



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Correlación entre la deformación y la Resistencia
a la Compresión Uniaxial en rocas.”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO EN MINAS**

Autor:

DAYANNA MICHELLE ROMAN CELI

Director:

ERNESTO PATRICIO FEJOO CALLE

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar a este punto con salud.

A mis padres Jorge y María por haberme apoyado en todo momento para poder salir adelante con mis metas trazadas y por su infinito amor.

A mis hermanas Gabriela y Priscila de las cuales aprendí aciertos y de momentos difíciles, siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda.

A mi Director de tesis Ing. Patricio Feijoo por su gran apoyo y motivación para la culminación de mis estudios.

Con todo mi cariño este trabajo se los dedico a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres María y Jorge por ser los primeros en apoyarme a cumplir mis sueños y creer en mí, por los consejos y principios que me han dado.

A mis profesores de la Universidad del Azuay de la Escuela de Ingeniería en minas por haberme compartido sus conocimientos a lo largo de este periodo de mi profesión.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	2
1.1 Las Rocas.	2
1.2 Tensión.....	4
1.3 Estado de Tensión Plano – Bidimensional.....	8
1.4 Estado de Tensión Tridimensional.....	10
1.5 Circulo de Mohr.	12
1.6 Deformaciones.....	13
1.7 Ley de Hooke.	18
CAPITULO II: MACIZOS ROCOSOS Y RESISTENCIA A LA COMPRESION	22
2.1 Clasificación de los Macizos Rocosos	22
2.2 Rock Mass Rating (RMR).....	26
2.3 Resistencia a la Compresión Simple o Uniaxial	31
2.5 La Fracturación.....	39
2.6 Criterios de Ruptura de la Matriz Rocosa	42
CAPÍTULO III: DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN.....	44
3.1 Descripción de las Muestras.....	44
3.2 Preparación de las Muestras.	46
3.3 Descripción de Métodos de Experimentación.....	49

3.4 Interpretación de los Resultados.....	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Roca, Material Rocoso o Matriz Rocosa.....	3
Figura 1. 2 Macizo Rocoso.	3
Figura 1. 3 Concepto Físico de Tensión.	6
Figura 1. 4 Concepto Físico de Tensión.	6
Figura 1. 5 Descomposición de la tensión en sus componentes.	7
Figura 1. 6 Estado Bidimensional.	8
Figura 1. 7 Gráfico para demostración de ecuaciones.	10
Figura 1. 8 Estado Tridimensional.	11
Figura 1. 9 Círculo de Mohr.....	12
Figura 1. 10 Ejemplo de Deformación.....	14
Figura 1. 11 Segmento sin deformación.	14
Figura 1. 12 Segmentos deformados en dos direcciones.	15
Figura 1. 13 Relación Fuerza vs Deformación.	19
Figura 1. 14 Relación Esfuerzo vs Deformación.	19
Figura 1. 15 Relación Esfuerzo vs Deformación.	20
Figura 1. 16 Relación Esfuerzo vs Deformación Ley de Hooke.	20
Figura 2. 1 Calculo de RQD.....	25
Figura 2. 2 Desarrollo de las fracturas extensionales y de cizalla como resultado de compresión.	34
Figura 2. 3 Relación de las dimensiones de las muestras.	39
Figura 2. 4 Fracturas y su disposición en el espacio (Nelson, 2001).	41
Figura 3. 1 Relación de diámetro y largo de las probetas (D/L).	45
Figura 3. 2 Probetas de roca.....	46
Figura 3. 3 Probetas de roca y relación de tamaño.	46
Figura 3. 4 Máquina de compresión Humboldt.	47
Figura 3. 5 Calibrador.	48
Figura 3. 6 Prensa.	48
Figura 3. 7 Esquema de trabajo.....	49
Figura 3. 8 Grafica de resultados RCU vs. Deformación.	53

Figura 3. 9 Correlación Logarítmica.....	54
Figura 3. 10 Correlación Ecuación exponente 3.....	55
Figura 3. 11 Correlación RCU Máxima y Mínima.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Clasificación según el Grado de Meteorización.	24
Tabla 2. 2 Clasificación de las Rocas según la ISRM.	24
Tabla 2. 3 Clasificación de las rocas según el RMR.....	27
Tabla 2. 4 Puntajes para determinación del RMR, primera etapa.	28
Tabla 2. 5 Parámetro: Separación de las discontinuidades.	29
Tabla 2. 6 Clasificación para RMR.....	31
Tabla 2. 7 Tiempo de Autosostenimiento.	31
Tabla 2. 8 Tipo de fortificación.	31
Tabla 2. 9 Clasificación de las rocas por estimación con martillo de geólogo.	32
Tabla 2. 10 Clasificación Ingenieril de las rocas.	33
Tabla 2. 11 Clasificación de las rocas según la Resistencia a la Compresión.	36
Tabla 2. 12 Clasificación de las fracturas.	40
Tabla 3. 1 Dimensiones de las probetas (hermana A).	50
Tabla 3. 2 Dimensiones de las probetas (hermana B).....	50
Tabla 3. 3 Datos de ejemplo para cálculo de resistencia a la compresión (hermana A).....	50
Tabla 3. 4 Datos de ejemplo para cálculo de deformación (hermana B).....	50

CORRELACIÓN ENTRE LA DEFORMACIÓN Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL EN ROCAS

RESUMEN

En explotación minera, túneles y/o taludes, para la evaluación de macizos rocosos, un parámetro fundamental es la resistencia a la compresión del material rocoso y las clasificaciones geomecánicas, utilizan como base la resistencia a la compresión uniaxial. Para obtener este índice implica muchas veces llevar un número de muestras a laboratorio. La resistencia a la compresión se puede determinar con equipos estándar sencillos, el presente trabajo trata de encontrar una relación entre deformaciones por compresión de la roca y la resistencia a la compresión. Esta relación se la trabajó y podría generar un método de fácil ejecución, bajo costo y con cierto grado de confiabilidad para obtener una aproximación del parámetro antes descrito.



Ernesto Patricio Feijoo Calle
Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela

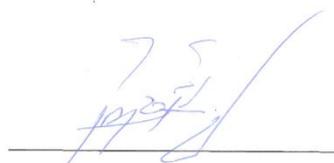


Dayanna Michelle Román Celi
Autora

**CORRELATION BETWEEN DEFORMATION AND RESISTANCE TO
UNIAXIAL COMPRESSION IN ROCKS**

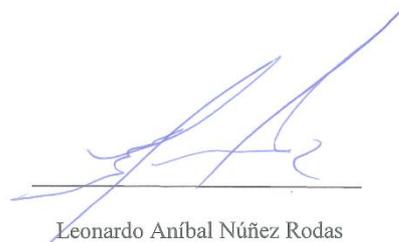
ABSTRACT

The resistance to compression of rocky material is a fundamental parameter in mining, tunnels, slopes and the evaluation of rock massifs. The geomechanical classifications use the uniaxial compressive strength as a basis. Obtaining this index often involves taking a number of samples to the laboratory. The compressive strength can be determined with simple standard equipment. The present work tries to find a relation between deformations by compression of the rock and the resistance to compression. This relationship was analyzed and could generate a method of easy execution, low cost and with a certain degree of reliability to obtain an approximation of the parameter described above.



Ernesto Patricio Feijoo Calle

Thesis Director



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator



Dayanna Michelle Román Celi

Author



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Román Celi Dayanna Michelle

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Abril, 2019

INTRODUCCIÓN

La Minería es una actividad económica ya sea por la extracción, explotación y aprovechamientos de minerales que se hallan acumulados en el suelo en forma de yacimientos. La minería es una de las actividades más antiguas desarrolladas por el hombre. El hombre ha venido desarrollando técnicas que le permitan procesar y elaborar los metales. En toda mina sea a cielo abierto o subterránea se realizan diversos pasos o fases para la explotación de minerales, ya sea para exploración (localizar yacimientos), extracción (resistencia de rocas), procesamiento (separar minerales), transporte y aprovechamiento (tener un uso específico del mineral).

En la naturaleza las rocas aparecen por diferentes caracteres geológicos estructurales, como es la esquistosidad, pliegues, fallas, estratificación y diaclasas. Al conjunto de estos caracteres que atraviesan las rocas se denomina estructura del macizo rocoso. Se entiende como macizo rocoso a la forma en cómo se presentan las rocas en el medio natural.

El comportamiento mecánico de las rocas está definido por su resistencia y deformabilidad. La resistencia es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Cuando se elaboran probetas de roca, se denomina resistencia a la compresión simple.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

El comportamiento mecánico de las rocas está definido por su resistencia y su deformabilidad. La resistencia es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Cuando la resistencia se mide en probetas de roca sin confinar se denomina resistencia a compresión simple, y su valor se emplea para la clasificación geotécnica de las rocas.

La resistencia de la roca no es un valor único, ya que depende de otras condiciones, como la magnitud de los esfuerzos confinantes, la presencia de agua en los poros o la velocidad de aplicación de la carga de rotura. También, incluso en rocas aparentemente isotropas y homogéneas, los valores pueden variar según el grado de cementación o variaciones en la composición mineralógica.

1.1 Las Rocas.

Se define roca como un agregado sólido, formado por uno o varios minerales, que se encuentra ocupando grandes extensiones de la corteza terrestre. En mecánica de rocas se habla en muchas ocasiones de roca o roca intacta para referirse a un elemento (trozo, bloque o probeta) de roca que no presenta discontinuidades observables (Ramírez Alejano, 2004).

En la naturaleza las rocas aparecen muy comúnmente atravesadas por distintos caracteres geológicos estructurales y discontinuidades de variado origen geológico, como la estratificación, esquistosidad, pliegues, fallas, juntas o diaclasas. Al conjunto de estas discontinuidades que atraviesan la roca se le suele denominar estructura del macizo rocoso.

Se define macizo rocoso como la forma en la que se presentan las rocas en el medio natural. Así pues un macizo rocoso estará definido por la roca y la estructura, que a su vez contendrá planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otros caracteres estructurales. Los macizos rocosos son por tanto discontinuos y puede presentar propiedades heterogéneas y/o anisótropas (Ramírez Alejano, 2004).

En las figuras 1.1 y 1.2 se puede observar un ejemplo de roca y macizo rocoso respectivamente.



Figura 1. 1 Roca, Material Rocoso o Matriz Rocosa



Figura 1. 2 Macizo Rocoso El Tahal.

En la Mecánica de Rocas, que es la encargada de estudiar las propiedades de las rocas y de los macizos rocosos, es muy importante definir algunas de ellas, que sin restar importancia a otras, se consideran prioritarias.

En cuanto a la matriz rocosa o simplemente roca, hay muchos parámetros que se emplean para su identificación y descripción de sus características. Estas propiedades junto con la composición mineralógica determinan su comportamiento.

Las propiedades mecánicas de la matriz rocosa son las que permiten conocer las características tenso-deformacionales de la mina, sometida a un estado de esfuerzos determinados. Dentro de las propiedades básicas, y de cara al conocimiento del

comportamiento mecánico de la matriz, son de particular importancia la Resistencia a Compresión Simple y la Resistencia a Tracción (Galván, 2015).

El comportamiento tensión-deformacional de una roca, viene definido por la relación entre dos esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas y hace referencia a como se va deformando y a la variación del comportamiento del material a lo largo de la aplicación de la carga; que permite conocer:

- El comportamiento antes de llegar a la rotura.
- La forma en la que se produce la rotura.
- El comportamiento después de la rotura.

Su estudio, se lleva a cabo a partir de ensayos de aplicación de fuerzas, en donde se registran las curvas esfuerzo-deformación a lo largo de las diferentes etapas del proceso.

Las rocas presentan relaciones lineales y/o no lineales entre las fuerzas aplicadas y las deformaciones producidas, obteniéndose diferentes modelos de curvas tensión contra deformación para distintos tipos de rocas (Galván, 2015).

1.2 Tensión.

En este capítulo se analizará lo que sucede en un cuerpo constituido por material compacto, continuo, que se somete a fuerzas que pueden ser superficiales y concentradas de tensión.

El material que constituye un cuerpo continuo puede ser homogéneo o heterogéneo, se dice homogéneo cuando el cuerpo tiene iguales propiedades en todos sus puntos, puede ser isótropo o anisótropo, se dice isótropo cuando el cuerpo tiene iguales propiedades en cada dirección, por ejemplo una roca que contenga una chispa de oro no es homogéneo porque existen puntos de diferentes propiedades, punto al interior del oro y punto al exterior. Una roca esquistosa no es isótropa porque las propiedades y el comportamiento varían con la dirección que se considera: la roca se fractura muy fácilmente si es presionada en una dirección perpendicular a los planos de esquistosidad y se tiene que ejercer una fuerza mucho mayor si se quiere fracturarla en una dirección paralela a los planos de esquistosidad (Feijoo, 1997).

La materia no es continua. Si empleamos un microscopio de suficiente resolución podremos apreciar como ésta se compone de multitud de átomos separados entre sí, los cuales a su vez

están formados por un núcleo diminuto y nubes de electrones lejanos a estos. Esta observación es válida para cualquier tipo de cuerpo: sólido, líquido o gaseoso. El estudio basado consiste en estudiar la física de estas partículas y permite conocer todas las propiedades de los cuerpos en teoría. Sin embargo, es tal la complejidad de estas ecuaciones que para obtener resultados, más o menos precisos, resulta imprescindible emplear modelos. En mecánica, que es la disciplina que nos concierne, existe el modelo de “partícula” que Galileo y Newton, entre otros, introdujeron. Según este modelo, la dinámica de sólidos puede estudiarse considerando que estos son puntos dotados de masa. Un modelo de complejidad mayor es el de “sólido rígido”, que incorpora detalles sobre la distribución de la masa y la orientación de los cuerpos. Los dos modelos indicados no describen ni la deformabilidad de los cuerpos, ni la posibilidad de rotura/fallo, ni las diferencias entre distintos materiales, ni los efectos de la temperatura sobre los cuerpos. Para incorporar todos estos aspectos se formula un modelo más complejo, llamado el modelo de “sólido deformable”, que sigue siendo imperfecto e inexacto, pero cuya precisión a la hora de reproducir lo que ocurre con los sólidos reales es mucho mayor que la de la partícula o el sólido rígido (Romero, 2016).

En un cuerpo sometido a un genérico sistema de fuerzas, por cada elemento de superficie δA interior al cuerpo se puede individualizar una fuerza δF y estas dos se correlacionan mutuamente.

Disminuyendo cada vez más δA también δF se vuelve más pequeña. Para dos elementos δA muy pequeños se puede ver que es verificada la siguiente relación:

$$\frac{\delta F}{\delta A} = \delta t$$

t es llamada tensión.

La tensión t es por esto una fuerza distribuida en el interior del cuerpo y tiene la dimensión física de fuerza sobre superficie, o bien de una presión (Figura 1.3). (Feijoo, 1997).

Esto se puede medir en $\text{N/m}^2 = \text{Pascal (Pa)}$.

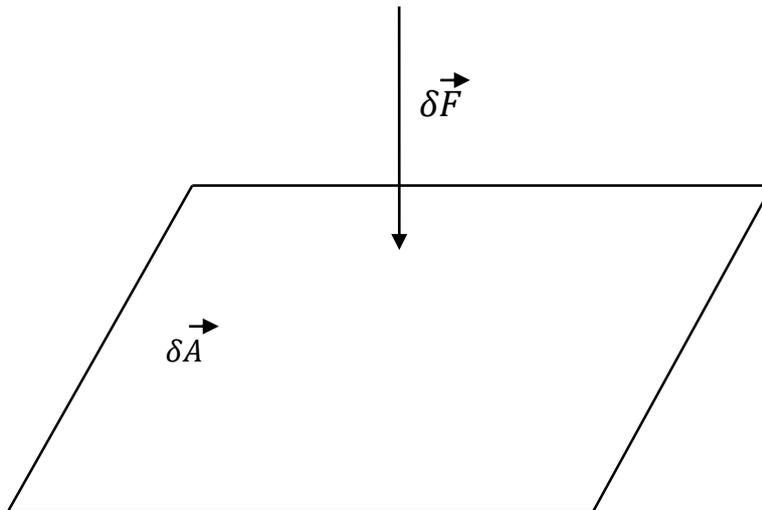


Figura 1. 3 Concepto Físico de Tensión.

De esta forma se ha visto como la tensión es una fuerza distribuida que actúa sobre cada elemento de un área muy pequeña al interior del cuerpo. Consideremos ahora un punto interior al cuerpo y por ese punto se puede pensar en otro plano muy pequeño $\delta A'$ con orientación distinta de δA ; a este plano corresponde una diferente tensión t' .

