

COMPARACIÓN DEL CRITERIO DE ROTURA DE
HOEK-BROWN RESPECTO AL ENSAYO TRIAXIAL EN ROCAS DE UNA
CANTERA DEL VALLE DEL CAUCA

ALVARO CHAMORRO PÉREZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI, JULIO DE 2022

COMPARACIÓN DEL CRITERIO DE ROTURA DE
HOEK-BROWN RESPECTO AL ENSAYO TRIAXIAL EN ROCAS DE UNA
CANTERA DEL VALLE DEL CAUCA

ALVARO CHAMORRO PÉREZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

ING. MANOLO GALVÁN CEBALLOS Ph. D.



Universidad del Valle

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI, JULIO DE 2022

AGRADECIMIENTOS.

A Dios, primeramente, por ayudarme cada día y haberme acompañado paso a paso en este proceso que hoy culmina. A Jesús, por siempre ser mi amigo.

Agradezco a mis padres, por su ejemplo, amor y tenacidad para seguir juntos, remando cada día al lado de sus hijos en un sueño que continua.

A mi hermano Luis Ignacio Chamorro Pérez, por haber hecho esta meta parte de su proyecto de vida.

A mis hermanos Juan Pablo Chamorro Pérez y Carlos Julio Chamorro Pérez por su aprecio y apoyo.

A mi tía Helena Pérez Delgado por haber creído en mí.

Gracias a mis compañeros de grupo de estudio, aquellos que en el proceso académico entendimos que éramos un equipo y que pese a las diferencias comprendimos que juntos podíamos superar obstáculos, apoyándonos en nuestras debilidades.

Gracias a los profesores por su aporte en conocimiento y, sobre todo, hacer de mí un mejor ser humano, al profesor Manolo Galván por su apoyo para finalizar este proceso académico, al profesor Carlos Manrique y al laboratorista Noé Duran por su gran aporte a lo largo de este trabajo. Finalmente, me gustaría hacer una mención al profesor Ricardo Ramírez, a quien admiro por su compromiso y su gran dedicación a sus alumnos.

Esta tesis fue realizada por Alvaro Chamorro Pérez, bajo la dirección del profesor Manolo Adolfo Galván Ceballos. Fue revisada y aprobada por el siguiente Comité Revisor y jurado examinador, para obtener el título de Ingeniero Civil.

Nota de aceptación:

Firma del director
Programa Académico Ingeniería Civil
Carlos Alberto Madera, Ph. D

Firma del Jurado
Carlos Manrique Londoño
Ingeniero Geotecnólogo

Firma del Jurado
Hugo Edmundo Coral Moncayo, Ph. D

RESUMEN

Hasta el momento, para obtener las propiedades de la matriz rocosa, entre ellos el esfuerzo principal menor y el esfuerzo principal mayor en la falla, se requiere del criterio de Hoek-Brown, el cual incluye suposiciones de algunos de sus parámetros.

En el presente trabajo se realizará la implementación de un equipo de laboratorio para la realización de ensayos triaxiales en muestras de roca, los cuales permite obtener los esfuerzos principales directamente de la matriz.

Posterior a ello se realizará la comparación de los resultados obtenidos en base al criterio falla de Hoek-Brown respecto a los resultados experimentales. Finalmente, tras realizar un ajuste estadístico y se propone una posible ecuación que representa la resistencia de la matriz rocosa obtenida en una cantera del sur occidente colombiano.

Palabras clave:

Macizo rocoso, criterio de falla, Triaxial, Hoek – Brown, Matriz de roca, Compresión uniaxial.

Abstract

So far, to obtain the properties of the rock matrix, including the minor principal stress and the major principal stress at failure, the Hoek-Brown criterion is required, which includes assumptions of some of its parameters.

In the present work, the implementation of a laboratory equipment will be carried out to carry out triaxial tests on rock samples, which allow obtaining the main stresses directly from the matrix.

later, the results obtained will be compared based on The Hoek-Brown failure criterion with respect to the experimental results. Finally, after making a statistical adjustment, a possible equation is proposed that represents the resistance of the rocky matrix obtained in a quarry in the Colombian south-west.

