos realizaran solo un tipo o más de los ensayos expuestos.

#### 1) Roca intacta

- a) Para iniciar esta prueba de laboratorio lo primero será seleccionar las muestras adecuadas de acuerdo al tipo de martillo Schmidt con el que se cuente, en el caso de ser núcleos deberán tener un diámetro mayor a 8.4 cm para el martillo tipo *N*; un diámetro mayor a 5.47 cm para el martillo tipo *L*; y en el caso de bloques de roca, deberán ser al menos de 10.0 cm de espesor en el punto del impacto.
- b) Para el caso de la longitud de los núcleos, lo único que hay que considerar es que los núcleos sean lo suficientemente grandes para albergar la cantidad de puntos de impacto necesarios para la prueba, tales puntos de impacto deberán estar separados entre sí como mínimo por el diámetro de la punta del martillo Schmidt.
- c) Se deberá constatar que los núcleos no tengan fracturas evidentes a simple vista y que la superficie de contacto entre el émbolo del martillo Schmidt y el núcleo (puntos de impacto) sea lisa y libre de polvo, es posible utilizar papel de lija fino para suavizar la superficie de los núcleos en caso de ser necesario.
- d) A continuación se señalarán los 20 puntos de impacto requeridos para la prueba, realizando 20 marcas al núcleo o bloque con el marcador permanente, dichas marcas serán los puntos de impacto para el émbolo del martillo Schmidt y deberán estar separadas por lo menos por una distancia equivalente al diámetro de dicho émbolo.

---

<sup>7</sup> Para la elaboración de este apartado se tomó como referencia el documento: Aydin, A. (2009). *ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: revised version*.



Figura 5.2 las marcas o puntos de impacto pueden o no seguir un orden, sólo se deberá cumplir con el requerimiento de separación entre ellos.

- e) En el caso de los bloques de roca competente sólo se requerirá que el martillo se encuentre de manera perpendicular a la cara donde se realizará la toma de datos, pero en el caso de los núcleos se utilizará la base de metal; para núcleos de roca competente, se utilizará la base con ranura en  $v$ ; y, para los núcleos con roca poco competente, la base con ranura en forma de arco; tal como se muestra en la siguiente figura:

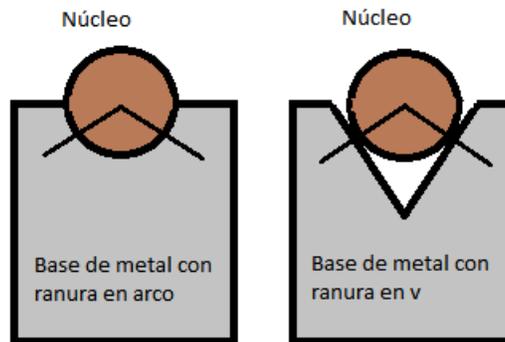


Figura 5.3 sección transversal de las bases de metal para cilindros de roca con ranura en tipo  $v$  y arco. (Aydin, 2009).

- f) Antes de colocar el núcleo en la base se deberá colocar el soporte de martillo Schmidt en posición perpendicular al núcleo acoplándolo a la base, esto con el objetivo de evitar que cuando se realice la prueba el martillo Schmidt se mueva o resbale por la superficie del núcleo y se disperse la energía de impacto por una posición incorrecta haciendo que el valor del rebote disminuya.



Figura 5.4 base de metal con ranura en v y soporte para martillo Schmidt

- g) Para iniciar con la toma de datos se libera el émbolo del martillo presionando el botón de seguro que se encuentra a un costado del mismo.



Figura 5.5 martillo Schmidt en posición de cargado y en posición liberado de inicio para la toma de datos

- h) Una vez liberado el émbolo, se colocará el martillo Schmidt en posición perpendicular al núcleo o bloque (haciendo uso del soporte en el caso de los núcleos para que no se mueva), sobre la marca del primer punto de impacto.
- i) Antes de realizar el primer impacto se deberá verificar que el medidor o aguja de la barra de desplazamiento, ubicado a un costado del martillo Schmidt, se encuentre en el valor de cero.
- j) Para iniciar el ensayo o prueba se ejercerá presión sobre el martillo en dirección del núcleo o bloque, con lo que el émbolo empezará a retroceder o introducirse nuevamente en el martillo, y se deberá detener hasta que se escuche un pequeño ruido proveniente del golpe de rebote del émbolo.



Figura 5.6 martillo Schmidt registro de datos del ensayo de valor de rebote

- k) Una vez que se ha oído el ruido producido por el golpe de rebote se debe volver a presionar el botón del seguro para poder retirar el martillo y registrar la primera medición, la cual será la registrada por el medidor o aguja de la barra de desplazamiento ubicado a un costado del martillo, éste será el valor del primer rebote obtenido y se deberá registrar en la columna “Valor de rebote del martillo Schmidt” de la tabla 5.1.
  - l) Una vez tomada la primera medición se deberá mover el núcleo o bloque a la siguiente posición o marca de punto de impacto para proceder con el siguiente impacto.
  - m) Se deberán repetir del paso *g* al *l* para cada uno de los siguientes puntos de impacto hasta completar las 20 tomas de datos necesarias.
- 2) Paredes de discontinuidades
- a) En esta sección de la práctica el ensayo se realizará *in situ* en un macizo rocoso (o pared de roca con discontinuidades), el cual deberá ser previamente aprobado por el profesor a cargo.
  - b) Una vez seleccionado el lugar de la prueba, se deberá verificar que la superficie del macizo rocoso sea lisa y esté libre de polvo, si es necesario, se podrá utilizar un cepillo o brocha para retirar el polvo o el material suelto del área de trabajo del macizo rocoso.

- c) A continuación se señalarán los 20 puntos de impacto requeridos para la prueba realizando 20 marcas al macizo rocoso o pared de discontinuidades con el marcador permanente, dichas marcas serán los puntos de impacto para el émbolo del martillo Schmidt y deberán estar separadas por lo menos por una distancia equivalente al diámetro de dicho émbolo.
- d) Para iniciar con la toma de datos se libera el émbolo del martillo presionando el botón de seguro que se encuentra a un costado del mismo.



Figura 5.7 Toma de datos con el martillo Schmidt en una pared de discontinuidades

- e) Una vez liberado el émbolo, se colocará el martillo Schmidt en posición perpendicular al macizo rocoso, sobre la marca del primer punto de impacto.
- f) Antes de realizar el primer impacto, se deberá verificar que el medidor o aguja de la barra de desplazamiento, ubicado a un costado del martillo Schmidt, se encuentre en el valor de cero.
- g) Para iniciar el ensayo o prueba se ejercerá presión sobre el martillo en dirección del macizo rocoso, con lo que el émbolo empezará a retroceder o introducirse nuevamente en el martillo, se deberá detener hasta que se escuche un pequeño ruido proveniente del golpe de rebote del émbolo.
- h) Una vez que se ha oído el ruido producido por el golpe de rebote, se debe volver a presionar el botón del seguro para poder retirar el martillo y registrar la primera medición, la cual será la registrada por el medidor o aguja de la barra de desplazamiento ubicado a un costado del martillo, éste será el valor del primer rebote obtenido y se deberá registrar en la columna “Valor de rebote del martillo Schmidt” de la tabla 5.3 junto con la dirección o posición en la que fue realizada la medición.

- i) Una vez tomada la primera medición, se deberá mover el martillo Schmidt a la siguiente posición o marca de punto de impacto para proceder con el siguiente impacto.
- j) Se deberán repetir del paso *d* al *i* para cada uno de los siguientes puntos de impacto hasta completar las 20 tomas de datos necesarias.

**V.3.d. Cálculos**

Para realizar el cálculo de la RCS por medio del valor de rebote del matillo Schmidt, se dividirán los cálculos en dos secciones, en la primera sección se realizará el cálculo de la RCS en roca intacta y en la segunda sección se realizará el cálculo de la RCS para paredes de discontinuidades

1) Roca intacta

- a) Una vez capturadas las 20 tomas de datos del ensayo en roca intacta en la tabla 5.1, se deberán ordenar dichos valores de mayor a menor y acomodar en la columna “Valores ordenados de mayor a menor” de dicha tabla.

Tabla 5.1 Tabla de registro de datos del valor de rebote para roca intacta o cilindros de roca



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Facultad de Ingeniería**  
**División de Ciencias de la Tierra**  
**Mecánica de Rocas**



Datos	Valor de rebote del martillo Schmidt	Valores ordenados de mayor a menor
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		

15
16
17
18
19
20

b) Una vez ordenados los datos de mayor a menor, se usarán para calcular los valores de la media (promedio aritmético), mediana (valor medio), moda (valor más repetido) y rango de las lecturas.

*media* = \_\_\_\_\_

*mediana* = \_\_\_\_\_

*moda* = \_\_\_\_\_

*rango de lecturas* = \_\_\_\_\_

c) Se deberá tener en cuenta que la RCS es un valor que se obtiene de la relación del valor de rebote del martillo Schmidt y la densidad de la roca, por lo que para realizar el cálculo de la misma, primero, se debe asignar el valor de su densidad al núcleo de roca que se ensayó; a continuación se muestra la tabla 5.2 que proporciona las densidades para los principales tipos de rocas.

Tabla 5.2 valores típicos de densidad para la roca intacta Lama y Vutukuri (como se citó en Zhang, 2005).