En cada punto existe una tensión para cada uno de los infinitos planos pequeños que se puedan pensar. Por esto en un punto se tienen infinitas tensiones (Figura 1.4). (Feijoo, 1997).

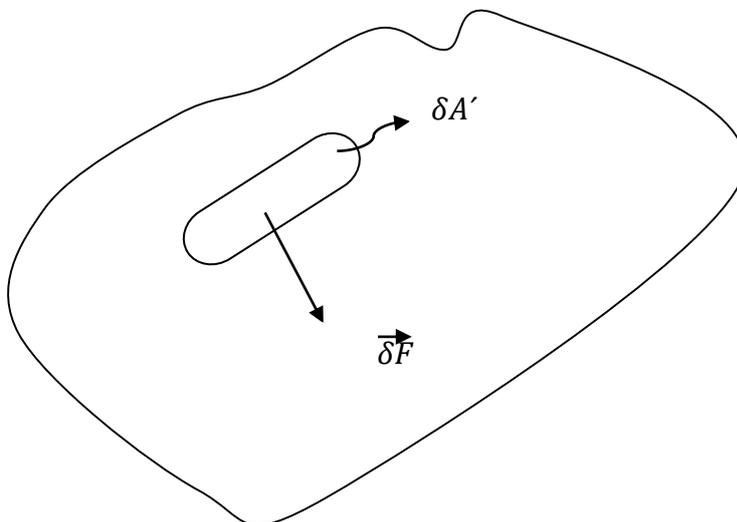


Figura 1. 4 Concepto Físico de Tensión.

Se considera ahora un elemento de superficie interior δA con la correspondiente tensión σ . Esta puede ser descompuesta en dos componentes: σ perpendicular a δA , llamada tensión normal y τ paralela a δA , llamada tensión tangencial o tensión de cizallamiento. (Figura 1.5).

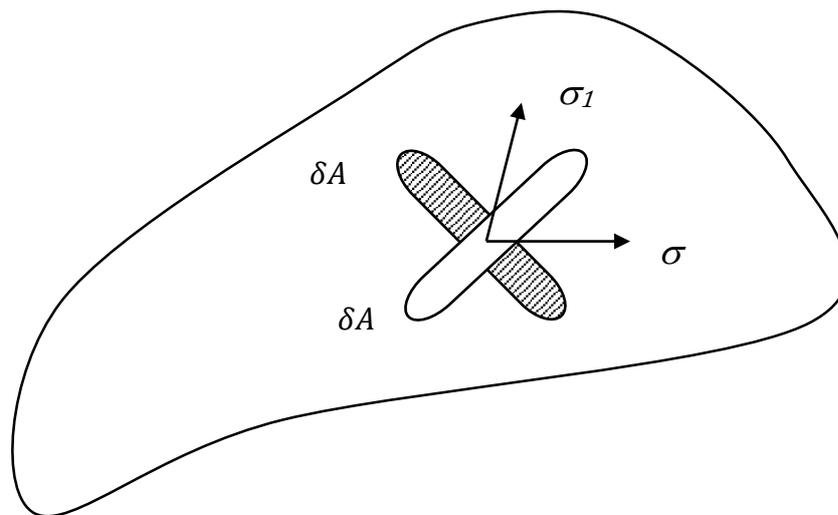


Figura 1. 5 Descomposición de la tensión en sus componentes.

Como la mecánica trata de las fuerzas y su efecto sobre los cuerpos, el primer paso para describir en que consiste el sólido deformable consiste en delimitar qué fuerzas vamos a considerar y cuáles no. En el caso de la partícula, las únicas fuerzas que se admiten son las fuerzas puntuales. En el modelo del sólido rígido, además de las primeras, se admiten pares de fuerzas (Romero, 2016).

El concepto de fuerza interna es central para el estudio de cuerpos deformables y es nuevo, en el sentido de que no existe en los modelos de partículas con masa o en el de cuerpos rígidos. Cuando se estudia un cuerpo deformable sometido a fuerzas externas se deduce que, aunque no se puedan medir, deben de existir fuerzas en el interior del mismo. Estas no se pueden medir porque para ello habría que partir el cuerpo, creando una nueva superficie externa y por tanto dejarían de ser fuerzas internas. Pero, sin duda deben de existir para mantener la cohesión entre sus partículas y para transmitir las fuerzas aplicadas desde el exterior, en la superficie o en el interior (Romero, 2016).

La razón definitiva por la que una pieza o estructura falla no es por la superación de un límite elástico en un punto o región, sino por la aparición y propagación de grietas que, en última instancia, llevan a la fragmentación de esta y a la pérdida completa de su capacidad resistente. El estudio de la nucleación y propagación de grietas es complejo, pero necesario para identificar de forma definitiva la capacidad mecánica de un cuerpo. A diferencia del estudio de la elasticidad, la predicción de la aparición de grietas y el cálculo explícito de su crecimiento no se comprende del todo y sigue siendo tema de investigación. De hecho, el

fenómeno de la fractura tiene mucho que ver con el de pandeo, pues es una inestabilidad en la capacidad resistente de una pieza. Para simplificar el cálculo, la mecánica de la fractura siempre se tomará como punto de partida la existencia de una o más grietas en el sólido (Romero, 2016).

El conjunto de todas las tensiones σ , y por esto de todas las componentes σ y τ , que se pueden encontrar en un punto P para cada pequeñísimo plano δA es llamado estado de tensión en un punto.

1.3 Estado de Tensión Plano – Bidimensional

Un cuerpo en el que todas las tensiones t son vectores paralelos a un mismo plano es sometido a un estado de tensión plano (Feijoo, 1997).

Por ejemplo se puede pensar en una plancha con pequeño espesor como la figura 1.6.

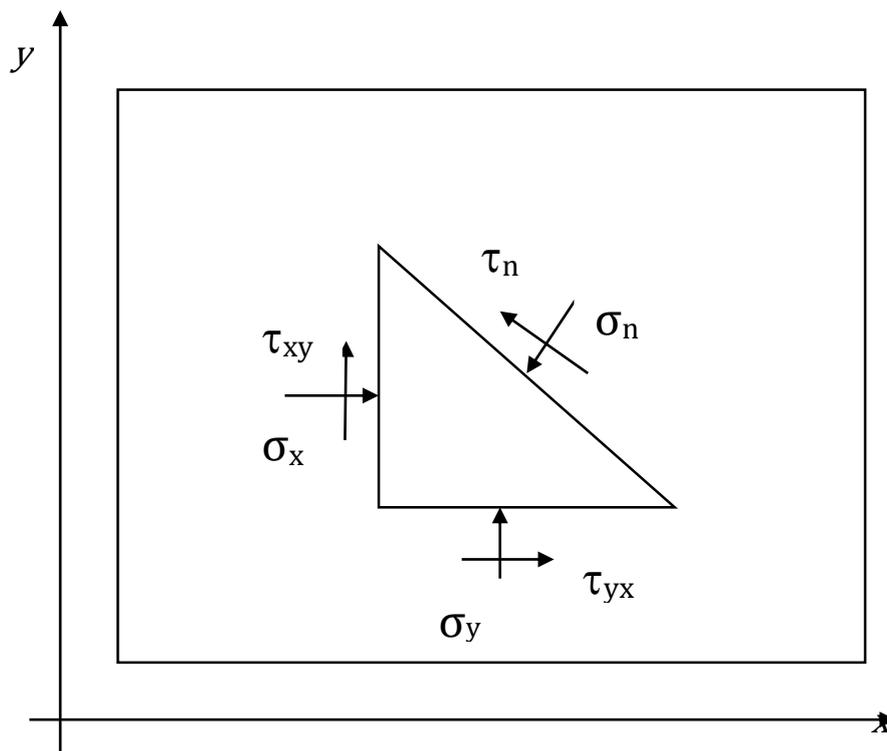


Figura 1. 6 Estado Bidimensional.

Del resultado del análisis de sistemas se comprueba que al plantear las condiciones de equilibrio a un sistema de fuerzas que actúa en una porción del diagrama de cuerpo libre de un elemento que forma parte de una estructura formada por elementos uniaxiales, sólo es posible determinar la resultante de las fuerzas internas en un punto de una sección del

elemento y no la ley que determina la forma en que se distribuyen estas fuerzas internas en la sección (Persico, 2008).

Se considera en esa plancha un punto P y un elemento muy pequeño triangular alrededor de P, en cada lado del triángulo hay tensiones (fuerzas interiores distribuidas que se transmiten desde el triángulo a la plancha), se puede demostrar que si se conocen σ_x , σ_y , $\tau_{xy}=\tau_{yx}$, se pueden calcular: σ_n y τ_n , para cada ángulo α (Feijoo, 1997).

Para conocer las infinitas componentes de tensión σ_n , τ_n que se pueden encontrar en el punto P, son suficientes tres componentes σ_x , σ_y y σ_{xy} , relativas a dos direcciones perpendiculares entre ellas. Las ecuaciones que permiten hacer esto pueden ser obtenidas razonando sobre el equilibrio del pequeño elemento triangular y son las siguientes:

$$\sigma_n = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + 2\tau_{xy} \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\tau_n = \tau_{xy} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) + (\delta y - \delta x) \sin \alpha \cos \alpha$$

Para la demostración de estas ecuaciones observamos en la figura 1.7 el muy pequeño prisma ABC constituidos por material que pertenece a una plancha plana de espesor unitario y utilizaremos las siguientes convenciones:

- Las σ de compresión son positivas
- Las σ de tracción son negativas
- Una tensión normal es de compresión si es directa hacia el interior del elemento
- Para las tensiones de cizallamiento se usan las convenciones expresadas por la figura

Se puede demostrar que: $\tau_{xy}=\tau_{yx}$

Si ΔA es el área de la cara CB, las áreas AC y AB son respectivamente: $\Delta A \cos \alpha$ y $\Delta A \sin \alpha$ (Feijoo, 1997).

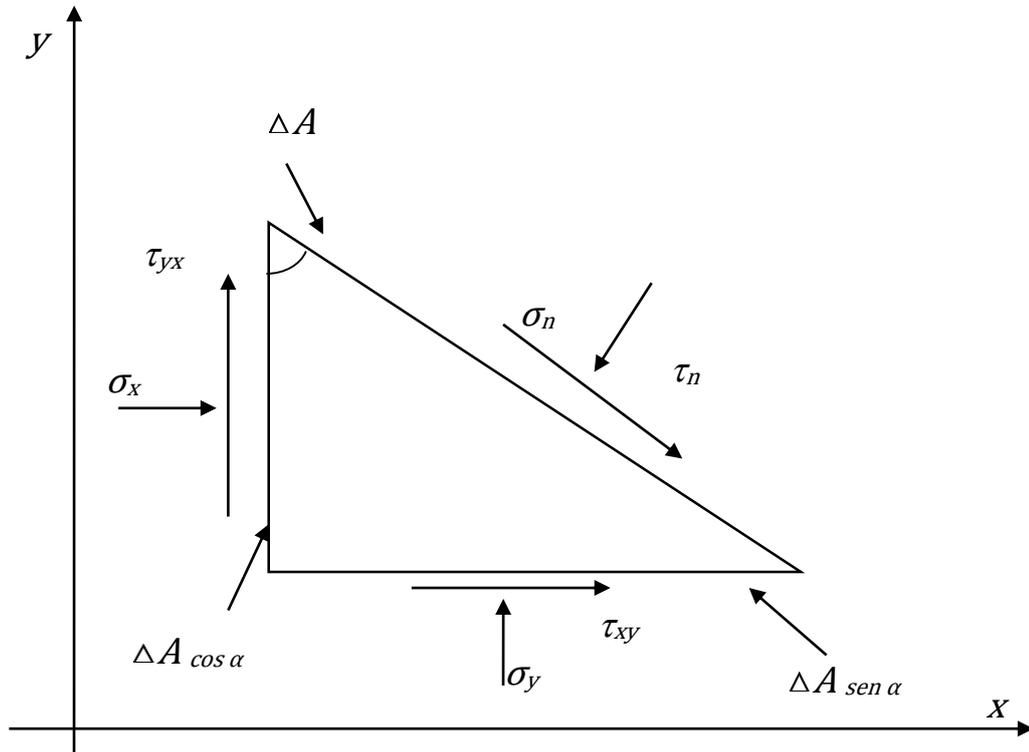


Figura 1. 7 Gráfico para demostración de ecuaciones.

1.4 Estado de Tensión Tridimensional

En general el estado de tensión en un cuerpo es tridimensional. Se ha dicho que un estado de tensión bidimensional puede ser extendido al caso tridimensional. Si para el conocimiento de todas las infinitas tensiones en un punto es bastante conocer las tres componentes σ_x , σ_y , τ_{xy} , en el caso tridimensional se necesita de seis: σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} , tres tensiones normales y tres de cizallamiento.

De la misma manera que para el caso plano se pueden obtener las ecuaciones que, dadas las componentes, permiten de computar las componentes para un plano de orientación cualquiera (figura 1.8).

Las infinitas componentes de tensión en un punto serian imposible de determinar, por esto se utiliza un sistema de referencia cartesiano espacial xyz .

Se recuerda que en el caso plano serán suficientes las tres relativas a un sistema cartesiano plano xy (Feijoo, 1997).

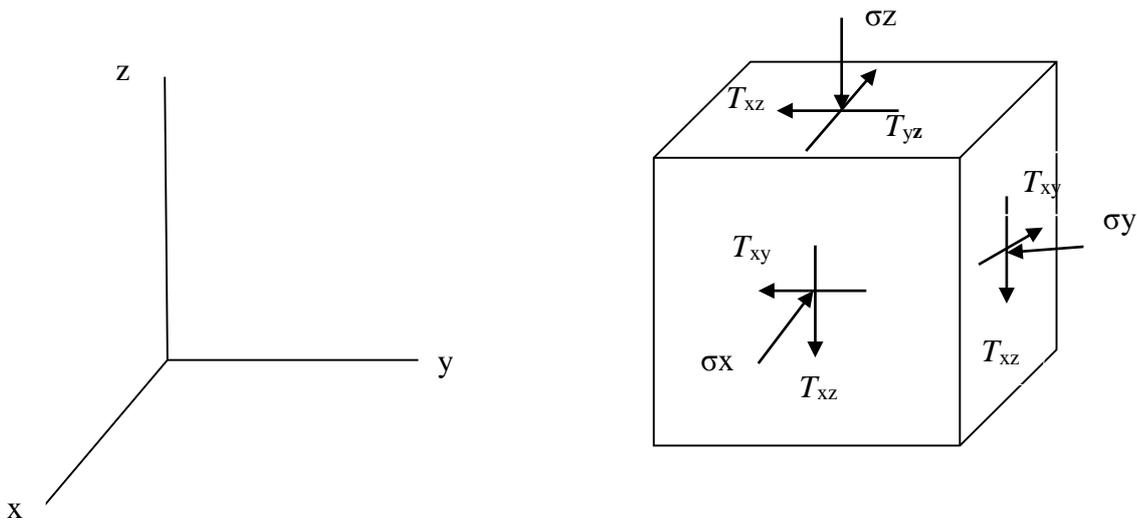


Figura 1. 8 Estado Tridimensional.

Se considera un punto P sometido a un estado de tensión plano (bidimensional), para cada una de las infinitas orientaciones que se pueden pensar en P se tiene una componente normal de tensión y una componente tangencial. Se puede demostrar que existen dos orientaciones ortogonales entre ellas, en las que la tensión de cizallamiento es cero. Estas orientaciones corresponden a las dos componentes máxima y mínima que se tienen en el punto P. Estas dos tensiones normales son llamadas tensiones principales y son:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Que es la máxima, y:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Que es la mínima (Feijoo, 1997).

1.5 Círculo de Mohr.

Desarrollo hecho por Christian Otto Mohr (1835-1918), el círculo de Mohr es un método gráfico para determinar el estado tensional en los distintos puntos de un cuerpo. Entre las tensiones que existen en un cuerpo sometido a un cierto estado de cargas y con unas ciertas restricciones, importan en general las tensiones principales, que son las tensiones que existen sobre ciertos planos del cuerpo, donde las tensiones de corte son nulas. Estas tensiones son de importancia para el estudio de la resistencia mecánica de una pieza. Este método tiene aplicación para estados tensionales en dos y tres dimensiones (Antico, 2008).

