



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**Alternativa de uso del PET con agregados (arena) en Fortificación
Minera, mediante la caracterización de Resistencia a la Flexión.**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autor

YALITZA ANABEL BOTINA AREVALO

Director

ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a todos mis familiares ya que me apoyaron durante este largo trayecto de mi vida universitaria, de manera especial a mis padres Nora y Julio César, por guiarme por el camino correcto para cumplir con mis sueños.

A mis abuelitos Papito Rubén y Mimita, ellos han sido un ejemplo de dedicación y amor.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sobre todas las cosas por darme la vida y la salud para poder culminar mis estudios sin problemas.

A mi director de tesis el Ingeniero Ernesto Patricio Feijoo Calle por apoyarme y guiarme durante mi carrera universitaria y especialmente durante la ejecución de este trabajo de titulación.

A los Ingenieros Fernando Valencia, Gil Álvarez, Federico Auquilla y al Doctor Juan Calderón por guiarme y formarme en mi vida universitaria.

Gracias a mi ex compañero Juan Pablo Cedillo por haberme apoyado en mi carrera universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO:PROPIEDADES MECÁNICAS, PLÁSTICOS Y AGREGADOS.....	3
1.1 Propiedades de la madera.....	4
1.2 Resistencia a la flexión.....	5
1.3 Origen del plástico	9
1.3.1 Evolución del plástico	12
1.4 Características Generales de los Plásticos.....	12
1.5 Plástico PET y su reciclaje.....	14
1.5.1 Sistema de reciclaje	15
1.6 Agregados. Clasificación.....	16
1.6.1 Análisis Granulométrico.....	18
1.6.2 Tamización	19
1.6.3 Curvas Granulométricas	20
1.7 Tipos de Arenas y sus características.....	21
CAPITULO 2: FORTIFICACIÓN MINERA.....	23
2.1 Macizos Rocosos.....	23
2.1.1 Parámetros del macizo rocoso.....	24

2.2 Clasificación de los macizos rocosos	25
2.3 Determinación de la fortificación en túneles mediante clasificaciones geomecánicas.	32
2.3.1 Sistema de clasificación Q.....	32
2.3.2 Tamaño relativo de bloque, RQD/Jn	38
2.3.3 La resistencia al corte interbloque, Jr/Ja.....	39
2.3.4 El esfuerzo activo, Jw/SRF.....	39
2.3.5 Dimensión equivalente, De.....	40
2.3.6 Rock mass rating, RMR.....	42
2.3.6 Resistencia a la compresión del material de roca intacta	44
2.3.7 Rock quality designation, RQD.....	44
2.3.8 Espaciamiento de juntas o discontinuidades	44
2.3.9 Condición de la discontinuidad	44
2.3.10 Condición de agua en suelo	45
2.3.11 Orientación de las discontinuidades	45
2.3.12 Estimación y Aplicaciones del RMR.....	46
2.3.13 Tiempo de auto-soporte de túneles	47
2.3.14 Requerimiento de Soporte según RMR	48
2.4 Tipos de Fortificación	48
2.4.1 Fortificación con madera	48
2.4.2 Fortificación con marcos de acero.....	50
2.4.3 Fortificación con Pernos.....	51
2.4.4 Mallas	52
2.4.5 Shotcrete	53
CAPÍTULO 3: DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN	55
3.1 Descripción del proceso para la elaboración de muestras.....	55
3.2 Caracterización de las muestras	58
3.3 Descripción y ejecución del ensayo de flexión	60
3.4 Análisis e interpretación de los resultados.....	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71

BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ejemplo de movimiento de flexión.	5
Figura 1.2 Clasificación de vigas	6
Figura 1.3 Diagrama de fuerza cortante y momento flector	6
Figura 1.4 Fuerzas internas en la selección (fuerza cortante positiva y momento flector positivo)	7
Figura 1.5 Diagrama de fuerzas de una viga en voladizo	8
Figura 2.1 Transición entre la roca intacta y el macizo rocoso altamente fracturado.	24
Figura 2.2 Representación del número de familias mediante bloques diagramas.	27
Figura 2.3 a) Bloques cúbicos pequeños formados por familias de discontinuidades ortogonales entre sí en materiales margocalizos; b) bloques columnares grandes (de unos 3 m de altura) en un macizo volcánico con la parte inferior afectada por un mayor grado de fracturación.	29
Figura 2.4 Macizo rocoso volcánico masivo con bloques muy grandes; b) macizo dolomítico triturado, con bloques muy pequeños.	30
Figura 2.5 Relación entre la frecuencia del espaciado y el índice RQD.	30
Figura 2.6 Ejemplos de meteorización de macizos rocosos. a) Grado II: gneiss glandular con matriz rocosa y superficies de discontinuidad ligeramente decoloradas; b) y c) Grado III: macizos rocosos calizo y cuarcítico moderadamente meteorizados, con alteración en las superficies de discontinuidad y en los bloques de matriz rocosa; d) Grado IV: macizo cuarcítico muy meteorizado, con los bloques de matriz rocosa separados y muy alterados.	32
Figura 2.7 Procedimiento de medición y cálculo de RQD	37

Figura 2.8 Correlación entre J_v y RQD con el rango	37
Figura 2.9 Gráfico de soporte para Q.....	42
Figura 2.10 Dirección de avance respecto manto de discontinuidades.....	45
Figura 2.11 Tiempo de auto-soporte versus luz de túnel para varias clases de macizos rocosos y sus clasificaciones según RMR.....	47
Figura 2.12 Fortificación con madera.....	50
Figura 2.13 Fortificación con marcos de acero.....	50
Figura 2.14 Frente fortificada con pernos de acero	51
Figura 2.15 Sistema de pernos con malla y shotcrete.....	52
Figura 2.16 Aplicación de shotcrete	54
Figura 3.1 Tamizaje de arena.....	56
Figura 3.2 Prensa Humboldt con capacidad de carga de 50000 kg	60
Figura 3.3 Cilindro de soporte para flexión	61
Figura 3.4 Soporte para prueba de flexión.....	61
Figura 3.5 Soporte con muestra para realizar ensayo de flexión.	61
Figura 3.6 Soporte para prueba de flexión en prensa Humboldt	62
Figura 3.7 Muestra el tipo de fractura por flexión	63
Figura 3.8 Muestra falla al esfuerzo máximo y sin fractura	63
Figura 3.9 Muestra #1	64

Figura 3.10 Muestra #2	64
Figura 3.11 Muestra # 3	64
Figura 3.12 Muestra #4	65
Figura 3.13 Muestra # 5	65
Figura 3.14 Muestra # 5	65
Figura 3.15 Muestra # 6	66
Figura 3.16 Muestra # 7	66
Figura 3.17 Muestra #8	67
Figura 3.18 Muestra # 9	67
Figura 3.19 Muestra # 10	67
Figura 3.20 Gráfico de dispersión muestras 1, 2, 3	67
Figura 3.21 Gráfico de dispersión muestras 4, 5, 6	68
Figura 3.22 Gráfico de dispersión muestras 7, 8, 9	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Escalas usadas para el tamaño de arena.....	17
Tabla 1.2 Clasificación de tamices.	19
Tabla 2.1 Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades	26
Tabla 2.2 Descripción del tamaño de bloque en función de discontinuidades.	28
Tabla 2.3 Clasificación de macizos rocosos en función del tamaño y forma de los bloques.	28
Tabla 2.4 Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso.....	31
Tabla 3.1 Clasificación de Arena según S.I.....	59
Tabla 3.2 Diseño de Muestras.....	60
Tabla 3.3 Resultados de flexión.....	68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Pesaje de Arena	75
Anexo 2 Porcentajes de PET y arena	76
Anexo 3 Homogenización de las muestras	77
Anexo 4 Colocación de la mezcla en el molde	78

**ALTERNATIVA DE USO DEL PET CON AGREGADOS (ARENA) EN
FORTIFICACIÓN MINERA, MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

RESUMEN

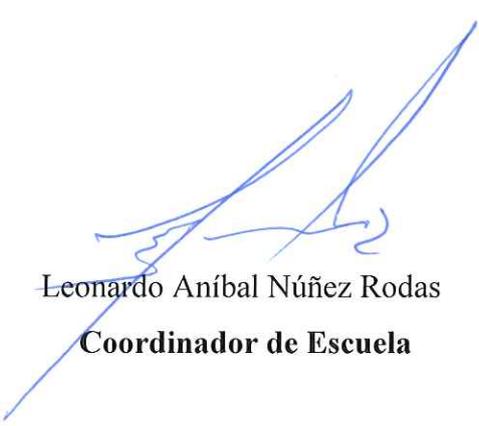
El presente trabajo tiene como finalidad determinar la viabilidad del uso de plástico PET combinado con arena, en diferentes porcentajes y granulometría, mediante ensayos de resistencia a la flexión, para futuras investigaciones en fortificación minera, siendo esta una alternativa amigable con el ambiente en comparación de la madera que se utiliza actualmente. Para lograr esto se elaboraron 10 muestras en total, 9 con distintos porcentajes de PET y arena y una con el 100% de PET. Para los ensayos se utilizó la prensa para pruebas de compresión de materiales marca Humboldt del laboratorio de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad el Azuay. Con los resultados obtenidos se analizó la factibilidad y uso de PET para ademes mineros.

Palabras claves: PET, flexión, fortificación, minería, arena.



Ernesto Patricio Feijoo Calle

Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Yalitza Anabel Botina Arévalo

Autor

**ALTERNATIVE OF USE OF PET WITH AGGREGATES (SAND) IN MINING
FORTIFICATION THROUGH THE CHARACTERIZATION OF RESISTANCE
TO THE FLEXION**

ABSTRACT

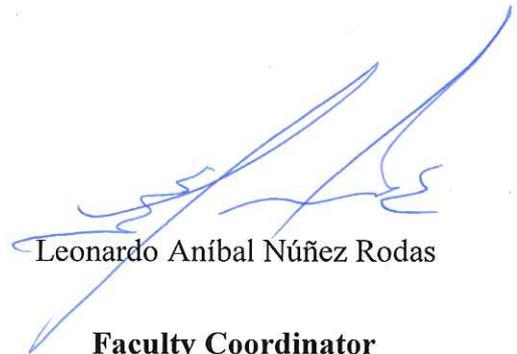
The purpose of this work is to determine the viability to use PET plastic combined with sand in different percentages and granulometries through bending resistance tests for future investigations in mining fortification. This plastic is an environmentally friendly alternative compared to the wood, which is currently used. To achieve this, 10 samples were prepared in total, 9 with different percentages of PET and sand and one with 100% PET. For the trials, the Humboldt compression press of materials for tests was used in the laboratory of the Faculty of Science and Technology of the University of Azuay. With the obtained results, the feasibility and use of PET for mining aids was analyzed.

Keywords: PET, bending, fortification, mining, sand.



Ernesto Patricio Feijoo Calle

Thesis Director



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator



Yalitza Anabel Botina Arévalo

Author



UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Yalitza Anabel Botina Arévalo

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle.

Abril 2019

**ALTERNATIVA DE USO DEL PET CON AGREGADOS (ARENA) EN
FORTIFICACIÓN MINERA, MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la minería ha evolucionado considerablemente a tal grado de ser una de las actividades más rentables, pues es un factor muy importante para el desarrollo económico de nuestro país. No obstante, está ligada a la producción de grandes residuos sólidos y líquidos produciendo contaminación de aire, suelo y agua.

Existe una gran variedad de minerales a explotar y sus procesos de extracción enmarcan en la extracción a cielo abierto y extracción subterránea. En la minería subterránea para llevar a cabo sus labores se requiere de fortificación para sus galerías, chimeneas, preparación y hundimiento, etc.

La madera es muy utilizada en ademes mineros (fortificación), esta etapa provoca la tala de árboles a gran escala, dejando nuestros bosques con impactos ambientales, debido a este problema se busca una alternativa amigable con el ambiente como es el Polietileno de Tereftalato (PET) con agregados (arena) para reemplazar la madera.

Con este trabajo investigativo se busca la viabilidad del PET mezclado con arena en distintos porcentajes y granulometrías.

En su primera parte este trabajo trata sobre definiciones básicas de la madera que comúnmente se utiliza en minería, como las propiedades mecánicas y especialmente flexión. Así mismo, sobre el origen del plástico, sus características generales, el PET y su reciclaje. Como también sobre los agregados, en este caso la arena con sus características.

Consecuentemente, se describe todo lo relacionado con la fortificación minera, en la cual es necesario utilizar una serie de conocimientos de ingeniería, aquí se detalla los conceptos sobre macizos rocosos y su clasificación, la determinación de tipos de fortificación en túneles y sus características.

Por último, se ha mencionado todo lo relacionado con la elaboración de las muestras, sus porcentajes y granulometría, al igual se detalla los equipos utilizados y soporte construido para lograr los ensayos. Finalmente se analizó los datos y resultados del ensayo.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO. PROPIEDADES MECÁNICAS, PLÁSTICOS Y AGREGADOS

Las propiedades mecánicas se agrupan de acuerdo al comportamiento de la madera ante la acción de una carga y al plano de corte en que se aplique la misma; como así también, de acuerdo a las modalidades de las cargas sobre las muestras, si éstas son estáticas o dinámicas, y de su tiempo de aplicación. De este modo, podemos dividir a las mismas en: resistencia estática, dinámica y de dureza / desgaste.

La resistencia estática de la madera: se determina a través de cargas o solicitaciones que se van aumentando en forma lenta y regular. Normalmente, la velocidad de aplicación de las cargas está establecida en las normas técnicas y tiene por finalidad producir situaciones de características aproximadas a las que presenta una carga estática propiamente dicha. Los ensayos de flexión estática, corte paralelo a las fibras, compresión paralela y perpendicular a las fibras pertenecen a esta clasificación.

Los valores de resistencia estática tienen una gran importancia en las aplicaciones de la madera en la construcción, especialmente en el dimensionado de las diferentes piezas según su resistencia y deformación. (Spavento, 2008)

La resistencia dinámica de la madera: se determina a través de la aplicación de cargas instantáneas. Debido a esto, las ondas generadas normalmente no se propagan, provocando la rotura del cuerpo a causa de la fragilidad que presentan las maderas. Esta es la característica fundamental de los diferentes ensayos dinámicos, ya que mediante ellos puede determinarse la fragilidad o capacidad de una madera para absorber cargas instantáneas, por intermedio del trabajo necesario para producir la rotura de una muestra de un solo impacto.

En el caso puntual de la flexión dinámica, la misma está relacionada con la flexión estática, pero la diferencia fundamental entre ambas, está basada en el carácter de las condiciones técnicas: mientras que en la flexión estática la carga actúa lentamente, a velocidad constante y se analizan fundamentalmente los atributos elásticos, en la flexión dinámica se ensaya el comportamiento plástico de la madera a través de una carga instantánea.

En madera sujeta a esfuerzos móviles como elementos de máquina, deportivos, carrocerías, escaleras y en construcciones, raramente se produce la rotura a cargas estáticas, sino que el peligro principal se presenta en muchos casos, espontáneamente a través de un esfuerzo dinámico, ocasionado por medio de un golpe por aplicación de una carga instantánea o vibración periódica. (Spavento, 2008)

1.1 Propiedades de la madera.

Anisotropía.

Es un material anisótropo, es decir que no se comporta igual en todas las direcciones de las fibras.

Resistencia.

La madera es uno de los materiales más idóneos para su trabajo a flexión, por su especial estructura direccional, su resistencia será máxima cuando la sollicitación sea paralela a la fibra y cuando sea perpendicular su resistencia disminuirá. En esta sollicitación juegan un papel importante las fibras cortas o interrumpidas y los nudos, que minoran la resistencia. El esfuerzo de flexión, origina uno de flexión y otro de compresión separados por una zona neutral, por lo cual la resistencia a flexión será máxima cuando la fuerza actuante sea perpendicular a las fibras y mínima cuando ambos sean paralelos.

Flexibilidad.

La madera puede ser curvada o doblada por medio de calor, humedad, o presión. Se dobla con más facilidad la madera joven que la vieja, la madera verde que la seca. Las maderas duras son menos flexibles que las blandas.

Dureza.

Está relacionada directamente con la densidad, a mayor densidad mayor dureza. Al estar relacionada con la densidad, la zona central de un tronco es la que posee mayor dureza, pues es la más compacta La humedad influye de manera cuadrática en la dureza. Si la humedad es elevada la dureza disminuye enormemente. Por el contrario, si la madera se reseca, carece de humedad y se vuelve muy frágil. (ARQHYS, 2012).

1.2 Resistencia a la flexión.

La flexión es una combinación de esfuerzos de compresión y de tracción como se muestra en la figura 1.1. Mientras que las fibras superiores de la pieza están sometida a un esfuerzo de flexión (se acortan), las inferiores se alargan, o viceversa cuando cambia el sentido de la fuerza, produciendo una deformación a lo largo de su eje, que tiendan a doblarlo. El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector. (Figura 1.1).