Tipo de roca	Rango de densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio (kg/m <sup>3</sup> )
<i><b>Rocas ígneas</b></i>		
<b>Granito</b>	2516 – 2809	2667
<b>Granodiorita</b>	2668 – 2785	2716
<b>Sienita</b>	2630 – 2899	2757
<b>Cuarzo diorita</b>	2680 – 2960	2806
<b>Diorita</b>	2721 – 2960	2839
<b>Norita</b>	2720 – 3020	2984
<b>Gabro</b>	2850 – 3120	2976
<b>Dolerita</b>	2804 – 3110	2965
<b>Peridotita</b>	3152 – 3276	3234
<b>Dunita</b>	3204 – 3314	3277

<b>Piroxenita</b>	3100 – 3318	3231
<b>Anortosito</b>	2640 – 2920	2734
<b><i>Rocas sedimentarias</i></b>		
<b>Arenisca</b>	2170 – 2700	---
<b>Caliza</b>	2370 – 2750	---
<b>Dolomita</b>	2750 – 2800	---
<b>Tiza</b>	2230	---
<b>Mármol</b>	2750	---
<b>Lutitas</b>	2060 – 2660	---
<b>Arena</b>	1920 – 1930	---
<b><i>Rocas metamórficas</i></b>		
<b>Gneis</b>	2590 – 3060	2703
<b>Esquisto</b>	2700 – 3030	2790
<b>Pizarra</b>	2720 – 2840	2810
<b>Anfibolita</b>	2790 – 3140	2990
<b>Granulita</b>	2630 – 3100	2830
<b>Eclogita</b>	3338 – 3452	3392

d) Una vez que se cuenta con el valor de la densidad se podrá utilizar el gráfico 5.1, el cual relaciona el valor de la densidad con el valor del rebote del martillo para obtener la RCS, sin embargo, es importante notar que la densidad en el gráfico está en  $N/m^3$  y la densidad en la tabla en  $Kg/m^3$ , es decir, el gráfico utiliza el peso específico, por lo tanto, habrá que convertir la densidad en peso específico multiplicándola por la constante de la gravedad.

La forma de utilizar el gráfico es la siguiente:

- Se tomará como punto de partida el valor que, en el eje de las abscisas, coincida con el valor promedio de rebote obtenido y con la posición del martillo Schmidt al realizar el ensayo con respecto a la horizontal. Es importante considerar que en el caso del ensayo en roca intacta al hacer uso de la base de metal el núcleo quedará paralelo a la horizontal.
- Una vez colocado en tal posición se trazará una recta perpendicular al eje de las abscisas que corte a las diagonales de la densidad (peso específico).
- Se deberá localizar la diagonal que coincida con el valor de la densidad de la muestra o núcleo y, en el punto que esta diagonal corte la vertical

trazada anteriormente se iniciará una línea horizontal que se intersectará con el eje de las ordenadas. Donde dicha recta se intersecte con el eje de las ordenadas se encontrará el valor de la RCS.

**valor RCS =** \_\_\_\_\_

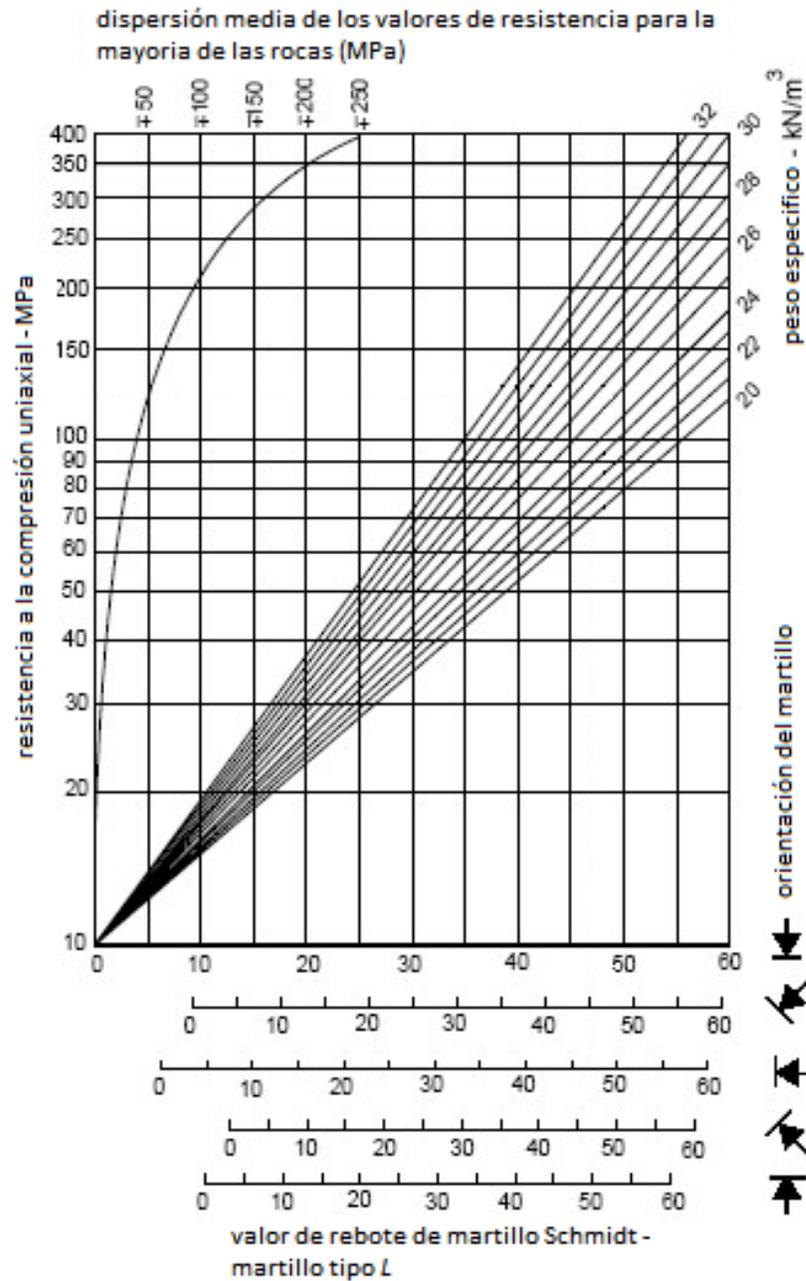


Gráfico 5.1 Abanico de correlación entre el valor de rebote de martillo Schmidt y el peso específico (González et al., 2002).

2) Pared de discontinuidades

- a) Una vez capturadas las 20 tomas de datos del ensayo en macizo rocoso o pared de discontinuidades en la tabla 5.3, se deberán ordenar dichos valores de mayor a menor y acomodarlos en la columna “Valores ordenados de mayor a menor” de la misma tabla.

Tabla 5.3 Tabla de registro de datos del valor de rebote para macizos rocosos



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Facultad de Ingeniería**  
**División de Ciencias de la Tierra**  
**Mecánica de Rocas**



Dato	Valor de rebote del martillo Schmidt	Posición	Valores ordenados de mayor a menor
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

- b) Una vez ordenados los datos de mayor a menor, éstas se usarán para calcular los valores de la media (promedio aritmético), mediana (valor medio), moda (valor más repetido) y rango de las lecturas.

$$media = \underline{\hspace{2cm}}$$

*mediana* = \_\_\_\_\_

*moda* = \_\_\_\_\_

*rango de lecturas* = \_\_\_\_\_

- c) Se deberá tener en cuenta que la RCS es un valor que relaciona el valor de rebote obtenido del martillo Schmidt con la densidad de la roca, por lo que para realizar el cálculo de la misma, primero, se debe asignar el valor de su densidad al macizo rocoso o pared de discontinuidades que se ensayó. En la tabla 5.2 se muestran las densidades para los principales tipos de rocas.
- d) Una vez que se cuenta con el valor de la densidad, se podrá utilizar el gráfico 5.1, el cual relaciona el valor de la densidad con el valor del rebote del martillo para obtener la RCS, sin embargo, es importante notar que la densidad en el gráfico está en  $N/m^3$  y la densidad en la tabla en  $Kg/m^3$ , es decir, el gráfico utiliza el peso específico por lo tanto, habrá que convertir la densidad en peso específico multiplicándola por la constante de la gravedad.
- e) La forma de utilizar el gráfico es la siguiente:
- Se tomará como punto de partida el valor que, en el eje de las abscisas, coincida con el valor promedio de rebote obtenido y con la posición del martillo Schmidt al realizar el ensayo con respecto a la horizontal. Es importante considerar que en el caso del ensayo *in situ* (a diferencia del realizado en un laboratorio) no se puede maniobrar la superficie a ensayar por lo que se deberá registrar la posición en la que se realizó el ensayo con respecto a la horizontal y usar este dato para posicionar el punto de inicio en el gráfico 5.1. Además, todas las tomas se deberán realizar usando la misma posición o de lo contrario se alterará el ensayo.
  - Una vez colocado en tal posición, se trazará una recta perpendicular al eje de las abscisas que corte a las diagonales de la densidad (peso específico).
  - Se deberá localizar la diagonal que coincida con el valor de la densidad de la muestra o núcleo y, en el punto en el que esta diagonal corte la vertical trazada anteriormente, se iniciará una línea horizontal que se

intersectará con el eje de las ordenadas. Donde dicha recta se interseque con el eje de las ordenadas se encontrará el valor de la RCS.

$$\text{valor RCS} = \underline{\hspace{10em}}$$

### **V.3.e. Cuestionario**

Para la evaluación de esta práctica el alumno deberá completar el siguiente cuestionario:

1. Menciona tres factores que pueden afectar los resultados del ensayo con el martillo Schmidt.
2. Explica el proceso de calibración del martillo Schmidt y el factor de corrección sugerido por Aydin.
3. ¿Cuál es el peso que deben de tener las bases metálicas para los martillos tipo *L* y *N*? Explica cuál es la razón de la diferencia de pesos
4. ¿Cuál es la fórmula de correlación entre los valores de rebote del martillo Schmidt tipo *L* y *N*?