Keywords:

Rock mass, failure criteria, Triaxial, Hoek – Brown, Rock matrix, Uniaxial compression,

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
2.2 OBJETIVOS.....	4
2.3 JUSTIFICACIÓN.....	5
Capítulo 3. MARCO DE REFERENCIA	6
3 ESTADO DE ARTE	6
3.1 ANTECEDENTES.....	8
3.1.1 Criterio de rotura de Hoek – Brown	8
3.1.2 Criterio de rotura de Hoek-Brown 1980	8
3.1.3 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 1983.....	12
3.1.4 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 1988.....	17
3.1.5 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 1992.....	20
3.1.6 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 1995.....	24
3.1.7 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 2002.....	25
Capítulo 4. MARCO CONCEPTUAL.....	28
4 PROPIEDADES ÍNDICE DE LAS ROCAS.....	28
4.1 Porosidad.....	28
4.2 Peso específico	28
4.3 Humedad	29
4.4 Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial	29
4.5 Ensayo triaxial en rocas.....	32
4.6 Metodología de muestreo y tamaño de la muestra.....	33
4.7 Método del muestreo.....	34
4.8 Clasificación geológica de las muestras de estudio	34
4.8.1 Rocas ígneas.....	35
4.9 Equipos de laboratorio	35
Capítulo 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	38

5	INTRODUCCIÓN METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
5.1	CAMPAÑA EXPERIMENTAL	39
5.1.1	Método del muestreo.....	40
5.1.2	Descripción de la muestra de estudio.....	40
5.1.3	Determinación del tamaño muestral	41
5.2	ESTUDIOS DE LABORATORIO	45
5.2.1	Determinación del contenido de humedad (ASTM D 2216 -98).....	45
5.2.2	Determinación del peso específico	46
5.2.3	Determinación de la porosidad	47
5.3	DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS PRINCIPALES POR MEDIO DE LA ECUACIÓN DE HOOK-BROWN PARA LA MATRIZ ROCOSA	48
5.4	ENSAYO TRIAXIAL EN ROCAS POR MEDIO DE LA CÉLULA DE HOOK.....	50
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	52
6.1	GRÁFICA DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS	53
6.2	DETERMINACIÓN DE PROMEDIO Y AJUSTE DE DATOS EXPERIMEN- TALES Y TEÓRICOS	54
8	BIBLIOGRAFÍA	64
	ANEXOS	66

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Valores estimados para la constante m según clasificación de rocas.....	11
Tabla 2. Valores aproximados para la constante m_i para la matriz rocosa	12
Tabla 3 Valores aproximados para las constantes m y s Hoek – Brown 1983	15
Tabla 4. Valores estimados para esfuerzos de compresión uniaxial σ_c	21
Tabla 5. Valores para la constante m_i para la roca intacta	22
Tabla 6. Valores estimados m_b y a basados en la estructura de la superficie de la roca.....	23
Tabla 7. Valores para la constante D del macizo rocoso.	27
Tabla 8. Tolerancia de probetas de roca para el ensayo de compresión simple	31
Tabla 9. Especificaciones de la geología estudiada	40
Tabla 10. Resumen del cálculo del tamaño muestral Statgraphics	44
Tabla 11. Valores de humedad para las rocas A, B Y C.....	46
Tabla 12. Valores de peso específico rocas A, B y C	47
Tabla 13. Datos de porosidad rocas A, B y C	48
Tabla 14. Valores de compresión y σ_3 <i>propuestos</i> roca A	49
Tabla 15. Valores de compresión y σ_3 <i>propuestos</i> roca B	49
Tabla 16. Valores de compresión y σ_3 <i>propuestos</i> roca C	50
Tabla 17. Resultados ensayo triaxial roca A.....	51
Tabla 18. Resultados ensayo triaxial roca B	51
Tabla 19. Resultados ensayo triaxial roca C	52
Tabla 20. Promedio de los ensayos triaxiales roca A	54
Tabla 21. Promedio de los ensayos triaxiales roca B.....	54
Tabla 22. Promedio de los ensayos triaxiales roca C.....	55
Tabla 23. Errores para ajuste de datos experimentales	55
Tabla 24. Ecuación propuesta para la resistencia de la matriz rocosa del Valle del Cauca.....	61
Tabla 25. Ecuaciones teórica y experimental	62
Tabla 26. Comparación de resultados teóricos versus experimentales.....	62