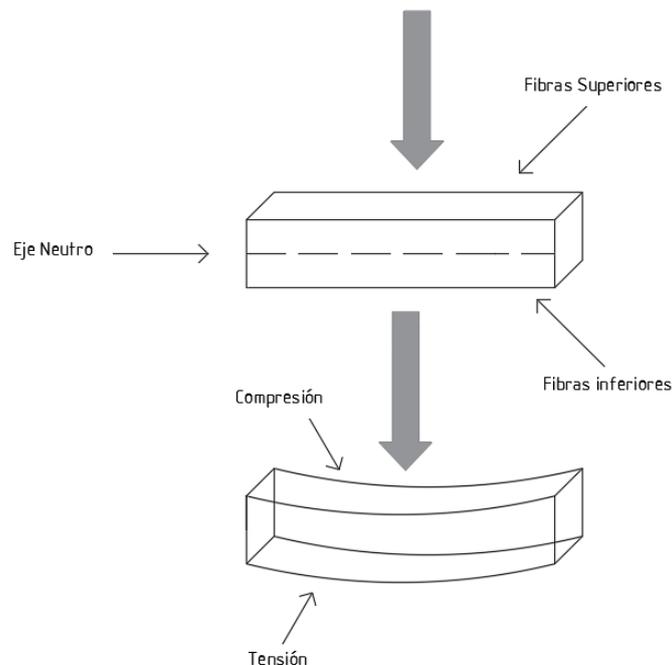


Figura 1.1 Ejemplo de movimiento de flexión.

A este tipo de esfuerzo se ven sometidas las vigas y las placas de una estructura. Al saltar en la tabla del trampolín de una piscina, la tabla se flexiona. También se flexiona un panel de una estantería cuando se carga de libros o la barra donde se cuelgan las perchas en los armarios.

Las vigas se clasifican de acuerdo con la forma en que estén apoyadas. En la figura 1.2 se muestran varios tipos de vigas que se usan con frecuencia.

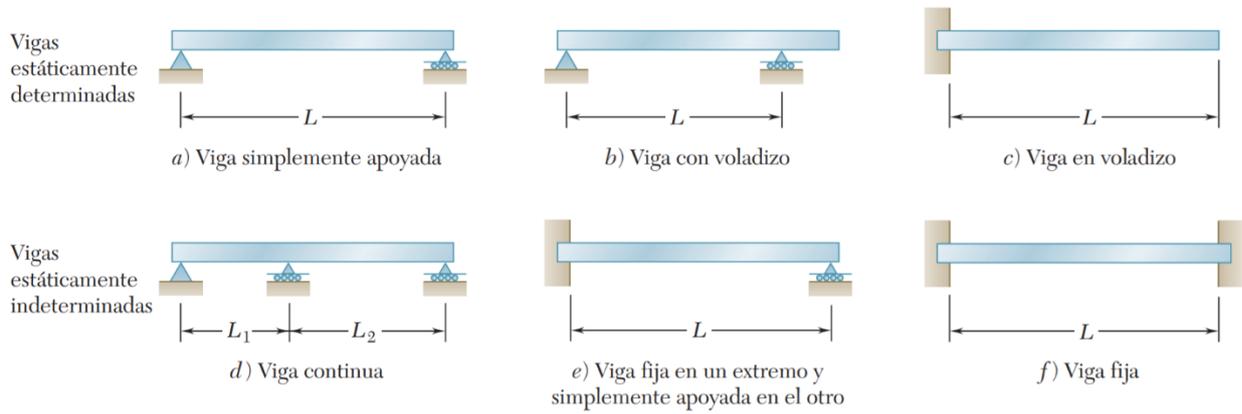


Figura 1.2 Clasificación de vigas.

Fuente: (Beer, 2010)

Para este ensayo se utilizó la viga simplemente apoyada que podemos ver en la figura 1.2 en el literal a. A continuación, se muestra el diagrama de fuerza cortante y momento aplicado para este ensayo.

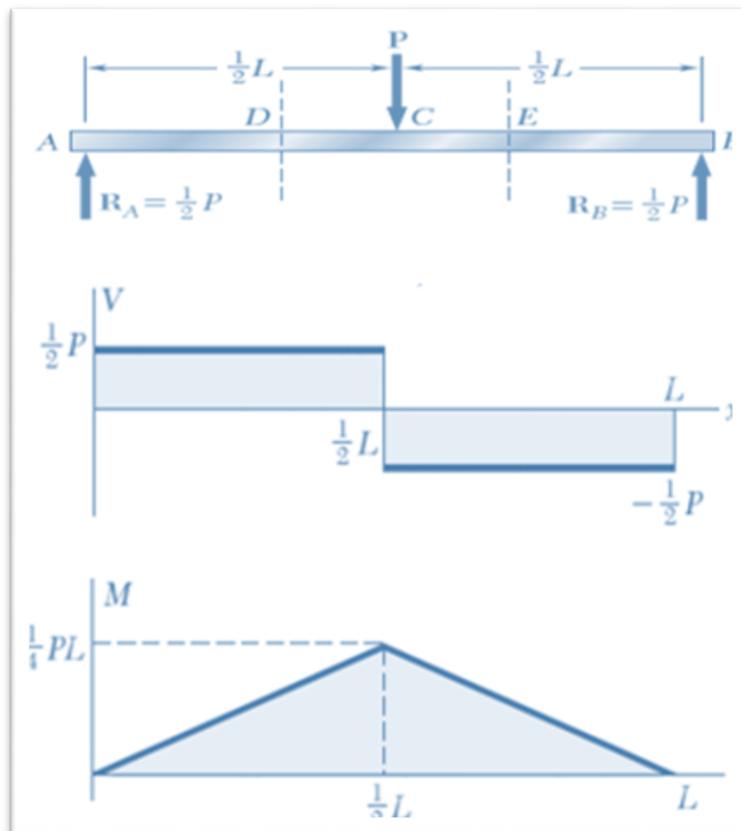


Figura 1.3 Diagrama de fuerza cortante y momento flector.

Fuente: (Beer, 2010)

Para calcular este tipo de esfuerzo, se utiliza la siguiente fórmula, donde σ_t es la tensión de trabajo expresado en kgf/cm^2 , M_f es el momento flector en la sección en $\text{cm}\cdot\text{kgf}$ y W_{xx} es el módulo o momento resistente de la sección en cm^3 .

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_{xx}}$$

Dentro del esfuerzo de flexión, debemos conocer las siguientes pautas:

Momento flector y fuerza cortante.

El momento flector es el momento resultante con respecto a dicha sección, de los momentos producidos por las fuerzas situadas a la izquierda o derecha de dicha sección, incluidas las reacciones.

La fuerza cortante es la suma algebraica de todas las fuerzas externas perpendiculares al eje de la viga (o elemento estructural) que actúan a un lado de la sección considerada.

Se dice que la fuerza cortante V y que el momento flector M en un punto dado de la viga son positivos cuando las fuerzas y los pares internos que actúan sobre cada parte de la viga están dirigidos como se muestra en la figura 1.3. (Beer, 2010)

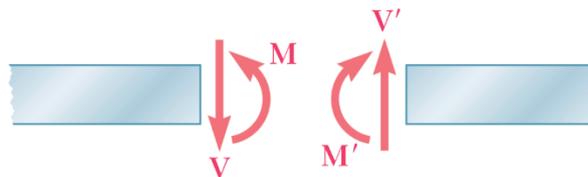


Figura 1.4 Fuerzas internas en la selección (fuerza cortante positiva y momento flector positivo).

Fuente: (Beer, 2010)

Momento resistente.

Depende de la forma de sección de la pieza y diferenciaremos entre los perfiles de sección cuadrada y sección redonda. Donde W_{xx} es el momento resistente, para secciones

rectangulares, b es la longitud de la base del rectángulo en cm y h es la altura del rectángulo en cm. El resultado ha de estar expresado en cm^3 .

Sección rectangular:

$$W_{xx} = \frac{bh^2}{6}$$

Fibras que trabajan a tracción y fibras que trabajan a compresión. Como ya hemos mencionado en el esfuerzo de flexión, está compuesto por dos esfuerzos, uno de tracción y otro de compresión.

$$\sigma_f = \frac{Mf}{W_{xx}}$$

Fibra neutra son las fibras que ni se alargan ni se encogen y están contenidas en el plano central que pasa por los ejes xx (eje horizontal) de todas las secciones, donde está el centro de gravedad. (Figura 1.5).

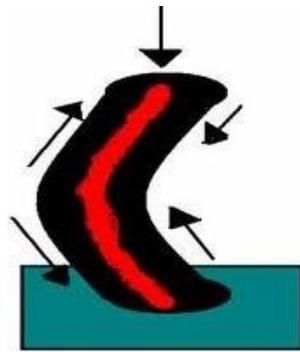


Figura 1.5 Diagrama de fuerzas en una viga en voladizo.

Fuente: (Federación de Enseñanza de Andalucía, 2011)

El momento de inercia se calcula con la siguiente fórmula y expresado en cm^4 :

Perfil rectangular:

$$I_{xx} = \frac{bh^3}{12}$$

(Federación de Enseñanza de Andalucía, 2011)

1.3 Origen del plástico

La historia del origen y evolución de lo que hoy conocemos como plásticos y que utilizamos a diario ya sea en una u otra actividad se remonta al año 1860, en el cual mediante un concurso en el que el premio era \$10.000, el fabricante estadounidense de bolas de billar Phelan and Collander buscaba un sustituto de garantías al marfil natural, pues éste no era un recurso económicamente sostenible.

Durante este concurso realizado entre varios inventores destacó el norteamericano Wesley Hyatt, él desarrolló un método de procesamiento mediante presión a la piroxilina, ésta sustancia era en sí un nitrato de celulosa de baja nitración, tratado anteriormente con alcanfor y una cantidad mínima de disolvente de alcohol, cabe recalcar que Hyatt no ganó dicho concurso, pero su producto fue patentado bajo el nombre de “celuloide”, el cual tuvo un importante éxito a nivel comercial pues se utilizó para elaborar diferentes productos u objetos que resultaban ser inflamables y se sabía de su deterioro al exponerse a la luz.

La producción de este celuloide se daba mediante el procesamiento de un hidrato de carbono que se obtenía de las plantas, en una solución de alcanfor y etanol, el resultado final era el celuloide cuya característica principal era el poder ser ablandado y moldeado repetitivamente mediante calor, lo cual le da el calificativo de termoplástico. Con dicho proceso se obtuvo la materia prima para fabricar distintos objetos, pero principalmente se elaboraban películas cinematográficas, mangos de herramientas y armazones para lentes, entre otros.

A principios del siglo XIX (1909) Leo Hendrik Baekeland, químico norteamericano con ascendencia belga, mediante ensayos y experimentos logró sintetizar un polímero de garantías y de interés comercial, el mismo que se producía mediante moléculas de fenol y formaldehído. Este polímero gozaba de características únicas para ese tiempo, principalmente el hecho de que podían moldearse en el mismo momento en que se formaba, su dureza al solidificarse, su nula conductividad a la electricidad y su resistencia a diferentes tipos de disolventes lo convirtieron en lo que para la historia se conocería como el primer plástico totalmente sintético y mecanizable de la historia y recibió la denominación de baquelita (bakelita). (Gómez, 1997)

Al momento de producir su polímero, Baekeland desconocía que su invento resultaría en lo que hoy por hoy conocemos bajo el nombre de copolímero que, a diferencia de los homopolímeros, constituidos por unidades monoméricas idénticas, éstos están formados por al

menos dos monómeros diferentes. Baekeland también llegó a ignorar un pequeño detalle que le confería a su invento la termoestabilidad y éste no era más que el alto grado de entrecruzamiento de la estructura molecular, que le otorgaba la propiedad de poder moldearse apenas se terminaba su preparación.

Dicho de manera simple, una vez que la baquelita se enfría no es posible que se pueda volver a ablandar, lo cual la diferencia en la actualidad de otros polímeros termoplásticos que son capaces de fundirse y moldearse repetidas veces debido a que su estructura molecular no presenta un entrecruzamiento, sino que sus cadenas moleculares pueden ser lineales o ramificadas.

La evolución de los plásticos se vio impulsada por el incentivo que suponía a los químicos y a la industria el poder implementar moléculas más sencillas con el fin de que se pudieran formar enlaces y a partir de ellas crear polímeros. Así fue que en las posteriores décadas se fueron descubriendo nuevos termoplásticos, por ejemplo, un grupo de químicos ingleses en 1930 ensayó sometiendo al gas etileno a la acción del calor y la presión, este se polimerizaba formando un termoplástico al que denominaron PE (Polietileno).

De la misma manera en 1930, pero en Alemania se desarrolló una variante de plástico conocida como PS (Poliestireno) que era un material totalmente transparente y que en su mayoría se utilizó para envases o recipientes, a partir de este también se produjo el EPS (Poliestireno Expandido) el cual era una espuma blanca y rígida que se utilizó como aislante térmico y en otros casos para embalaje. Posteriormente en 1950 se descubrió el PP (Polipropileno).

El PVC (Cloruro de Polivinilo), que hoy por hoy se utiliza en tuberías de distintos tipos, se inventó al remplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro dando como resultado un plástico muy duro y rígido que era resistente al fuego, adecuado para cañerías, al agregar distintos aditivos al PVC se consiguió un material más suave y blando que se utilizó para ser sustituto del caucho que en ese entonces era utilizado en distintos objetos como cobertores, impermeables y juguetes. El PVC guarda relación con un material sumamente parecido que es el PTFE (Politetrafluoretileno) o mayormente conocido como teflón con el cual se producían sartenes y rodillos antiadherentes entre otras herramientas. (Modernos, 1990)

El mayor impulso que recibió la industria de los plásticos se dio en años anteriores y posteriores a la Segunda Guerra Mundial pues en 1935 el químico Wallace Carothers creó la primera fibra

de nylon de la historia, en la empresa Dupont, esto se dio debido a que Carothers descubrió que juntar una sustancia química como el Hexametildiamina con el ácido adípico daba como resultado polímeros que al ser bombeados y estirados a través de agujeros se podían tejer, su primer uso fue la fabricación de paracaídas para las fuerzas aerotransportadas de la armada estadounidense, se extendió de manera acelerada a la industria textil que combinó el nylon con algodón y lana para la confección de medias y otros artículos de vestir tejidos, el nylon tuvo distintos tipos de variantes como el acrilán y el orlón.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la industria de los plásticos creció y evolucionó debido a una serie de eventos en distintos países en conflicto, en Alemania se perdieron las fuentes naturales de látex, utilizado en diferentes materiales, esto dio paso a la creación de un programa dedicado al desarrollo de cauchos sintéticos. La irrupción de Japón en este conflicto mundial comenzó mediante un bloqueo de suministros a Estados Unidos, estos suministros eran distintos tipos de cauchos sintéticos, seda y diferentes tipos de metales asiáticos, Estados Unidos en respuesta a este bloqueo intensificó la producción y utilización de plásticos tales como el nylon que se convirtió en fuente de fibras textiles, los poliésteres que fueron utilizados para crear blindajes y materiales bélicos y armamentísticos, la creación en grandes cantidades de cauchos sintéticos.

Una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial, la industria de los plásticos mantuvo una creciente evolución mediante descubrimientos que la dotaron de mayor campo de aplicación, los plásticos técnicos como los policarbonatos, acetatos y las poliamidas se utilizaron como materiales sintéticos que suplantaron a los metales en componentes para maquinaria, cascos de seguridad y en general a muchas más herramientas que estuvieran sometidas a altas temperaturas o condiciones ambientales extremas.

La industria de los plásticos mantuvo su creciente evolución antes, durante y posterior a la Segunda Guerra Mundial siendo uno de los favorecidos a distintas circunstancias que desembocaron en su crecimiento, producción y evolución debido a su inagotable versatilidad a la hora de crear sustitutos aceptables.

Los estudios acerca de las propiedades de los plásticos llegaron a su punto máximo en el año 1953 cuando el químico alemán Karl Ziegler realizó una exhaustiva investigación acerca del polietileno y a su vez su homólogo Giulio Natta desarrolló en 1954 el polipropileno, estos dos tipos de plásticos son los más utilizados en la presente década, en 1963 Karl Ziegler y Giulio

Natta compartieron el Premio Nobel de Química por sus estudios y avances en el campo de los polímeros.(Gnauk,1989)

En la actualidad el plástico que más se utiliza en el embotellamiento, envasado y en distintos materiales es el PET (Polietileno de Tereftalato) que ha suplantado al vidrio y al PVC en el mercado de plásticos para envases. (Rodriguez, 2018)

1.3.1 Evolución del plástico

Mientras, en 1907, el químico Leo Baekeland, considerado fundador de los plásticos modernos, inventó la “baquelita”, la primera resina totalmente sintética calificada como termoestable, aislante y resistente al agua, a ácidos y al calor moderado. De igual manera que en el caso anterior, vino a sustituir un elemento natural que escaseaba (el shellac), cuyo uso principal era el aislamiento para cables. Gracias a éste y a otros descubrimientos, Baekeland recibió las medallas Nichols de la Sociedad Americana de la Química (1909) y Franklin del Instituto Franklin (1940).

Fue en 1926, cuando el químico Waldo Semon, trabajador de la empresa B.F. Goodrich, desarrolló definitivamente el PVC (cloruro de vinilo), un material impermeable y resistente al fuego, ideal para numerosas aplicaciones que a día de hoy siguen resultando indispensables en nuestra vida diaria (como tubos de cañería).

Otros de los plásticos más usados y conocidos, fueron elaborados por primera vez durante los años 30, como son el polietileno, el poliestireno y el nylon, seguidos veinte años después por el polipropileno.

En la actualidad, el plástico que se ha desarrollado con mayor intensidad es el tereftalato de polietileno (PET), cuya aplicación principal es el envasado de productos alimentarios. (Aseconsist, 2017).

1.4 Características Generales de los Plásticos

La mejor manera de caracterizar a los plásticos es describir las cualidades que todos ellos tienen en común, es decir, mencionar aquellas características que convierte a un elemento en plástico, estas son:

- Los plásticos se llaman así debido a que en alguna etapa de su producción, elaboración o utilización poseen propiedades plásticas, pueden ser plásticos solo una vez o tantas veces como se desee.
- Los plásticos son materiales orgánicos debido a que están basados en la química del carbono.
- Los plásticos son también materiales sintéticos cuyos productos se derivan de industrias químicas que convierten materias primas en objetos de utilización cotidiana.
- Los plásticos son polímeros cuyo peso molecular siempre es elevado, esto se debe a que son moléculas grandes formadas por numerosas unidades repetidas combinadas en un solo agregado.