### **V.3.f. Resultados**

El reporte deberá incluir fotografías de las observaciones y procedimientos realizados en cada muestra de manera ordenada y por separado.

Así mismo, el registro de los resultados u observaciones se deberá hacer de forma ordenada y en el orden en que se realizaron los cálculos anteriormente.

### **V.3.g. Evaluación sugerida**

Esta práctica se podrá realizar en equipos de 4 a 5 alumnos y para su evaluación se entregará un reporte escrito de manera individual, el cual constará de la explicación y registro de cada uno de los pasos realizados en la práctica, así como los resultados obtenidos y el cuestionario.

## **V.4 Bibliografía**

Ayala, F. (1989). *Manual de ingeniería geológica*. España. Ministerio de industria y energía.

Aydin, A. (2009). *ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: revised version*. Oxxford, USA. Springer.

- Borselli, L. (2017). *Geotecnia I*. San Luis Potosi, México: Facultad de ingeniería UASLP.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson educación.
- Hoek, E. y Brown, E. (1985). *Excavaciones subterráneas en roca*. Londres, Inglaterra. McGraw Hill.
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: S/E.
- Real Academia Española (15 de julio de 2018). Diccionario de la lengua española.
- Tarback, E. y Lutgens, F. (1999). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Prentice Hall.
- Zhang, L. (2005). *Engineering properties of rocks*. Lexington, USA: Elsevier.

## **PRÁCTICA 6. Resistencia al corte de las discontinuidades**

PREGUNTA GUÍA: ¿Por qué es importante conocer el comportamiento de las discontinuidades y cuáles son las ventajas de usar el criterio de Barton y Bandis?

### **VI.1 Introducción**

Cuando se habla de excavaciones o cimentaciones en roca, las discontinuidades o planos de debilidad juegan un papel muy importante, ya que éstas condicionan el comportamiento y la respuesta del macizo rocoso ante la alteración de las fuerzas en su entorno por la acción del hombre.

Es debido a esto que muchos investigadores han dedicado su tiempo y esfuerzo a predecir el comportamiento de las discontinuidades con el objetivo de ubicar condiciones desfavorables o de riesgo para las diferentes obras ingenieriles que se desarrollan en los diferentes macizos rocosos.

La resistencia al corte de las discontinuidades y la orientación de las discontinuidades respecto a las obras ingenieriles, son los aspectos más importantes en la determinación de la resistencia, grado de fracturamiento y comportamiento de los macizos rocosos (González, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002). En este trabajo se pondrá especial atención a la resistencia al corte de las discontinuidades al desarrollar el criterio de Barton y Bandis.

### **VI.2 Marco teórico**

Antes de iniciar la práctica, es necesario que los estudiantes se familiaricen con algunos conceptos básicos que son fundamentales para el desarrollo de la misma; para posteriormente, realizar un análisis de la resistencia al corte para los diferentes tipos de discontinuidades.

#### **V.2.a. Conceptos básicos**

- Esfuerzo: “Los esfuerzos se definen en términos de fuerzas que actúan sobre un punto o sobre una superficie” (Hoek y Brown, 1985).
- Resistencia: “La resistencia se define como el esfuerzo que la roca puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación [...]” (González et al., 2002).

- Rotura: La rotura es un fenómeno que se produce cuando la roca no puede soportar las fuerzas aplicadas, alcanzando el esfuerzo un valor máximo correspondiente a la resistencia pico del material. (González et al., 2002).
- Cohesión: “[...] es la fuerza que une las partículas minerales que forman la roca” (Ayala, 1989).
- Ángulo de fricción interna: “[...] es el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento (resistencia al corte), a lo largo de un plano, y la fuerza normal aplicada a dicho plano. (Borselli, 2017).
- Fractura: “[...] la fractura es la formación de planos de separación en la roca, rompiéndose los enlaces de las partículas para crear nuevas superficies. Se pierden las fuerzas cohesivas y permanecen únicamente las friccionales.” (González et al., 2002).
- Compresión: “Presión a la que está sometido un cuerpo por la acción de fuerzas opuestas que tienden a disminuir su volumen” Real Academia Española [RAE] (2018).
- Dureza: “[...] es una medida de la resistencia de un mineral a la abrasión o al rayado. Esta propiedad se determina frotando un mineral de dureza desconocida contra uno de dureza conocida o viceversa. [...]” (Tarbuck y Lutgens, 1999).
- Resistencia a la compresión simple (RCS): “Es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio” (González et al., 2002).

### **VI.2.b. Resistencia al corte de las discontinuidades**

Para entender el por qué de la importancia de la resistencia al corte en las discontinuidades se debe primero explicar brevemente qué es una discontinuidad y cuál su influencia en el macizo rocoso.

Para tal caso, Abbruzzese y Labiouse (S/F) definen las discontinuidades como: “[...] cualquier cese de continuidad en la masa de la roca (como juntas, zonas de corte, planos de estratificación, fracturas) originadas por medios físicos, químicos, geológicos o geomorfológicos”; asimismo, al respecto Hoek (2006) menciona que: “A poca profundidad donde las tensiones son bajas, el fallo del material de roca intacta es mínimo y el

comportamiento de la masa de roca se controla deslizando sobre las discontinuidades”, en otras palabras, a poca profundidad la ruptura de la roca difícilmente ocurre y su fallamiento está definido por su deslizamiento sobre las discontinuidades.

En el pasado muchos criterios de falla empíricos fueron formulados con el objetivo de superar las deficiencias de los criterios teóricos, uno de los más importantes fue el formulado por Hoek y Brown en 1980, sin embargo, estos tienen una deficiencia general puesto que todos fueron formulados para masas de rocas unidas sin contemplar las discontinuidades (Hoek, 2006).

En este mismo sentido, González et al. (2002) explican que las discontinuidades imprimen un carácter discontinuo y anisótropo a los macizos, haciéndolos más deformables y débiles, lo que supone una gran dificultad para evaluar el comportamiento mecánico de los mismos frente a las obras de ingeniería. Pese a ello, es importante tener presente que las discontinuidades representan planos de preferentes de alteración, meteorización y fractura, como se muestra en la figura 6.1, y que además permiten el flujo de agua, por lo que su reconocimiento, descripción y caracterización es fundamental para el estudio de la estabilidad de las excavaciones y cimentaciones en roca.

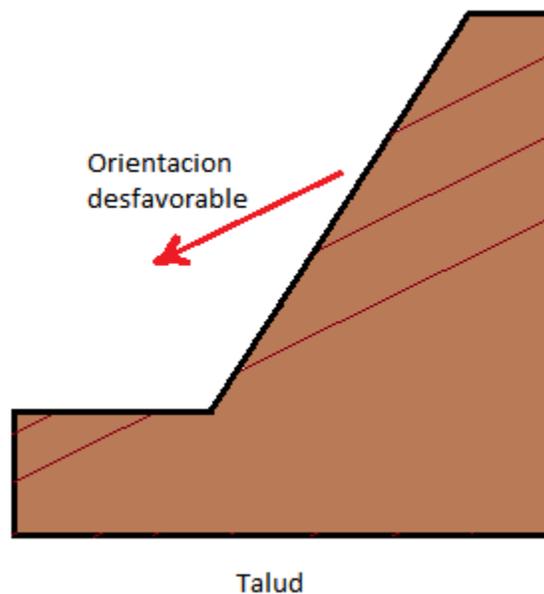


Figura 6.1 Ejemplo de discontinuidades con orientación desfavorable para el caso de un talud

Tomando como referencia el ejemplo mostrado en la figura 6.1 se puede observar que existen situaciones en las que las discontinuidades tienen una orientación desfavorable para la obra ingenieril, sin embargo, es necesario un estudio más apropiado de la respuesta del macizo rocoso al desplazamiento, de esta manera, González et al. (2002) mencionan que: “La resistencia de los planos de discontinuidad viene dada por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, y se determina en el ensayo de resistencia al corte en laboratorio”. Por medio de este tipo de análisis se podrá obtener información fiable del comportamiento que presentarán las discontinuidades y, por tanto, si existen posibilidades de un deslizamiento de roca, en cuyo caso será necesario valorar si se debe reforzar con concreto lanzado o anclas, o bien, si la cohesión y resistencia de la roca por si solos impedirán el desplazamiento.

#### a) Resistencia al corte de superficies planas

En el caso de un macizo rocoso cuya discontinuidad es absolutamente plana, es decir, que no tiene irregularidades, en un ensayo de resistencia al corte (como se muestra en la figura 6.2) se le sometería a un esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) al plano de la discontinuidad, y se tendría que medir el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) requerido para causar un desplazamiento ( $\delta$ ) (Hoek, 2006).