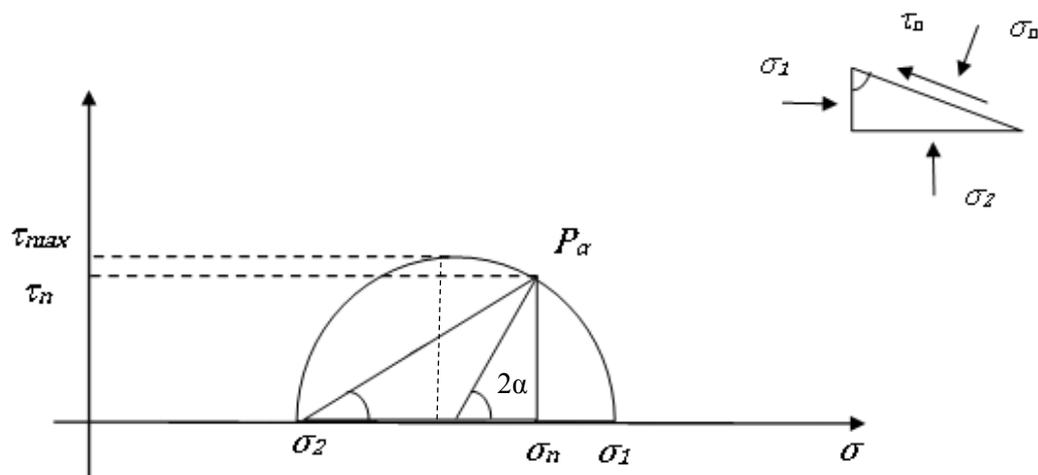


Figura 1. 9 Círculo de Mohr.

Se pueden demostrar que el estado tensional en un punto (se habla aquí del caso plano pero se puede extender el razonamiento al caso espacial), es representable gráficamente con un círculo en el plano σ - τ este tipo de representación es el círculo de Mohr. Cada punto del círculo representa un plano con un par de tensiones, normal σ y tangencial τ .

Se pueden ver dos puntos que pertenecen al eje, caracterizados por $\tau=0$, en los que se representan los planos principales de tensión con las tensiones principales.

El genérico punto del círculo P representa la pareja de componentes, correspondientes al plano inclinado de un ángulo con respecto al plano de tensión máxima. P forma un ángulo al centro igual a 2α . Se observa la máxima tensión de cizallamiento en el punto representado por el círculo y es:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

1.6 Deformaciones

Todo elemento estructural sometido a la acción de cargas se deforma. En la mayoría de los casos las deformaciones son imperceptibles, y deben ser medidas con el auxilio de instrumentos. Podemos definir la deformación de un elemento estructural como una alteración del estado físico debido a una fuerza mecánica externa, a una variación de temperatura, a un cedimiento de apoyos, etc. La deformación puede ser elástica, cuando desaparece al cesar la acción que lo produce, por lo que las partículas elementales del cuerpo vuelven a su posición inicial; y permanente, cuando persiste después de desaparecer la causa que lo ha producido. El elemento en el primer caso tiene un comportamiento elástico y en el segundo un comportamiento plástico o inelástico. En la Naturaleza no existen deformaciones exclusivamente elásticas o exclusivamente permanentes, pues cualquier cuerpo estructural, después de ser deformado, al cesar la acción, no vuelve nunca a las condiciones iniciales; así, aplicando un esfuerzo pequeño a un cuerpo muy poco elástico, la deformación tiende a anularse al menos en parte.

En la práctica diremos que el cuerpo se comporta elásticamente cuando la deformación permanente que sufre el cuerpo es casi imperceptible. Para extendernos sobre las deformaciones de los elementos estructurales, vamos a clasificar los mismos y las cargas que originan las deformaciones (Morales, 2013).

Se puede pensar que un efecto de las tensiones en un cuerpo sea la deformación de este. Por ejemplo se puede considerar un cilindro de hierro (figura 1.10) con un corte transversal de área A; este cilindro es comprimido por una pareja de fuerzas F, dirigidas a lo largo de su eje.

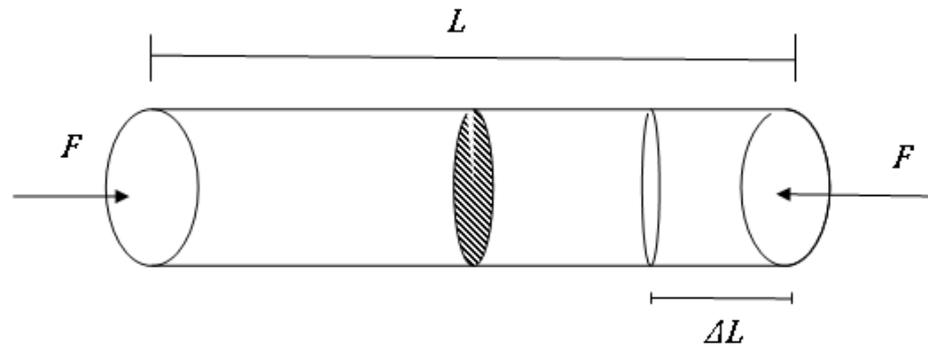


Figura 1. 10 Ejemplo de Deformación.

En el interior del cilindro surgen tensiones normales positivas (>0 porque son de compresión) en dirección del eje, esto produce un acortamiento ΔL del cilindro. Si realizamos la relación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Obtenemos ε que es la deformación normal del cilindro. Suponiendo un acortamiento debido a cargas de acotamiento. (Morales, 2013)

Para los materiales comunes la deformación unitaria es muy pequeña porque $\Delta L \lll L$. Para introducir un trato más formal se considera, un cuerpo no todavía deformado, un segmento muy pequeño PQ de longitud δL muy pequeña (figura 1.11).

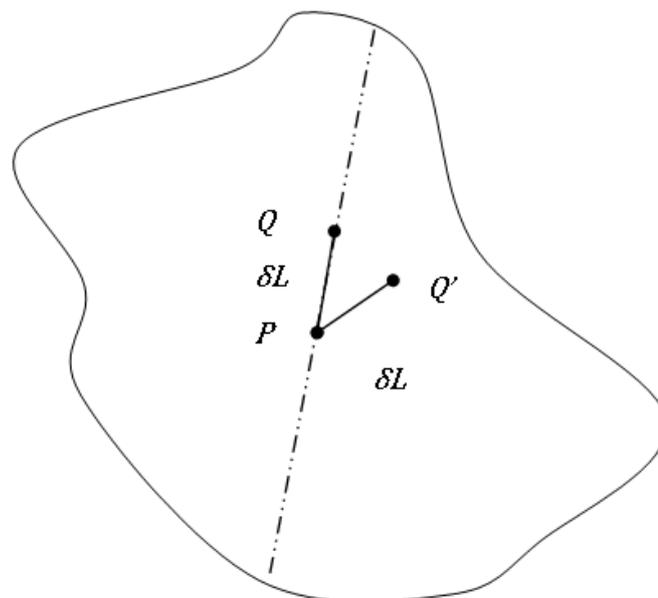


Figura 1. 11 Segmento sin deformación.

Para efecto de la deformación del cuerpo este sufre una rotación más una traslación y un acortamiento, o alargamiento $\delta\varepsilon$.

Si realizamos la relación:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta\varepsilon}{\delta L}$$

Obtenemos ε_x que es la diferencia normal en la dirección xx en el punto P.

Si se consideran dos direcciones perpendiculares xx , yy , y los dos segmentos muy pequeños PQ y PR sobre éstas (figura 1.12), por efecto de la deformación del cuerpo el ángulo entre los dos segmentos, en el estado inicial igual a 90° , varia.

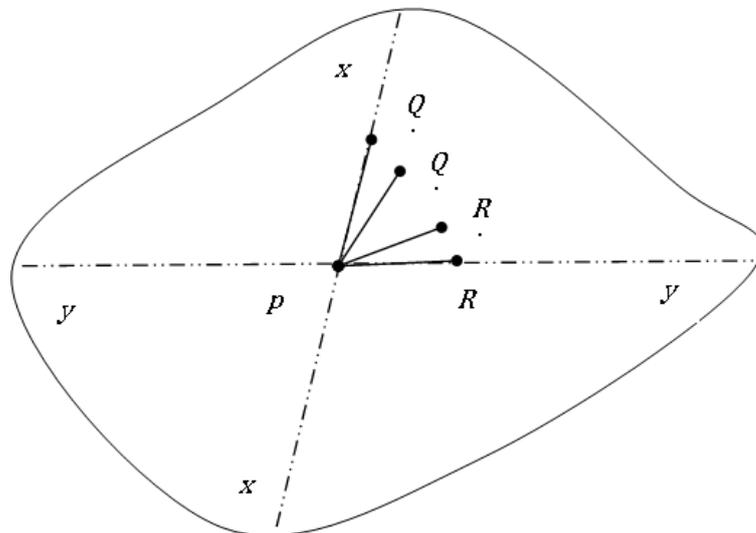


Figura 1. 12 Segmentos deformados en dos direcciones.

Una medida de variación viene dada por la llamada deformación de cizallamiento, γ_{xy} .

Análogamente lo que se ha visto para el estado de tensión en un punto, constituido por un conjunto de infinitas componentes de tensión variables con la orientación del plano que se considera, en un punto existen infinitas deformaciones variables en razón de la dirección que se considere (estado de deformación en un plano). Para el conocimiento de estas deformaciones es suficiente que se conozcan las tres deformaciones referidas a dos direcciones perpendiculares xx y yy .

Se necesita por lo tanto, según lo expuesto, para definir las infinitas deformaciones (normales y de cizallamiento) en un punto, de conocer solo tres componentes de deformación: ε_x , ε_y , γ_{xy} .

Muchos resultados encontrados para los estados de tensión son válidos para los estados de deformación, en particular existen en cada punto de un cuerpo dos deformaciones principales, la máxima ε_1 y la mínima ε_2 , y es válido además la propiedad: $\gamma_{12}=0$.

Las direcciones de deformación principales son perpendiculares entre ellas, como para el estado de tensión.

Se observa al fin que implícitamente se ha tratado hasta ahora el estado de deformación plano, bidimensional.

Para el conocimiento completo del estado de deformaciones en un punto, se necesita pero, en el caso tridimensional, de las seis componentes: ε_x , ε_y , ε_z , γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz} , relativas a tres direcciones mutuamente perpendiculares (Feijoo, 1997).

Las deformaciones del material pertenecen al grupo de las denominadas lesiones mecánicas. Son consecuencia de procesos mecánicos, a partir de fuerzas externas o internas que afectan a las características mecánicas de los elementos constructivos. En el caso de las deformaciones, son una primera reacción del elemento a una fuerza externa, al tratar de adaptarse a ella.

La mecánica de los sólidos deformables estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos deformables ante diferentes tipos de situaciones como la aplicación de cargas o efectos térmicos. Estos comportamientos, más complejos que el de los sólidos rígidos, se estudian en mecánica de sólidos deformables introduciendo los conceptos de deformación y de tensión mediante sus aplicaciones de deformación. Una aplicación típica de la mecánica de sólidos deformables es determinar a partir de una cierta geometría original de sólido y unas fuerzas aplicadas sobre el mismo, si el cuerpo cumple ciertos requisitos de resistencia y rigidez. Para resolver ese problema, en general es necesario determinar el campo de tensiones y el campo de deformaciones del sólido.

Se tiene la siguiente clasificación para el comportamiento de la deformación de materiales:

- Comportamiento elástico, se da cuando un sólido se deforma adquiriendo mayor energía potencial elástica y, por tanto, aumentando su energía interna sin que se produzcan transformaciones termodinámicas irreversibles. La característica más importante del

comportamiento elástico es que es reversible: si se suprimen las fuerzas que provocan la deformación el sólido vuelve al estado inicial de antes de aplicación de las cargas. Dentro del comportamiento elástico hay varios subtipos:

- Elástico lineal isótropo, como el de la mayoría de metales no deformados en frío bajo pequeñas deformaciones.
- Elástico lineal no-isótropo, la madera es material ortotrópico que es un caso particular de no-isotropía.
- Elástico no-lineal, ejemplos de estos materiales elásticos no lineales son la goma, el caucho y el hule, también el hormigón o concreto para esfuerzos de compresión pequeños se comporta de manera no-lineal y aproximadamente elástica.
- Comportamiento plástico: aquí existe irreversibilidad; aunque se retiren las fuerzas bajo las cuales se produjeron deformaciones elásticas, el sólido no vuelve exactamente al estado termodinámico y de deformación que tenía antes de la aplicación de las mismas. A su vez los subtipos son:
 - Plástico puro, cuando el material "fluye" libremente a partir de un cierto valor de tensión.
 - Plástico con endurecimiento, cuando para que el material acumule deformación plástica es necesario ir aumentando la tensión.
 - Plástico con ablandamiento.
- Comportamiento viscoso: que se produce cuando la velocidad de deformación entra en la ecuación constitutiva, típicamente para deformar con mayor velocidad de deformación es necesario aplicar más tensión que para obtener la misma deformación con menor velocidad de deformación pero aplicada más tiempo. Aquí se pueden distinguir los siguientes modelos:
 - Visco-elástico, en que las deformaciones elásticas son reversibles. Para velocidades de deformaciones arbitrariamente pequeñas este modelo tiende a un modelo de comportamiento elástico.
 - Visco-plástico, que incluye tanto el desfase entre tensión y deformación por efecto de la viscosidad como la posible aparición de deformaciones plásticas irreversibles.

El límite elástico, es la tensión máxima que un material elástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican tensiones superiores a este límite, el material experimenta deformaciones permanentes y no recupera su forma original al retirar las cargas.

La propiedad elástica de los materiales está relacionada, como se ha mencionado, con la capacidad de un sólido de sufrir transformaciones termodinámicas reversibles e independencia de la velocidad de deformación (los sólidos viscoelásticos y los fluidos, por ejemplo, presentan tensiones dependientes de la velocidad de deformación). Cuando sobre un sólido deformable actúan fuerzas exteriores y éste se deforma se produce un trabajo de estas fuerzas que se almacena en el cuerpo en forma de energía potencial elástica y por tanto se producirá un aumento de la energía interna. El sólido se comportará elásticamente si este incremento de energía puede realizarse de forma reversible, en este caso se dice que el sólido es elástico.

Un caso particular de sólido elástico se presenta cuando las tensiones y las deformaciones están relacionadas linealmente. Cuando eso sucede se dice que el sólido es elástico lineal. La teoría de la elasticidad lineal es el estudio de sólidos elásticos lineales sometidos a pequeñas deformaciones de tal manera que además los desplazamientos y deformaciones sean "lineales", es decir, que las componentes del campo de desplazamientos u sean muy aproximadamente una combinación lineal de las componentes del tensor deformación del sólido. En general un sólido elástico lineal sometido a grandes desplazamientos no cumplirá esta condición (Ramírez, 2013).

1.7 Ley de Hooke.

Robert Hooke en su libro de potencia restitutiva (1679), estableció la famosa ley que relaciona fuerzas y deformaciones. Con un sencillo dispositivo en el cual a un plato se le van agregando pesos y se van midiendo las deformaciones producidas progresivamente en el resorte encontró una proporcionalidad directa entre los pesos aplicados y las deformaciones.

A partir de un ensayo en el laboratorio puede graficarse la variación de la Fuerza vs la Deformación total:

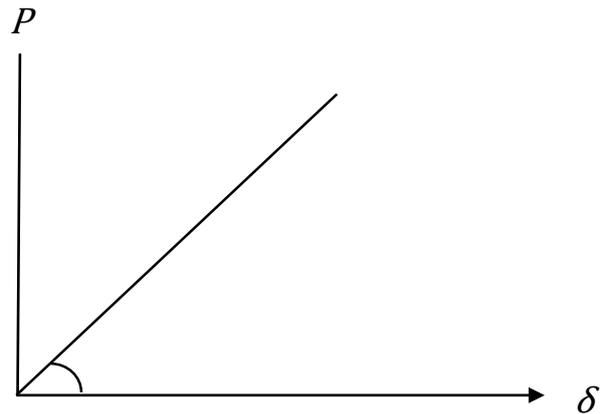


Figura 1. 13 Relación Fuerza vs Deformación.

Ley establecida originalmente por Hooke: $P = k \delta$

Sin embargo, para estudiar las propiedades de un material, deben relacionarse cantidades unitarias (esfuerzo σ y deformación unitaria ϵ) de tal manera que en la ley queden obviadas el área y la longitud de la probeta ensayada.

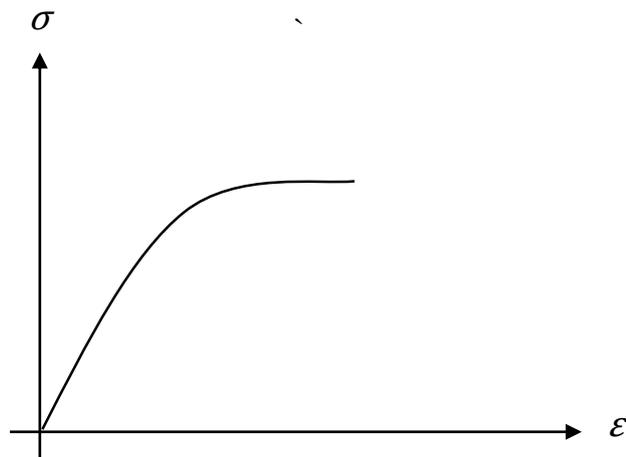


Figura 1. 14 Relación Esfuerzo vs Deformación.