Específicamente existen diferentes propiedades o características mecánicas que hacen del plástico un material versátil y confiable:

- Densidad: La densidad de los plásticos es baja, esto se debe a que la mayoría de plásticos tienen un bajo peso específico.
- Propiedades Ópticas: Existen materiales plásticos transparentes, translúcidos y opacos, esta propiedad se adquiere mediante la adición de pigmentos o colorantes durante la etapa de producción del plástico.
- Coeficiente de Fricción: El coeficiente de fricción producida entre los plásticos con otros plásticos o metales es baja, esto elimina la necesidad de lubricantes.
- Aislante Eléctrico y Térmico: En general, los plásticos son excelentes aislantes eléctricos, pues no tienen la capacidad de conducir electricidad, sin embargo, en caso de incendios el plástico es altamente conductor y es necesario tomar precauciones.
- Resistencia a la Fatiga: Una gran variedad de plásticos ofrecen un comportamiento sobresaliente a la fatiga, lo cual los hace óptimos para soportar esfuerzos dinámicos como dobleces o pandeos.
- Conductividad Térmica: Los plásticos contienen un alto coeficiente de aislamiento térmico, esto le proporciona una ventaja para controlar o soportar variaciones de temperatura externas.
- Resistencia a Impactos: Son altamente resistentes a los impactos, esta resistencia puede ser mejorada añadiendo o incorporando aditivos durante su elaboración.

- **Resistencia a la Corrosión:** Resisten la humedad, oxígeno, ácidos débiles y soluciones salinas de manera notable, existen algunas variaciones de plásticos que además son resistentes a solventes orgánicos.
- **Diseño:** En el proceso de producción de los plásticos, las propiedades de este ofrecen la posibilidad de diseñar y elaborar formas polifuncionales de objetos sin necesidad de ensamblajes.
- **Economía:** Tomando en cuenta el coste de la materia prima, su producción y manufactura es relativamente económica.
- **Higiene:** La hermeticidad con la que los plásticos son elaborados y la adecuada materia prima los convierten en altamente higiénicos.
- **Grado de Toxicidad y Reciclaje:** Los plásticos son resistentes al deterioro, pero no todos ellos son reutilizables, esto depende de su tipo y aplica para todo tipo de plástico.

1.5 Plástico PET y su reciclaje.

La presencia de plásticos en los residuos se ha incrementado de forma continua en las últimas décadas. Esto obedece a distintas causas, entre las que destaca su utilización en productos de vida útil corta que son desechados rápidamente por los usuarios; se ha estimado que alrededor del 50% de los plásticos que se producen se destina a aplicaciones de un solo uso; entre 20 y 25% se emplean en la construcción y el resto en la fabricación de otros productos, como electrónicos, muebles y vehículos. Los plásticos con mayor presencia en los residuos son el polietileno y el PET, debido a que representan la mayor proporción en los envases y embalajes. Como la gran mayoría de los plásticos no son degradables, una vez que se desechan se acumulan en los rellenos sanitarios o tiraderos, e incluso en los distintos hábitats que conforman el planeta, a los que llegan debido a su mal manejo. (Morillas, 2016).

El reciclaje consiste básicamente en someter a un material o producto ya utilizado en un proceso de reutilización total o parcial para dar origen materia prima o nuevos productos. Esta iniciativa tiene como base moral el agotamiento de los recursos naturales y la obligación de mantener el ambiente libre de contaminantes.

1.5.1 Sistema de reciclaje

Se define como una instalación con diversos equipos ligados en serie y que permiten el tratamiento completo del residuo hasta la obtención de un producto capaz de ser reutilizado como materia prima.

Trituración.

Dependiendo de los materiales a tratar se pueden utilizar dos o tres fases de trituración, clasificándolas como: Pre trituración o desgarrado, trituración media y trituración final o de afinase.

Lavado o descontaminación.

En esta fase se pretende liberar el material de los contaminantes que lo acompañan, sea tierra (en filmes agrícolas u otros), sean restos de productos diversos (en los embalajes), papel, colas o incluso materias plásticas no compatibles. Los equipos utilizados en esta fase varían conforme a los materiales a tratar, y pueden actuar aisladamente o en conjunto para obtener el mejor resultado.

Secado.

El material triturado y lavado transporta consigo cantidades considerables de agua que, a pesar de irse separando en los sinfines de transporte que hacen de unión de los diversos equipos del sistema y que son dotados de fondos en chapa perforada para facilitar esa separación, es necesario retirarla para que el material sea tratado, en la fase siguiente, por la extrusora, granceadora o peletizadora. Esta operación es ejecutada por centrifugadoras de alta rotación en cubas de chapa perforada permitiendo la salida de los líquidos y otras impurezas que se separan en el proceso de centrifugación. (Correa, 2014).

Reciclado Mecánico:

El reciclado mecánico consiste en la conversión de desechos plásticos post-consumo o post-industriales en partículas que pueden ser reutilizadas en la producción de otros productos,

obteniendo diferentes plásticos en determinadas proporciones o productos compuestos por un único tipo de plástico.

Trituración para obtener hojuelas: El plástico es fragmentado en pequeñas partes con un molino especial.

Remoción de Contaminantes: En esta etapa son removidos los diferentes tipos de contaminantes por ejemplo etiquetas, papel u otros contaminantes.

Lavado: La suciedad del plástico es eliminada por medio de una etapa de lavado, el agua del lavado debe recibir un tratamiento para su reutilización o emisión como afluente.

Secado: Se retira el exceso de agua que se encuentra en el material utilizando un proceso de centrifugado.

Aglutinación: Cuando se completa el secado, el material debe ser compactado antes de proseguir, esto aminora su volumen; el proceso de aglutinación funciona permitiendo que la fricción que se produce en los fragmentos de plástico en la pared del equipo rotativo provoquen un aumento de temperatura que forma una masa plástica, aquí también pueden añadirse aditivos como cargas, pigmentos o lubricantes.

Extrusión: La extrusora funde y vuelve a la masa plástica homogénea. A la salida de la extrusora se encuentra el cabezal, del cual sale un hilo continuo que es enfriado con agua, enseguida este hilo es picado en un granulador transformando en pellet (granos plásticos).

Reciclado Químico:

Este tipo de reciclado químico trata de diferentes procesos mediante los cuales las moléculas de los polímeros se rompen para dar origen a una nueva materia prima básica que puede ser utilizada para fabricar nuevos plásticos. (Hachi, 2010)

1.6 Agregados. Clasificación.

La arena varía en forma lisa y redonda a muy áspera y angular. Las formas lisas y redondas se encuentran en materiales arrastrados por el aire, los granos sub redondos se presentan en aluviones y arenas de playa y aquellos angulares en depósitos glaciales. En un ambiente fuertemente intemperizador, los minerales toman formas variadas, determinadas por la

naturaleza de la intemperización y la estructura cristalina del mineral. Por ejemplo, a medida que la apatita se intemperiza a formar granos de tamaño de arena por disolución, se producen numerosas formas muy irregulares, en contraste con otros minerales como la hipestena que al hidrolizarse desarrolla borde aserrados (Fitzpatrick, 1984).

Leet & Judson, 1968 usa la escala de Wentworth para la determinación del tamaño del particulado de la arena, es decir clasifica en cinco categorías diferentes el tamaño y el grado del partículas de arena, es la comúnmente utilizada por geólogos, mientras que Blyth & Freitas, 2001, determina otra escala para el tamaño del particulado, el cual divide en tres categorías el tamaño y el grado de la partícula, siendo esta empleada en especificaciones ingenieriles y utilizada en la mecánica de suelos.

Tabla 1.1 Escalas usadas para el tamaño de arena.

WENTWORTH		ATTERBERG	
Grado	Tamaño	Tamaño	Grado
	2mm	2mm	
Grano muy grueso			
	1mm		Grano grueso
Grano grueso		0,6mm	
	1/2mm		
Grano mediano			Grano medio
	1/4mm		
Grano fino		0,2mm	
	1/8mm		
Grano muy fino			Grano fino
	0.06mm	0.06mm	

Fuente: (Fitzpatrick, 1984)

Los agregados que componen los suelos son granos de diferente forma y tamaño que pueden ser del tamaño de la mano hasta aquellos que son visibles solamente por medio de un microscopio, la granulometría es un proceso de clasificación y distribución según el tamaño de los granos de un material y sirva principalmente para analizar las propiedades mecánicas de los agregados que se utilicen en construcciones civiles.

Cuando se habla de granulometría se puede conceptualizar como un procedimiento ya sea manual o mecánico que tenga como fin la separación o clasificación según el tamaño de partícula de un material, es decir, la medición o gradación de los granos que componen un suelo específico mediante el cual se pueda analizar su composición, origen y propiedades mecánicas

y geológicas por medio de una escala de clasificación definida, además de esto, se estudia la proporción en la que un tamaño de partícula se presenta en un material.

La importancia del estudio granulométrico radica en la clasificación de los materiales según su tamaño de grano, pero además esto permite una clasificación según el sistema de dispersión que posea el material, por lo general los suelos están constituidos por sistemas de material disperso pues sus granos son de diferente tamaño y forma, estos sistemas se encuentran finamente divididos, aunque actúan de manera distinta en conjunto que en solitario. Estos sistemas pueden presentar de tres maneras que son:

Sistemas Granulares: Estos sistemas por lo general presentan distribuciones de tamaño de partícula en torno a los 2 milímetros y 0.044 milímetros.

Sistemas en Polvo: Los sistemas en polvo se componen de finas partículas que se encuentran entre los 44 micrómetros y los 0.24 micrómetros aproximadamente.

Sistemas Coloidales: Son solo visibles plenamente mediante un microscopio debido a que su tamaño de partícula oscila entre las centenas y decenas de nanómetros.

La mayoría de los agregados que la industria ocupa para la producción de materiales son sistemas dispersos como la arena y grava, la clasificación de los sistemas según el tamaño de su grano es compleja dependiendo de cuanto más disminuya el tamaño de la partícula y cuanto más se desee clasificar los granos.

1.6.1 Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico o de granulometría es el conjunto de procesos mediante los cuales se logra la determinación de los tamaños que compone una muestra en relación a su peso, es una herramienta que sirve para el análisis del comportamiento de un material que se destina como agregado de un producto ya sea para construcciones civiles o ensayos de permeabilidad.

La finalidad de este análisis es obtener la distribución y clasificación de un suelo según su tamaño de partícula mediante un proceso manual o mecánico de tamización, en los cuales se utilizan tamices de separación normalizados en orden decreciente, los resultados se pueden interpretar de forma analítica, mediante tablas de porcentajes con respecto al peso total, y de forma gráfica, mediante gráficas de curvatura conocida como “Curva Granulométrica”.

1.6.2 Tamización

El proceso mecánico de tamización mediante el cual se separan las partículas por su tamaño en diferentes tamices normalizados que contienen diferentes tipos de aberturas en orden decreciente, la cantidad retenida entre dos tamices indica el tamaño que posee, estos en sayos se realizan en partículas cuyo tamaño es mayor a 0.075 milímetros.

Un tamiz es un instrumento metálico por el cual se separa los suelos según su tamaño, está conformado por alambres que se cruzan ortogonalmente y forman aberturas, según las normas de American Society for Testing and Materials (ASTM E11) son diseñados por medio de pulgadas y números que indican el grado de abertura del tamiz.

Existen diferentes tipos de mallas que clasifican el material, pero las más comunes se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1.2 Clasificación de tamices.

TAMIZ (ASTM)	ABERTURA REAL (mm)	TIPO DE SUELO
3 "	76,12	GRAVA
1 "	25,4	
3/8 "	9,52	
Nº 4	4,76	ARENA GRUESA
Nº 10	2	ARENA MEDIA
Nº 20	0,84	
Nº 40	0,42	
Nº 60	0,25	ARENA FINA
Nº 140	0,105	
Nº 200	0,074	

Fuente: (USCS, 2011)

El método de tamización también posee algunas claras desventajas al momento de aplicarlo, por ejemplo, no provee de información acerca de la estructura y forma de las partículas, algunas partículas pequeñas tienden a adherirse a partículas grandes, el número de tamices son limitados y los tamaños que una partícula puede tener son infinitos y sobre todo este método de gradación mide partículas irregulares en un sistema orientado a partículas de forma regular.

Procedimiento:

La muestra se debe secar en un horno a 100° centígrados por un periodo de 3 horas con el fin de evaporar todo tipo de humedad que las cavidades porosas puedan albergar.

Con ayuda de una balanza se debe pesar la cantidad de muestra que se va a analizar.

Se procede a verter el material a través de los tamices en orden decreciente con un acumulador en el fondo.

Se inserta el sistema de tamices en un agitador mecánico con movimiento vertical y horizontal durante 5 minutos, de no contar con agitadores mecánicos se puede hacer de forma manual por un lapso de 10 minutos.

Se pesa la cantidad de material retenido en cada tamiz, este proceso puede hacerse de manera individual o acumulada.

El material acumulado en el fondo se puede secar a 100° centígrados si se desea clasificar aún más.

Cabe recalcar que si se tiene un material compuesto por granulometrías muy dispares es mejor realizar el proceso en dos etapas, en la primera realizar el procedimiento con tamices de hasta una granulometría media y la segunda etapa realizar solo con tamices de granulometría media y fina. (Rodríguez, 2018).

1.6.3 Curvas Granulométricas

La curva granulométrica de un suelo se obtiene mediante los datos obtenidos por el proceso de tamización, se representa en una tabla junto a una gráfica donde se puede observar el tamaño promedio de las partículas y la forma de distribución, estos sistemas de representación ayudan a comparar diversas granulometrías de forma eficiente.

La grafica en la que la curva granulométrica se representa está conformada por un eje de abscisas, que contiene una escala logarítmica que representa el diámetro del tamiz, y en el eje de las ordenadas se encuentra una escala natural que representa el porcentaje que pasa por cada tamiz.

Las representaciones gráficas de las curvas granulométricas sirven para determinar tres parámetros básicos del suelo, estos son:

Diámetro Efectivo: Es la abertura del tamiz por la cual pasa el 10% de la muestra.

Coefficiente de Uniformidad: Es la relación entre el diámetro correspondiente al 60% y el diámetro efectivo de la curva granulométrica.

Coefficiente de Curvatura: Es la relación que existe entre la abertura por la cual pasa el 30% del material dividida para la abertura por la cual pasa el 60% del material multiplicada por el diámetro efectivo de la curva granulométrica.

Por medio del análisis granulométrico se pueden obtener los distintos tipos de diámetros de los granos del material representados por la letra "D" y un subíndice (10, 30, 60,85) que denota el porcentaje del material. (M Casanova., 2004).

1.7 Tipos de Arenas y sus características.

La arena es un conjunto de partículas de rocas disgregadas. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 mm. Una partícula individual dentro de este rango es llamada grano de arena. Una roca consolidada y compuesta por estas partículas se denomina arenisca. Las partículas por debajo de los 0,063 mm y hasta 0,004 mm se denominan limo, y por arriba de la medida del grano de arena y hasta los 64 mm se denominan grava. El componente más común de la arena, en tierra continental y en las costas no tropicales, es la sílice, generalmente en forma de cuarzo. Sin embargo, la composición varía de acuerdo a los recursos y condiciones locales de la roca. Gran parte de la fina arena hallada en los arrecifes de coral, por ejemplo, es caliza molida que ha pasado por la digestión del pez loro. En algunos lugares hay arena que contiene hierro, feldespato o, incluso, yeso. Según el tipo de roca de la que procede, la arena puede variar en apariencia. Por ejemplo, la arena volcánica es de color negro mientras que la de las playas con arrecifes de coral suele ser blanca. La arena es transportada por el viento, también llamada arena eólica, (pudiendo provocar el fenómeno conocido como calima) y el agua, y depositada en forma de playas, dunas, médanos, etc. En el desierto, la arena es el tipo de suelo más abundante. La granulometría de la arena eólica está muy concentrada en torno a 0,2 mm de diámetro de sus partículas. Para que una arena pueda ser utilizada para elaboración de moldes y corazones para el vaciado de piezas

debe cumplir con una serie de requerimientos que son: a) Ser fácilmente moldeable, de manera que se adapte perfectamente a las formas del modelo y las reproduzca fielmente. b) Presentar una buena resistencia a la erosión producida por el desplazamiento y el impacto del metal líquido en el interior del molde. c) Resistencia a los ataques químicos que pueden producirse entre el molde y el metal líquido. d) Refratariedad, es decir, ofrecer una adecuada resistencia a altas temperaturas. e) Poseer buena permeabilidad para permitir la evacuación de los gases que se generan durante la colada del molde y del aire que ocupa inicialmente la cavidad. f) Buena capacidad para disipar la energía térmica del metal líquido y favorecer así la correcta solidificación de las piezas. g) Ser colapsable, es decir, presentar una buena capacidad de disgregación. h) Generar buenos acabados superficiales en las piezas) Ser reutilizable, de manera que una vez regenerada pueda moldearse nuevamente. (Solis, 2014)

CAPITULO 2

FORTIFICACIÓN MINERA

2.1 Macizos Rocosos.

Es el conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. La presencia de discontinuidades de diverso tipo confiere al macizo rocoso un carácter heterogéneo y un comportamiento no continuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, y condiciona su comportamiento geomecánico e hidráulico.

También la propia matriz rocosa, a pesar de considerarse mecánicamente continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral.