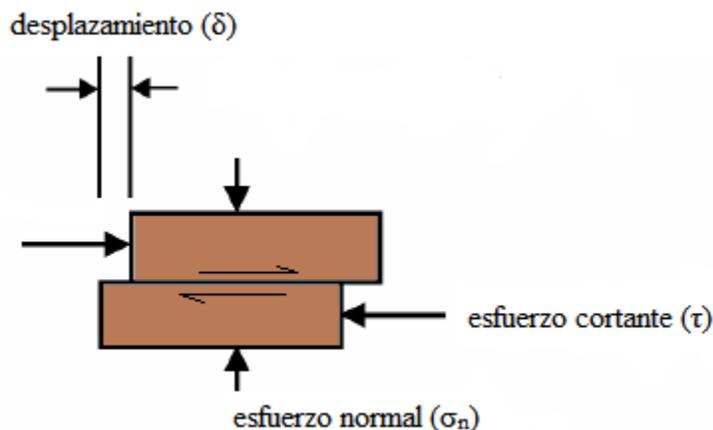


Figura 6.2 Ensayo de resistencia al corte en discontinuidades planas (Abbruzzese y Labiouse, S/F)

Este tipo de ensayos tiene como objetivo encontrar el esfuerzo cortante requerido para generar un desplazamiento en una discontinuidad plana sometida a un esfuerzo normal, para lograrlo, el esfuerzo cortante se irá aumentando gradualmente hasta que

alcance la resistencia máxima del material, la cual corresponderá a la suma de la resistencia originada por la cohesión del material alrededor de la discontinuidad y de la resistencia originada por la fricción de las superficies correspondientes. Una vez rebasada la resistencia máxima se iniciará el desplazamiento sobre la discontinuidad, en cuyo caso el valor del esfuerzo cortante caerá a un valor residual que permanecerá constante sin importar la distancia del desplazamiento (Hoek, 2006).

La relación entre la resistencia máxima al corte o resistencia al corte de pico de las discontinuidades planas ( $\tau_p$ ) y el esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) está dada por la expresión de Morh-Coulomb:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi_p \quad (6.1)$$

Donde  $\tau_p$  es la resistencia máxima al corte de las discontinuidades planas;  $\sigma_n$  es el esfuerzo efectivo normal sobre el plano de discontinuidad;  $c$  es la cohesión; y  $\phi_p$  es su ángulo de fricción pico (González et al., 2002).

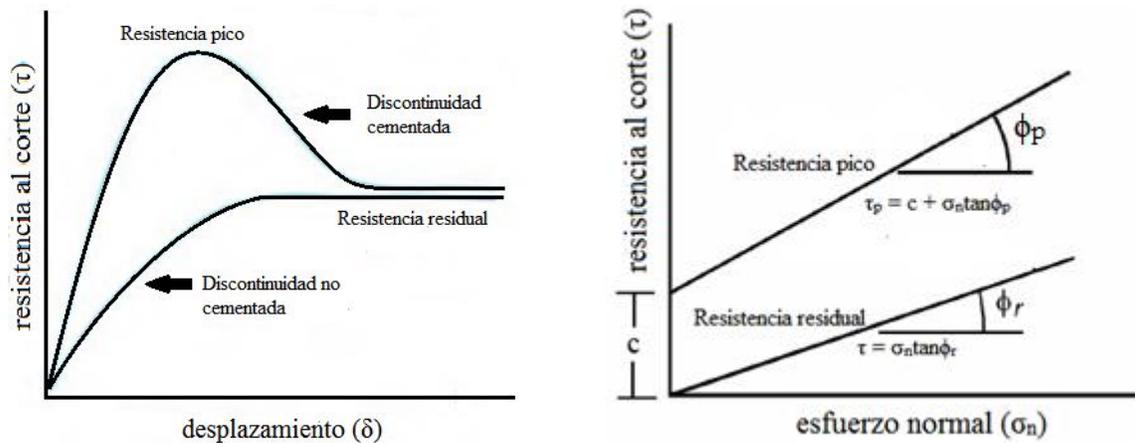


Figura 6.3 Gráficos del comportamiento de las discontinuidades planas. (Hoek, 2006).

En el caso de la resistencia residual, el valor de la cohesión  $c$  cae a cero y la relación entre  $\phi_r$  y  $\sigma_n$  puede representarse por la ecuación:

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \quad (6.2)$$

Donde  $\tau_r$  es la resistencia residual;  $\sigma_n$  es el esfuerzo normal; y  $\phi_r$  es el ángulo de fricción residual.

El ángulo de fricción básico  $\phi_b$  es un parámetro fundamental obtenido en laboratorio, es aproximadamente igual al ángulo de fricción residual  $\phi_r$  pero, a diferencia de este último, se mide probando superficies de roca aserrada o molida (Hoek, 2006). Estas pruebas pueden llevarse a cabo incluso en superficies tan pequeñas como 50mm x 50mm y producirán un gráfico de línea recta definido por la ecuación:

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_b \quad (6.3)$$

#### **b) Resistencia al corte de las superficies rugosas**

La superficie de las discontinuidades realmente nunca es tan lisa, es por eso que es necesario considerar parámetros como ondulaciones y asperezas que tienen una influencia significativa en la resistencia al corte de las discontinuidades.

Patton (Como se citó en González et al., 2002) propuso un modelo de rotura bilineal basado en la influencia de las rugosidades o irregularidades que generalmente presentan las discontinuidades. La irregularidad de una superficie de discontinuidad puede ser definida por un ángulo de rugosidad  $i$ , que se suma al ángulo de fricción básico  $\phi_b$  para obtener el valor total de  $\phi_p$  de la superficie:

$$\phi_p = \phi_b + i \quad (6.4)$$

El ángulo  $i$  es el que forma la irregularidad con respecto al plano de discontinuidad, y tiene una gran influencia en el comportamiento geomecánico de las discontinuidades.

Para lograr dicho modelo Patton llevó a cabo pruebas de corte en muestras de “diente de sierra” como la que se ilustra en la figura 6.4. El desplazamiento al corte en estas muestras se produce como resultado de las superficies que se mueven hacia arriba de las caras inclinadas, causando la dilatación (un aumento en el volumen) de la muestra (Hoek, 2006).

La resistencia al corte de las muestras de dientes de sierra de Patton se puede representar mediante la ecuación:

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (6.5)$$

Donde  $\phi_b$  es el ángulo de fricción básico de la superficie e  $i$  es el ángulo de la cara de dientes de sierra.

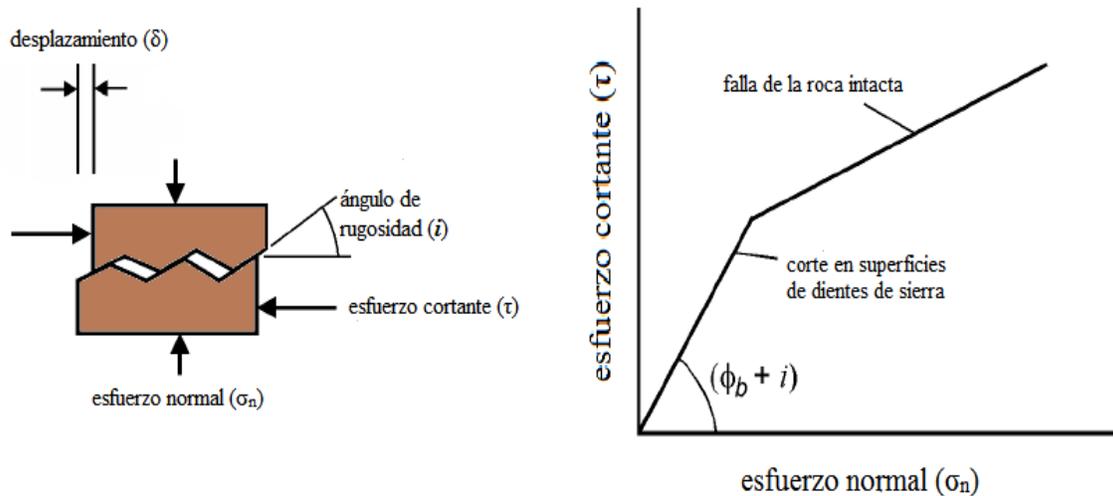


Figura 6.4 Experimento de Patton sobre la resistencia al corte de las muestras de dientes de sierra (Hoek, 2006).

### c) Criterio de Barton y Bandis

Si bien el enfoque de Patton tiene el mérito de ser muy simple, no refleja la realidad de los cambios en la resistencia al corte a medida que aumenta el esfuerzo normal, ya que estos son graduales en lugar de abruptos (Hoek, 2006). Barton (1973, 1976) estudió el comportamiento de las discontinuidades de la roca y propuso que la ecuación de Patton se pudiera escribir como:

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \phi_b + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (6.6)$$

Sin embargo, Barton desarrolló este criterio de resistencia no lineal para discontinuidades de roca a partir del análisis de los datos publicados en la literatura (Hoek, 2006). Posteriormente, Barton y Choubey (1977) revisaron y modificaron esta ecuación con

base en los resultados obtenidos de las pruebas de corte directo en 130 muestras de rocas variadas, logrando postular la siguiente ecuación:

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \phi_r + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (6.7)$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante;  $\sigma_n$  es el esfuerzo normal;  $\phi_r$  es el ángulo de fricción residual;  $JRC$  es el coeficiente de rugosidad conjunta; y  $JCS$  es la resistencia a la compresión de la pared de discontinuidades.

Las ecuaciones anteriores se han convertido en parte del criterio de Barton y Bandis (1990) para la resistencia y deformabilidad de las discontinuidades de roca y tiene la ventaja de que se puede obtener tanto en pruebas de laboratorio como en *in situ*.