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo que representa la estructura del macizo rocoso Hoek -Brown.....	16
Figura 2. Ilustración máquina universal para ensayo de resistencia a la compresión.....	29
Figura 3. Fases de ensayo del ensayo de la resistencia a la compresión simple.....	32
Figura 4. imágenes de equipo para extraer núcleos[7]	35
Figura 5. Célula de Hook Para ensayos triaxiales.....	36
Figura 6. Detalle de la unidad cono-estratigráfica de Cali y Yumbo.....	39
Figura 7. Imágenes de la zona de toma de muestras.....	39
Figura 8. Gráfica de dispersión resultados compresión prueba piloto.....	42
Figura 9. Diagrama de bigotes para los resultados de compresión prueba piloto.....	43
Figura 10. Curva de determinación del tamaño muestral	44
Figura 11. Gráfica para los valores experimentales sin corregir	53
Figura 12. Grafica de primer ajuste estadístico	56
Figura 13. Convergencia polinómica respecto a datos estadísticos y simulación	58
Figura 14. Convergencia de datos experimentales y teóricos sin ajuste.....	59
Figura 15. Comparación Hoek-Brown versus datos experimentales.....	60

Capítulo 1.

1 INTRODUCCIÓN

Al realizar un proyecto constructivo sobre un macizo rocoso, es necesario un amplio conocimiento sobre las propiedades geomecánicas que componen el lugar donde se cimentarán los diferentes elementos de la edificación, como lo son: pilotes, caisson, pantallas, muros de contención, entre otros. Adicional a utilizar la roca como elemento de soporte de cimentación, otros factores importantes se presentan cuando se emplea la roca como parte del material de la estructura y la roca como material de construcción, donde el desconocimiento de sus propiedades geomecánicas puede ocasionar que se incurra en errores de diseño.

Criterios como el de Hoek-Brown es aceptado por el REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE [1] al realizar diseños basados en el límite de rotura del macizo rocoso, condicionados por los esfuerzos máximos y mínimos en el momento de falla. El criterio de Hoek-Brown se realiza con referencia ensayos de laboratorio de compresión uniaxial, donde se obtienen los parámetros suficientes para la aplicación y desarrollo del respectivo criterio.

Por lo anteriormente citado, poder realizar ensayos de laboratorio triaxiales para diseñar las estructuras condicionados por los resultados obtenidos, posibilitaría construir obras con un mejor conocimiento geológico y capacidad real de resistencia de los macizos rocos, logrando un óptimo desempeño estructural, con la capacidad de soportar los diferentes eventos causados generalmente por fallas geológicas y condiciones ambientales, a los que una estructura civil es sometida con regularidad durante su vida útil.

En consecuencia, se requiere investigar otros métodos con mejores ajustes, que permitan determinar las propiedades de las rocas, gran parte de estas propiedades pueden ser determinadas a través de ensayos triaxial en rocas, esta prueba es reglamentada por la Norma ASTM [2] Título D 2664-95^a, que consiste en aplicar fuerzas axiales y laterales sobre una muestra cilíndrica de roca hasta llevarla a la ruptura, situación geológica presentado en su estado natural.

Los diferentes requerimientos para realizar el ensayo y las condiciones de las muestras a ensayar se encuentran estandarizados en diferentes normativas, como en la NORMA TECNICA COLOMBIANA 1936, la Norma UNE [3] en el Título 22-950 parte 4; capítulo designado a ensayos para la determinación de la resistencia mecánicas en rocas.

En el presente trabajo se realizó una investigación donde se evaluó la resistencia máxima de rotura en muestras de rocas tomadas de una cantera del Valle del Cauca, haciendo uso del ensayo triaxial, logrando un acercamiento a la distinción de las propiedades geomecánicas de las rocas de la región, con el objetivo de realizar una comparación respecto al criterio de rotura de Hoek-Brown.

La realización de este estudio será un aporte significativo al sector académico e investigativo local y nacional, ya que se ampliará el conocimiento de la Mecánica de Rocas y las diferentes

propiedades de resistencia que componen los estratos y macizos rocosos que se encuentran en el departamento. Otro de los actores beneficiados serán los sectores relacionados con la construcción de obras civiles, donde se necesita la caracterización, parametrización de estratos y macizos rocosos, para realizar los diseños de las diferentes estructuras.