Todos estos factores constituyen, en conjunto, la estructura rocosa, y gobiernan el comportamiento global del macizo rocoso, predominando más uno u otro componente en función de sus propiedades respectivas y de la escala o ámbito de estudio en el macizo (figura 2.1).

Además de las propiedades intrínsecas del macizo rocoso asociadas a las características de la matriz rocosa y de las discontinuidades, y que definen en gran parte su resistencia, existen otros factores que afectan a su comportamiento geotécnico, como son:

- Las tensiones naturales (estado tensional).
- Los factores geoambientales.
- Estructuras tectónicas y sedimentarias no discontinuas en el macizo rocoso (por ejemplo, los pliegues). (Gonzalez, 2007)

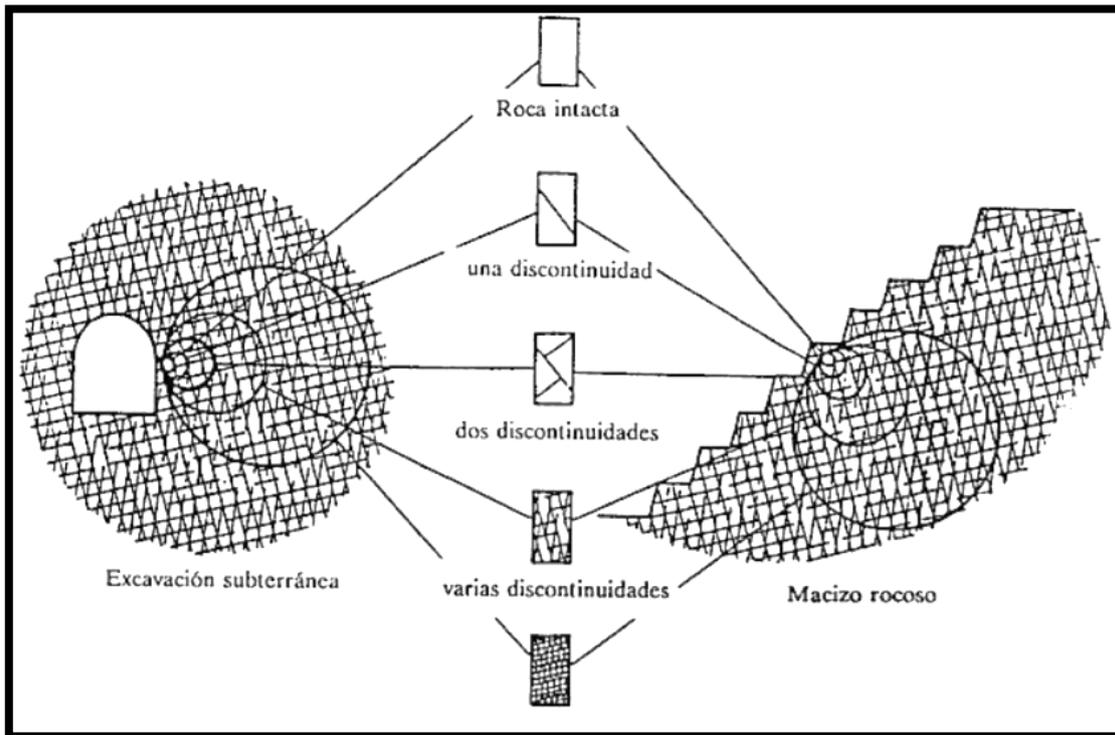


Figura 2.1 Transición entre la roca intacta y el macizo rocoso altamente fracturado.

Fuente: (Gonzalez, 2007).

2.1.1 Parámetros del macizo rocoso.

Para la caracterización global del macizo rocoso a partir de datos de afloramientos, además de la descripción de sus componentes, la matriz rocosa y las discontinuidades, deben ser considerados otros factores representativos del conjunto, como son:

- Número y orientación de las familias de discontinuidades.
- Tamaño de bloque e intensidad de fracturación.
- Grado de meteorización.

Número y orientación de familias de discontinuidades

El comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades. La orientación de las diferentes familias con respecto a una obra o instalación sobre el terreno puede determinar, además, la estabilidad de la misma.

La intensidad o grado de fracturación y el tamaño de los bloques de matriz rocosa vienen dados por el número de familias de discontinuidades y por el espaciado de cada familia. Cada una de las familias queda caracterizada por su orientación en el espacio y por las propiedades y características de los planos.

En los reconocimientos de campo de los macizos rocosos deben ser registradas todas las familias presentes, y evaluar su grado de importancia relativa. Este grado puede expresarse mediante la asignación de números correlativos para las familias de mayor a menor importancia. Así, la familia principal (con mayor continuidad, menor espaciado, mayor abertura, etc.) sería la familia número uno.

La orientación media de una familia se evalúa mediante la proyección estereográfica o la construcción de diagramas de rosetas con los datos de las orientaciones medidas para cada discontinuidad. Actualmente existen programas informáticos para realizar estos trabajos de una forma rápida y exacta. (Gonzalez, 2007)

2.2 Clasificación de los macizos rocosos

El macizo puede clasificarse por el número de familias según la tabla 2.1, variando entre macizos rocosos masivos o con una única familia de discontinuidades, por ejemplo, un macizo rocoso granítico, y macizos con cuatro o más familias de discontinuidades, como puede ser un afloramiento de pizarras plegado e intensamente fracturado. La presencia de tres familias principales de discontinuidades ortogonales entre sí es frecuente en los macizos rocosos sedimentarios, siendo una de las familias la estratificación.

Tabla 2.1 Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades

Tipo de macizo rocoso	Número de familias
I	Masivo, discontinuidades ocasionales
II	Una familia de discontinuidades
III	Una familia de discontinuidades más otras ocasionales.
IV	Dos familias de discontinuidades.
V	Dos familias de discontinuidades más otras ocasionales.
VI	tres familias de discontinuidades.
VII	tres familias de discontinuidades más otras ocasionales.
VIII	Cuatro o más familias de discontinuidades.
IX	Brechificado.

Fuente: (Ferrer, 2010)

Las familias de discontinuidades se pueden representar gráficamente mediante bloques diagrama como el de la figura 2.2, permitiendo así la visualización espacial de su orientación relativa y del tamaño y forma de los bloques de matriz rocosa.

Tamaño de bloque y grado de fracturación

El tamaño de los bloques que forman el macizo rocoso condiciona de forma definitiva su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. La dimensión y la forma de los bloques están definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad. La descripción del tamaño de bloque se puede realizar de las siguientes formas:

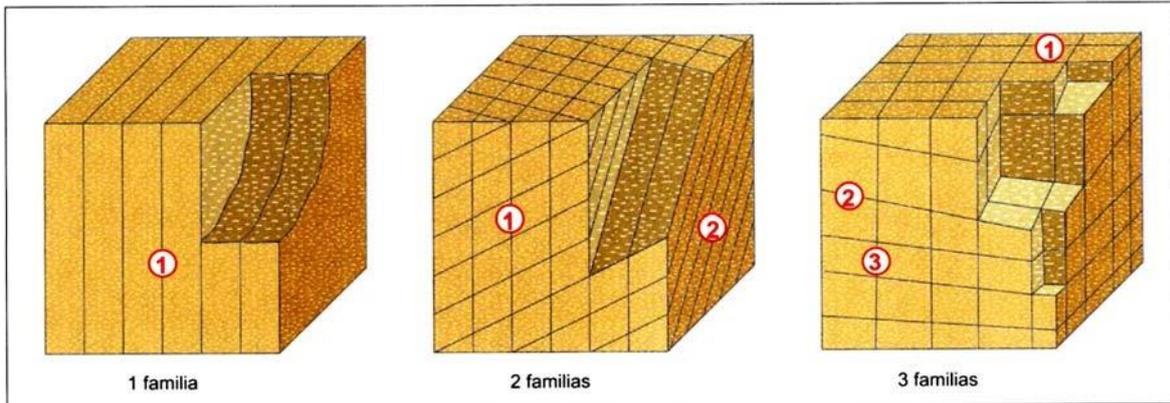


Figura 2.2 Representación del número de familias mediante bloques diagramas.

Fuente: (Ferrer, 2010)

- Mediante el índice de tamaño de bloque I_b , que representa las dimensiones medias de los bloques tipo medidos en el afloramiento. Por ejemplo, en el caso de una roca sedimentaria con planos de estratificación y con dos familias de discontinuidades perpendiculares entre sí, el índice I_b vendría definido por:

$$I_b = (e_1 + e_2 + e_3) / 3$$

Siendo e_1 , e_2 y e_3 los valores medios del espaciado de las tres familias de discontinuidades.

- Mediante el parámetro J_v , que representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen (1 m^3) del macizo rocoso. Ante la dificultad de observar tridimensionalmente un afloramiento, el valor de J_v se suele determinar contando las discontinuidades d_s de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias (o en su defecto realizando la corrección necesaria con respecto a la dirección aparente de medida):

$$J_v = \sum \frac{n \text{ de discontinuidades}}{\text{longitud de medida}}$$

Por ejemplo, para un macizo con tres familias de discontinuidades (J_1 , J_2 y J_3):

$$J_v = (n J_1/L_1) + (n^\circ J_2/L_2) + (n^\circ J_3/L_3)$$

Tabla 2.2 Descripción del tamaño de bloque en función de discontinuidades.

Descripción	Jv (discontinuidades/m ³)
Bloques muy grandes	< 1
Bloques grandes	1-3
Bloques de tamaño media	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	> 30

Fuente: (Ferrer, 2010)

La longitud a medir dependerá del espaciado de cada familia, variando normalmente entre 5 y 10 metros. De forma más rápida, aunque menos exacta, también puede estimarse el valor de Jv contando el número total de discontinuidades que interceptan una longitud L en cualquier dirección de interés (cortando al mayor número posible de planos), correspondiendo este valor a la frecuencia de discontinuidades, λ :

$$\lambda = \frac{\text{n de discontinuidades}}{L \text{ (m)}}$$

El valor de Jv se relaciona con el tamaño de los bloques; los valores mayores de 60 corresponden a un macizo rocoso brechificado.

La tabla 2.3 incluye una clasificación del macizo rocoso en función de la forma y tamaño del bloque y de la intensidad de fracturación.

Tabla 2.3 Clasificación de macizos rocosos en función del tamaño y forma de los bloques.

Clase	Tipo	Descripción
I	Masivo	Pocas discontinuidades o con espaciado muy grande
II	Cúbico	Bloques aproximadamente equidimensionales
III	Tabular	Bloques con una dimensión considerablemente menor que las otras
IV	Columnar	Bloques con una dimensión considerablemente mayor que las otras
V	Irregular	Grandes variaciones en el tamaño y forma de los bloques
VI	Triturado	Macizo rocoso muy fracturado

Fuente: (Ferrer, 2010)

En las (figuras 2.3 y 2,4) se presentan ejemplos de descripción del tamaño de los bloques y del grado de fracturación en los macizos rocosos en función del número de familias de discontinuidades.

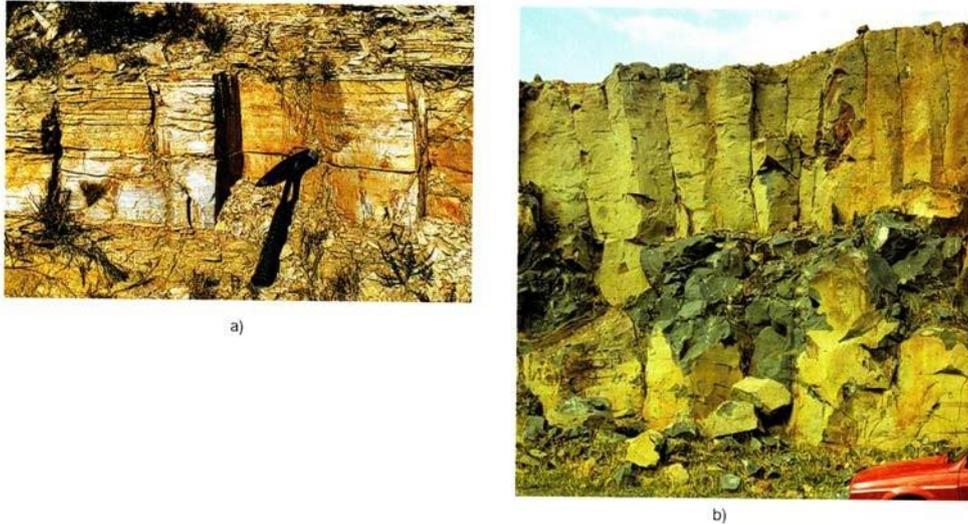


Figura 2.3 a) Bloques cúbicos pequeños formados por familias de discontinuidades ortogonales entre sí en materiales margocalizos; b) bloques columnares grandes (de unos 3 m de altura) en un macizo volcánico con la parte inferior afectada a por un mayor grado de fracturación.

Fuente: (Gonzalez, 2007)

La fracturación del macizo rocoso está definida por el número, espaciado y condiciones de las discontinuidades, cualquiera que sea su origen y clase. El grado de fracturación se expresa habitualmente por el valor del índice RQD (rock quality designation).

A pesar de su utilidad, este índice no considera aspectos como la orientación, separación, rellenos y de- más condiciones de las discontinuidades, por lo que no es suficiente para describir las características de la fracturación de los macizos rocosos; estos aspectos adicionales deben quedar cubiertos por descripciones de campo y de los testigos de los sondeos.

La descripción de la fracturación a partir de datos de afloramientos puede referirse al número de familias de discontinuidades y al tamaño de los bloques, como se ha descrito en los párrafos anteriores. El índice RQD puede estimarse en afloramientos a partir de correlaciones empíricas como la de Palmstrom, 1975 (ISRM, 1981):

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad \text{para } J_v > 4,5$$

$$RQD = 100 \quad \text{para } J_v \leq 4,5$$

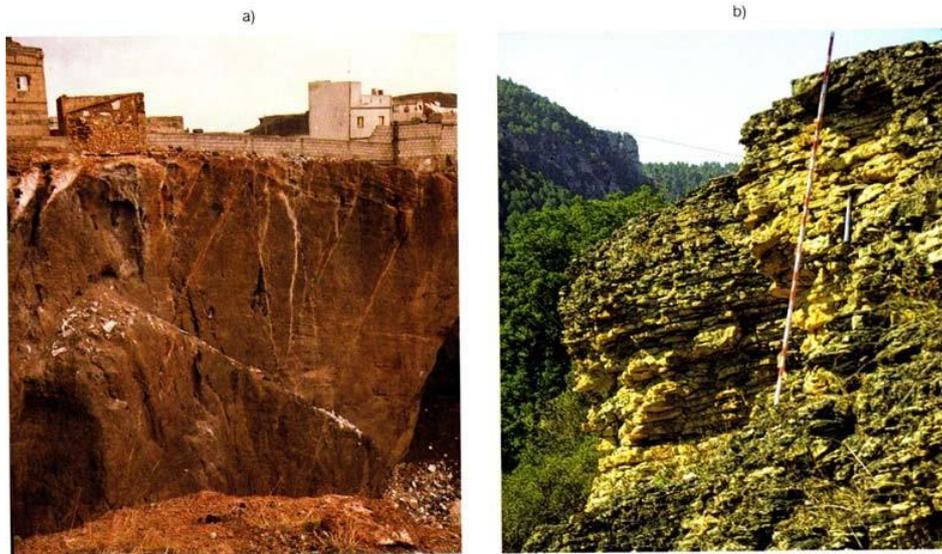


Figura 2.4 Macizo rocoso volcánico masivo con bloques muy grandes; b) macizo dolomítico triturado, con bloques muy pequeños.

Fuente: (Ferrer, 2010)

Por ejemplo, para un macizo rocoso de calidad aceptable con un RQD de 65, el valor correspondiente de J_v es de 15, mientras que, para un macizo rocoso de calidad pobre, con RQD de 30, J_v vale 26.

La estimación del índice RQD puede también realizarse a partir de la frecuencia de discontinuidades, λ , mediante la siguiente expresión que proporciona el valor teórico mínimo del RQD (Figura 2.5):

$$RQD \approx 100 \exp^{-0,1 \lambda} (0,1 \lambda + 1)$$

donde λ es la inversa del espaciado medio de las discontinuidades. (Figura 2.5).

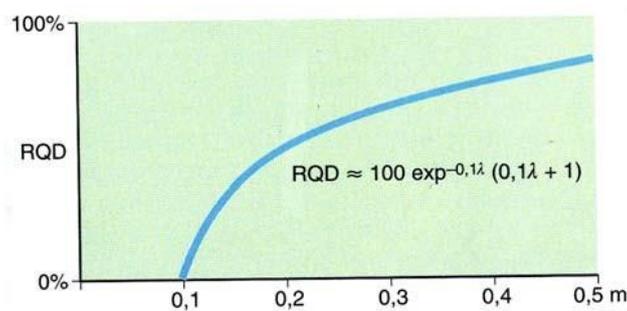


Figura 2.5 Relación entre la frecuencia del espaciado y el índice RQD.

Fuente: (Ferrer, 2010).

Grado de meteorización.

La evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se realiza por observación directa del aflora- miento y comparación con los índices estándares recogidos en la tabla 2.4. En ocasiones puede ser necesario fragmentar un trozo de roca para observar la meteorización de la matriz rocosa.

En la (figura 2.6) se presentan ejemplos de macizos rocosos afectados por diferentes grados de meteorización.

Tabla 2.4 Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso.