Ahora bien, el  $JRC$  o coeficiente de rugosidad conjunta es un número que varía en el intervalo de 0 a 20 y representa la relevancia de la rugosidad en la definición de la resistencia al corte de las rocas (Abbruzzese y Labiouse, S/F). Los valores del  $JRC$  pueden estimarse comparando la apariencia de la superficie de la discontinuidad con perfiles estándar como el mostrado en la figura 6.10, y sus valores extremos del intervalo están asignados para superficies lisas = 0 y para superficies muy rugosas = 20.

El  $JCS$  o resistencia a la compresión de la pared de discontinuidades se puede obtener por medio del valor de rebote del martillo Schmidt de acuerdo a los métodos sugeridos por ISRM (2009) tanto en laboratorio como *in situ*.

El ángulo de fricción residual  $\phi_r$  se puede estimar a partir del valor de rebote del martillo Schmidt a partir de:

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \left( \frac{r}{R} \right) \quad (6.8)$$

Donde  $\phi_r$  es el ángulo de fricción residual;  $\phi_b$  es el ángulo de fricción básico;  $r$  es el valor de rebote del martillo Schmidt en superficies húmedas y meteorizadas; y  $R$  es el valor de rebote del martillo Schmidt en superficies secas y no meteorizadas.

### **VI.3 Desarrollo de la práctica**

#### **VI.3.a. Objetivo**

El alumno reafirmará el concepto teórico de resistencia al corte en las discontinuidades y desarrollará la habilidad para realizar el cálculo de la misma por medio del criterio Barton y Bandis.

#### **VI.3.b. Material**

- Martillo Schmidt
- Transportador
- Base de metal o madera
- Base para núcleos de metal
- Soporte para martillo Schmidt
- Marcador permanente
- Regla o flexómetro
- Muestra (núcleo o bloque) por equipo
- Guantes de seguridad
- Lentes de seguridad
- Bata de laboratorio

#### **VI.3.c. Procedimiento**

La realización de esta práctica se dividirá en dos secciones, en la primera se realizará la medición del ángulo de fricción y, en la segunda, se realizará la medición del valor de rebote de martillo Schmidt en el plano de discontinuidad.

- 1) Ángulo de fricción
  - a) Este tipo de prueba generalmente se realiza en un laboratorio con una máquina de prueba de corte típica, sin embargo, para profundizar un poco más en el tema en esta ocasión se realizará en su lugar una prueba *in situ* llamada *tilt test* para calcular el ángulo  $\alpha$ .
  - b) Lo primero será seleccionar las muestras adecuadas de acuerdo al tipo de ensayo que se realizará, para esto se deberá tomar en cuenta que dicho ensayo se puede realizar tanto en bloques como en testigos de roca cilíndricos. En el caso de ser

núcleos deberán ser 3 por lo menos y en caso de ser bloques de roca estos deberán contener un plano de discontinuidad sin cohesión.

\*nota: es muy importante aclarar que como se está tratando de determinar la resistencia al corte de las discontinuidades, lo ideal es calcular el ángulo alfa o ángulo de fricción interna en dichas discontinuidades, es decir, bloques de roca con discontinuidades y no en núcleos cilíndricos de roca, ya que estos últimos debido a su forma disminuyen su resistencia al deslizamiento alterando el valor del ángulo. Sin embargo debido a ser este un ejercicio didáctico se plantearán ambas opciones y se dejará a criterio del docente cual método se realizara.

- c) A continuación se enlistan las principales características que las muestras y discontinuidades deberán tener:
- Volumen y litología iguales en todas las muestras
  - En caso de haber relleno, no deberá ser mayor a 3mm
  - La discontinuidad deberá ser representativa de las familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso.
  - Las muestras deberán tener el tamaño adecuado para realizar el ensayo de valor de rebote de acuerdo al tipo de martillo Schmidt con el que se cuente, en el caso de ser núcleos deberán tener un diámetro mayor a 8.4 cm para el martillo tipo *N*; un diámetro mayor a 5.47 cm para el martillo tipo *L*; y en el caso de bloques de roca, deberán ser al menos de 10.0 cm de espesor en el punto del impacto.
- d) Para el caso de bloques de roca se procederá a colocar el bloque sobre la base de metal o madera, que servirá como superficie o plano de apoyo, como se muestra en la figura 6.5. En caso de no contar con una base de madera o metal se puede usar una viga de metal.

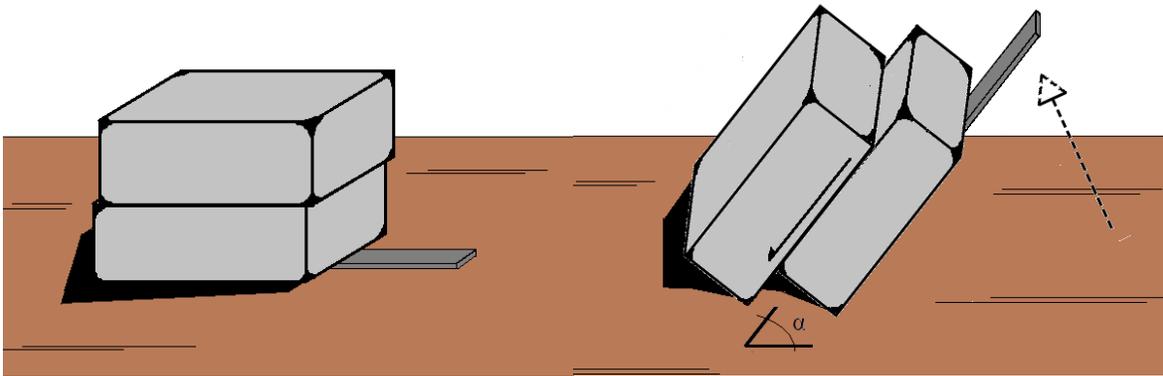


Figura 6.5 Ensayo *in situ tilt test* en bloques de roca

- e) Una vez colocado el bloque en posición se usará la base o viga para inclinar el plano de apoyo, como se muestra en la figura 6.5, este proceso continuará hasta que comience a deslizarse el fragmento superior del bloque sobre la discontinuidad.
- f) Una vez que la parte superior del bloque se empiece a deslizar se utilizará el transportador para medir el ángulo que la discontinuidad forma con la horizontal, dicho ángulo será  $\alpha$ .
- g) Para el caso de testigos de roca cilíndricos serán necesarios tres testigos de roca que cumplan con las especificaciones antes mencionadas, dos de ellos deberán ser colocados uno al lado del otro de forma paralela sobre la base de metal o madera que servirá como superficie o plano de apoyo.
- h) El tercer testigo deberá ser colocado encima de los otros dos apoyándose en ambos, como se muestra en la figura 6.6, para que el contacto de la superficie pueda simular la superficie de una discontinuidad.

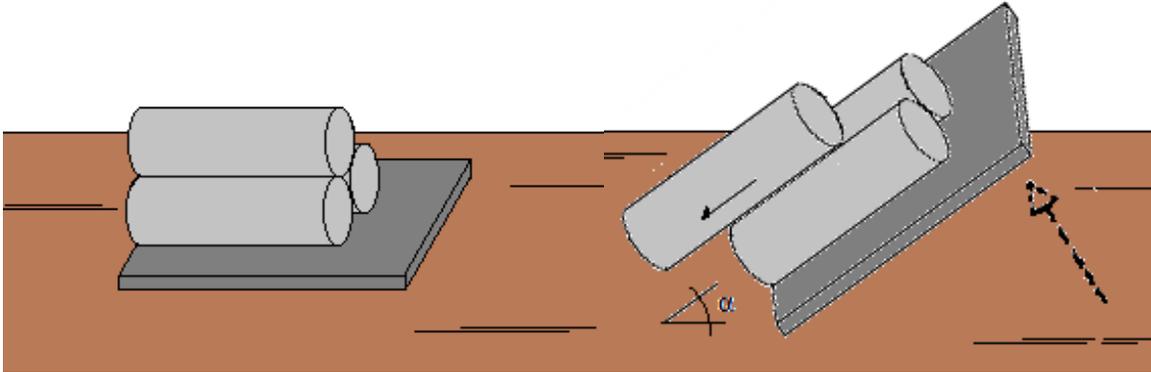


Figura 6.6 Ensayo *in situ* tilt test en testigos cilíndricos de roca

- i) Una vez colocados en posición se usará la base para inclinar el plano de apoyo, como se muestra en la figura 6.6, hasta que el testigo cilíndrico de roca que se encuentra en la parte superior empiece a desplazarse sobre el plano que se tomará como discontinuidad.
  - j) En el momento en que el testigo se empiece a deslizar se deberá hacer uso del transportador para medir el ángulo que el plano de la discontinuidad forma con la horizontal, dicho ángulo será  $\alpha$ .
- 2) Valor de rebote del martillo Schmidt<sup>8</sup>
- a) En esta sección de la práctica se utilizará el martillo Schmidt para obtener el valor de rebote con el que se calculará la resistencia a la compresión simple de la roca (RCS), para lo cual se deberá tomar en cuenta que dicho ensayo se puede realizar tanto en bloques como en testigos de roca cilíndricos.
  - b) Para el caso de bloques de roca se deberá verificar que la superficie del bloque sea lisa y esté libre de polvo, si es necesario, se podrá utilizar un cepillo o brocha para retirar el polvo o el material suelto del área de trabajo.
  - c) A continuación se señalarán los 20 puntos de impacto requeridos para la prueba realizando 20 marcas al bloque o pared con discontinuidad con el marcador permanente, dichas marcas serán los puntos de impacto para el émbolo del martillo Schmidt y deberán estar separadas por lo menos por una distancia equivalente al diámetro de dicho émbolo.