Este proyecto tendrá como punto de partida el criterio de falla de Hoek-Brown, metodología actualmente aceptada para el diseño geotécnico de estructuras, se identificarán los diferentes resultados obtenidos núcleos de rocas de la cantera seleccionada, a las cuales se le determinarán las propiedades de rotura según Hoek-Brown y se compararán con los resultados producto de realizar los ensayos triaxiales, finalizando con los respectivos análisis, comparaciones y conclusiones que representen el macizo rocoso de la zona en estudio.

Los ensayos de exploración y caracterización mencionados se realizaron en la Universidad de Valle, Laboratorio de Geología y Mecánica de rocas, laboratorio pionero en el Suroccidente Colombiano en realizar pruebas normalizadas de triaxial en muestras de rocas. Por tanto, su realización además de ser una aplicación de la mecánica de rocas, este un aporte valioso al ámbito investigativo de las diferentes Universidades que quieran realizar investigaciones relacionadas con la Geología y Mecánica de rocas de sus regiones.

Capítulo 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Al realizar estudios de suelos para el predimensionamiento y diseño definitivo de las cimentaciones de obras civiles como lo son: edificios, túneles, excavaciones, taludes, entre otros, se puede evidenciar la diversidad de materiales que lo conforman el subsuelo, entre ellos se encuentran materiales como gravas, arcillas, limos, arenas, rocas etc. Por consiguiente, se hacen necesarios realizar exploraciones en diferentes lugares del proyecto a profundidades que garanticen un conocimiento acertado de los estratos que se vean involucrados con los esfuerzos que transmite la estructura y de acuerdo con la complejidad del proyecto como lo determina el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente [4].

Un caso en particular sucede cuando las exploraciones (sondeos, apiques, trincheras, métodos indirectos, etc.) dictaminan que el lugar donde se construirá el proyecto está compuesto por un estrato rocoso, la identificación de las propiedades de resistencia del macizo rocoso resulta fundamental al realizar construcciones sobre estos. Parte de los parámetros de resistencia a identificar se pueden obtener a través de un ensayo de compresión simple [5], este método es válido como mecanismo de caracterización de las rocas ante las diferentes entidades de control de diseño estructural del país.

Sin embargo, para la construcción de estructuras con requerimientos geotécnicos técnicos especiales se necesita realizar una caracterización más rigurosa, tal es el caso de la construcción de túneles [6], donde se necesitan resultados representativos del macizo a partir de muestras, estos se obtienen con base en núcleos tomados a diferentes lugares y profundidades del macizo (matrices) y a partir de estos obtener parámetros para el diseño y construcción de la estructura que cuenta con elevado nivel de complejidad en diseño y construcción de la cimentación.

Diferentes normas reglamentan como realizar las exploraciones en el macizo, estudios geotécnicos y ensayos de laboratorio el ensayo de compresión uniaxial, entre ellas la ASTM [3] y la UNE [2] como se había mencionado, en estas se encuentran inscritos los diferentes criterios que se deben considerar para realizar ensayos sobre núcleos de rocas, entre los que se encuentran las características de la muestra como dimensiones del núcleo a ensayar, estado liso de sus superficie y planitud en las caras del núcleo, requerimientos que dada la composición frágil y heterogeneidad se hacen difíciles de cumplir a la hora de realizar el ensayo [7].

De acuerdo con lo expuesto numerosos diseños en Colombia se realizan teniendo en cuenta parámetros obtenidos en el ensayo de compresión simple o también conocido como presión unidimensional (RCU). Adicional a este ensayo, se tiene en cuenta el criterio de Hoek-Brown el cual considera la resistencia máxima la cual ocasiona la rotura en la roca, criterio de diseño utilizado con regularidad (Galván, Manolo 2020)

Sin embargo, poder contar con un ensayo triaxial que permita obtener diferentes parámetros y su variación ante diferentes esfuerzos tridimensionales resulta para la ingeniería de gran importancia [8], debido a que poseer un mayor reconocimiento y caracterización del material que compone la

zona donde se construirá el proyecto, posibilita dimensionar estructuras con una mayor precisión a las condiciones de demanda, garantizando condiciones de servicio adecuadas [9].