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y /o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y /o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y /o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

Fuente: (ISRM, 1981)

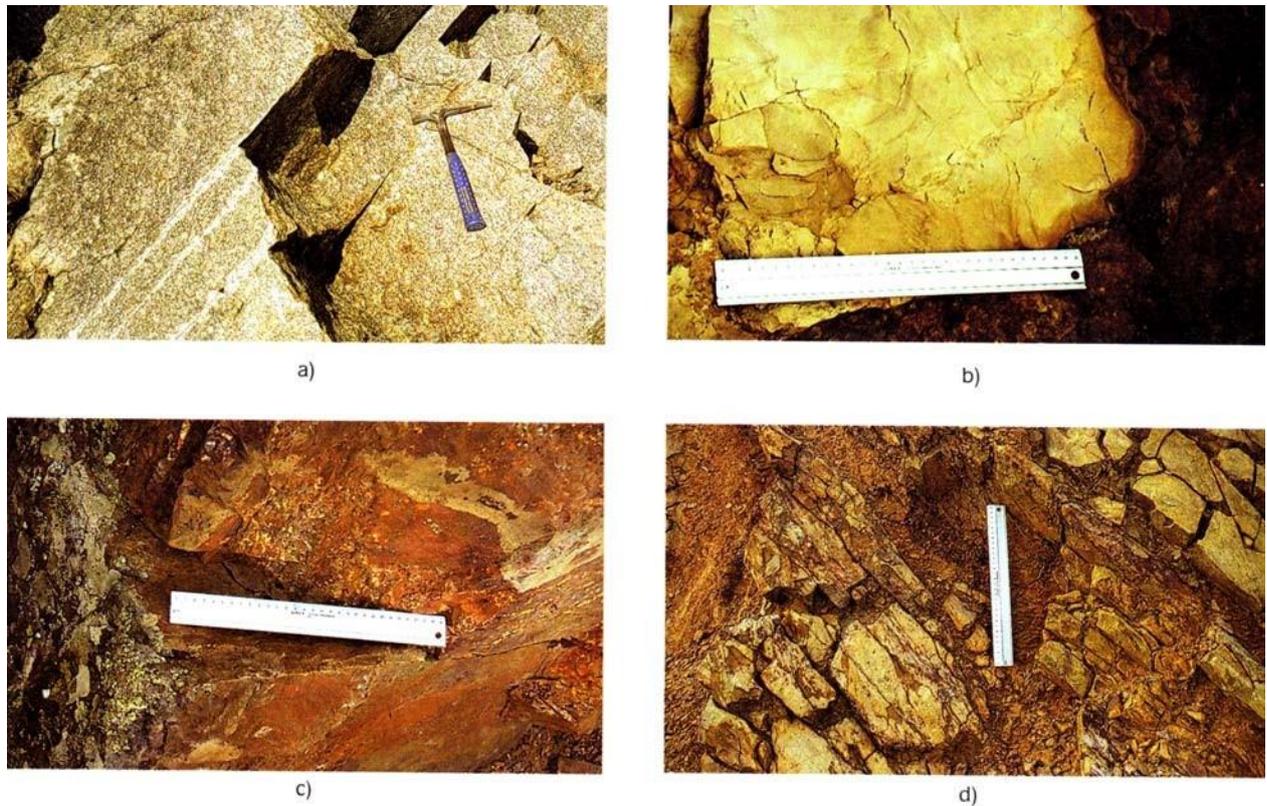


Figura 2.6 Ejemplos de meteorización de macizos rocosos. a) Grado II: gneiss glandular con matriz rocosa y superficies de discontinuidad ligeramente decoloradas; b) y c) Grado III: macizos rocosos calizo y cuarcítico moderadamente meteorizados, con alteración en las superficies de discontinuidad y en los bloques de matriz rocosa; d) Grado IV: macizo cuarcítico muy meteorizado, con los bloques de matriz rocosa separados y muy alterados.

Fuente: (Ferrer, 2010)

2.3 Determinación de la fortificación en túneles mediante clasificaciones geomecánicas.

2.3.1 Sistema de clasificación Q

Basado en una gran cantidad de datos asociados a proyectos de túneles, (Barton, 1974) del Norwegian Geotechnical Institute (NGI) desarrolló el sistema de clasificación geomecánica Q para estimar la necesidad de soporte y fortificación de túneles. El valor de Q está definido por seis parámetros combinados en la ecuación 2.1.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2.1)$$

Donde:

RQD: Rock quality designation

Jn: Parámetro para el número de familias de discontinuidades

Jr: Parámetro para la rugosidad de la junta

Ja: Parámetro para la alteración de la junta

Jw: Parámetro para presencia de agua

SRF: Factor asociado al estado tensional

La aplicación tradicional del valor de Q en función de sus 6 parámetros es para la selección de una combinación competente de shotcrete y pernos para el soporte y fortificación de macizos rocosos, es decir para la estimación del revestimiento permanente para túneles o cavernas en roca.

El parámetro RQD fue desarrollado por Deere (Deere, 1963) para proveer una estimación cuantitativa de la calidad de las rocas en función de testigos. Está definido como “El porcentaje de trozos intactos más largos que 100mm sobre el largo total del testigo”.

Respecto a los demás parámetros, cuyos valores se encuentran en las tablas 2.5 a la 2.12, se establece que, Jn es el índice para el número de familias de diaclasas en la zona de interés, Jr es el índice para la rugosidad de la familia de diaclasas más desfavorable o discontinuidad rellena, Ja es el índice para el grado de alteración o relleno de arcilla para la familia de diaclasas más desfavorable, Jw es el índice para la afluencia de agua y efectos de presión, que pueden causar vaciado del relleno de las diaclasas, y SRF es el índice para la falla, para razones resistencia/solicitud en rocas masivas duras, para squeezing o para swelling (Thomas, 2014).

Tabla 2.5 Valoración RQD en clasificación Q

1	RQD	RQD (%)
A	Muy Mala	0 - 25
B	Mala	25 - 50
C	Regular	50 - 75
D	Buena	75 - 90
E	Excelente	90 - 100

Fuente: (Palmstrom, *Characterization of jointing density and the quality of rock masses*, 1974)

Tabla 2.6 Valoración para índice de diaclasado en clasificación Q

2	Índice de diaclasado	Jn
A	Masivo, sin diaclarar o con fisuración escasa	0,5 - 1,0
B	Una familia	2
C	Una familia y diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias	4
E	Dos familias + diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias	9
G	Tres familias + diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias	15
J	Roca triturada	20

Fuente: (Palmstrom, *Characterization of jointing density and the quality of rock masses*, 1974)

Tabla 2.7 Valoración para índice de rugosidad en clasificación Q

3	Índice de rugosidad de las diaclasas	Jr
a) Contacto entre las paredes; b) Contacto entre paredes ante un desplazamiento inferior a 10 [cm]		
A	Discontinuas	4
B	Onduladas, rugosas o irregulares	3
C	Onduladas, lisas	2
D	Onduladas, pulidas	1,5
E	Planas, rugosas o irregulares	1,5
F	Planas, lisas	1
G	Planas, pulidas	0,5
c) Sin contacto entre las paredes		
H	Zona con materiales arcillosos, arenosos, o gravas con espesor para impedir el contacto	1

Fuente: (Palmstrom, *Characterization of jointing density and the quality of rock masses*, 1974)

Tabla 2.8 Valoración para índice de alteración en clasificación Q

4	Índice de alteración de las diaclasas	Ja
a) Contacto entre las paredes de la roca (sin minerales de relleno)		
A	Relleno duro, inablandable, impermeable	0,75
B	Paredes inalteradas o ligeramente manchadas	1
C	Paredes ligeramente alteradas	2
D	Recubrimientos inablandables limosos o areno arcillosos	3
E	Recubrimientos ablandables o con arcillas de baja fricción	4
b) Contacto entre las paredes de la roca (Con minerales de relleno < 5mm)		
F	Partículas arenosas, roca desintegrada sin arcilla	4
G	Rellenos de minerales arcillosos inablandables	6
H	Rellenos de minerales arcillosos ablandables	8
J	Rellenos de arcillas expansivas, montmorillonita	8 a 12
c) Sin contacto entre las paredes de las discontinuidades (Rellenos de gran espesor)		
K L M	Capas de roca desintegrada o triturada o arcilla (Ver G, H, J)	6 a 12
N	Capas de arcilla limosa o arenosa	5
O P R	Capas gruesas de arcilla (Ver G, H, J)	10, 13, 13 a 20

Fuente: (Palmstrom, *Characterization of jointing density and the quality of rock masses*, 1974)

Tabla 2.9 Valoración por presencia de agua en clasificación Q

5	Factor de reducción por la presencia de agua	Presión de agua [Kg/cm ²]	Jw
A	Excavación seca o poca infiltración, inferiores a 5l/min localmente	<1	1
B	Infiltración o presión mediana con lavado ocasional de los rellenos	1 - 2,5	0,66
C	Gran infiltración en roca competente con diaclasas sin relleno	2,5 - 10	0,5
D	Gran infiltración a presión alta, lavado importante de los rellenos	2,5 - 10	0,33
E	Infiltración o presión excepcionalmente alta junto con las voladuras	>10	0,2 - 0,1
F	Infiltración o presión excepcionalmente alta en todo momento	>10	0,1 - 0,05

Fuente: (Palmstrom, *Characterization of jointing density and the quality of rock masses*, 1974)

Tabla 2.10 Valoración para estado tensional en clasificación Q

6 Condiciones tensionales de la roca				SRF
a) Excavación en zonas de falla y/o fallas				
A	Múltiples zonas de debilidad que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada, roca circundante muy suelta (cualquier profundidad)			10
B	Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación < 50m)			5
C	Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación > 50m)			2,5
D	Múltiples zonas de fractura en roca competente sin arcilla, roca circundante suelta, cualquier profundidad			7,5
E	Zonas de fracturas aisladas en roca competente sin arcilla, profundidad excavación < 50m			5
F	Zonas de fracturas aisladas en roca competente sin arcilla, profundidad excavación > 50m			2,5
G	Diaclasas abiertas sueltas, diaclasado intenso cualquier profundidad			5
b) Excavación en rocas duras (competentes)				SRF
Comportamiento geotécnico		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	
H	Tensiones bajas, cerca de la superficie, diaclasas abiertas	>200	<0,01	2,5
J	Tensiones de nivel medio, estables	200 - 10	0,01 - 0,3	1
K	Elevado nivel de tensiones, estructura muy cerrada, Slabbing bajo, Slabbing menor, tensiones altas, ligera inestabilidad	10 - 5	0,3 - 0,4	0,5 - 2
L	Slabbing moderado	5 - 3	0,5 - 0,65	5 - 50
M	Slabbing y estallido de roca, Slabbing fuerte, Slabbing muy fuerte	3 - 2	0,65 - 1	50 - 200
N	Estallido de roca severo	<2	>1	200 - 400
c) Excavación en rocas deformables (incompetentes)				SRF
Comportamiento geotécnico		σ_θ/σ_c		
O	Squeezing bajo	1 - 5		5 - 10
P	Squeezing alto	> 5		10 - 20
d) Rocas expansivas: Actividad química dependiendo de presencia de agua				
R	Swelling bajo			5 - 10
S	Swelling alto			10 - 15

Fuente: (Palmstrom, Characterization of jointing density and the quality of rock masses, 1974)

El RQD es una herramienta de medición relativamente sencilla y rápida, ocupada en los registros por testigos y muchas veces es el único método usado para medir el grado de fracturación en la zona de interés.

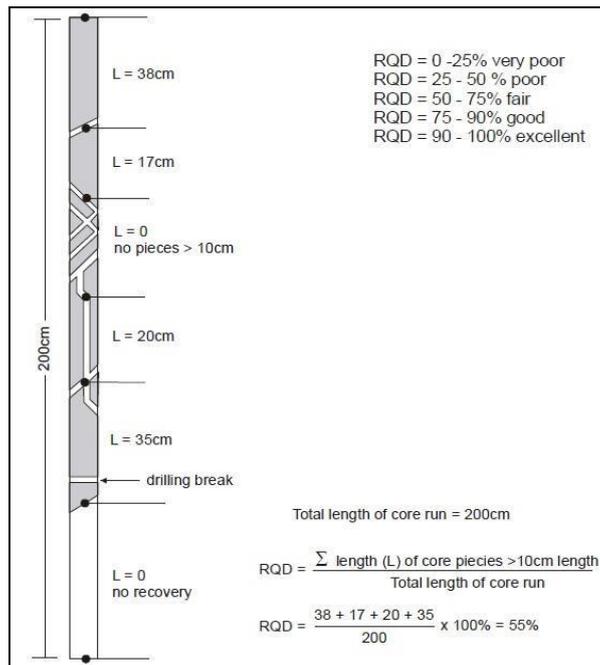


Figura 2.7 Procedimiento de medición y cálculo de RQD

Fuente: (Palmstrom, *Measurements of and correlation between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)*, 2005)

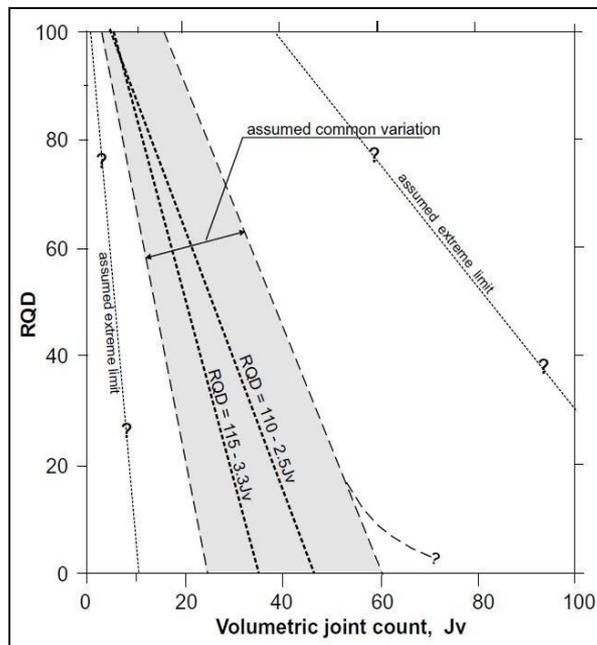


Figura 2.8 Correlación entre Jv y RQD con el rango

Fuente: (Palmstrom, *Measurements of and correlation between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)*, 2005)

Los estudios hasta la fecha muestran que es difícil relacionar el parámetro RQD con otras mediciones del grado de fracturación (Palmstrom, Measurements of and correlation between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), 2005), porque el RQD es un indicador unidimensional promediado basado sólo en testigos. Simulaciones usando bloques de tamaño y forma similar con muestreos lineales en distintos ángulos fueron usadas para hacer las estimaciones que relacionen parámetros relativos al tamaño de bloque. Los primeros intentos fueron hechos por Palmstrom (Palmstrom, Characterization of jointing density and the quality of rock masses, 1974) cuando introdujo el concepto de Volumetric Joint Count (J_v), que es una estimación del número de diaclasas que intersectan un volumen de macizo rocoso.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad 2.2$$

(RQD = 0 para $J_v > 35$, y RQD = 100 para $J_v < 4.5$)

La expresión 2.2 relaciona RQD y J_v , esta expresión fue incluida en la introducción del parámetro Q por Barton. Al observar la Figura 2.8 es clara la pobreza de la correlación entre ambos parámetros especialmente cuando las muestras de testigos tienen largos de alrededor de 0.1m. Ante dicha condición, (Palmstrom, 2005) propuso la relación 2.3 entre los parámetros, que, ante los casos estudiados en el citado trabajo, demostraron una mejor correlación.

$$RQD = 110 - 2.5J_v \quad 2.3$$

(RQD = 0 para $J_v > 44$, y RQD = 100 para $J_v < 4$)

De todas maneras, cuando J_v es casi el único parámetro disponible, la ecuación 2.3 ha sido una alternativa para la transición entre RQD y J_v .

La asociación de factores permite darle un sentido físico a cada uno de los cuocientes que conforman el parámetro Q.

2.3.2 Tamaño relativo de bloque, RQD/ J_n

El cuociente RQD/ J_n , representando la estructura del macizo rocoso, tiene dos valores extremos, 100/0.5 y 10/20, entendiendo el valor mínimo de RQD=10%, por lo tanto, el rango limitado de RQD se extiende gracias a la división por el factor J_n . Este cuociente representa la estructura a gran escala del macizo rocoso dando una cruda medición respecto al tamaño de bloque dentro de sus dos valores extremos 200 y 0.5. Si analizamos los valores extremos del cuociente y los interpretáramos como centímetros, las partículas “extremas” de 200 y 0.5 son vistas como una aproximación cruda pero bastante realista, aunque probablemente los tamaños

más grandes serán varias veces el tamaño extremo del parámetro y los fragmentos más pequeños, menores a la mitad del valor del cociente, donde las partículas de arcilla están obviamente excluidas. (Thomas, 2014)

2.3.3 La resistencia al corte interbloque, J_r/J_a

El segundo cociente representa la rugosidad y características friccionales de las paredes de juntas, con o sin material de relleno. El cociente J_r/J_a es una caracterización útil para la condición de las discontinuidades, para numerosas descripciones, bien definidas, y condiciones fácilmente reconocibles. “Este cociente está ponderado a favor de la aspereza de juntas inalteradas en contacto directo, donde se espera que las superficies en contacto estén cerca de peaks de esfuerzo, que se dilatan fuertemente cuando existe cizalle y que serán especialmente favorables para la estabilidad del túnel”. Cuando las juntas tienen rellenos de arcillas finas, el esfuerzo se reduce significativamente. (Hoek, 2004)

2.3.4 El esfuerzo activo, J_w/SRF

El cociente J_w/SRF es una relación empírica de dos grupos de parámetros de esfuerzo, pérdida de carga en casos de excavaciones a través de zonas de debilidad o rocas arcillosas, esfuerzos en rocas competentes, cargas de squeezing en rocas plásticas incompetentes. El parámetro J_w es una medida de la presión de agua, que tiene un efecto adverso sobre el esfuerzo de corte en la junta debido a una reducción en la tensión normal efectiva. El agua, además, causa ablandamiento y posibles flujos que lixivien material arcilloso presente en las juntas. “Está comprobado que es imposible combinar estos dos parámetros en términos de tensiones efectivas interbloque, porque paradójicamente, un valor alto de tensión normal efectiva a veces puede significar condiciones menos estables que un valor bajo, a pesar de la resistencia al corte más alto” (Hoek, 2004).