<sup>8</sup> Para la elaboración de este apartado se tomó como referencia el documento: Aydin, A. (2009). *ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: revised version*.

- d) Para iniciar con la toma de datos se libera el émbolo del martillo presionando el botón de seguro que se encuentra a un costado del mismo.



Figura 6.7 Martillo Schmidt en posición de cargado y en posición liberado de inicio para la toma de datos

- e) Una vez liberado el émbolo, se colocará el martillo Schmidt en posición perpendicular a la cara seleccionada del bloque de roca con discontinuidad, sobre la marca del primer punto de impacto.
- f) Antes de realizar el primer impacto, se deberá verificar que el medidor o aguja de la barra de desplazamiento, ubicado a un costado del martillo Schmidt, se encuentre en el valor de cero.
- g) Para iniciar el ensayo o prueba se ejercerá presión sobre el martillo en dirección del bloque de roca, con lo que el émbolo empezará a retroceder o introducirse nuevamente en el martillo, se deberá detener hasta que se escuche un pequeño ruido proveniente del golpe de rebote del émbolo.
- h) Una vez que se ha oído el ruido producido por el golpe de rebote, se debe volver a presionar el botón del seguro para poder retirar el martillo y registrar la primera medición, la cual será la registrada por el medidor o aguja de la barra de desplazamiento ubicado a un costado del martillo, éste será el valor del primer rebote obtenido y se deberá registrar en la columna “Valor de rebote del martillo Schmidt” de la tabla 6.1 junto con la dirección o posición en la que fue realizada la medición.
- i) Una vez tomada la primera medición, se deberá mover el martillo Schmidt a la siguiente posición o marca de punto de impacto para proceder con el siguiente impacto.

- j) Se deberán repetir del paso *d* al *i* para cada uno de los siguientes puntos de impacto hasta completar las 20 tomas de datos necesarias.
- k) Para el caso de testigos de roca cilíndricos será necesario constatar que los núcleos no tengan fracturas evidentes a simple vista y que la superficie de contacto entre el émbolo del martillo Schmidt y el núcleo (puntos de impacto) sea lisa y libre de polvo, es posible utilizar papel de lija fino para suavizar la superficie de los núcleos en caso de ser necesario.
- l) A continuación se señalarán los 20 puntos de impacto requeridos para la prueba, realizando 20 marcas al núcleo o bloque con el marcador permanente, dichas marcas serán los puntos de impacto para el émbolo del martillo Schmidt y deberán estar separadas por lo menos por una distancia equivalente al diámetro de dicho émbolo.



Figura 6.8 Las marcas o puntos de impacto pueden o no seguir un orden, sólo se deberá cumplir con el requerimiento de separación entre ellos.

- m) En el caso de los núcleos se utilizará la base de metal; para núcleos de roca competente, se utilizará la base con ranura en *v*; y, para los núcleos con roca poco competente, la base con ranura en forma de arco.
- n) Antes de colocar el núcleo en la base se deberá colocar el soporte de martillo Schmidt en posición perpendicular al núcleo acoplándolo a la base, esto con el objetivo de evitar que cuando se realice la prueba el martillo Schmidt se mueva o resbale por la superficie del núcleo y se disperse la energía de impacto por una posición incorrecta haciendo que el valor del rebote disminuya.



Figura 6.9 Base de metal con ranura en v y soporte para martillo Schmidt

- o) Para iniciar con la toma de datos se libera el émbolo del martillo presionando el botón de seguro que se encuentra a un costado del mismo.
- p) Una vez liberado el émbolo, se colocará el martillo Schmidt en posición perpendicular al núcleo, haciendo uso del soporte para que los testigos cilíndricos de roca no se muevan, sobre la marca del primer punto de impacto.
- q) Antes de realizar el primer impacto se deberá verificar que el medidor o aguja de la barra de desplazamiento, ubicado a un costado del martillo Schmidt, se encuentre en el valor de cero.
- r) Para iniciar el ensayo o prueba se ejercerá presión sobre el martillo en dirección del núcleo o bloque, con lo que el émbolo empezará a retroceder o introducirse nuevamente en el martillo, y se deberá detener hasta que se escuche un pequeño ruido proveniente del golpe de rebote del émbolo.



Figura 6.10 Martillo Schmidt registro de datos del ensayo de valor de rebote

- s) Una vez que se ha oído el ruido producido por el golpe de rebote se debe volver a presionar el botón del seguro para poder retirar el martillo y registrar la primera medición, la cual será la registrada por el medidor o aguja de la barra de desplazamiento ubicado a un costado del martillo, éste será el valor del primer rebote obtenido y se deberá registrar en la columna “Valor de rebote del martillo Schmidt” de la tabla 6.1.
- t) Una vez tomada la primera medición se deberá mover el núcleo o bloque a la siguiente posición o marca de punto de impacto para proceder con el siguiente impacto.
- u) Se deberán repetir del paso *o* al *t* para cada uno de los siguientes puntos de impacto hasta completar las 20 tomas de datos necesarias.

#### VI.3.d. Cálculos

Para realizar el cálculo de la resistencia al corte de las discontinuidades por medio del criterio de Barton y Bandis, utilizaremos la ecuación 6.7 propuesta por dicho criterio. Se calculará cada valor de la fórmula por separado para, al final, integrar todos los valores y obtener el valor de la resistencia al corte de las discontinuidades.

#### Esfuerzo normal $\sigma_n$

Existen dos formas de calcular el esfuerzo normal, cualquiera de las dos fórmulas mostradas a continuación es válida para tal objetivo, la selección dependerá de la información con la que se cuente:

$$\sigma_n = \gamma h \cos(\alpha)^2 \quad (6.9)$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico;  $h$  es la altura; y  $\alpha$  es el ángulo obtenido en la prueba de inclinación o *tilt test*.

$$\sigma_n = \left(\frac{P}{A}\right) \cos(\alpha)^2 \quad (6.10)$$

Donde  $P$  es el peso de la muestra;  $A$  es el área en el que actúa dicho peso; y  $\alpha$  es el ángulo obtenido en la prueba de inclinación o *tilt test*.

## Resistencia a la compresión de la pared de discontinuidades JCS

Para realizar el cálculo de la resistencia a la compresión de la pared de discontinuidades o JCS es necesario utilizar el *Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: revised versión.* de Aydin (2009).

Una vez capturadas las 20 tomas de datos del ensayo en roca intacta en la tabla 6.1, se deberán ordenar dichos valores de mayor a menor y acomodar en la columna “Valores ordenados de mayor a menor” de dicha tabla.

Tabla 6.1 Tabla de registro de datos del valor de rebote para roca intacta o cilindros de roca



**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Facultad de Ingeniería**  
**División de Ciencias de la Tierra**  
**Mecánica de Rocas**



Datos	Valor de rebote del martillo Schmidt	Valores ordenados de mayor a menor
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

Una vez ordenados los datos de mayor a menor, se usarán para calcular los valores de la media (promedio aritmético), mediana (valor medio), moda (valor más repetido) y rango de las lecturas.

*media* = \_\_\_\_\_

*mediana* = \_\_\_\_\_

*moda* = \_\_\_\_\_

*rango de lecturas* = \_\_\_\_\_

Se deberá tener en cuenta que la RCS es un valor que relaciona el valor de rebote obtenido del martillo Schmidt con la densidad de la roca, por lo que para realizar el cálculo de la misma, primero, se debe asignar el valor de su densidad a la muestra de roca que se ensayó; a continuación se muestra una tabla que proporciona las densidades para los principales tipos de rocas.

Tabla 6.2 Valores típicos de densidad para la roca intacta Lama y Vutukuri (como se citó en Zhang, 2005).

Tipo de roca	Rango de densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio (kg/m <sup>3</sup> )
<b><i>Rocas ígneas</i></b>		
<b>Granito</b>	2516 – 2809	2667
<b>Granodiorita</b>	2668 – 2785	2716
<b>Sienita</b>	2630 – 2899	2757
<b>Cuarzo diorita</b>	2680 – 2960	2806
<b>Diorita</b>	2721 – 2960	2839
<b>Norita</b>	2720 – 3020	2984
<b>Gabro</b>	2850 – 3120	2976
<b>Dolerita</b>	2804 – 3110	2965
<b>Peridotita</b>	3152 – 3276	3234
<b>Dunita</b>	3204 – 3314	3277
<b>Piroxenita</b>	3100 – 3318	3231
<b>Anortosito</b>	2640 – 2920	2734
<b><i>Rocas sedimentarias</i></b>		
<b>Arenisca</b>	2170 – 2700	---
<b>Caliza</b>	2370 – 2750	---
<b>Dolomita</b>	2750 – 2800	---
<b>Tiza</b>	2230	---

<b>Mármol</b>	2750	---
<b>Lutitas</b>	2060 – 2660	---
<b>Arena</b>	1920 – 1930	---
<b><i>Rocas metamórficas</i></b>		
<b>Gneis</b>	2590 – 3060	2703
<b>Esquisto</b>	2700 – 3030	2790
<b>Pizarra</b>	2720 – 2840	2810
<b>Anfibolita</b>	2790 – 3140	2990
<b>Granulita</b>	2630 – 3100	2830
<b>Eclogita</b>	3338 – 3452	3392

Una vez que se cuenta con el valor de la densidad se podrá utilizar el gráfico 6.1, el cual relaciona el valor de la densidad con el valor del rebote del martillo para obtener la RCS, sin embargo, es importante notar que la densidad en el gráfico está en  $N/m^3$  y la densidad en la tabla en  $Kg/m^3$ , es decir, el gráfico utiliza el peso específico, por lo tanto, habrá que convertir la densidad en peso específico multiplicándola por la constante de la gravedad.