Como se ve en la figura, a medida que aumenta el esfuerzo se incrementa la deformación unitaria del material que se está ensayando, pudiendo de esta forma obtenerse las propiedades mecánicas de los materiales a partir de esta gráfica Esfuerzo-Deformación.

La pendiente inicial de la gráfica nos dice cómo varían las deformaciones unitarias al incrementarse los esfuerzos. Para varios materiales esta primera parte de la gráfica es lineal presentándose por tanto una relación directa entre Esfuerzo y Deformación.

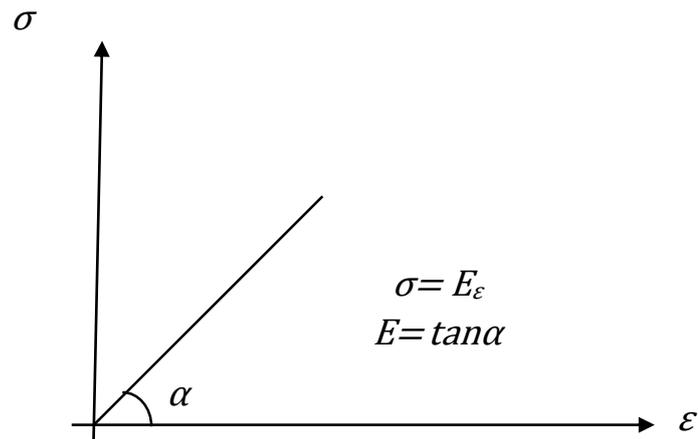


Figura 1. 15 Relación Esfuerzo vs Deformación.

Si escribimos la ecuación de la recta obtendremos la expresión actual de la Ley de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Siendo E, la pendiente de la recta. Este valor que es característico de cada material se conoce como el módulo de elasticidad o módulo de Young del material y nos dice que tan rígido es un material.

La rigidez, la resistencia y la ductilidad son propiedades mecánicas de los materiales:

- Rigidez: Capacidad de oponerse a las deformaciones
- Resistencia: Capacidad de oponerse a la rotura
- Ductilidad: Capacidad de deformarse antes de romperse.

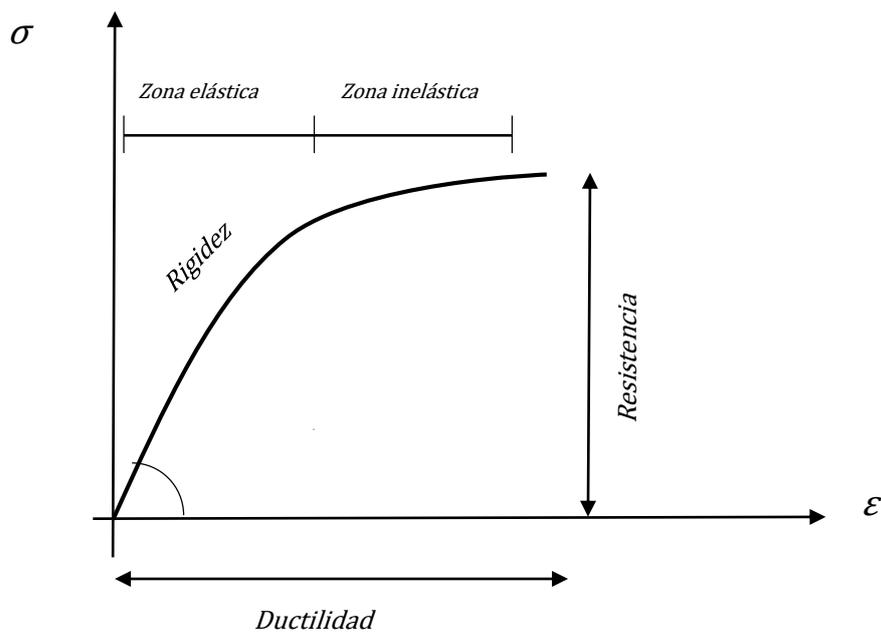


Figura 1. 16 Relación Esfuerzo vs Deformación Ley de Hooke.

A partir de la Ley de Hooke puede calcularse la deformación total que sufrirá un elemento sometido a fuerza axial.

Según la Ley de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$P/A = E \delta/L$$

$$\delta = PL/AE$$

Con esta expresión puede calcularse la deformación conociendo la carga P la longitud de la barra L, la sección transversal A y el módulo de elasticidad E (en la zona elástica). (Salazar, 2007).

CAPITULO II

MACIZOS ROCOSOS Y RESISTENCIA A LA COMPRESION

El comportamiento mecánico de una masa de roca in situ es diferente de una masa de suelo. Los dos motivos fundamentales que actúan juntos son los siguientes:

- El material rocoso es mucho más fuerte y resistente que el material de suelo.
- Una masa rocosa presenta casi siempre sistemas de debilidades estructurales (fracturas, diaclasas, fisuras, juntas, discontinuidades, fallas de varios tamaños).

Por este motivo se tiene que distinguir entre macizo rocoso y material rocoso.

Se habla de material rocoso entendiendo el material intacto, es decir un testigo o muestra de pequeño tamaño generalmente constituido por material sin fracturas. Se habla de macizo rocoso a todo el conjunto del material rocoso y de las discontinuidades presentes en el. Un macizo rocoso es por esto constituido por muchos bloques de material rocoso separados por discontinuidades, fisuras, etc.

2.1 Clasificación de los Macizos Rocosos

Actualmente, las clasificaciones geomecánicas son una herramienta de uso generalizado en el proyecto y construcción de túneles y, gracias a ellas, es posible obtener un mejor conocimiento, interpretación y aplicación de los datos geológicos y geotécnicos. Asimismo, dichas clasificaciones son criterios muy útiles que coadyuvan a la representación del comportamiento geomecánico de los macizos rocosos, ya que permiten realizar una primera aproximación de los parámetros mecánicos de diseño, así como de los posibles sistemas de soporte, estabilización y reforzamiento adecuados para el túnel.

Las clasificaciones geomecánicas modernas más difundidas en la ingeniería de túneles son las conocidas como Rock Mass Rating o sistema RMR de Z.T. Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1984, 1989), la clasificación del Instituto Geotécnico Noruego, o sistema Q, desarrollado por Barton, Lien y Lunde (1974) y el Geological Strength Index (GSI) desarrollado por Hoek (1985). Las primeras dos clasificaciones se basan en los datos de recuperación de núcleos (RQD, Deere, 1966), número de familias de discontinuidades, rugosidad y estado general de las juntas, presencia de agua y adicionalmente pueden

considerar la resistencia de la roca matriz, la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación y el tipo de obra de que se trate. (Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera, 2016)

En muchos proyectos de ingeniería la clasificación de los macizos rocosos se realiza inicialmente para determinar la estabilidad de las obras a ejecutar. Por ejemplo a menudo las carreteras atraviesan macizos rocosos y los materiales excavados en ellos deben ser utilizados en la construcción de la misma, siempre que sea posible, para tener los mínimos impactos y vertederos posibles. Por esta razón, es necesario tener un sistema de clasificación de los macizos rocosos. Estas clasificaciones son conocidas como clasificaciones geomecánicas y derivan de la diferencia existente entre las propiedades de la roca por su naturaleza y las del macizo, que presenta diferentes grados de fracturación y meteorización. Las clasificaciones geomecánicas son sistemas de valoración del comportamiento del terreno rocoso. Se basan en calificar numéricamente las propiedades y características específicas de la roca en un emplazamiento determinado y posteriormente obtener una calificación final como la suma de las valoraciones parciales.

Es un sistema de evaluación de la meteorización adoptado por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas. El grado de meteorización de un afloramiento rocoso es una característica fundamental de este, porque determina características tan importantes como la excavabilidad o la estabilidad de los desmontes excavados en él.

Este sistema de evaluación evalúa la meteorización en seis grados que van desde la roca sana (I) hasta el suelo residual (VI).

Tabla 2. 1 Clasificación según el Grado de Meteorización.

Grado de meteorización	Termino descriptivo	Descripción
VI	Suelo residual	Todo el material se ha convertido en suelo cambiar de emplazamiento. Se ha perdido la estructura y la textura. Cambio de volumen apreciable
V	Completamente meteorizado	El material está completamente meteorizado, pero mantiene intacta la estructura original de la roca
IV	Fuertemente meteorizado	Se ha meteorizado más del 50 por 100 del material. La roca, que puede estar sana o decolorada, esta fragmentos discontinuos.
III	Moderadamente meteorizado	Se ha meteorizado menos del 50 por 100 del material. La roca, que puede estar sana o decolorada, presentados en grandes fragmentos.
II	Ligeramente meteorizado	El material presenta un aspecto decolorado u oxidado tanto en las discontinuidades como en la propia roca. La resistencia de la roca es algo menos que la de la roca sana.
I	Sano	No se aprecia ningún signo visible de meteorización. Puede admitirse una ligera decoloración

Esta clasificación propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas se basa también en las condiciones de la roca, como se puede ver a continuación en la tabla adjunta.

Tabla 2. 2 Clasificación de las Rocas según la ISRM.

Clase y Definición	Descripción
W1 – Fresca	Ningún signo de alteración visible; tiene un leve cambio de coloración sobre las principales superficies de discontinuidad.
W2- Levemente Alterada	El material rocoso esta en todo o en parte tomado por la alteración y levemente menos resistente que el material fresco.
W3- Moderadamente Alterada	Menos de la mitad del material rocoso está descompuesto y/o desintegrado en forma de grupos de arena o tierra.
W4- Profundamente Alterada	Más de la mitad del material rocoso está descompuesto o desintegrado en forma de granos de arena o tierra
W5- Completamente Alterada	Todo el material rocoso está descompuesto y/o desintegrado en forma de granos de arena o tierra.

El índice RQD (Rock Quality Designation) establece la calidad de la roca de manera cuantitativa, directamente a partir de los núcleos extraídos de los sondeos mecánicos, a través de la correlación con la frecuencia de las discontinuidades en un afloramiento o frente de roca o mediante correlaciones con velocidades de onda sísmica p . Se define como la relación (en por ciento) de la longitud total de núcleos sanos de 10 cm, o más de longitud en un tramo de 1.0 m de sondeo. Para la determinación del RQD, la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas recomienda que los tamaños de los núcleos extraídos sean al menos (54.7 mm) y obtenidos con barril de doble tubo y broca de diamante. Las fracturas artificiales (producidas por la barrenación) deben ser ignoradas.

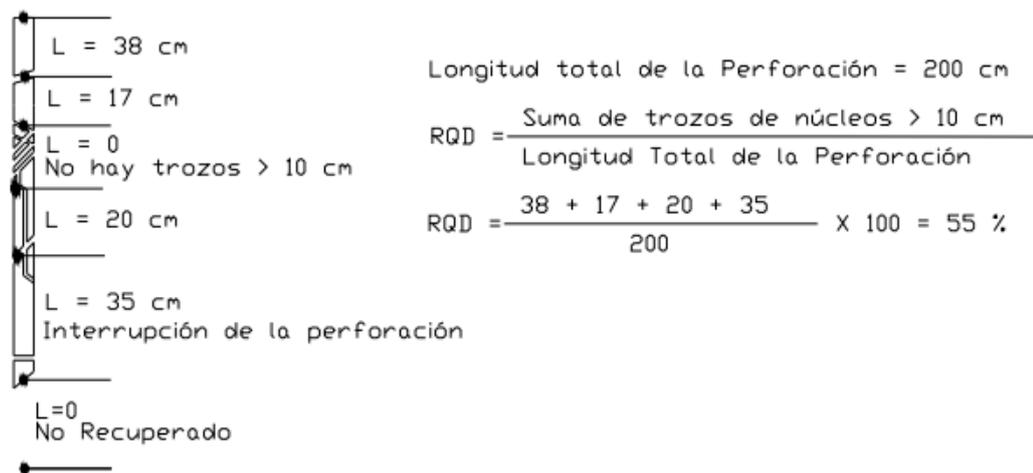


Figura 2. 1 Cálculo de RQD.

$$RQD = \frac{\text{Longitud total de los testigos } \geq 10\text{cm}}{\text{Longitud total perforada}} * 100$$

Palmström sugirió que, cuando el núcleo no es disponible, pero son visibles las trazas de las discontinuidades en la superficie expuesta, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen.

Para los macizos rocosos que son libres de rellenos arcillosos en sus discontinuidades y con su respectivo equipo se puede obtener los datos necesarios del RQD, ya que, con el número

de juntas o discontinuidades presentes en 1m^3 de roca, denominamos a estas juntas como J_v , y si este es mayor a 4,5 se utiliza la siguiente fórmula.

$$RQD = 115 - 3.3 * J_v$$

Si J_v es menor a 4.5 la siguiente relación:

$$RQD = 100$$

Si en un m^3 de roca se dan 1 a 4 juntas el valor del RQD es del 100%, si hay 35 o más juntas el valor de RQD es de 0%, y para otros valores que vayan de 5 a 34 se realiza el determinado cálculo de RQD.

2.2 Rock Mass Rating (RMR)

Según el Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera del 2016, la clasificación RMR ha sido desarrollada por Bieniawski entre los años 1972 a 1989 y está basada en mediciones de campo de más de 300 casos de túneles, cavernas y cimentaciones en el mundo. Esta clasificación toma en cuenta seis parámetros básicos que son:

- 1) Resistencia de la roca inalterada (usando la clasificación de la resistencia a la compresión uniaxial de Deere y Miller).
- 2) Estado de las fisuras (abertura, continuidad, rugosidad, estado de las paredes, relleno en fisuras).
- 3) Espaciamiento de las fisuras.
- 4) El R.Q.D. (índice de la calidad de la roca, Deere).
- 5) Las condiciones del agua subterránea.
- 6) La orientación de las discontinuidades respecto a la excavación.

Cada uno de estos parámetros tiene un valor numérico que se suma o resta definiendo cinco categorías de calidad de roca, de acuerdo con la Tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Clasificación de las rocas según el RMR.

RMR	CLASE	CALIDAD
100 a 81	I	Muy buena
80 a 61	II	Buena
60 a 41	III	Mediana
40 a 21	IV	Mala
< 20	V	Muy mala

Tabla 2. 4 Puntajes para determinación del RMR, primera etapa.

PARAMETRO		RANGO DE VALORES						
RESISTENCIA AL MATERIAL INTACTO	Indice de point Load Test-Is (50)	< 8 Mpa	4 a 8 Mpa	2 a 4 Mpa	1 a 2 Mpa	En estos bajos valores utilizar RCU		
	Resistencia a la compresión Uniaxial	< 200 Mpa	100 a 200 Mpa	60 a 100 Mpa	25 a 60 Mpa	10 a 25 Mpa	3 a 10 Mpa	1 a 3 Mpa
PUNTAJE		15	12	7	4	2	1	0
RQD		90 a 100	75 a 90	50 a 75	25 a 50	< 25		
		%	%	%	%	%		
PUNTAJE		20	17	13	8	3		
DISTANCIA ENTRE DISCLASAS		> 3	1 a 3	0,3 a 1	50 a 300	<50		
		M	M	m	mm	mm		
PUNTAJE		30	25	20	10	5		
CONDICIONES DE DIACLASAS		A	B	C	D	E		
PUNTAJE		25	20	12	8	0		
CONDICIONES HIDROLOGICAS		Caudal de agua en 10 m de túnel	0	<25	25 a 125	> 125		
			Lt/min	Lt/min	Lt/min	Lt/min		
			0	0 a 0,2	0,2 a 0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente seco	Humedo / agua intenso	Presión Modera	Problema de agua		
PUNTAJE			10	7	4	0		

Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: (Feijoo, 1997)

De los parámetros propuestos en la clasificación RMR, por ahora definiremos del 3 al 6 únicamente, ya que el índice RQD ha sido ya definido y la Resistencia a la Compresión Uniaxial la definiremos en el siguiente punto.

Las propiedades geomecánicas del macizo rocoso son muy importantes, ya que influyen directamente en las voladuras en lo que respecta a las variables de diseño.

Las discontinuidades que se presenten en la roca afectarán la resistencia, permeabilidad y la durabilidad del estrato. Por lo que es de suma importancia que se evalúen la geometría, naturaleza, estado y la condición en la que se encuentran las discontinuidades, por lo que ahí se definiría la estructura del macizo rocoso (Jaramillo, 2017).