Tabla 2.11 Descripción y valores para el parámetro J_w

Caracterización	P_w [kg/cm ²]	J_w
Excavaciones secas o poca infiltración, i.e. <5l/min localmente	< 1	1
Infiltración o presión mediana con lavado ocasional de los rellenos	1 - 2.5	0.66
Gran infiltración o presión alta en roca competente con diaclasas sin relleno	2.5 – 10	0.5
gran infiltración o presión alta, lavado importante de los rellenos	2.5 – 10	0.3
Infiltración o presión excepcionalmente alta con agua en chorro, disminuyendo con el tiempo	> 10	0.2 - 0.1
Infiltración o presión excepcionalmente alta con agua constante sin disminución en el tiempo	> 10	0.1 - 0.05

Fuente: (Palmstrom, Characterization of jointing density and the quality of rock masses, 1974)

Es claro que para flujos leves de agua ($J_w \geq 0.5$) existe influencia en las condiciones para un túnel, pero generalmente no significan grandes variaciones en las cantidades de soporte y fortificación. Para flujos donde se tienen $J_w < 0.5$, el agua puede limitar el uso de shotcrete y requerir soluciones especiales de soporte (A Palmstrom, 2006).

El factor de reducción de esfuerzos (Stress reduction factor, SRF), es básicamente una medida de:

- Pérdida de carga en casos de intersección entre zonas de debilidad/fallas, con la excavación.
- Esfuerzos de roca en macizos rocosos competentes, o problemas de sobreesfuerzo de roca en macizos rocosos frágiles.
- Carga de squeezing en macizos rocosos plásticos poco competentes.
- Cargas por swelling de reacciones químicas causadas por agua.

2.3.5 Dimensión equivalente, D_e

En relación al valor de Q y sus requerimientos de estabilidad y soporte de excavaciones subterráneas, Barton definió un parámetro adicional llamado dimensión equivalente, D_e , de la excavación, obtenido según la relación 2.4.

$$De = \frac{\text{Luz, diametro o altura de la excavación (m)}}{\text{Relación de soporte de excavación, ESR}} \quad 2.4$$

El valor de ESR está relacionado con el uso posterior de la excavación y el nivel de seguridad asociado, que influencia el sistema de soporte a instalar para mantener la estabilidad de la excavación. Barton definió los siguientes valores. (Barton, 1974)

Tabla 2.12 Categorías para la relación de soporte de excavación, ESR

Tipo de excavación	ESR
Excavaciones mineras provisionales	3-5
Excavaciones mineras permanentes, túneles de conducción de agua para obras hidroeléctricas (con excepción de las cámaras de alta presión para compuertas), túneles piloto (exploración), excavaciones parciales para cámaras subterráneas grandes.	1.6
Cámaras de almacenamiento, plantas subterráneas para el tratamiento de aguas, túneles carreteros y ferrocarriles pequeños, cámaras de alta presión, túneles auxiliares	1.3
Casas de máquinas, túneles carreteros y ferrocarriles mayores, refugios de defensa civil, portales y cruces de túnel	1.0
Estaciones nucleares eléctricas subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones para deporte y reuniones, fábricas	0.8

Fuente: (Palmstrom, Characterization of jointing density and the quality of rock masses, 1974)

Finalmente, los valores de Q son combinados con las dimensiones del túnel en un gráfico. Dicho gráfico está basado en más de 1000 casos de soporte para rocas en túneles o cavernas. Además, se define el valor de la clasificación Q, usando una serie de tablas mostradas en la sección anexos de esta memoria, donde se definen los números asociados a los diferentes parámetros que constituyen el valor de Q, basados en observaciones geológicas de macizo, en túneles o por muestreo de testigos. Se muestra en la Figura 2.8 el gráfico generado para la clasificación geomecánica Q.

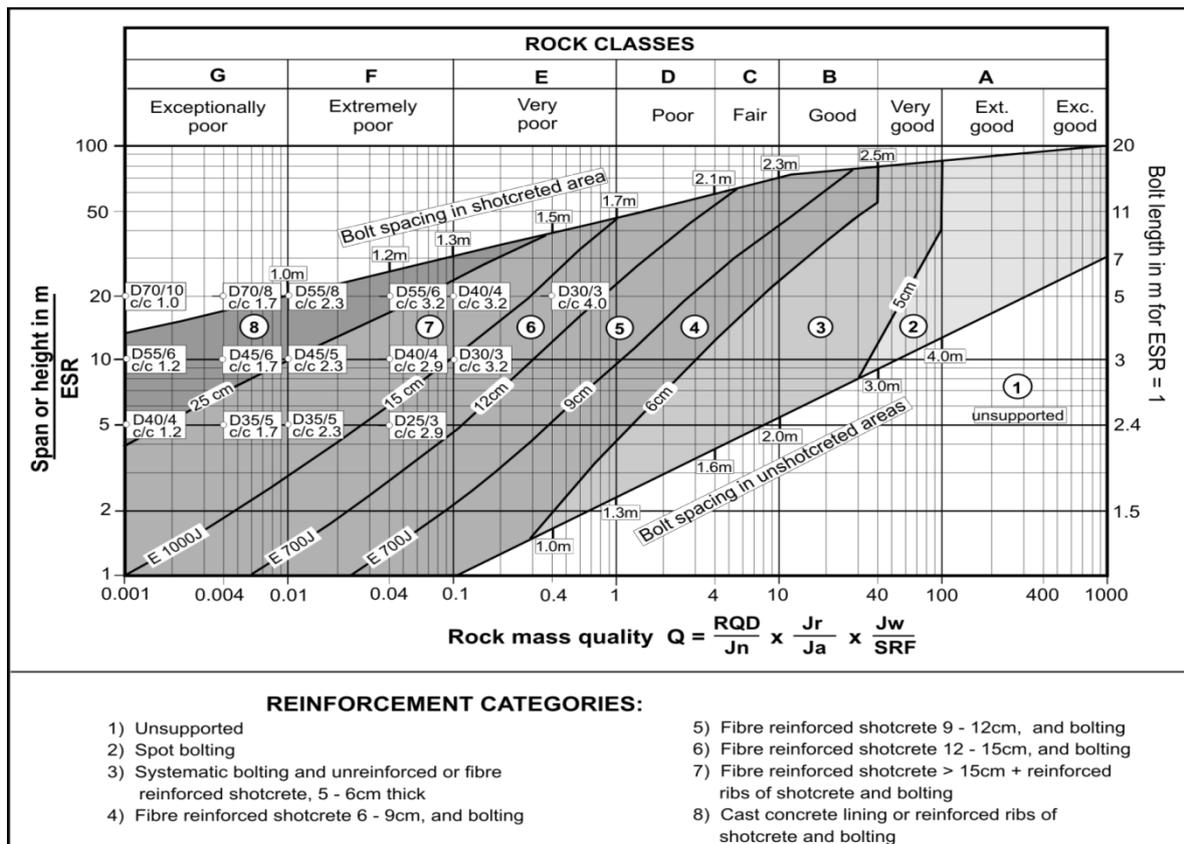


Figura 2.9 Gráfico de soporte para Q.

Fuente: (Palmstrom, Combining the RMR, Q and RMi classification system., 2009)

En este se determina la dimensión equivalente, De, versus el valor de Q.

2.3.6 Rock Mass Rating, RMR

El sistema de clasificación rock mass rating (RMR) fue inicialmente desarrollado en el South African Council of Scientific and Industrial Research (CSIR) por Bieniawski en 1973 en base a la experiencia en túneles poco profundos en rocas sedimentarias. El sistema de clasificación ha sufrido varios cambios desde su desarrollo en 1973, bajando la cantidad de parámetros de 8 a 6, ajustando o bajando los requerimientos de soporte, modificando alcances, etc. La clasificación geomecánica descrita en este apartado corresponde a la actualización realizada por Bieniawski en 1984. Para el uso de la clasificación RMR, el área de estudio debe ser dividida en unidades estructurales particulares sobre las cuales se determina la calidad del macizo rocoso. Los siguientes seis parámetros son usados para clasificar un macizo rocoso usando el sistema RMR, donde el último parámetro corresponde a un ajuste de la clasificación por su uso en túneles. (Tabla 2.13).

Tabla 2.13 Parámetros para clasificación RMR

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality <i>RQD</i>		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater r	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m Span	1 year for 10 m Span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (aperture)			None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infilling (gouge)			None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering Ratings			Unweathered 6	Slightly weathered 5	Moderately weathered 3	Highly weathered 1	Decomposed 0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis					
Drive with dip - Dip 45 - 90°			Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable			Favourable		Very unfavourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45-90°			Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°				
Fair			Unfavourable		Fair				

Fuente: (Bieniawski, 1989)

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
- Rock quality designation, RQD.
- Espaciamiento de las juntas o discontinuidades.
- Condición de la discontinuidad.
- Condición de agua en el suelo.
- Orientación de las discontinuidades. (Thomas, 2014)

2.3.6 Resistencia a la compresión del material de roca intacta

La resistencia del material intacto de la roca se obtiene de testigos del macizo rocoso de acuerdo a sus condiciones de sitio. El índice está basado en la resistencia a la compresión uniaxial y/o por la resistencia de carga puntual. Aunque para resistencias pequeñas se recomienda el uso de sólo la resistencia a la compresión uniaxial. (Bieniawski, 1989)

2.3.7 Rock Quality Designation, RQD

El parámetro RQD debe ser determinado como fue discutido en el punto 2.3.1.

2.3.8 Espaciamiento de juntas o discontinuidades

El término discontinuidad cubre las juntas, foliaciones, zonas de cizalle, fallas menores, u otras superficies de debilidad. La distancia lineal entre dos discontinuidades adyacentes debe ser medida para todas las familias de discontinuidades y el índice del parámetro debe ser calculado para la discontinuidad crítica. Se entrega en los anexos, los valores del parámetro para cada intervalo de espaciamiento de juntas, junto a una descripción cualitativa del espaciamiento. (Bieniawski, 1989)

2.3.9 Condición de la discontinuidad

Este parámetro incluye la rugosidad de las superficies de la discontinuidad, su separación, largo, continuidad, meteorización de los bordes de roca o planos de debilidad y el material de relleno de las discontinuidades. (Bieniawski, 1989)

2.3.10 Condición de agua en suelo

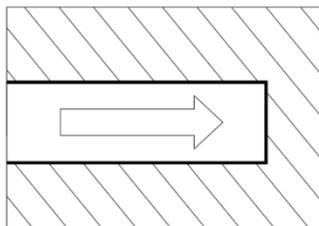
En el caso de túneles, se debe determinar el índice para la condición de agua en suelo en base a la medición de litros por minuto para un largo de 10 metros de túnel excavado, o una condición general descrita como completamente seco, húmedo, mojado, goteando o con flujos de agua. Si se maneja el dato de presión de agua, este debe ser expresado en términos de la fracción entre la presión de agua infiltrada y la mayor tensión principal. Los valores para la condición de agua se muestran en los anexos. (Bieniawski, 1989)

2.3.11 Orientación de las discontinuidades

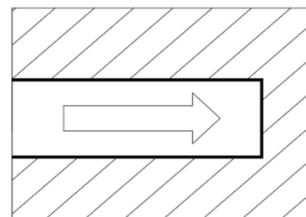
Este parámetro ajusta el valor de la suma de los cinco parámetros anteriores, según el uso de la clasificación en túneles, fundaciones o taludes. En este trabajo se utiliza el ajuste para al RMR usado en túneles.

La orientación hace referencia al rumbo y manto de las discontinuidades. El rumbo debe ser medido respecto al norte magnético. El ángulo de manto es aquel entre la horizontal y el plano de discontinuidad tomado en la dirección en la que el plano cae o se inclina.

La influencia del rumbo y manto de las discontinuidades se considera en función de la dirección de construcción del túnel. Para facilitar la elección de si el rumbo y manto son o no favorables para el proceso constructivo, se considera una valoración cualitativa para el efecto de la orientación de las juntas en túneles, como también se define una valoración cuantitativa para el parámetro asociado a la orientación de juntas. Respecto a la valoración cualitativa, se consideran dos categorías principales, clasificadas según la orientación del rumbo de las discontinuidades, según sean estas paralelas o perpendiculares el eje del túnel. Además, existe diferenciación respecto a si se construye a favor o en contra del manto de las discontinuidades.



Avance a favor del manto



Avance contra el manto

Figura 2.10 Dirección de avance respecto manto de discontinuidades

Una vez que el efecto de las discontinuidades es conocido, la suma aritmética de los seis índices descritos en este apartado, representan el valor final del Rock Mass Rating, RMR. (Thomas, 2014).

2.3.12 Estimación y Aplicaciones del RMR

El Rock Mass Rating quedará definido como la suma algebraica de los cinco valores obtenidos a partir de los parámetros dados entre la sección anexos para esta clasificación, además del ajuste por orientación de las discontinuidades mostrada en el anexo. Sobre la base de los valores de RMR para una estructura dada, el macizo rocoso es clasificado dentro de una de las cinco categorías nombradas como Muy buena, Buena, Media, Pobre y Muy pobre tal como se describe en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Clasificación del macizo rocoso a partir del Rock Mass Rating, RMR

Propiedades del parámetro del macizo	Rock Mass Rating				
	100 – 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0
Clasificación de la roca	Muy Buena	Buena	Media	Pobre	Muy pobre
Tiempo promedio de auto-soporte	10 años para 15 [m] de luz	6 meses para 8 [m] de luz	1 semana para 5[m] de luz	10 horas para 2,5 [m] de luz	30 min para 1 [m] de luz
Cohesión del macizo rocoso	>0,4 [MPa]	0,3 – 0,4 [MPa]	0,2 – 0,3 [MPa]	0,1 – 0,2 [MPa]	<0,1 [MPa]
Ángulo de fricción interna del macizo rocoso	<45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	15°

Fuente: (Bieniawski, 1989)

Asumiendo que el macizo rocoso se comporta como un material que cumple con la ley constitutiva de Coulomb, su esfuerzo de corte dependerá de su valor de cohesión y ángulo de fricción interna, mostrados en la Tabla 2.14. En base a la experiencia de la aplicación de esta clasificación geomecánica, estos valores son aplicables solo para laderas o pendientes con macizos rocosos saturados y meteorizados. El valor de cohesión es un orden de magnitud mayor en el caso de túneles gracias a que las discontinuidades son relativamente más estrechas y menos espaciadas entre ellas.

A partir del valor de RMR es posible obtener una serie de parámetros útiles como son la luz de túnel no soportada, el tiempo de soporte autónomo de túneles, la presión del soporte para aberturas subterráneas, entre otros. (Thomas, 2014)

2.3.13 Tiempo de auto-soporte de túneles

En la Tabla 2.14 se puede observar la estimación del tiempo de auto-soporte de túneles según su clasificación RMR, tiempo que depende de la luz efectiva del túnel, que está definida como la distancia más pequeña entre el ancho de la abertura subterránea y la distancia entre el frente del túnel y el último soporte instalado. Para túneles con techo en forma de arco el tiempo de auto-soporte será significativamente más grande que para aquellos túneles con techos planos. Para túneles con techos en forma de arco, el tiempo de soporte autónomo está relacionado con la categoría de clasificación RMR, mostrado en la Tabla 2.14. Es importante destacar que no se debe retrasar innecesariamente el soporte del techo, en los casos de macizos rocosos con alto tiempo de auto-soporte, ya que esto puede conducir a un deterioro del macizo rocoso. (Bieniawski, 1989). (Figura 2.11).