La forma de utilizar el gráfico es la siguiente:

- 1) Se tomará como punto de partida el valor que, en el eje de las abscisas, coincida con el valor promedio de rebote obtenido y con la posición del martillo Schmidt al realizar el ensayo con respecto a la horizontal. Es importante considerar que en el caso del ensayo en roca intacta al hacer uso de la base de metal el núcleo quedará paralelo a la horizontal.
- 2) Una vez colocado en tal posición se trazará una recta perpendicular al eje de las abscisas que corte a las diagonales de la densidad (peso específico).
- 3) Se deberá localizar la diagonal que coincida con el valor de la densidad de la muestra o núcleo y, en el punto que esta diagonal corte la vertical trazada anteriormente se iniciará una línea horizontal que se intersectará con el eje de las ordenadas. Donde dicha recta se intersecte con el eje de las ordenadas se encontrará el valor de la RCS.

**Valor de RCS o JCS = \_\_\_\_\_**

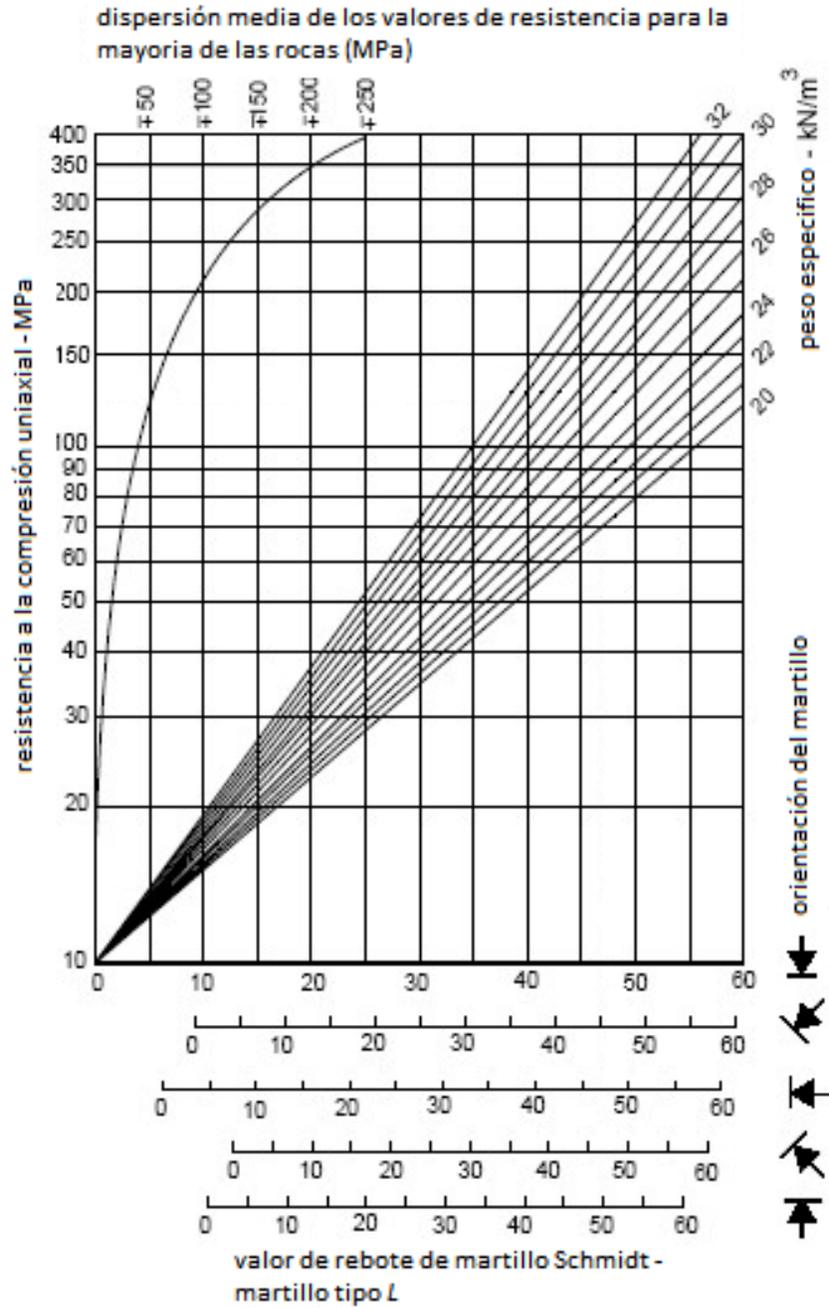


Gráfico 6.1 Abanico de correlación entre el valor de rebote de martillo Schmidt y el peso específico. (González et al., 2002).

### Coefficiente de rugosidad conjunta *JRC*

Para obtener el coeficiente de rugosidad conjunta o *JRC* se comparará visualmente la rugosidad de la discontinuidad con los perfiles de la figura 6.11.

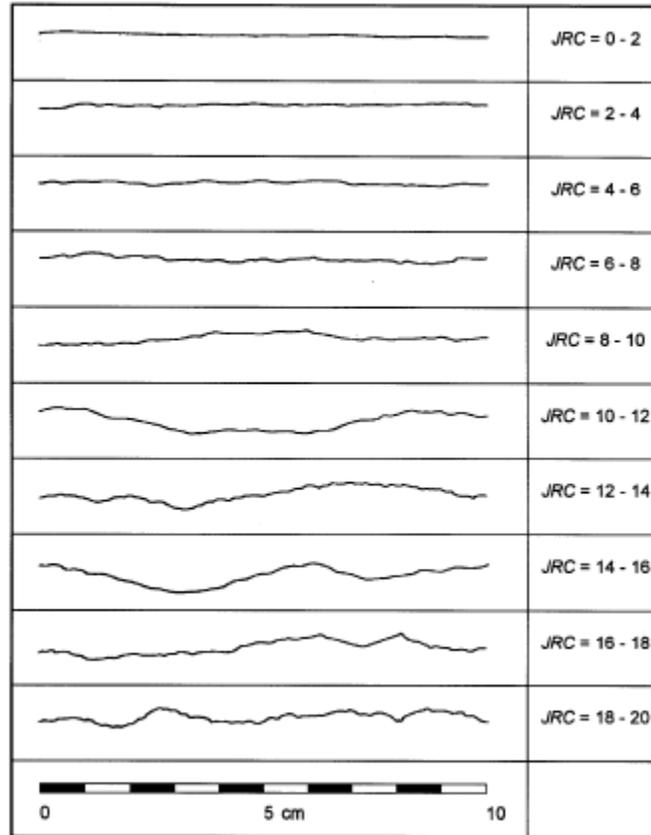


Figura 6.11 Perfiles de rugosidad y sus correspondientes valores de JRC. (Hoek, 2006).

Otra opción para realizar el cálculo de la JRC, especialmente en el caso de testigos de roca cilíndricos es el uso de la siguiente fórmula:

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right)} \quad (6.11)$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de deslizamiento en la prueba *tilt test*;  $\phi_r$  es el ángulo de fricción residual de la superficie de la roca;  $JCS$  es la resistencia a la compresión de la pared de discontinuidades; y  $\sigma_n$  es el esfuerzo normal.

#### Ángulo de fricción residual de la pared de discontinuidades $\phi_r$

Para el cálculo del ángulo de fricción residual de la pared de discontinuidades se utilizará la fórmula de Barton y Choubey (ecuación 6.8) a partir de la resistencia del martillo Schmidt.

Donde  $\phi_b$  es el ángulo de fricción básico;  $r$  es el valor de rebote del martillo Schmidt con en superficie húmeda; y  $R$  es el valor de rebote del martillo Schmidt en superficie seca.

Para fines de este ejercicio se obtendrá un valor estimado del ángulo de fricción básico usando la tabla 6.3, la cual contiene los valores típicos de  $\phi_b$  según el tipo de roca, sin embargo, se debe de recordar que estos solo son valores índice, no pueden tomarse como una regla, ya que el ángulo de fricción puede cambiar según la superficie y su relleno.

Tabla 6.3 Valores típicos del ángulo de fricción básico (González et al., 2002).

Tipo de roca	Cohesión $c$ (kp/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción básico $\phi_b$ (grados)
<b>Andesita</b>	280	45
<b>Arenisca</b>	80 – 350	30 – 50
<b>Basalto</b>	200 – 600	48 – 55
<b>Caliza</b>	50 – 400	35 – 50
<b>Caliza margosa</b>	10 – 60	30
<b>Cuarcita</b>	250 – 700	40 – 55
<b>Diabasa</b>	900 – 1,200	40 – 50
<b>Diorita</b>	150	50 – 55
<b>Dolomía</b>	220 – 600	25 – 35
<b>Esquisto</b>	250	25 – 30*
	20 – 150*	20 – 30*
<b>Gabro</b>	300	35
<b>Gneiss</b>	150 – 400	30 – 40
<b>Granito</b>	150 – 500	45 – 58
<b>Grauvaca</b>	60 – 100	45 – 50
<b>Mármol</b>	150 – 350	35 – 45
<b>Lutita</b>	30 – 350	40 – 60
		15 – 25*
<b>Pizarra</b>	100 – 500	40 – 55
	< 100*	15 – 30*
<b>Toba</b>	7	---
<b>Yeso</b>	---	30

(\*) En superficies de laminación o esquistosidad.  
**Datos seleccionados a partir de Walthan (1999), Rahn (1986), Goodman (1989), Farmer (1968), Jiménez Salas y Justo Alpañés (1975).**

Con los valores previamente calculados ya se puede obtener el valor de la resistencia al corte de las discontinuidades  $\tau$  por medio del criterio de Barton y Bandis.