El macizo rocoso también exige evaluar otros factores más como sería el origen de los rellenos, la cantidad de agua presente, revestimiento y tipo de material en las paredes, aberturas, rugosidad, persistencia y número de familias presente en las discontinuidades.

La evaluación media entre las discontinuidades o juntas se la determina en la dimensión del bloque típico. Si el macizo rocoso presenta la densidad de discontinuidades y saber el estado de fracturación del macizo rocoso, esta se la realiza colocando un hilo formando una recta horizontal de una longitud adecuada, en el cual se van tomando medidas de separación entre junta y junta, para luego de todos los valores obtenidos sacar un promedio de ellos (Jaramillo, 2017).

La separación o el espaciamiento de las discontinuidades estos se clasifican según la tabla que se observa a continuación:

Tabla 2. 5 Parámetro: Separación de las discontinuidades.

Descripción	Espaciado de las Juntas	Tipo de Macizo Rocosos
Muy Separadas	>2 m	Sólido
Separadas	0,6 – 2 m	Masivo
Moderadamente juntas	200 – 600 m	En bloques
Juntas	60 – 300 m	Fracturado
Muy Juntas	< 60 mm	Machacado

Fuente: (Feijoo, 1997)

Siendo un factor importante para el estudio del macizo rocoso, las fracturas o las fallas las cuales se puedan reconocer de varias maneras. Si una falla o fractura está expuesta en un farallón, en el corte de una carretera, o en una labor minera, se las puede observar fácilmente y obtener datos precisos concernientes a su posición y a la separación de los estratos dislocados (Billings, 1974).

Al momento de obtener datos en campo la observación puede no ser muy real, por lo que se debe realizar un análisis completo de la falla o fractura. En algunos casos se puede extraer alguna información sobre la falla o fractura pero puede resultar un tanto complicado obtener datos completos sobre el análisis (Jaramillo, 2017).

La condición de las fracturas considera la separación o abertura de las discontinuidades, su rugosidad, condición mecánica de las caras si estas son suaves o duras y así mismo si estas presentan material de relleno entre ellas. El dato mecánico de la separación de las juntas es que estas están presentes de forma lisa de forma transversal, sin relleno en ellas y sin rugosidades, paredes de diaclasas duras (Jaramillo, 2017).

Este es un dato muy importante el cual se debe tomar en consideración como es la influencia del agua en el macizo rocoso ya que este influye en la estabilidad, para el cual se recomienda realizar un examen del estado hidrológico del mismo. Esta evaluación varía desde completamente seco hasta problemas de aguas graves.

Al momento de realizar una excavación es necesario saber el rumbo, dirección de buzamiento, rumbo de buzamiento, sabiendo esto se divide en tres categorías:

- Rumbo perpendicular al eje de la excavación.
- Rumbo paralelo al eje de la excavación.
- Angulo de buzamiento menos a 20° independiente del rumbo.

Si el rumbo es perpendicular al eje de la excavación se elegiría las siguientes opciones:

- Dirección de buzamiento en sentido de la excavación.
- Dirección de buzamiento en contra de la excavación.

El valor del ángulo de buzamiento se establecerá a cual categoría pertenece el problema, si el valor del ángulo de buzamiento está dividido en dos opciones entre 20° y 45° y entre 45° y 90° . Si se opta por la segunda alternativa se observara únicamente el valor del ángulo de buzamiento y se establecerá su categoría,

Y la fractura o falla tiene un ángulo de buzamiento menor a 20° la categoría siempre será desfavorable (Jaramillo, 2017). Tabla 2.4

Determinados estos parámetros se procede a la evaluación del macizo rocoso en términos de RMR, tipo de Roca o Clase de Roca, tiempo de Autosostenimiento e incluso el tipo de fortificación para el caso de túneles. Esta valoración se la puede observar en las tablas 2.6 a 2.8.

Tabla 2. 6 Clasificación para RMR.

Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 2. 7 Tiempo de Autosostenimiento.

Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 2. 8 Tipo de fortificación.

Corrección por la orientación de las discontinuidades						
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

2.3 Resistencia a la Compresión Simple o Uniaxial

Es una medida de resistencia de la matriz rocosa, la cual representa el esfuerzo de compresión axial máximo que puede soportar una muestra de material antes de fracturarse. Generalmente el ensayo se realiza sobre cubos o probetas cilíndricas de roca intacta con un diámetro recomendable de 50 milímetros (Almeida, 2018).

$$R.C.U. = \frac{\text{Fuerza a la que falla la roca}}{\text{Area de aplicacion de la fuerza}}$$

De acuerdo a la estimación en el terreno (Hoeck, 1999) la roca es resistente, en función de que un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico, correspondiendo a un valor de 50 a 100 MPa (tabla 2.9). De acuerdo a una clasificación ingenieril del tipo de roca se ha tomado un valor entre 55 a 110 Mpa (tabla 2.10).

Tabla 2. 9 Clasificación de las rocas por estimación con martillo de geólogo.

Clase (a)	Clasificación de la roca según su resistencia	Resistencia uniaxial (Mpa)	Índice de carga puntual (Mpa)	Estimación en terreno de la resistencia	Ejemplos
R6	Extremadamente Resistente	>250	>10	Golpes de martillo geológico solo causan descostramiento superficiales en la roca.	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, granito, cuarcita.
R5	Muy Resistente	100 - 250	4 - 10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse.	Anfibolita, arenisca, basalto, grabo, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba.
R4	Resistente	50 - 100	2 - 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.	Caliza, marmol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras.
R3	Moderadamente Resistente	25 - 50	1 - 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe de martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarras, limolitas.
R2	Débil	5 - 25	(b)	Un golpe con la punta del martillo geológico deja una indentacion superficial. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	Muy débil	1 - 5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas.	Roca muy alterada o muy meteorizada.
R0	Extremadamente Débil	0.25 - 1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Salbanda arcillosa dura.

Fuente: (Feijoo, 1997)

Tabla 2. 10 Clasificación Ingenieril de las rocas.

Clase	Descripción	Resistencia a la compresión uniaxial		Tipos de roca
		(PSI)	(Mpa)	
A	Resistencia muy alta	> 32.000	= 220	Cuarcitas, diabasas. Mayoría de rocas ígneas. Ciertas rocas metamórficas. Areniscas frágilmente cementadas.
B	Resistencia alta	16.000 - 32.000	= 110 a = 220	Lulitas resistentes. Mayoría de calizas. Ciertas dolomitas
C	Resistencia media	8.000 - 16.000	= 5 a = 110	Algunas lulitas. Areniscas y calizas porosas. Esquistos y rocas metamórficas.
D	Resistencia baja	4.000 - 8.000	= 28 a = 55	Rocas porosas de baja densidad. Areniscas deleznales. Tufas y lulitas arcillosas. Rocas meteorizadas y químicamente alteradas de cualquier litología.
E	Resistencia muy baja	< 4.000	< 28	

Fuente: (Feijoo, 1997)

La resistencia a la compresión simple se mide por sus valores que van desde 10 a 2000 Kg/cm², siendo esto una ayuda para determinar la resistencia de la roca es decir si esta es muy baja o la resistencia es muy alta.

También se puede representar el tipo de roca que es gracias a su petrografía; sin embargo es difícil la determinación de resistencia por el cual se ha logrado desarrollar un tipo de prueba menos complicada llamada Is50, siendo esta de bajo costo y pudiendo obtener datos aproximados.

Dentro de las propiedades físicas se incluyen densidad, porosidad, permeabilidad a líquidos y gases, capacidad calorífica, conductividad y expansión térmicas, etc. Entre las propiedades químicas pueden incluirse la resistencia a soluciones ácidas y alcalinas, y a las reacciones inducidas por la presencia de sales. Las propiedades mecánicas incluyen la resistencia a la compresión, tensión, flexión e impacto y penetración por otro cuerpo y por otras acciones que involucran la generación de fuerzas, como la cristalización de hielo y

sales en el interior del sistema poroso de los materiales y los cambios volumétricos de los mismos debidos a cambios de temperatura. (Agcasco, 2007).

La resistencia a la compresión es la carga (o peso) por unidad de área a la que el material falla (se rompe) por fracturación por cizalla o extensional (figura 2.2). Esta propiedad es muy importante en la mecánica de materiales, tanto en situación no confinada (uniaxial) como confinada (triaxial). Dado que los materiales cerca de la superficie terrestre, incluyendo los edificios, suelen estar sometidos a condiciones no confinadas, consideraremos exclusivamente esta situación. En este caso, la resistencia a la compresión uniaxial (longitudinal) se mide en una prensa hidráulica que registra el esfuerzo compresor aplicado sobre una probeta de material en una dirección del espacio, y la deformación lineal inducida en esa misma dirección. (Agcasco, 2007).

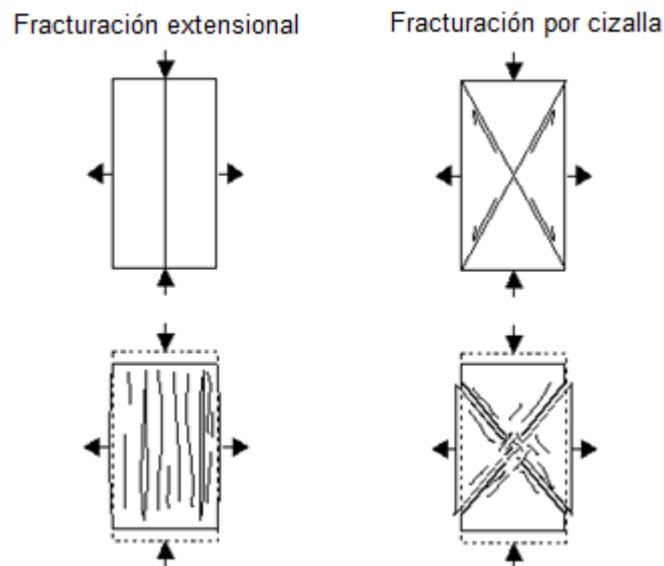


Figura 2. 2 Desarrollo de las fracturas extensionales y de cizalla como resultado de compresión.

El esfuerzo es igual a la fuerza aplicada por sección o superficie:

$$\delta = \frac{F}{A}$$

Donde f es la fuerza y A es el área transversal de la probeta.

Al aumentar el esfuerzo y superarse el límite elástico, la deformación aumenta rápidamente y es en parte permanente. Al aumentar el esfuerzo se llega finalmente al

punto denominado de ruptura, donde el cuerpo experimenta una fracturación catastrófica por cizalla o fisuración extensional. Este punto de ruptura define, en términos del esfuerzo compresivo, la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión de los materiales de construcción es muy variable, oscilando desde materiales (Agcasco, 2007):

- muy débiles (<70 kg/cm²)
- débiles (70-200 kg/cm²)
- moderadamente resistentes (200-700 kg/cm²)
- fuertes (700-1400 kg/cm²) hasta
- muy fuertes (>1400 kg/cm²).

Las rocas naturales son relativamente resistentes a la compresión (no tanto a la tensión y flexión), aunque las rocas sedimentarias son las más débiles debido sobre todo a su mayor porosidad y variable grado de cementación. Aunque no puede generalizarse el efecto del tamaño de grano, puede decirse que, en general, la resistencia a la compresión aumenta a medida que aumenta el tamaño de grano de los materiales, a igualdad de otras variables como composición mineral, estructura, porosidad, cementación, etc. (Agcasco, 2007).

Durante muchos años, la prueba directa de resistencia al esfuerzo cortante fue prácticamente la única usada para la determinación de la resistencia de los suelos. Hoy aun cuando conserva interés práctico debido a su simplicidad, ha sido substituida en buena parte por las pruebas de compresión triaxial.

El comportamiento mecánico de las rocas está definido por su resistencia y su deformabilidad. La resistencia es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Cuando la resistencia se mide en probetas de roca sin confinar se denomina resistencia a compresión simple, y su valor se emplea para la clasificación geotécnica de las rocas, en la tabla 1 se incluyen los valores típicos de este parámetro para diferentes tipos de roca. Se obtiene mediante el ensayo de resistencia uniaxial o de compresión simple.

La resistencia es función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material (además de otros valores extrínsecos al material rocoso). La cohesión, c , es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca. El ángulo de fricción interna, ϕ , es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca, para la mayoría de las rocas este ángulo varía entre 25 y 45 grados.

Tabla 2. 11 Clasificación de las rocas según la Resistencia a la Compresión.

Descripción	Resistencia a la Compresión Simple en MPa	Ejemplo de Roca
Resistencia muy baja	1 - 25	Yeso, sal de roca
Resistencia baja	25 - 50	Carbón, limonita, esquisto
Resistencia media	50 – 100	Arenisca, pizarra, lutita
Resistencia alta	100 – 200	Mármol, granito, gneiss
Resistencia muy alta	> 200	Cuarcita, gabro, basalto

Fuente: (Feijoo, 1997)

2.4 Índice de Carga Puntual o Point Load Strenght Test (Is 50)

El ensayo de carga puntual se utiliza para determinar la resistencia a la compresión simple de fragmentos irregulares de roca, testigos cilíndricos de sondajes o bloques, a partir del índice de resistencia a la carga puntual (Is), de tal forma que la fuerza aplicada se convierte a valores aproximados de la resistencia a la compresión simple, según el diámetro de la muestra. El procedimiento consiste en romper una muestra entre dos puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa. (González, 2002).

Las ventajas de este ensayo son que se pueden usar muestras de roca irregulares sin preparación previa alguna y que la maquina es portátil.

El procedimiento se puede describir a continuación:

1. Concebir una idea general de la roca en cuanto a su litología y estructuras.
2. Identificar las muestras.
3. Medir las dimensiones de la muestra.
4. Dependiendo del tipo de muestra (figura 2.3), se sitúa el testigo entre las puntas cónicas de la máquina, resguardando que se cumplan las configuraciones de carga y requerimientos de forma del testigo.
5. Se recubre la máquina con una bolsa resistente cuyo fin será el de evitar que al momento de fallar la roca no salten fragmentos y dañen a personas u objetos de alrededor.

6. Una persona se encarga de medir la presión a la cual está siendo sometida la muestra mediante un manómetro conectado directamente a la prensa hidráulica.
7. Una segunda persona será la encargada de ir aumentando paulatinamente la presión en la prensa hidráulica.
8. Una vez falle el testigo se retira y se analizan las condiciones y modo de ruptura.

Esta prueba consiste en colocar la roca entre dos puntas de forma estándar y luego se aplica una fuerza hasta que la roca se rompa; Al momento del fracturamiento de la roca se mide la altura de la muestra D y luego de esto se mide la fuerza que se aplicó en el momento de la ruptura P .