Ante lo anteriormente mencionado, en esta investigación se realizará una verificación del criterio de Hoek-Brown aplicado a rocas de una cantera localizada en el Valle del Cauca y se comparará respecto al ensayo triaxial en rocas, indagando sobre diversas incógnitas como, ¿Describe realmente la resistencia en rocas el criterio de Hoek- Brown respecto a los valores obtenidos por el ensayo triaxial en rocas?, ¿representa realmente el criterio de Hoek-Brown la resistencia de las rocas del suroccidente Colombiano?, ¿Qué variables coinciden o se diferencian respecto a los dos métodos de determinación de variables?, validando o en su defecto mostrando las diferencias encontradas.

2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Son comparables los resultados de resistencia obtenidos por medio del criterio de Hoek-Brown respecto a los valores generados por el ensayo triaxial en rocas del Suroccidente Colombiano?

2.2 OBJETIVOS

Comparar la resistencia del criterio de rotura de Hoek-Brown 2002 respecto a la resistencia determinada a través del ensayo triaxial en rocas del Valle del Cauca, aplicando la norma ASTM D 2664-95a.

Específicos.

- Clasificar las rocas por medio de las propiedades índice.
- Obtener la resistencia en rocas utilizando el criterio de Hoek-Brown 2002.
- Determinar la resistencia en rocas por medio del ensayo triaxial en rocas aplicado la norma ASTM D 2664-95a.
- Realizar la comparación de resultados de resistencia obtenidos por medio del criterio de Hoek- Brown respecto a los del ensayo triaxial en rocas

2.3 JUSTIFICACIÓN

En ingeniería civil idealizar como se comportarán las estructuras ante el movimiento sísmico y movimiento que puedan generar estructuras aledañas, permite construir edificaciones civiles con capacidad y buen desempeño, cumpliendo la demanda para lo cual fue diseñada [1]. Poder identificar que variables están interviniendo en el medio cuando una estructura civil es construida resulta fundamental. Esto permitirá que el diseño cuente con mayor nivel de seguridad, que se eviten deformaciones en exceso evitando deterioro o colapso.

En concordancia a lo anterior el desconocimiento de parámetros en la resistencia de las rocas podría resultar en errores en la elección de cimentación, profundidad, sección de los elementos, tipo de materiales, y en general, en el dimensionamiento de las estructuras [5]. Este desconocimiento podría ocasionar que las estructuras fallen cuando se presentan cargas aun menores a las consideradas en el predimensionamiento, lo que conlleva a que las estructuras dejen de prestar servicio antes de cumplir la vida útil para la cual fueron proyectadas.

Por lo anterior es preciso mencionar que la presente investigación busca documentar sobre lo que se tiene en cuenta en la actualidad: donde diversos diseños consideran el criterio de rotura de Hoek-Brown, que resultados se obtienen y compararlos con los que resulten del ensayo triaxial en rocas, con fin de ajustar o buscar una correlación que represente la resistencia de las rocas para las muestras aquí evaluadas, si fuere necesario.

Después realizar una indagación sobre la información disponible en Colombia, es notable la falta de conocimiento en torno a la mecánica de rocas a nivel nacional [7], adicional al elevado costo que un ensayo triaxial representa en la actualidad para un proyecto. Por tanto, poder establecer y ajustar un ensayo triaxial en la zona del Sur Occidente Colombiano brindara apoyo al sector de la infraestructura, dado que brindara aportes geotécnicos sobre la estructura mecánica de las rocas validando o reforzando criterios como el de Hoek-Brown.

Esto conlleva a contar con una experiencia más amplia en torno a los ensayos necesarios para determinar las propiedades de la roca, aumentado el número de herramientas que permiten obtener sus diferentes características mecánicas, como su resistencia a compresión, porosidad, ángulo de fricción, entre muchas de las características a determinar, brindando información científica valiosa para futuras investigaciones en el campo de la Geología y Mecánica de Rocas.