### VI.3.e. Cuestionario

Para la evaluación de esta práctica el alumno deberá completar el siguiente cuestionario:

1. Explica cómo afecta el relleno en la resistencia al corte de las discontinuidades.
2. Explica la influencia de la presión del agua en la resistencia al corte de las discontinuidades.
3. ¿Qué sucede con el valor  $\phi_r$  y  $\phi_b$  cuando las paredes de discontinuidades están sanas?
4. La ecuación  $\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i)$  es válida en el caso de esfuerzos normales bajos, sin embargo ¿Qué sucede con la resistencia al corte en superficies de dientes de sierra en el caso de esfuerzos normales altos?

### VI.3.f. Resultados

El reporte deberá incluir fotografías de las observaciones y procedimientos realizados en cada muestra de manera ordenada y por separado.

Así mismo, el registro de los resultados u observaciones se deberá hacer de forma ordenada y en el orden en que se realizaron los cálculos anteriormente.

### VI.3.g. Evaluación sugerida

Esta práctica se podrá realizar en equipos de 3 a 4 alumnos y para su evaluación se entregará un reporte escrito con el nombre de cada uno de los integrantes del equipo, el cual constará de la explicación y registro de cada uno de los pasos realizados en la práctica, así como los resultados obtenidos y el cuestionario.

### VI.4 Bibliografía

- Abbruzzese, J., Labiouse V. (S/F). *Shear strength of discontinuities*. Suiza, Lausanne: Universidad politécnica federal de Lausanne.
- Ayala, F. (1989). *Manual de ingeniería geológica*. España. Ministerio de industria y energía.
- Aydin, A. (2009). *ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: revised version*. Oxford, USA. Springer.
- Barton, N y Bandis, S. (1990). *Revisión de las capacidades predictivas del modelo JRC-JCS en la práctica de ingeniería. En juntas de roca*. Loen, Noruega.

- Borselli, L. (2017). *Geotecnia I*. San Luis Potosi, México: Facultad de ingeniería UASLP.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson educación.
- Hoek, E. (2006). *Practical rock engineering*. North Vancouver, Canada.
- Hoek, E. y Brown, E. (1985). *Excavaciones subterráneas en roca*. Londres, Inglaterra. McGraw Hill.
- Ramirez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: S/E.
- Real Academia Española (15 de julio de 2018). Diccionario de la lengua española.
- Tarback, E. y Lutgens, F. (1999). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Prentice Hall.
- Zhang, L. (2005). *Engineering properties of rocks*. Lexington, USA: Elsevier.

## CONCLUSIONES

Haciendo un análisis de lo propuesto en este trabajo, sería incierto decir que se comprueba que el objetivo e hipótesis del mismo se han completado satisfactoriamente, principalmente porque este trabajo forma parte de un esfuerzo conjunto que intenta lograr que el laboratorio de mecánica de rocas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM empiece a funcionar debidamente.

Sin embargo, es posible advertir que este Manual sin duda ayudará a elevar la calidad de la formación académica que se propone en los cursos de mecánica de rocas y geotecnia de excavaciones, ya que proporciona al alumno una metodología para realizar de forma adecuada cada una de las prácticas, así mismo, a través de este Manual el alumno conoce y aprende a manejar el equipo del laboratorio de manera adecuada, unificando de esta manera conocimientos teóricos y prácticos.

Cabe destacar que también se está aportando material didáctico con bibliografía y referencias actualizadas, lo que será fundamental para la mejora de la enseñanza y aprendizaje de los alumnos de la materia de mecánica de rocas y afines. Esta herramienta pretende también invitar al alumno a consultar nuevas fuentes de apoyo en sus investigaciones sobre el tema.

Asimismo, es importante advertir que con anterioridad a esta propuesta se contaba ya con la realización de tesis y proyectos que se habían enfocado en la generación de propuestas de pruebas de laboratorio dirigidas a reforzar el tema de mecánica de rocas realmente, sin embargo, no se existía aún documento alguno que sistematizara tales conocimientos en una propuesta pedagógica de aplicación en un y entorno ideal como sería el laboratorio aún en rehabilitación de la Facultad de Ingeniería; ya que la mayoría de dichos trabajos se han enfocado en la proposición de pruebas con fines de estudio en ciertas zonas o en ciertos proyectos ingenieriles en concreto.

Finalmente, es importante mencionar que el alcance y utilidad de este trabajo está supeditado a la dificultad de que el laboratorio de mecánica de rocas se encuentra en restauración, de que éste no cuenta con el equipo necesario y que además el existente tiene ya varios años sin utilizarse por lo que podría tener problemas de funcionamiento. Pese a ello, este tipo de manuales y lo que proponen podrían convertirse en un aliciente importante

para echar a andar proyectos para la habilitación del laboratorio, de esta manera, este trabajo podrá ser visto como la primera piedra en el camino para lograr el desarrollo del LRM y en la actualización del material didáctico alrededor del mismo, con lo que se espera exhortar a más alumnos a continuar con esta labor.

En lo personal el desarrollo de este manual de prácticas me ha dado una gran satisfacción, ya que para mí representa una aportación hacia una institución que me ha dado tanto, que me albergó en sus aulas y me brindó el conocimiento y las herramientas necesarias para continuar con mi desarrollo personal y profesional, espero en un futuro poder poner el nombre de la UNAM y la Facultad de Ingeniería en alto, este Manual pretende convertirse en un primer paso para emprender este camino.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Abbruzzese, J., Labiouse V. (S/F). *Shear strength of discontinuities*. Suiza, Lausanne: Universidad politécnica federal de Lausanne.
- Alonso, F. (2006). *La porosidad como componente petrográfico: la porosidad de las rocas carbonatadas*. Oviedo, España. Universidad de Oviedo.
- Alonso, F. (2010). *La porosidad como propiedad física: propiedades densidad y porosidad*. Oviedo, España. Universidad de Oviedo.
- Alonso, F. (2011). *El agua en los materiales rocosos*. Oviedo, España. Universidad de Oviedo.
- Andreu, C., Saval, J., Baeza, F. y Tensa, A. (2008). *Prácticas de materiales de construcción I.T. Obras públicas*. Universidad de Alicante.
- Ayala, F. (1989). *Manual de ingeniería geológica*. España. Ministerio de industria y energía.
- Aydin, A. (2009). *ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: revised version*. Oxxford, USA. Springer.
- Barton , N y Bandis, S. ( 1990 ). *Revisión de las capacidades predictivas del modelo JRC-JCS en la práctica de ingeniería. En juntas de roca*. Loen, Noruega.
- Bernaola, J., Castilla, J. y Herrera J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Borselli, L. (2017). *Geotecnia I*. San Luis Potosi, México: Facultad de ingeniería UASLP.
- Bueche, F. y Hetch, E. (2007). *Física general*. D.F., México. McGraw-Hill/Interamericana editores S.A. de C.V.
- Castilla, J. y Herrera, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Castro, A. (1989). *Petrografía básica: texturas, clasificación y nomenclatura de rocas*. Madrid, España: Paraninfo.
- Duque, G. (2017). *Manual de geología para ingenieros*. Manizales, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson educación.

- Griem, W. (2017). *Apuntes de geología general*. Chile: S/E.
- Herrera, J. y Castilla J. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Hoek, E. (2006). *Practical rock engineering*. North Vancouver, Canadá.
- Hoek, E. y Brown, E. (1985). *Excavaciones subterráneas en roca*. Londres, Inglaterra. McGraw Hill.
- International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. (1977). *Suggested Method for Determining Water content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties*. Gran Bretaña, Reino Unido
- International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. (1978). *Suggested Method for Petrographic Description of Rocks*. Gran Bretaña, Reino Unido
- International Society of Rock Mechanics (1985). *ISRM Suggested Method for Determining Point Load Strength*. Gran Bretaña, Reino Unido.
- López, V. (2003). *Fundamentos para la explotación de minas*. D.F., México: Facultad de ingeniería UNAM.
- MetAs & Metrólogos asociados. (Abril 2005). *Masa (unidad, definición, prototipo)*. La Guía MetAs.
- Muñoz, M., Guardiola, J., Belda, A., Cañaveras, J., Ordoñez, S. y Rodríguez, M. (2016). *Elaboración de fichas de autoaprendizaje para el estudio de minerales y rocas*. Alicante, España; Departamento de ciencias de la tierra y medio ambiente, Universidad de Alicante.
- Quimacer (2013). *Aditivos para fluidos de perforación*. Alcora, España.
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: S/E.
- Real Academia Española (2018). *Diccionario de la lengua española*.
- Saldarriaga, J., Pablos, A., Aguayo, A., Aguado, R., Olazar, M. (2014). Determinación de la densidad de partícula mediante porosimetría de mercurio para el estudio fluidodinámico de biomasa en lechos móviles. *Avances en Ciencias e Ingeniería*.
- Tarbuck, E. y Lutgens, F. (1999). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Prentice Hall.

Viades, J. (2013). *Fenómenos de superficie. Adsorción*. D.F., México: Facultad de Química UNAM.

Villegas, K. (s/f). *Densidad de las rocas*. S/E

Zhang, L. (2005). *Engineering properties of rocks*. Lexington, USA: Elsevier.