Existen tres tipos de pruebas como:

- Carga diametral sobre núcleos cilíndricos
- Carga axial sobre núcleos cilíndricos
- Carga de muestras de forma irregular

La prueba más usada es la de carga de muestras de forma irregular ya que es la de más fácil aplicación en el campo, para poder realizar esta prueba es necesario la obtención de un mínimo de 20 pruebas y así poder obtener un valor promedio. El Is_{50} se determina por la siguiente relación, así mismo luego de realizar los cálculos respectivos realiza la corrección con su ábaco.

$$Is = \frac{P}{D^2}$$

Al momento de realizar la corrección debe seguir los siguientes pasos:

- Con el valor obtenido del Is se traza una recta horizontal hasta el valor del diámetro de la muestra, así mismo siguiendo la curva hasta encontrar el diámetro de 50mm.
- Nuevamente se traza una recta horizontal desde este punto hasta el eje de las coordenadas, encontrándonos con el valor del Is_{50} .
- Ya que se obtuvo el valor del Is se puede pasar al siguiente paso que es el cálculo del valor de compresión uniaxial con la siguiente relación.

$$\sigma = (14 + 0,175 * D) * Is$$

D siempre va a ser expresado en mm; Las muestras siempre deber cumplir con todos los requisitos al momento de ejecutarse la prueba con lo siguiente.

$$L = 0,7 * D$$

La carga axial con núcleos cilíndricos la relación entre el largo del núcleo y el diámetro esta dado de la siguiente forma:

$$\frac{D}{L} = 1,1 \pm 0,05$$

La carga de muestra de forma irregular tiene relación entre el largo del núcleo y el diámetro esta dado de la siguiente forma:

$$\frac{D}{L} = 1 a 1,4$$

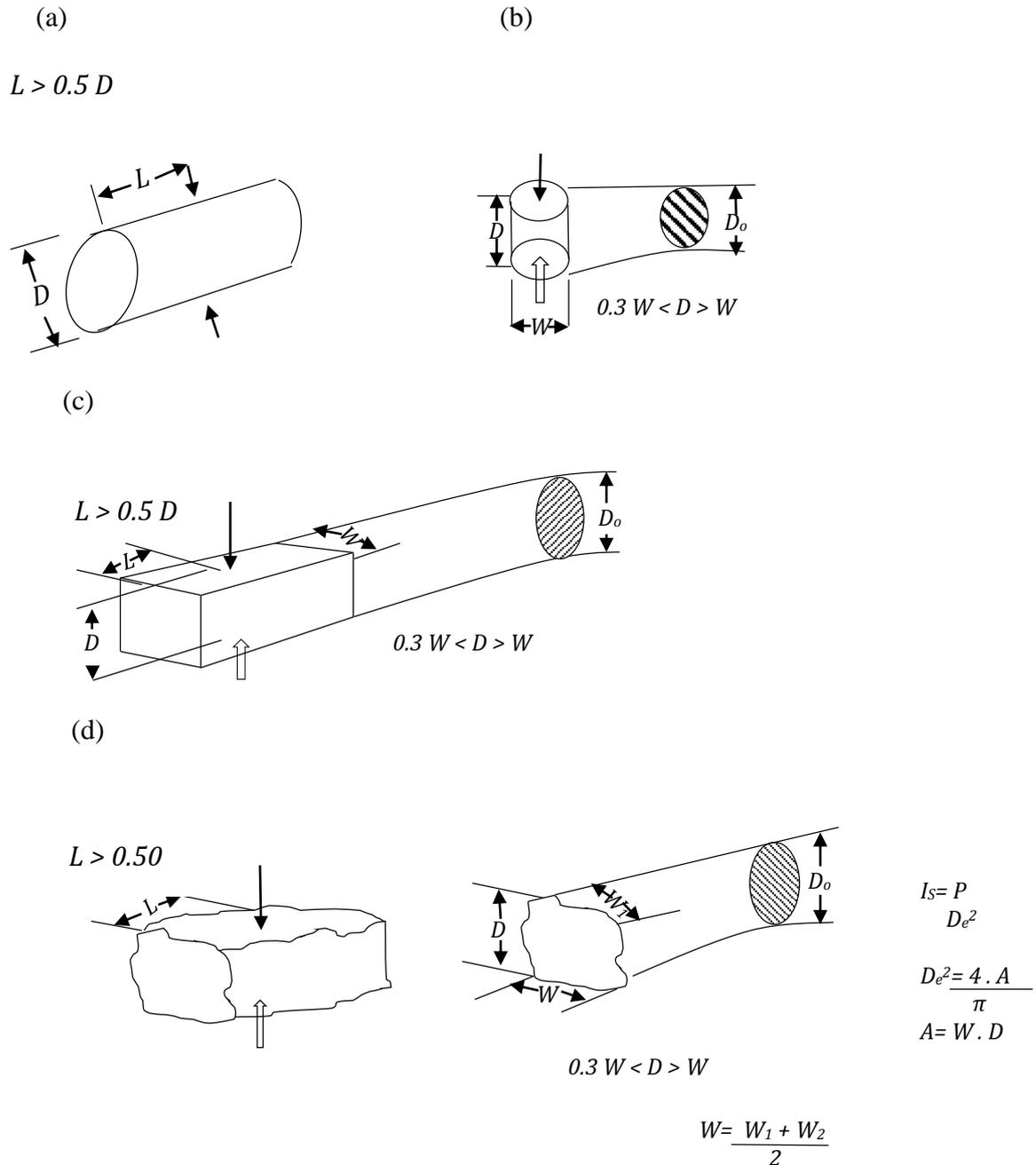


Figura 2. 3 Relación de las dimensiones de las muestras.

2.5 La Fracturación

La palabra Fractura proviene del latín fractus, que significa “quebrar” y se ha empleado para referirse a las superficies discretas que segmentan o dividen en bloques a rocas y minerales en la naturaleza; estas definen superficies de baja cohesión. Son el resultado del comportamiento quebradizo de los materiales. Las fracturas pueden ser generadas por la concentración de esfuerzos en zonas de contraste composicional (contactos de capas, cambio de facies), por pérdida de volumen (compactación), por enfriamiento, durante deformación contraccional o extensional. Pueden ser más abundantes en lugares donde existan

heterogeneidades en la roca como: presencia de fósiles, nódulos minerales, en clastos, huecos cársticos, burbujas por gas, ondulaciones en la base de la capa (marcas de ondulaciones y estructuras de carga) entre otros puntos heterogéneos. Las fracturas se distinguen por los movimientos relativos que ocurren a lo largo de la superficie durante su formación (Nelson, 2001).

Una fractura natural en una roca corresponde con una discontinuidad macroscópica planar que ha sido resultado de esfuerzos que han excedido la resistencia a la ruptura (Stearns, 1990). Esta definición es concreta, pues no toma en cuenta el aspecto microscópico y morfológico de los sistemas de fracturamiento. La siguiente definición tiene un enfoque más técnico, ya que considera que todo cuerpo sólido responde a las cargas externas experimentando grandes deformaciones o fracturamiento. El fracturamiento corresponde a una pérdida de la continuidad entre dos partes del cuerpo rocoso. Además implica la generación de una grieta y su propagación hasta que se presente la falla general o que se alcance un nuevo estado de equilibrio (Aubinet G. y Arias A.1991).

En teoría existen tres tipos de fracturas que han sido observadas en forma consistente y en ángulos predecibles con referencia a las tres principales direcciones de esfuerzo, durante pruebas de compresión, extensión y tensión, en laboratorio. Todas las fracturas en las rocas caen dentro de estos tipos básicos de fracturas. Cizalla, extensión y tensión. Tabla 2.12.

Tabla 2. 12 Clasificación de las fracturas.

<p><u>Clasificación experimental o genérica de las fracturas.</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Fracturas de cizalla. 2. Fracturas de extensión. 3. Fracturas de tensión. <p><u>Clasificación por ocurrencia natural de las fracturas.</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Fracturas tectónicas. (creadas por fuerzas de superficie). 2. Fracturas regionales (creadas por fuerzas superficiales). 3. Fracturas contraccionales (creadas por fuerzas de cuerpo). 4. Fracturas relacionada a superficie (creadas por fuerzas de cuerpo)
--

Fuente: (Feijoo, 1997)

Las fracturas de cizalla tienen un sentido de desplazamiento paralelo al plano de fractura, estas forman algún ángulo agudo con respecto a la máxima dirección del esfuerzo

compresivo principal (σ_1) y un ángulo obtuso con respecto a la dirección mínima de esfuerzo compresivo (σ_3) dentro de la muestra de roca. Las orientaciones potenciales de cizalla se pueden desarrollar en cualquier experimento de fracturamiento en laboratorio, con uno u otro lado fuera y orientado al mismo ángulo a (σ_1). En estos experimentos, esta forma de fracturas son paralelas con (σ_2) y forman un ángulo obtuso con (σ_3). En la Figura 2.4 se muestra la forma de la fractura de cizalla cuando los tres principales esfuerzos son compresivos (el esfuerzo compresivo es considerado positivo y viceversa el extensional es negativo), (Nelson, (2001).

El ángulo agudo entre las fracturas de cizalla es llamado el ángulo conjugado y este depende principalmente de:

- 1.- De las propiedades mecánicas del material.
- 2.- De la magnitud absoluta del esfuerzo principal mínimo (σ_3).
- 3.- De la magnitud del esfuerzo principal intermedio (σ_2) relativo a los esfuerzos máximo y mínimo (como σ_2 se acerca a σ_1 , el ángulo entre σ_1 y el plano de la fractura decrece).

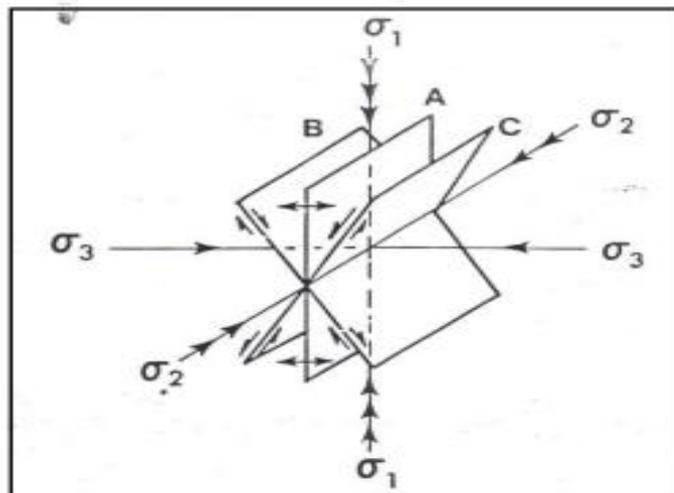


Figura 2. 4 Fracturas y su disposición en el espacio (Nelson, 2001).

En términos más prácticos podemos manifestar que una fractura es la separación de un sólido bajo tensión en dos o más piezas. La ductilidad es la habilidad de un material para deformarse antes de fracturarse. Es una característica muy importante en el diseño estructural, puesto que un material dúctil es usualmente muy resistente a cargas de impacto. Tiene además la ventaja de "avisar" cuando va a ocurrir la fractura, al hacerse visible su gran deformación;

mientras que, la fragilidad es lo opuesto de ductilidad. Cuando un material es frágil no tiene resistencia a cargas de impacto y se fractura aún en carga estática sin previo aviso.

A este punto es muy importante mantener claro la hipótesis de este trabajo, la cual es que si podemos en un número determinado de probetas de roca determinar la deformación lineal de dichas probetas y a su vez obtener del mismo material de probetas su fuerza a la ruptura o fractura, correlacionarlos para tratar de encontrar una relación entre estas dos variables.

2.6 Criterios de Ruptura de la Matriz Rocosa

La rotura de los materiales más comunes en ingeniería industrial y de la construcción, como el acero y el hormigón, se produce al estar sometidos a tracción. Sin embargo los campos tensionales que actúan comúnmente en el ámbito de la mecánica de rocas se encuentran predominantemente en el dominio de la compresión, por lo que las teorías desarrolladas para los materiales anteriores no son directamente aplicables a los macizos rocosos. Una complicación que se da en el caso de las rocas sometidas a compresión tienen su origen en la fricción movilizada entre las superficies de las microfracturas, donde se produce la iniciación de la fracturación y que hace que la resistencia de la roca sea muy dependiente de la tensión de confinamiento, por lo que surgen dudas sobre la relevancia de nociones como el principio de normalidad, flujo asociado y teoría de la plasticidad al analizar las propiedades de resistencia a la rotura y deformación post-rotura de las rocas (Ramírez Alejano, 2004).

El proceso de rotura macroscópica de una roca, es muy complejo y generalmente intervienen en él muchos fenómenos microscópicos que complican su comprensión y con ello su tratamiento teórico.

En la rotura macroscópica pueden considerarse los siguientes tipos:

- Rotura por tracción: En este tipo de rotura se produce cuando la disposición y estructura del macizo rocoso hace que a una cierta sección de la roca esté sometida a una tracción pura o casi pura.
- Rotura por esfuerzo cortante: Se produce cuando una cierta superficie de la roca está sometida a esfuerzos cortante suficientemente altos para que una cara de la superficie deslice respecto a la otra.

- Rotura por compresión: Se presenta en volúmenes de roca comprimidos intensamente. En realidad, microscópicamente, se producen grietas de tracción y planos de corte que progresan delimitando el volumen roto por “compresión”. Independiente de estos procesos de rotura por compresión, en las rocas muy porosas, tales como aglomerados volcánicos de baja densidad, areniscas cementadas (tipo Creta); se dan procesos de colapso mecánico por una compresión isótropa, en los que la estructura de la cementación se rompe, transformándose la roca en un material pulverulento de tipo suelo con mayor densidad que la roca inicial. Las rocas densas bajo compresión isotrópica, pueden colapsar también bajo compresiones muy elevadas por cambio de su estructura cristalina.
- Rotura por flexión: Se produce cuando una cierta sección de la roca está sometida a flexión. En realidad la sección está sometida a unas tensiones normales variables y se rompe por la zona de las tracciones a causa de esta sollicitación. (Galván, 2015).

CAPÍTULO III

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

La finalidad de este trabajo de investigación es determinar la manera en qué se relacionan un incremento de una fuerza en una probeta de roca y los valores de la resistencia a la compresión en la misma, para luego proceder a la utilización en cualquier sistema de clasificación de macizos rocosos. Esta operación se la propone con equipos estándar, específicamente una prensa (entenalla) y un calibrador, equipos que generalmente se encuentran presentes en el taller de mantenimiento de cualquier mina a cielo abierto o en subterráneo.

Las dimensiones de las probetas y la forma en que se realizó su corte, se basa en diversos parámetros técnicos que posteriormente serán detallados.

En total se utilizaron 63 probetas, cada una de ellas tiene prácticamente las mismas dimensiones. Sin embargo, para las pruebas que se pretende realizar, todas serán analizadas en función de las dos muestras que se obtuvieron para las pruebas.

3.1 Descripción de las Muestras

Las rocas son sustancias heterogéneas enmarcadas por amplios rangos de variación en su composición, textura y estructura. Esta variabilidad hace que las propiedades de las rocas, que son las que dictan sus campos de aplicación, sean también variables. Así, la preparación de una probeta de roca para un determinado fin, debe basarse en determinadas propiedades que deben, a su vez, ser fácilmente medibles en el laboratorio.

Las probetas de roca presentan propiedades físicas, tales como: densidad, porosidad, dureza, higroscopicidad, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, pandeo, entre otras. Las propiedades mecánicas incluyen la resistencia a la compresión, tensión y flexión. Las propiedades anteriormente nombradas presentan un gran interés en el campo de la ingeniería y principalmente en la ingeniería de minas.

Una propiedad de una probeta de roca puede medirse en distintos equipos, bajo distintas condiciones experimentales y utilizando probetas de muestra de distintas dimensiones y formas. Esto supone generalmente obtener resultados distintos para una misma propiedad, por lo que éstas deben medirse siguiendo normativas que aseguren que los datos obtenidos son comparables con los obtenidos en otros laboratorios.

Es muy importante conocer que los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial (RCU) para un mismo material (muestras hermanas) depende de la forma y tamaño de la probeta. Los prismas y cilindros largos presentan menor resistencia a la compresión que los cubos con la misma área de sección, y estos a su vez menores que los prismas y cilindros cortos (con alturas menores que sus lados o radios). Igualmente, la resistencia a la compresión depende de la tasa de aplicación de la carga, de forma que a mayores velocidades de compresión mayor es el valor de la resistencia.

La teoría experimental puede seguir la recomendación de que las probetas irregulares, a pesar de que las probetas fueron preparadas en forma de prisma, mantengan una relación de diámetro (D) sobre el largo (L) que estén en el orden de 1 a 2.5. (Figura 3.1)

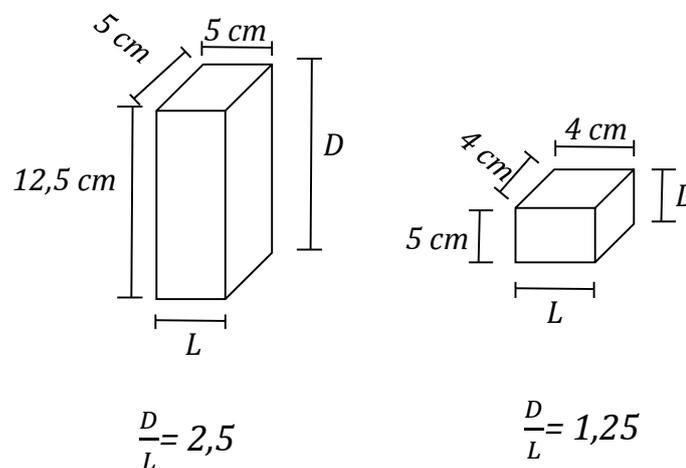


Figura 3. 1 Relación de diámetro y largo de las probetas (D/L).

Las muestras pueden definirse brevemente como paralelepípedos de roca cortados en lo posible con aristas paralelas con dos probetas de las siguientes dimensiones: 12.5 cm de alto, 5 cm de ancho y 5 cm de espesor la primera y la segunda de: 5 cm de alto, 4 cm de ancho y 4 cm de espesor. Figuras 3.2 y 3.3.



Figura 3. 2 Probetas de roca.