Capítulo 3. MARCO DE REFERENCIA

3 ESTADO DE ARTE

Poca relevancia se le había dado al estudio de las rocas en el campo de la ingeniería Civil y geotecnia, fue hasta el año 1959 cuando ocurrió la catástrofe de la presa de Malpasset en Francia, debido al asentamiento, agrietamiento y posterior deslizamiento del macizo rocoso en el cual se había cimentado, desastre que además de generar pérdida económica total para el proyecto, dado el colapso de la estructura, las aldeas de Malpasset y Bozon fueron destruidas causando la pérdida aproximada de 421 personas [10].

Dado el continuo avance de la ingeniería y las construcciones civiles es frecuente que se encuentren a menudo con diferentes retos a superar para llevar a cabo las obras civiles, donde la ingeniería Civil, Geotecnia y la Geología se ven puestas a prueba cuando se requieren diseñar y construir sobre un lecho rocoso. Por ejemplo, la determinación de las envolventes en rocas intactas y exploración de sobre un macizo rocoso, magnitud y localización de los estratos, información relevante para diseñar diferentes estructuras entre ellas; túneles, el subnivel de una mina caso práctico llevado a cabo en el distrito minero de Rey del Plata en México [11].

Diferentes organizaciones han estudiado el rango de resistencia a compresión de las rocas, aportando numerosas tablas de valores que oscilan entre 1 – 250 Mpa [12], dicha dispersión en los valores es debida a la disposición a la que se encuentra la matriz rocosa, ya que generalmente está rodeada por suelo o material geológico de menor resistencia, adicional a diversas condiciones ambientales y estados de esfuerzos que causan en ella fisuras, reduciendo su resistencia y generando condiciones complejas de equilibrio en el macizo rocoso [7].

Para la investigación es de gran importancia recopilar información donde se encuentre detallados los diferentes procedimientos para determinar la resistencia y propiedades de estratos rocosos, dado que la composición y caracterización de cada uno de los estratos varia respecto a los tipos de roca que lo conforman [13], ya sea granito, granófiro, gabro etc. Establecer un procedimiento adecuado que se adapte a las características de las rocas que se encuentran en el Valle del Cauca permitirá identificar el rango de resistencia y comportamiento ante esfuerzo triaxiales, cuyo objetivo es uno de los propósitos del presente trabajo.

Adicional a las diferentes investigaciones que se han realizado sobre estratos rocosos, poder contar con un trabajo de investigación como guía de laboratorio realizados por los ingenieros (Blanco y Paterneli) [14], en cuyo documento se encuentra el diseño, armado y ajuste realizados al equipo de ensayo triaxial es un aporte valioso, ya que como se mencionó anteriormente este será uno de los primeros trabajos en el Sur Occidente de Colombia donde se estudie las rocas de la región, y uno de los retos asumidos será la incorporación de la Célula de Hoek al laboratorio de Geología y Mecánica de Rocas de la Universidad del Valle.

Poder realizar los ensayos, correlacionar los resultados y con base a estos identificar los esfuerzos principales de la matriz para catalogar el macizo, es uno de los logros más significativos que se pueden realizar a través del criterio de Hoek-Brown, esto se logra gracias a la incorporación de

diferentes constantes que se ajustan a los ensayos y resultados a los ensayos de laboratorios uniaxiales [15], estas constantes tienen en cuenta la composición del macizo y el índice de resistencia geológica.

En el contexto Colombiano el ingeniero Wilson López realizó una investigación sobre parámetros materiales de fractura en rocas intactas, siendo un proyecto de investigación que relaciona los criterios de falla como el de Mohr Coulomb y Hoek-Brown, donde se realizan ensayos de compresión uniaxial, carga directa y ensayos triaxiales, investigación de ámbito nacional que contribuirá a lograr los alcances propuestos.

Localmente en el departamento del Valle del Cauca se realizó un trabajo de grado que correlaciona la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad de eficaz en rocas [7], donde se gestiona información geológica y estadística de la zona de estudio, fuente que se apoyó con instituciones gubernamentales, gremios, universidades y centros de investigación.

3.1 ANTECEDENTES

3.1.1 Criterio de rotura de Hoek – Brown

El criterio de Hoek-Brown inicialmente fue desarrollado para determinar la resistencia de los macizos rocosos de buena calidad, sin embargo a falta de alternativas, el criterio se empezó a utilizar indiscriminadamente en una amplia variedad de macizos rocosos incluyendo rocas que por su composición geológica se clasifican como de mala calidad [16].