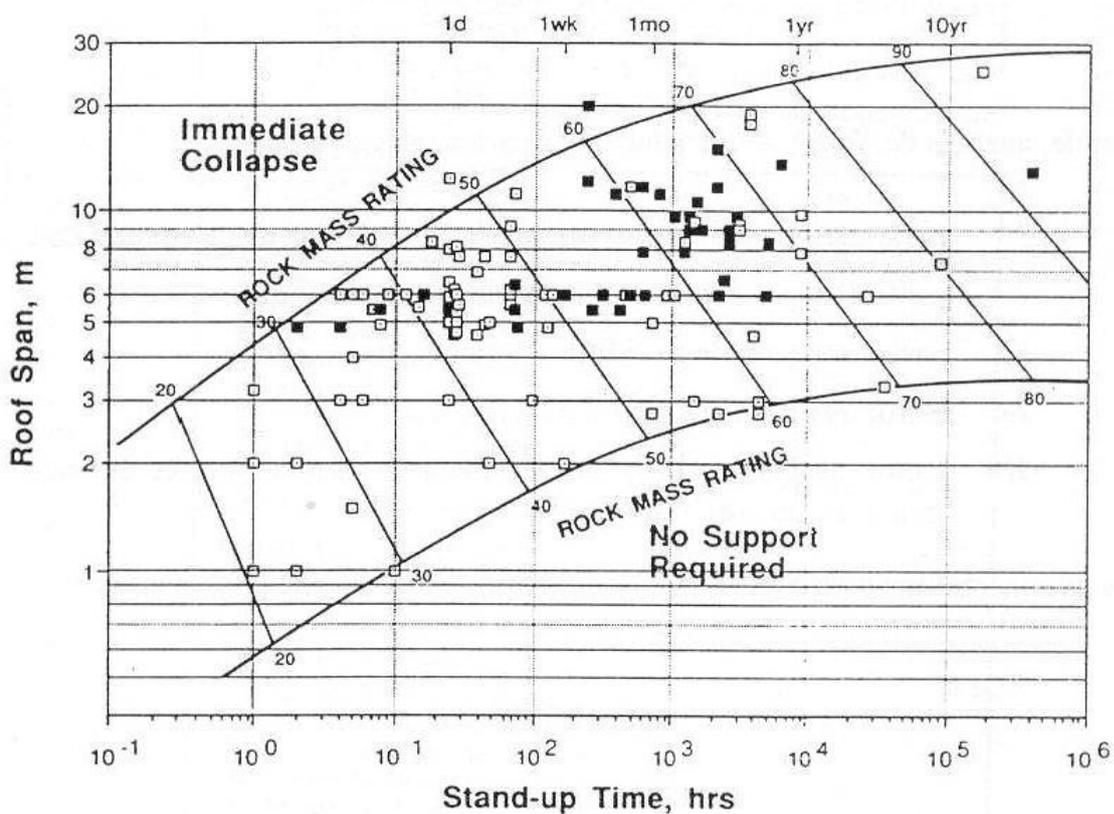


Figura 2.11 Tiempo de auto-soporte versus luz de túnel para varias clases de macizos rocosos y sus clasificaciones según RMR

Fuente: (Bieniawski, 1989)

2.3.14 Requerimiento de Soporte según RMR

Bieniawski (1989) proporcionó una guía para la determinación de los requerimientos de soporte para un túnel, con luz libre de 10m, excavado según el método convencional o Drill and Blast. De igual manera, la guía es aplicable en función de factores como la profundidad desde la superficie (para tener presente problemas de sobrecarga o tensiones in situ), tamaño del túnel y método de excavación. Las cantidades de soporte y soporte presentes en la Tabla 2.15 corresponden al soporte permanente y no al temporal o soporte primario.

2.4 Tipos de Fortificación

Los sistemas de fortificación son un conjunto de elementos que son instalados durante la construcción de una labor subterránea, con el fin de estabilizar el contorno de la excavación producto del mismo desarrollo y de la actividad minera a través de 3 objetivos como son: reforzar, sostener y contener los bloques.

Los sistemas de fortificación son un conjunto de elementos que son instalados durante la construcción de una labor subterránea, con el fin de estabilizar el contorno de la excavación producto del mismo desarrollo y de la actividad minera a través de 3 objetivos como son: reforzar, sostener y contener los bloques. (Rosso, 2010)

2.4.1 Fortificación con madera

Fue el sistema más utilizado hasta la segunda guerra mundial, cuando comenzó a ser desplazada por el acero. Sus principales desventajas es ser un material altamente combustible y que se degrada fácilmente por organismos parasitarios (ej: hongos, insectos). (Rosso, 2010). (Figura 2.12).

Tabla 2.15 Guía para la excavación y soporte de túneles de acuerdo al Rock Mass Rating, RMR

Clase de macizo rocoso	Excavación	Sostenimiento		
		Pernos (ϕ 20 mm, adhesión total)	Shotcrete	Marcos de acero
Roca muy buena I RMR: 81 - 100	Avances de 3 [m] a sección completa	Generalmente no se necesita sostenimiento, excepto algunos pernos para refuerzo local		
Roca buena II RMR: 61 - 80	Avances de 1 a 1,5 [m] a sección completa. Sostenimiento total a 20 [m] del frente.	Pernos locales en el techo, 3 [m] de largo y espaciado de 2,5[m] con malla ocasional.	50 [mm] en el techo donde fuera necesario	No
Roca regular III RMR: 41 - 60	Media sección y banqueo, progresiones de 1,5 a 3,0 [m] en la media sección. Sostenimiento primario después de cada voladura. Sostenimiento completo a 10 [m] del frente.	Empernado sistemático de 4 [m] de largo, espaciados de 1,5 a 2,0 [m] en el techo y paredes con malla en el techo	50 - 100 [mm] en el techo. 30 [mm] en las paredes	No
Roca mala IV RMR: 21 - 40	Media sección y banqueo, progresiones de 1,0 a 1,5 [m] en la media sección. Hay que instalar los refuerzos conforme el avance, a 10 [m] del frente	Empernado sistemático de 4 a 5[m] de largo, espaciados de 1,0 a 1,5 [m] en el techo y paredes con malla.	100 a 150 [mm] en el techo. 100 [mm] en las paredes	Marcos ligeros a medianos separados 1,5 [m], donde haga falta
Roca muy mala V RMR: < 20	Etapas múltiples. A veces de 0,5 a 1,5 [m] en la media sección. Instalación del sostenimiento a medida que se excava. Hormigón lanzado con la mayor brevedad después de las voladuras.	Empernado sistemático de 5 a 6[m] de largo, espaciado 1 a 1,5[m] en el techo y paredes con malla. Instalación de pernos en el piso contrabóveda	150 - 200 [mm] en el techo. 150 [mm] en las paredes y 50 [mm] en el frente	Marcos medianos a pesados espaciados a 0,75 [m] con tablestacado donde se necesite.

Fuente: (Bieniawski, 1989)

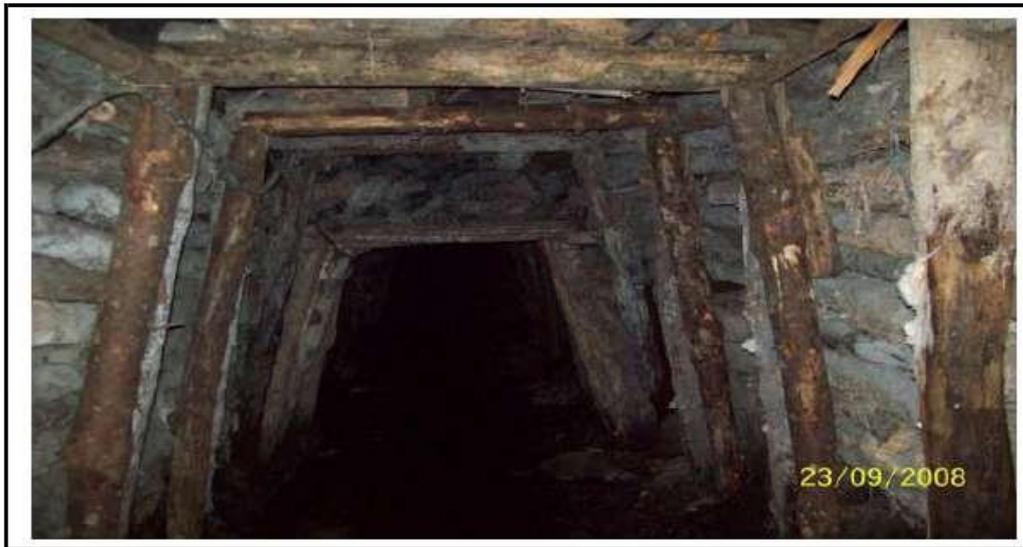


Figura 2.12 Fortificación con madera

Fuente: (Rosso, 2010)

2.4.2 Fortificación con marcos de acero

Es uno de los sistemas más utilizados ya que el acero es uno de los elementos que mejor resiste el agresivo ambiente minero, especialmente los relacionados a temperatura, humedad, gases y agua. Además, el acero tiene dos características de gran relevancia en la minería subterránea: es un elemento incombustible y reutilizable. (Rosso, 2010). (Figura 2.13).



Figura 2.13 Fortificación con marcos de acero

Fuente: (Rosso, 2010)

2.4.3 Fortificación con Pernos.

Principalmente la fortificación con pernos se basa en oponerse a la deformación del macizo rocoso, ayudando al macizo rocoso a auto soportarse. El perno pasa a formar parte del mismo entorno, reforzando la resistencia de la roca.

Los tipos de pernos más comunes o más usados en el sostenimiento de terrenos son: pernos con anclajes expansivos, estabilizadores de fricción, pernos cementados con resina o cemento y los cables de acero o también llamados pernos cables. En la selección de los elementos para sostenimiento es muy importante tener un conocimiento de las funciones y las resistencias de cada elemento.

También toma en cuenta la altura de las labores, el tipo de roca y su clasificación, el tipo de maquinaria disponible, el tiempo de vida útil de la labor, etc. (Rosso, 2010). (Figura 2.14).

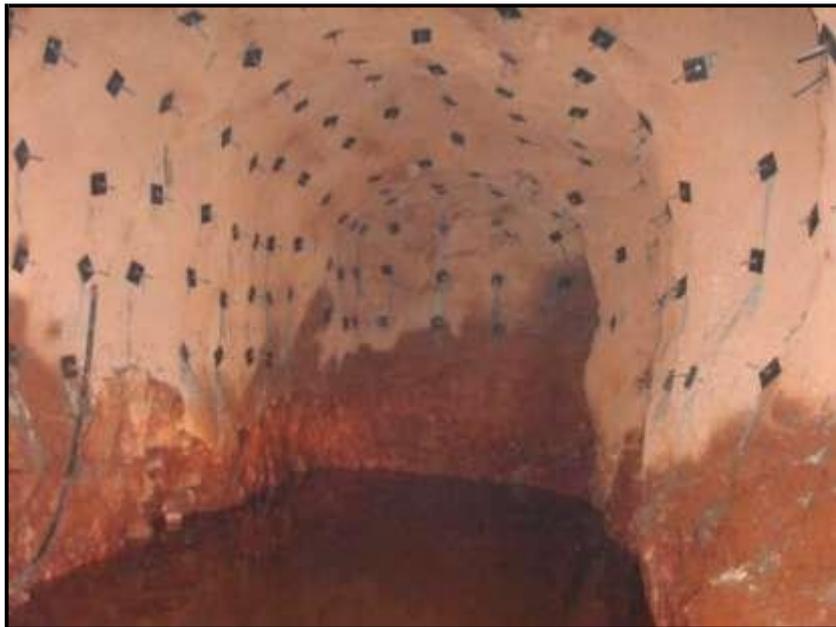


Figura 2.14 Frente fortificada con pernos de acero

Fuente: (Rosso, 2010)

2.4.4 Mallas

La armadura sirve para absorber las solicitaciones por contracción, aumentar la resistencia a la tracción / cizallamiento y para repartir las cargas concentradas.

Esta alternativa de fortificación es recomendable cuando se quiere garantizar obras subterráneas sometidas a los esfuerzos mencionados anteriormente. La abertura o luz de la malla no debe ser inferior a 5 centímetros, siendo la más utilizada la de 10.

La malla es fabricada en alambre galvanizado se emplean en la fortificación de túneles mineros y en la contención de terrenos y taludes.

Los rollos de fabrican en el largo y ancho especificado por el cliente, siendo el rollo más común es el de 25 x 2.50 para la malla 100-06 y de 25 x 2.00 para el resto.

Tenemos capacidad para tejer mallas de hasta 5 metros de ancho. (Rosso, 2010). (Figura 2.15).



Figura 2.15 Sistema de pernos con malla y shotcrete

Fuente: (Rosso, 2010)

2.4.5 Shotcrete

El hormigón proyectado suele denominarse “shotcrete”, palabra extraída del idioma inglés que se refiere al acto de proyectar hormigón sobre determinada superficie y este será el término que utilizaremos durante el desarrollo de este curso.

En este punto se verán los conceptos generales del uso del shotcrete como elemento fortificador de labores subterráneas. El shotcrete puede ser usado de las siguientes maneras:

Primario: Shotcrete utilizado como elemento de sostenimiento primario, siendo este el encargado principal de mantener la estabilidad de la excavación.

Complementario: Shotcrete utilizado como complemento de un sistema de fortificación primario (Shotcrete como sistema de fortificación secundario o sostenimiento secundario).

Reparador: Shotcrete utilizado para la reparación de un sistema de fortificación previamente instalado que presenta deterioro o fallas, o que requiera de un aumento en sus niveles de fortificación.

El shotcrete proyectado es una excelente herramienta de soporte primario, secundario de estabilización de desarrollos de túneles por periodos de tiempo relativamente cortos. En la minería subterránea dinámica y moderna se hace necesario el uso del shotcrete por lo que se ha ido complementando con los métodos tradicionales de fortificación y en algunos casos reemplazándolos, obviamente dependiendo de las condiciones geomecánicas de las labores subterráneas.

Con el desarrollo de nuevas tecnologías de aditivos se ha logrado mejorar la calidad de las mezclas de shotcrete, a la vez acelerar los ciclos productivos en el desarrollo de túneles y explotación minera subterránea, mejorando considerablemente los rendimientos de los avances. (Rosso, 2010). (Figura 2.16).



Figura 2.16 Aplicación de shotcrete

Fuente: (Rosso, 2010)

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

3.1 Descripción del proceso para la elaboración de muestras.

Recolección de arena: la arena que se ha empleado proviene de la zona de El Tahal – El Descanso, provincia del Azuay.

Lavado y filtrado: en un recipiente se colocó la arena, con abundante agua y movimientos circulares se eliminaron los limos e impurezas. Seguidamente se realizó el filtrado para separar el agua de la arena.

Este proceso se realiza para tener una arena homogénea con una granulometría que cumpla con las necesidades para la elaboración de las muestras.

Secado: la arena se colocó en bandejas plásticas por dos días, esto con el fin de que el secado se realice con temperatura ambiente y así no cambiar las propiedades físicas.

Tamizaje: Con la arena seca se realizó un tamizaje con las mallas número 30, 40 y 50 de la serie Humboldt, puesto que las medidas que comprenden estos tamices son los tamaños de grano que corresponden a los materiales clasificados como arenas. (Figura 3.1).



Figura 3.1 Tamizaje de arena

Obtención polietileno de tereftalato: en la empresa INMEPLAST se adquirió el Polietileno de Tereftalato deshidratado.

El Polietileno de Tereftalato (PET) al ser un plástico higroscópico, es decir, que absorbe la humedad en su estructura molecular, se lo debe deshidratar para evitar que se formen burbujas de aire en las muestras y mejorar su eficiencia al momento de quemarlo.

Proceso de secado: El secado de los plásticos se hace mediante un flujo constante de aire caliente y seco en tanques deshumidificadores. El aire es deshumidificado haciéndolo pasar a través del agente desecante (óxido de fósforo). Este deshumidificador está usualmente constituido por un tamiz molecular de silicato de aluminio alcalino, es efectivo en la absorción de agua del aire con baja humedad.

El aire posteriormente se calienta a la temperatura de secado específica de cada material. Este aire caliente y sin humedad se hace pasar a través del material para remover las moléculas de agua. Subsiguientemente se hace pasar nuevamente por el tamiz molecular en un ciclo continuo. Después de que el tiempo de secado recomendado ha terminado, el material puede procesarse sin problemas.

Un bajo punto de rocío, el que se define como la temperatura a la cual un gas (aire, en este caso) debe ser enfriado para producir condensación, usualmente está en -20°C , es suficiente para secar la mayoría de materiales higroscópicos al nivel de humedad residual necesario para el procesamiento. Esto proveerá un secado más rápido, un contenido absoluto de agua menor en el aire y una humedad residual inferior en el material. (Saigh, 2005)

Elaboración de las muestras:

Las muestras fueron elaboradas en la empresa INMEPLAST puesto que esta empresa facilitó el uso de hornos para poder elaborar las muestras.

Al tener la arena y el PET con las características físicas que se requieren, se procede a realizar lo siguiente:

- Se encienden dos hornos, el primero a una temperatura de 350°C y el segundo a una temperatura de 50°C .
- En un recipiente apto para el calor se coloca el porcentaje de arena de cada muestra, esta se la ingresa en el horno a 350°C por aproximadamente 3 minutos.
- A la arena caliente se le agrega el porcentaje correspondiente a cada muestra de PET y se la coloca en el horno a 350°C .
- Se deja esta mezcla cinco minutos en el horno, para que el PET se comience a derretir, se saca el recipiente del horno y se comienza a homogenizar la mezcla mediante movimientos circulares con un hierro resistente al calor y se vuelve a introducir el recipiente en el horno.
- Se realiza este procedimiento entre cuatro a cinco veces con el mismo intervalo de tiempo de cinco minutos para tener una mezcla totalmente homogénea y líquida.
- Al tener esta mezcla líquida se la coloca en un molde de acero de transmisión, para altas temperaturas, cuyas medidas son de 25 cm de longitud x 5cm de ancho x 5 cm de profundidad, para que la mezcla tome la forma del molde, este molde debe estar

humedecido con aceite y tener la misma temperatura que la muestra, para que no se solidifique sin realizar la presión necesaria al momento de apretar los tornillos.

- Este molde se deja a temperatura ambiente por cinco minutos, luego se procede a desarmar los tornillos y retirar la muestra del molde.
- Al retirar la muestra del molde, se la deja en el horno a 50 °C para que tenga un proceso de enfriamiento controlado. Esto debido a que si la muestra se enfría abruptamente se cuartea y rompe, volviéndola inservible.

Este procedimiento se lo realizó con las 10 muestras, cada una con diferentes porcentajes que se han calculado previamente de arena y de PET.

3.2 Caracterización de las muestras

El diseño de las muestras tiene principalmente dos variables que modifican totalmente la composición de cada una, se definió que las muestras tengan un porcentaje no menor del 70% de PET en su composición dejando un 30% de margen para la adición de agregados, esto se especifica de la siguiente manera:

- Relación: 90% PET – 10% Arena
- Relación: 80% PET – 20% Arena
- Relación: 70% PET – 30% Arena

Estos 3 tipos de relaciones PET/Arena fueron distribuidas justamente en las 9 muestras que se elaboraron.