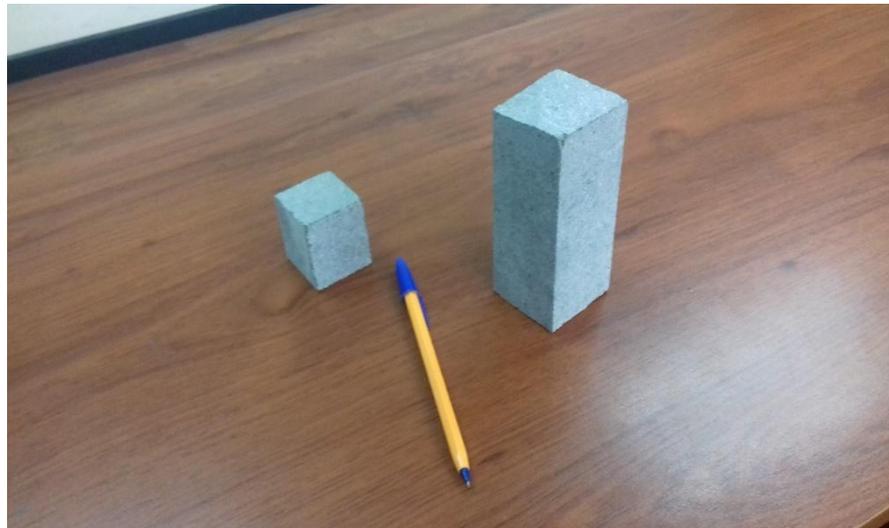


Figura 3. 3 Probetas de roca y relación de tamaño.

Todas las rocas de las cuales se obtuvieron las probetas fueron recolectadas en el sector del Cojitambo, provincia del Cañar.

3.2 Preparación de las Muestras.

Como se detalló en el punto anterior, de una misma roca se han obtenido dos probetas de las dimensiones 5 cm x 5 cm x 12.5 cm y 5 cm x 4 cm x 4 cm y (figuras 3.2 y 3.3), a las cuales llamaremos hermanas A y B y las cuales sufrieron dos procesos diferentes. En total se elaboraron 63 pares de probetas, codificadas desde el número 1 al 63, la hermana A y la hermana B.

La primera probeta, por ejemplo la hermana 1A, se sometió a la prueba de resistencia a la compresión, en este ensayo fue necesario la utilización de una prensa hidráulica Humboldt con capacidad de ejercer una carga de aplastamiento de hasta 50000 kilogramos de fuerza. La misma que se encuentra en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay. (Figura 3.4)



Figura 3. 4 Máquina de compresión Humboldt.

La segunda probeta o hermana 1B, se sometió a la prueba en la entenalla, determinando inicialmente su diámetro con un calibrador milimétrico (figura 3.5) con precisión de dos decimales, para luego colocándola en la entenalla (figura 3.6), progresivamente cerrar las mandíbulas de la misma hasta la ruptura de la probeta (figura 3.6) y medir su deformación, lo cual es la distancia entre las mandíbulas de la entenalla.



Figura 3. 5 Medición de probetas con Calibrador.



Figura 3. 6 Rotura de probetas mediante prensa.

Un esquema se presenta a continuación:

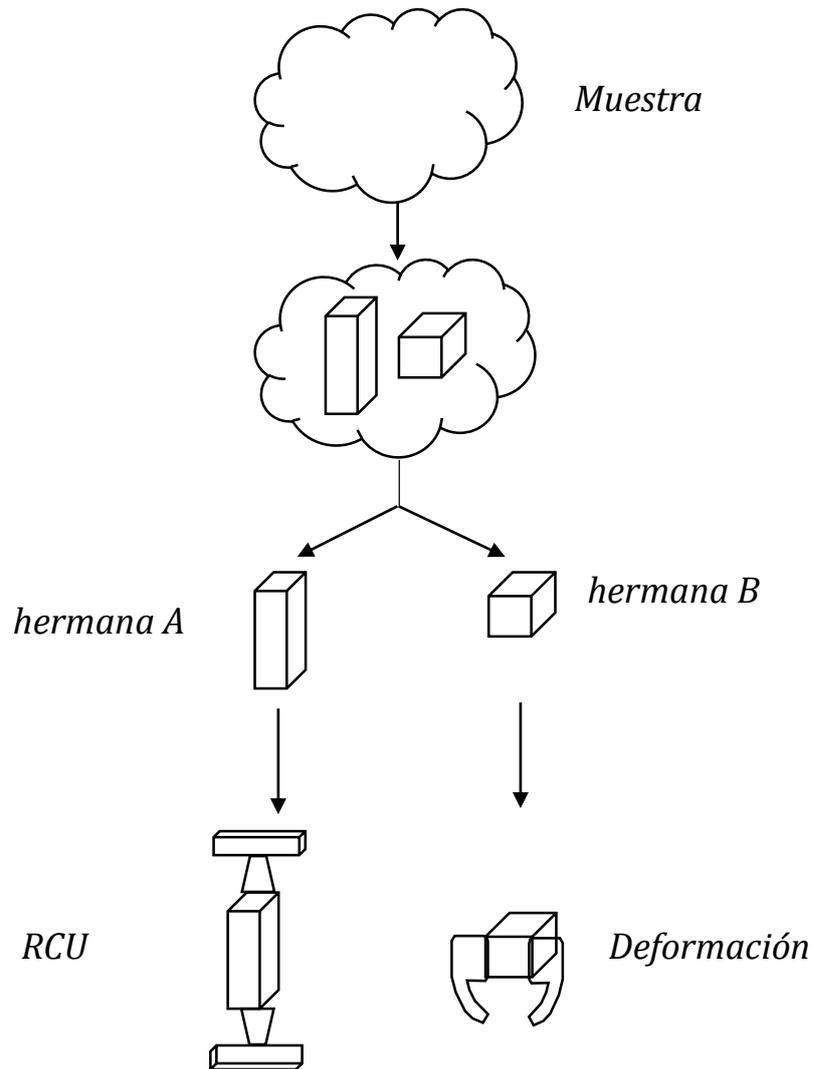


Figura 3. 7 Esquema de trabajo.

3.3 Descripción de Métodos de Experimentación

La prueba de resistencia a la compresión simple, es un ensayo mediante el cual se mide el esfuerzo máximo que puede soportar un material a una fuerza de aplastamiento. Dependiendo del material que componga la muestra, en este caso las probetas de roca en forma de paralelepípedo, se puede decir que esta prueba proporciona la cantidad de esfuerzo necesario para romper o deformar el material.

Luego de obtener las probetas respectivas, durante dos meses, se procedió a establecer las características de cada probeta, inicialmente determinando su relación de diámetro con largo, llegándose a proponer las siguientes medidas tentativas para cada muestra (tablas 3.1 y 3.2).

Tabla 3. 1 Dimensiones de las probetas (hermana A).

Alto	12.5 cm
Ancho	5cm
Espesor	5 cm

Tabla 3. 2 Dimensiones de las probetas (hermana B).

Alto	5 cm
Ancho	4 cm
Espesor	4 cm

Para realizar los análisis se procederá a crear una tabla de datos y cada uno de ellos corresponde a una roca (muestras hermanas). (Tablas 3.3 y 3.4)

Las muestras con la denominación 1^a y 1B, se entiende que son hermanas, ya que provienen de una misma roca.

Tabla 3. 3 Datos de ejemplo para cálculo de resistencia a la compresión (hermana A).

Hermana A				
	F	D	RCU	RCU
	Kg	cm	Kg/cm ²	Mpa
1	7892	5.3	280.95	27.5

Tabla 3. 4 Datos de ejemplo para cálculo de deformación (hermana B).

Hermana B					
	D	L	D/L	Do	Δl
	cm	cm		Cm	mm
1	5.3	4.2	1.3	5.12	1.8

3.4 Interpretación de los Resultados

Luego de realizado el proceso de cada una de las 63 muestras, es decir ejecutadas las pruebas de compresión y de entenalla de las probetas hermanas, se tiene la siguiente tabla de resultados:

Tabla 3.5 Datos de las 63 probetas.

	D	L	D/L	Do	Δl	F	RCU	RCU
	Cm	cm		cm	mm	kg	kg/cm ²	Mpa
1	5.3	4.2	1.26	5.18	1.2	7892	280.95	27.54
2	4.96	4.32	1.15	4.81	1.5	7564	307.46	30.14
3	5.08	4.21	1.21	4.95	1.3	7556	292.80	28.71
4	5.11	4.12	1.24	5	1.1	7258	277.96	27.25
5	5.52	4.1	1.35	5.4	1.2	8623	283.00	27.74
6	5.28	4.23	1.25	5.16	1.2	7756	278.21	27.28
7	5.2	4.24	1.23	5.07	1.3	8012	296.30	29.05
8	5.21	4.14	1.26	5.11	1	7112	262.01	25.69
9	5.13	4.23	1.21	4.98	1.5	7812	296.84	29.10
10	5.14	4.12	1.25	5.01	1.3	7529	284.98	27.94
11	5.13	4.26	1.20	5	1.3	7456	283.32	27.78
12	5.18	4.17	1.24	5.05	1.3	7645	284.92	27.93
13	5.28	4.19	1.26	5.15	1.3	7564	271.32	26.60
14	5.01	4.23	1.18	4.88	1.3	7255	289.04	28.34
15	4.89	4.32	1.13	4.77	1.2	7074	295.83	29.00
16	5.09	4.23	1.20	4.98	1.1	7148	275.90	27.05
17	5.04	4.14	1.22	4.92	1.2	7194	283.21	27.77
18	5.29	4.18	1.27	5.18	1.1	7565	270.33	26.50
19	5.06	4.2	1.20	4.94	1.2	7304	285.27	27.97
20	4.99	4.13	1.21	4.88	1.1	7165	287.75	28.21
21	5.14	4.15	1.24	4.97	1.7	8050	304.70	29.87
22	5.41	4.14	1.31	5.29	1.2	7979	272.62	26.73
23	5.13	4.16	1.23	5.01	1.2	7651	290.73	28.50
24	5.15	4.18	1.23	5.01	1.4	8207	309.44	30.34
25	5.15	4.12	1.25	5.02	1.3	8105	305.59	29.96
26	5.08	4.13	1.23	4.96	1.2	7206	279.23	27.38
27	5.12	4.22	1.21	5.01	1.1	7156	272.98	26.76
28	5.22	4.3	1.21	5.1	1.2	7240	265.70	26.05
29	5.11	4.32	1.18	4.92	1.9	8015	306.95	30.09
30	5.21	4.26	1.22	5.1	1.1	7756	285.73	28.01
31	5.56	4.29	1.30	5.45	1.1	7851	253.97	24.90
32	5.33	4.14	1.29	5.21	1.2	7454	262.38	25.72

33	5.19	4.13	1.26	5.02	1.7	8564	317.94	31.17
34	5.15	4.16	1.24	5.04	1.1	7515	283.34	27.78
35	5.21	4.14	1.26	5.09	1.2	6941	255.71	25.07
36	5.32	4.18	1.27	5.2	1.2	7861	277.75	27.23
37	5.12	4.22	1.21	5.01	1.1	7741	295.30	28.95
38	5.54	4.31	1.29	5.45	0.9	8415	274.18	26.88
39	5.35	4.12	1.30	5.24	1.1	7451	260.32	25.52
40	5.11	4.05	1.26	5.02	0.9	6541	250.50	24.56
41	5.25	4.12	1.27	5.16	0.9	6641	240.94	23.62
42	5.51	4.1	1.34	5.42	0.9	7510	247.36	24.25
43	5.15	4.13	1.25	5.03	1.2	7645	288.25	28.26
44	5.22	4.14	1.26	5.03	1.9	8501	311.98	30.59
45	5.35	4.08	1.31	5.24	1.1	7642	266.99	26.18
46	5.12	4.11	1.25	5.03	0.9	7451	284.23	27.87
47	5.14	4.03	1.28	5.03	1.1	7095	268.55	26.33
48	5.18	4.1	1.26	5.06	1.2	7298	271.98	26.67
49	5.36	4.08	1.31	5.24	1.2	7989	278.08	27.26
50	5.09	4.12	1.24	4.91	1.8	8041	310.37	30.43
51	5.15	4.14	1.24	5.06	0.9	7365	277.69	27.22
52	5.16	4.04	1.28	5.06	1	7215	270.98	26.57
53	5.32	3.99	1.33	5.21	1.1	7521	265.74	26.05
54	5.26	4.1	1.28	5.14	1.2	7621	275.45	27.00
55	5.42	4.12	1.32	5.26	1.6	9061	308.44	30.24
56	5.15	4.16	1.24	5.05	1	7351	277.16	27.17
57	5.05	4.69	1.08	4.93	1.2	7814	306.40	30.04
58	5.23	4.21	1.24	5.12	1.1	7415	271.09	26.58
59	5.31	4.25	1.25	5.22	0.9	6952	246.56	24.17
60	4.99	4.21	1.19	4.85	1.4	7445	298.99	29.31
61	5.22	4.32	1.21	5.11	1.1	7543	276.82	27.14
62	5.42	4.34	1.25	5.3	1.2	7890	268.58	26.33
63	5.23	4.35	1.20	5.08	1.5	8574	313.46	30.73

Esta tabla nos proporciona una gráfica en la cual en el eje de las abscisas se representa a la deformación obtenida en la entenalla y en el eje de las ordenadas la resistencia a la compresión. Esta cantidad de puntos la podemos observar en la figura 3.8.

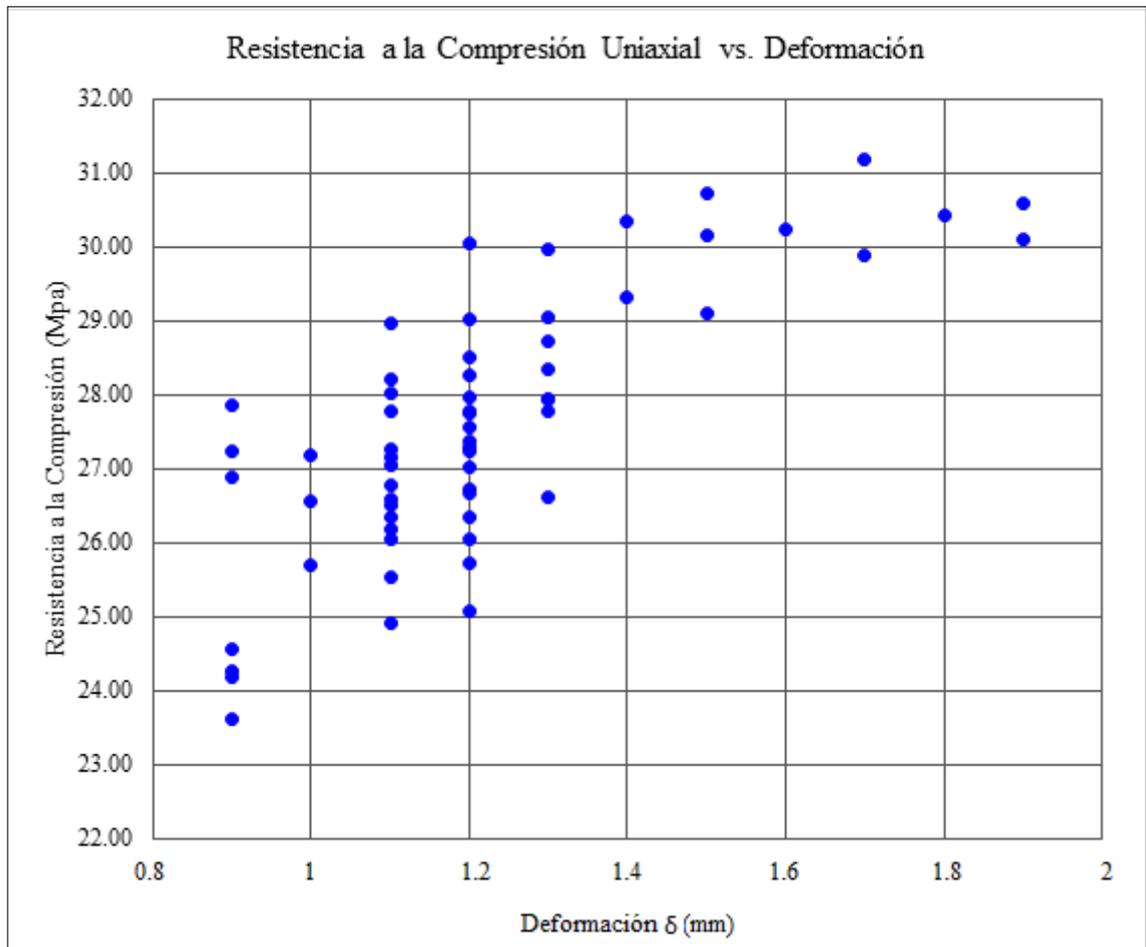


Figura 3. 8 Grafica de resultados RCU vs. Deformación.

- Correlación Logarítmica

Analizados los datos se ha podido determinar que existe una correlación entre la RCU y la deformación de la roca. Esta deformación es proporcional y aumenta de acuerdo al aumento de la presión ejecutada en el ensayo.

Si buscamos una primera aproximación de los valores obtenidos determinamos que la misma está en función de una curva logarítmica como lo muestra la figura 3.9.

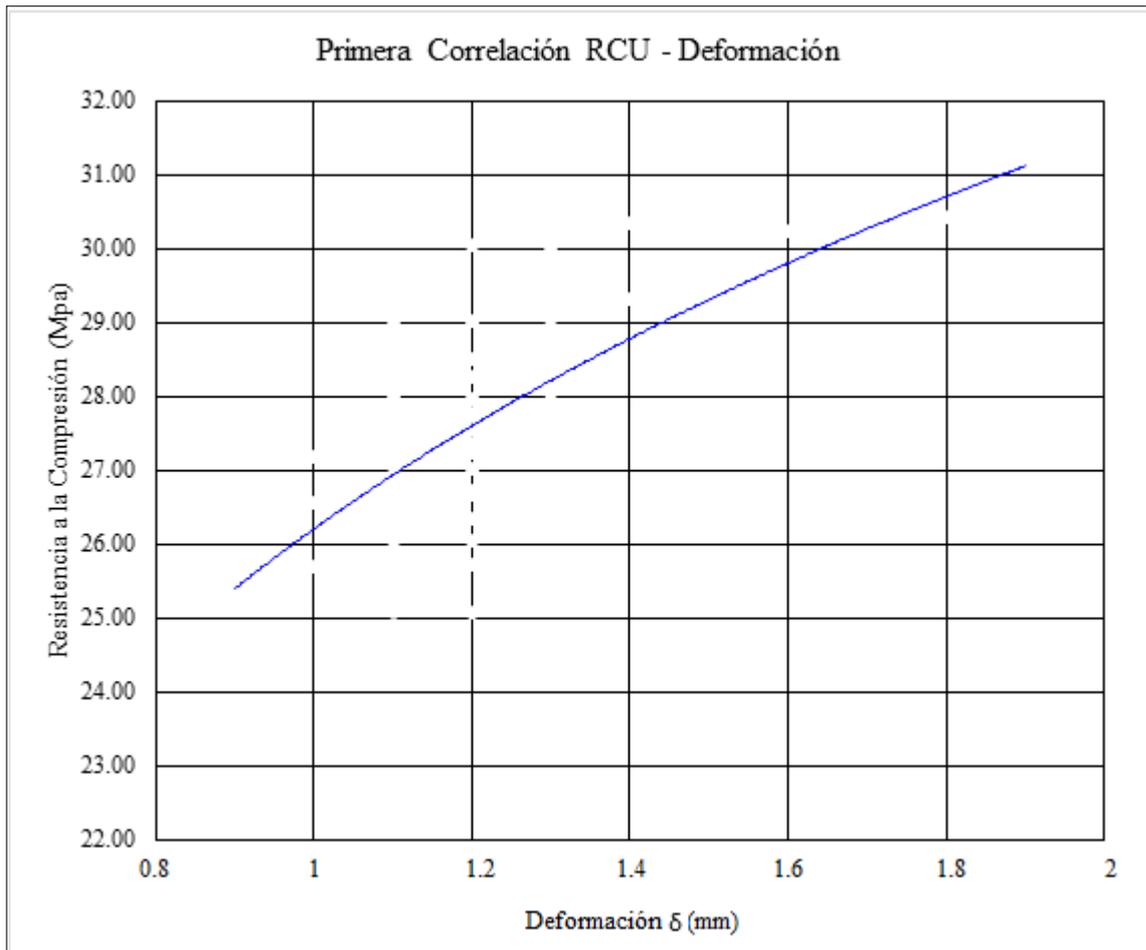


Figura 3. 9 Correlación Logarítmica.

Estadísticamente nos presenta la relación:

$$RCU \text{ (MPa)} = 7.65 \ln(\delta / 10)(\text{mm}) + 43.82$$

$$R^2 = 0.6$$

- Correlación de Ecuación Grado 3

Pero se plantea una segunda correlación en base a una ecuación de grado 3, la cual se puede ver en la figura 3.10.

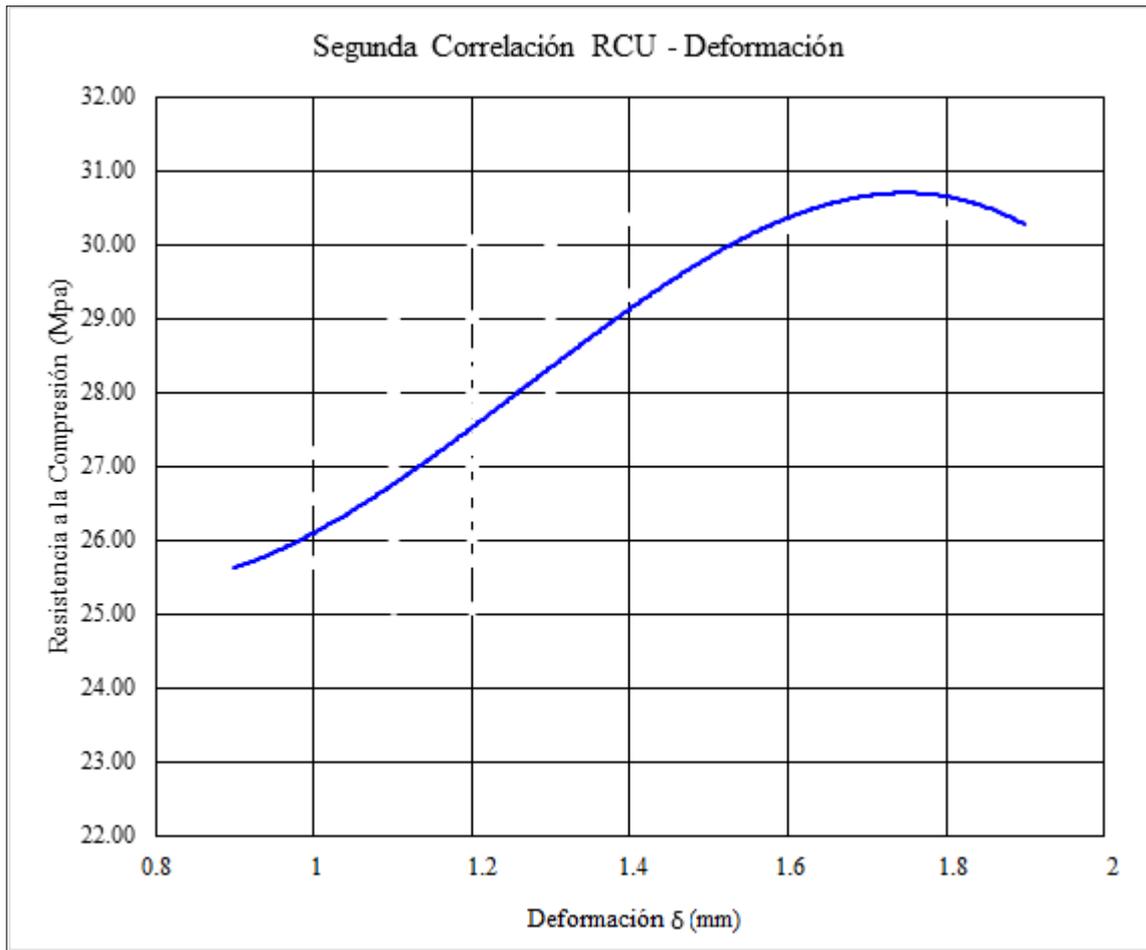


Figura 3. 10 Correlación Ecuación exponente 3.

Estadísticamente nos presenta la relación:

$$RCU \text{ (MPa)} = -11733 \cdot (\delta/10)^3 \text{ (mm)} + 4453.6 \cdot (\delta/10)^2 \text{ (mm)} - 431.43 \cdot (\delta/10) \text{ (mm)} + 41.434$$

$$R^2 = 0.62$$

A pesar de tener un R^2 mayor que la correlación anterior, no es lógica la interpretación, ya que en teoría la RCU debería aumentar permanentemente.

Finalmente se propone una gráfica para determinar la RCU máxima y mínima que podría tener la probeta de roca, estableciendo los límites de la gráfica con las respectivas ecuaciones determinadas en base a la serie de datos. (Figura 3.11)

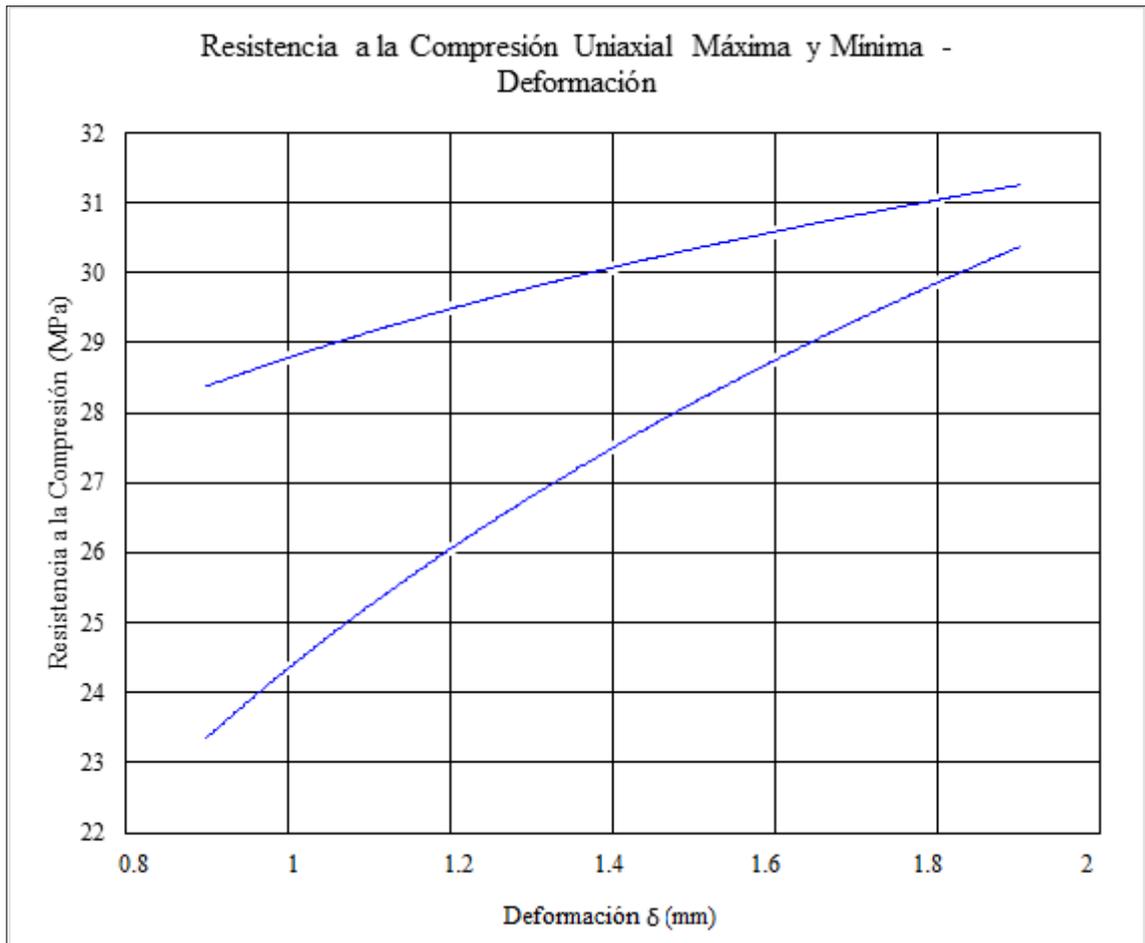


Figura 3. 11 Correlación RCU Máxima y Mínima.

Esta última gráfica nos presenta dos ecuaciones logarítmicas que podrían representar los valores máximos y mínimos de la RCU de la roca, en función de la deformación sufrida en el proceso con la entenalla.

Las ecuaciones se presentan a continuación:

$$\text{RCU max (MPa)} = 3.84 \ln(\delta/10) \text{ (mm)} + 37.64$$

$$\text{RCU min (MPa)} = 9.39 \ln(\delta/10) \text{ (mm)} + 45.97$$

Esta interpretación nos proporciona una herramienta para que en campo tener una idea aproximada de la RCU en el material rocoso.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Una vez evaluados los resultados que se han obtenido en las experiencias llevadas a cabo en diferentes muestras, reconocemos el empleo del procedimiento para la determinación en campo de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU) de rocas.
- Según lo observado en la figura 3.11, se puede determinar que las rocas cuando presenten valores de deformación inferiores a los 0.9 mm estas presentarían valores de RCU que están encasillados en las rocas blandas y en el caso de valores de deformación mayores a 0.19 cm la roca se establece entre las rocas duras, lo que nos puede generar una buena idea del comportamiento de dichas clases de roca.
- Como conclusión podemos anotar que los afloramientos del sector de Cojitambo presentan valores de RCU de entre 23 MPa a 32 MPa, como se puede observar en la figura 3.11, lo cual nos hace prever que si las deformaciones de nuevas muestras o probetas de roca no se encuentran dentro de estos valores, probablemente nos encontramos con otro tipo de formación geológica.
- Esta metodología permite conocer la resistencia a la compresión de la roca de una manera económica y en poco tiempo, lo cual brinda cierta ventaja con respecto a los ensayos que se usan normalmente en laboratorio.
- Esta investigación proporciona una valoración de la resistencia a la compresión de materiales rocosos que es necesaria para el estudio geotécnico y comportamiento del macizo rocoso. La profundización en el conocimiento de los diferentes materiales rocosos, la evolución en el tiempo de la eficiencia del modelo y las características del ejercicio propuesto constituido por su metodología, son algunos de los temas que deben ser abordados para que esta propuesta se ponga a punto y sea utilizada en el campo.

Recomendaciones

- En proyectos mineros una etapa importante para la determinación de la resistencia a la compresión de la roca es inicialmente enviar muestra a laboratorio para partir de datos reales y correlacionarlos en el desarrollo del proyecto minero.
- Se recomienda realizar pruebas con este procedimiento en materiales o rocas de otros afloramientos para tratar de generalizar la propuesta y ponerla a punto.
- Es recomendable ejecutar esta propuesta con un proceso de medición de la deformación con calibradores o medidores de alta precisión y de esta forma lograr una mayor aproximación de dicho parámetro.
- La interpretación de resultados podría variar si las muestras aumentan en su totalidad, por lo que se recomienda analizar el proceso de linealización con mínimos cuadrados y de esta forma obtener las ecuaciones con mayor grado de aceptación.

BIBLIOGRAFÍA

- Agcasco, R. (2007). Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación: . Universidad De Granada. España.
- Almeida, X. (2018). Planeamiento Minero y Diseño de Explotación para Materiales de Construcción en el libre aprovechamiento San Gerardo de la Parroquia Mariano Moreno:. Universidad Del Azuay. Cuenca, Ecuador.
- Antico, P. F. (2008). Estructuras III. Círculo de Mohr. Universidad de la Plata. Argentina.
- Billings, M. P. (1974). Geología Estructural. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires - Rivadavia.
- Feijoo, P. (1997). Manual de Estabilidad de Túneles y Taludes. Cuenca, Ecuador: Universidad Del Azuay. Escuela de Minas.
- Fiallos, J. (2013). Perfeccionamiento del sistema de laboreo del nivel principal de la Mina Subterránea Liga de Oro, Somilor S.A. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Galván, M. (2015). Mecánica de Rocas. Correlación entre la Resistencia a Carga Puntual y La Resistencia a la Compresión Simple. Colombia.
- González, V. L. (2002). Libro Ingeniería Geológica.
- Jaramillo, J. (2017). Diseño de Perforación y Voladura con Análisis Económico De La Cantera Luzagui. Universidad Del Azuay. Cuenca, Ecuador.
- Morales, R. (2013). Deformaciones de las Estructuras. . Universidad de Mendoza .
- Persico, D. L. (2008). Aplicaciones de la Teoría Lineal de la Elasticidad en Estados Planos De Deformación y de Tensión. Resúmenes del Dictado de Clases.
- Ramírez Alejano, P. L. (2004). Mecánica de Rocas. Fundamentos e Ingeniería de Taludes. España.
- Ramírez, A. L. (2013). Deformacion y Resistencia de Los Materiales:. Instituto Politécnico Santiago Mariño. Venezuela.
- Romero, I. (2016). Mecánica de Sólidos. Ingeniería Mecánica E.T.S.I. Industriales Universidad Politécnica. Madrid.
- Salazar. (2007). Resistencia de Materiales Básica para Estudiantes de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia,.