La variable que corresponde al tamaño de partícula que se agregó al material fundido, PET, se realizó con el afán de utilizar un determinado tamaño de partícula en las muestras y no un conglomerado de diversos tamaños, la selección de los tamaños de partícula se dio en base a la clasificación de Attemberg (Sistema Internacional) que brinda la información acerca de los tamaños en los que un material puede considerarse “arena” (Rodríguez, 2018). (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Clasificación de Arena según S.I

Dimensión de la partícula elemental (mm)	Attemberg (Sistema Internacional)
0,05	Arena Fina
0,1	
0,25	
0,2	
0,5	Arena Gruesa
1	
2	

Fuente: Sistema Internacional de Clasificación de Suelos

De esta manera se estableció como variable de estudio 3 tipos de granulometría según el tipo de tamiz que lo retiene:

- Agregado Grueso: Tamiz Nro. 30: Tamaño de Partícula 0.6 (mm)
- Agregado Fino: Tamiz Nro. 40: Tamaño de Partícula 0.425 (mm)
- Agregado Fino: Tamiz Nro. 50: Tamaño de Partícula 0.3 (mm)

En la siguiente tabla se enumera las muestras que se realizaron y su relación PET/Arena en porcentajes y cantidades establecidas con un máximo de 1090 gramos, las variables a tomarse en cuenta para la fabricación de las muestras son:

- Granulometría de la Arena en la Mezcla
- Porcentaje de Arena en la Mezcla
- Porcentaje de PET

Además, se ha fijado para un punto de comparación una muestra que posea 100 % de PET es decir que los 1090 gramos sean de PET y no tenga arena. (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Diseño de Muestras

Muestras	Malla #	Arena %	PET %	Peso Arena(g)	Peso PET(g)
1	50	10	90	110	980
2	50	20	80	218	872
3	50	30	70	327	763
4	40	10	90	110	980
5	40	20	80	218	872
6	40	30	70	327	763
7	30	10	90	110	980
8	30	20	80	218	872
9	30	30	70	327	763
10			100		1090

3.3 Descripción y ejecución del ensayo de flexión

Para realizar las pruebas de flexión se ha empleado una prensa hidráulica marca Humboldt (figura 3.2) con capacidad de carga de hasta 50000 kg, la cual tiene las siguientes características:

- Adecuado para cilindros, cubos, vigas y núcleos de mezclas.
- Rango de prueba de 2500 a 250000 lb (11 a 1112 KN) con una precisión de $\pm 0.5\%$ de la carga indicada.
- La configuración estándar incluye platos para probar cilindros de 6 "x 12" (150 mm x 300 mm).

Para poder realizar esta prueba se ha adaptado un soporte en esta prensa para que el ensayo sea el de flexión.



Figura 3.2 Prensa Humboldt con capacidad de carga de 50000 kg

El soporte que se ha empleado para realizar las pruebas a la flexión, es de acero inoxidable de 30 cm de largo y 12 cm de ancho como se puede observar en la (figura 3.4), cuenta con dos soportes cilíndricos fijos a 5 cm de los bordes, para realizar la prueba de flexión se coloca un semicilindro de 14 cm de largo y 2,5 cm de radio justo en la parte media de la muestra cómo se puede observar en la (figura 3.3).



Figura 3.3 Cilindro de soporte para flexión



Figura 3.4 Soporte para prueba de flexión.



Figura 3.5 Soporte con muestra para realizar ensayo de flexión.

Para la ejecución del ensayo de flexión, el soporte se ha colocado como se muestra en la (figura 3.5) dentro de la prensa para análisis de compresión de materiales marca Humboldt, esta se ha adaptado mediante el soporte para poder realizar el ensayo.



Figura 3.6 Soporte para prueba de flexión en prensa Humboldt

Para el ensayo se coloca la muestra correctamente en el centro del soporte y así mismo el soporte quede al centro de la prensa para que el ensayo sea totalmente satisfactorio, al colocar la muestra y el soporte se acciona la máquina y se procede a tomar el valor en el cual la carga de flexión es la máxima posible (figura 3.6).

En el caso de este experimento se dieron dos situaciones para obtener este valor, la primera es cuando la muestra se rompe por lo que automáticamente deja de ejercer una fuerza como se puede ver en la (figura 3.7) y la segunda cuando la máquina comienza a hacer un esfuerzo negativo esto se puede observar en la (figura 3.8).



Figura 3.7 Muestra el tipo de fractura por flexión



Figura 3.8 Muestra falla al esfuerzo máximo y sin fractura

3.4 Análisis e interpretación de los resultados.

Luego de ejecutadas las pruebas de flexión, nos permite realizar el siguiente análisis detallado de cada una de las 10 muestras que se han usado con sus diferentes porcentajes de PET y arena, como se detalló en la tabla 3.2:

- Muestra #1: Se produjo una rotura aproximadamente en el centro de la muestra, no hubo desprendimiento de material, esto se produjo con una carga máxima de 829 kg (figura 3.9).



Figura 3.9 Muestra #1

- Muestra #2: Esta muestra alcanzo una carga máxima de 686 kg sin producir una rotura visible (figura 3.10).

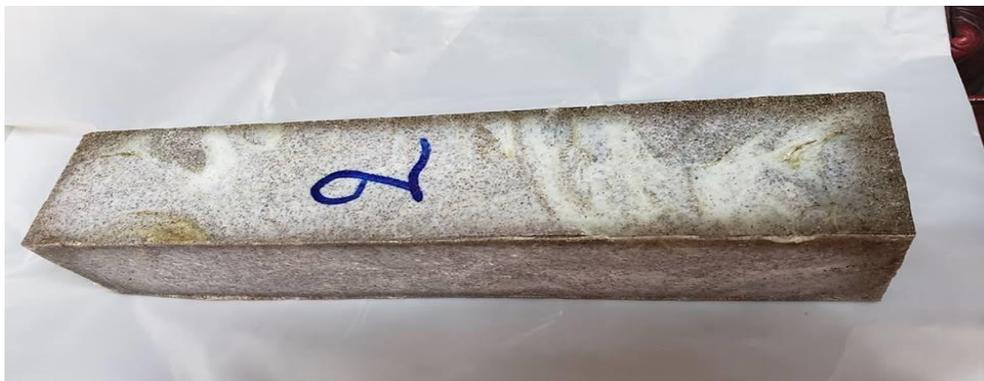


Figura 3.10 Muestra #2

- Muestra #3: En esta muestra se produjo una rotura casi lineal aproximadamente a 8cm del extremo derecho (figura 3.11).



Figura 3.11 Muestra # 3

- Muestra #4: Explotó bruscamente y se produjo una rotura casi central, existió desprendimiento de material en sus vértices (figura 3.12).



Figura 3.12 Muestra #4

- Muestra #5: Produjo un fuerte sonido y se fracturó de forma diagonal cilíndrica en la parte central (figura 3.13 y 3.14).



Figura 3.13 Muestra # 5



Figura 3.14 Muestra # 5

- Muestra # 6: Debido a la ruptura brusca una parte salió de la máquina, no existió desprendimiento del material y la ruptura fue casi en central (figura 3.15).



Figura 3.15 Muestra # 6

- Muestra # 7: Esta muestra produjo un fuerte sonido y se rompió por la mitad desprendiendo un pedazo pequeño (figura 3.16).



Figura 3.16 Muestra # 7

- Muestra # 8: Produjo un fuerte sonido al momento de la rotura y se rompió por la mitad (figura 3.17).



Figura 3.17 Muestra #8

- Muestra # 9: Esta muestra es la que menos resistió se produjo una rotura casi instantánea con una fuerza de 359 kg, la rotura fue prácticamente en el centro (figura 3.18).



Figura 3.18 Muestra # 9

- Muestra # 10: Esta muestra es 100% PET produjo un fuerte sonido al momento de la rotura, no existió desprendimiento de material y la rotura fue prácticamente al centro (figura 3.19).



Figura 3.19 Muestra # 10

Al finalizar los ensayos se ha obtenido la fuerza que se necesita para que se produzca la máxima flexión en cada una de las muestras. Esto se puede ver en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados de flexión

Muestra	Carga (Kg)	Fuerza (N)	Momento Flector (N.m)	σ Flexión (MPa)
1	829	8124,2	406,21	19,50
2	686	6722,8	336,14	16,14
3	663	6497,4	324,87	15,60
4	1083	10613,4	530,67	25,48
5	1386	13582,8	679,14	32,60
6	691	6771,8	338,59	16,25
7	1223	11985,4	599,27	28,77
8	683	6693,4	334,67	16,07
9	350	3430	171,5	8,23
10	563	5517,4	275,87	13,24

En la tabla 3.3 se observan los resultados de los cálculos realizados para obtener σ Flexión, estos se encuentran en un orden predominante por la numero de malla que ha pasado la arena ver en la tabla 3.2 siendo así las muestras 1, 2, 3 malla número 50, las muestras 4, 5, 6 malla 40 y las muestras 7, 8, 9 la malla 30 siendo así la numero 10 solamente PET.

En el caso de las muestras 1, 2, 3 se observa una clara reducción de la σ Flexión ver en la figura 3.20 cuando se reduce la cantidad de PET pudiendo así inferir que a menor cantidad de PET menor será la resistencia a la flexión.

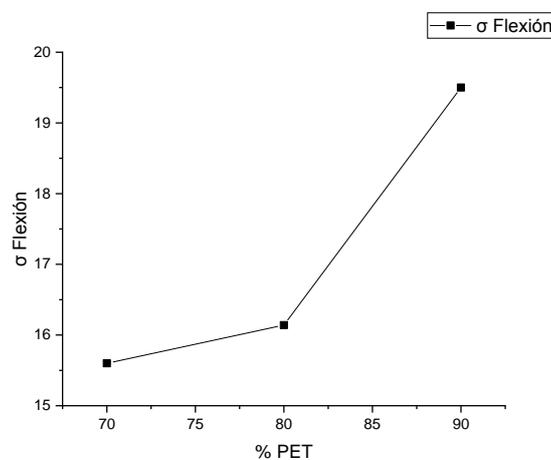


Figura 3.20 Grafico de dispersión muestras 1, 2, 3 malla 50.

En el caso de las muestras 4, 5, 6 no se puede decir lo anterior, puesto que existe un salto de esfuerzo en la flexión ver en la figura 3.21, ya que la muestra número 5 soporta un σ Flexión mayor a la número 4 por lo que no se cumple el criterio que a menor cantidad de PET menor resistencia.

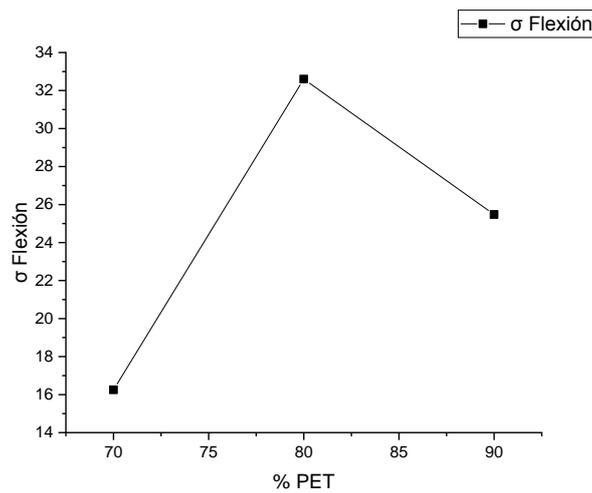


Figura 3.21 Gráfico de dispersión muestras 4, 5, 6 malla 40.

En las muestras 7, 8, 9 sucede lo mismo que con las muestras 1, 2, 3 ve en la figura 3.22 por lo que existe la misma relación.

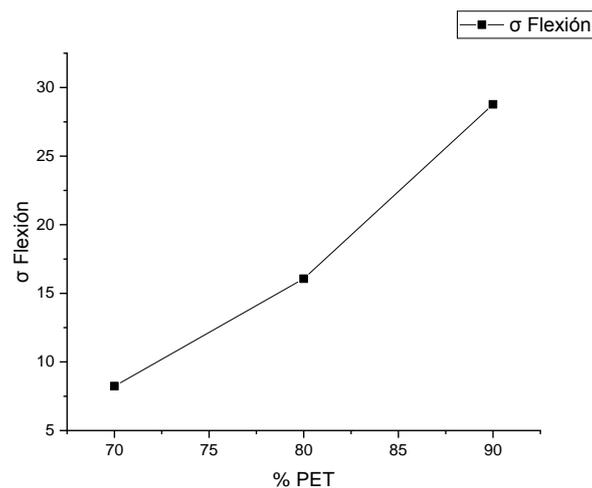


Figura 3.22 Gráfico de dispersión muestras 7, 8,9 malla 30.

La muestra número 10 al poseer el 100 % de PET no cumple este parámetro, pero se puede concluir que esto se debe a que no posee arena por lo que no puede ser comparado con el resto de muestras y solo serviría para un punto de apoyo en los resultados.

Mediante la tabla 3.3 se ha determinado cuales son las condiciones para que la flexión sea máxima, esto se ha producido en la muestra #5 que corresponde a la malla número 40, contiene 20 % de arena es decir 110 g y 80 % de PET es decir 980 g.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- Se han elaborado 10 muestras con diferentes composiciones, las cuales se las ha sometido a un esfuerzo de flexión mediante la prensa para análisis de compresión de materiales marca Humboldt.
- La flexión máxima que han soportado las muestras es de 32,60 MPa, que se ha producido en la muestra número 5 que tiene una composición de 20 % arena retenida en la malla 40 y 80% PET.
- De la tabla 3.3 de resultados se puede observar que existen 5 muestras con una resistencia a la flexión entre 10 y 20 MPa, lo que probablemente nos indica que el PET con agregados de arena tiene una resistencia a la flexión entre estos límites.
- Así mismo la tabla 3.3, presenta 3 muestras con valores de resistencia a la flexión entre 25 y 33 MPa, lo que representaría los máximos valores del ensayo.
- Al comparar los valores de resistencia a la flexión de las diferentes muestras con valores de la madera, se ha logrado determinar que el uso del plástico PET aparentemente no cumple con los mínimos valores de resistencia a la flexión necesarios para implementarlo en fortificación.

Recomendaciones:

- Es importante asegurarse que el PET se encuentre deshidratado ya que al ser un material higroscópico la humedad interna produce poros en las muestras provocando la rotura de las mismas.
- Se recomienda que al momento de homogenizar la mezcla de PET y arena, vigilar que esta mezcla no se derrame puesto que al momento de colocarla en el molde este no se llenará en su totalidad.
- Se debe colocar abundante aceite en el molde para evitar que la muestra se pegue en las paredes evitando así su correcto desprendimiento.
- Se recomienda colocar máximo 3 muestras con temperatura superior a 50 °C, puesto que al momento de colocar más muestras en el horno de 50 °C, este comienza a absorber la temperatura, elevando la interior y evitando que el enfriamiento de las muestras sea correcto.
- Al momento de realizar la prueba de flexión se debe asegurar que el soporte este centrado en la prensa, y que el cilindro se coloque en el centro de la viga.

BIBLIOGRAFÍA

- A Palmstrom, E. B. (2006). *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system.*
- Aseconsist. (2017). Origen del Plastico. *Humplast.*
- Barton, N. (1974). *Engineering classification of rock masses for masses for the design of tunnel support.*
- Beer, J. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros.*
- Bieniawski, T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification.*
- Correa, F. R. (2014). Diseño y construcción de una máquina para moler plásticos p.e.t. para la microempresa de reciclaje “santa anita” ubicada en el cantón salcedo. Latacunga.
- Deere, D. (1963). *Technical description of rock cores for engineering purposes.*
- Federación de Enseñanza de Andalucía. (2011). Tipos de Esfuerzosw Físicos. En D. d. física. Andalucía.
- Ferrer, M. (2010). Descripción de macizos rocosos. Madrid.
- Fitzpatrick. (1984). Suelos: su formación, clasificación y distribución. México: Continental.
- Gonzalez, L. (2007). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Hachi, J. G. (Marzo de 2010). *dspace.ups.edu.ec*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2450/20/UPS-GT000106.pdf>
- Hoek, E. (2004). *Rock mass classification.*
- M Casanova., W. V. (2004). Guía de Edafología. Santiago de Chile.

- Morillas, A. V. (Octubre de 2016). El reciclaje de los plásticos. *anipac*, 16. Obtenido de http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf
- Palmstrom, A. (1974). *Characterization of jointing density and the quality of rock masses*.
- Palmstrom, A. (2005). *Measurements of and correlation between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)*.
- Palmstrom, A. (2009). *Combining the RMR, Q and R_{Mi} classification system*.
- Rodriguez, D. (2018). Determinación del uso de Plástico PET como Alternativa al uso de Madera en Fortificación Minera. Cuenca.
- Rosso, D. (2010). *Fortificación de Minas*.
- Saigh, D. (Julio de 2005). Tecnología del plástico. Obtenido de <http://www.plastico.com/temas/Que-opciones-hay-para-secar-plasticos+3041537?pagina=2>
- Solis, A. (2014). Clasificación del cemento.
- Spavento, E. M. (2008). *Propiedades Mecánicas de la Madera*. Argentina.
- Thomas, C. (2014). Estudio comparativo entre requerimientos de soporte y fortificación de túneles definidos según métodos empíricos de clasificación geomecánica versus métodos analíticos y numéricos.
- USCS. (2011). Sistema de clasificación internacional de suelos.

ANEXOS

Anexo 1 Pesaje de Arena



Anexo 2 Muestras de PET y ARENA



Anexo 3 Homogenización de las muestras



Anexo 4 Colocación de la mezcla en el molde