El criterio de rotura de Hoek-Brown fue desarrollado durante la preparación del libro excavaciones subterráneas en la roca por E. Hoek y ET Brown, publicado en 1980. Sin embargo, desde su aparición se han presentado numerosas actualizaciones, esto para poder aplicarlo en condiciones que el criterio no incluía, como se mencionó en macizos de mala calidad y numerosas situaciones presentadas en diversas de obras civiles, como lo es taludes, minería, entre otras [17].

En la actualidad se están llevando a cabo investigaciones que permiten ampliar, validar, y establecer nuevos parámetros que posibilitan la aplicación del criterio en diferentes condiciones geológicas, esto ha traído consigo un avance en el desarrollo del criterio que es netamente empírico, puesto cada vez más los resultados obtenidos representan las condiciones naturales estudiadas [11].

Como se expuso anteriormente dadas las numerosas actualizaciones que ha presentado el criterio empírico de Hoek-Brown para determinar la resistencia de macizos rocosos, convenientemente para el desarrollo y una mejor comprensión de la investigación se hace un recorrido de las diferentes actualizaciones desde su inicio en 1980 hasta 2002, donde se resaltarán los avances y cambios más significativos presentados.

3.1.2 Criterio de rotura de Hoek-Brown 1980

Hacia los años 1978-1979 se requería de una metodología que permitiera determinar parámetros para el diseño de excavaciones subterráneas, en la época no se contaba con un procedimiento para calcular los diferentes esfuerzos que existían en el macizo rocoso. Fue entonces donde los ingenieros de la época se centraron en determinar una ecuación adimensional, que se relacionara con la información geológica [18].

En 1980 el profesor E. Hook y Brown presentan la primera versión de la ecuación, que posteriormente sería reconocida como el criterio de Hook-Brown para la determinación de la resistencia del macizo rocoso, esta ecuación no era nueva ni única, tenía una ecuación idéntica, la utilizada por los ingenieros e investigadores para describir el fracaso de hormigón a una etapa temprana [18].

El criterio planteado y validado en 1980, este describe un comportamiento no lineal para evaluar la resistencia de la matriz rocosa, cuando Hook y Brown propusieron este criterio tuvieron en cuenta macizos que se componían por roca dura o de “buena calidad”, con un sin número de especificaciones para que pudiera ser aplicado el criterio, estas se listaban en el documento de presentación de la ecuación primaria, sin embargo, los diferentes ingenieros y profesionales de la época, quienes se relacionaban con la ingeniería y la geología empezaron aplicar el criterio, sin considerar las limitaciones propuestas por Hoek-Brown y lo aplicaban a macizos sin importar la calidad de la roca [8] .

Algunas de las condiciones que se deberían tener en cuenta para el uso del criterio eran las siguientes.

- La resistencia de un macizo rocoso será función de la resistencia de la roca intacta, la resistencia de las discontinuidades y de cómo éstas se distribuyan en el macizo.
- Cuando la geometría de las discontinuidades controla la estabilidad del macizo, lo más correcto es considerar la resistencia de las estructuras para el diseño.
- Cuando no hay un control definido de la geometría de discontinuidades, se aplican otros criterios de falla.
- El criterio más común para obras de ingeniería civil es el de Hoek-Brown, este es adecuado para obras subterráneas túneles, minería, excavaciones profundas.

Los principales objetivos fueron:

- Determinar las propiedades mecánicas del macizo rocoso en diseños de excavaciones subterráneas, en rocas fracturadas sin alteración o intactas.

Esto venia acompañado de diferentes supuestos.

1. La roca presentaba características de rocas intactas y se aplicaban factores de reducción.
2. Se asumía que los bloques de las rocas están en contacto (no se tenía en cuenta los rellenos).
3. El criterio presenta un comportamiento no-lineal de las propiedades mecánicas del macizo.
4. Considera que el macizo rocoso a la escala de la obra de ingeniería en que se trabaja puede considerarse isótropo [19]. Esto significa que hay un número suficiente de discontinuidades poco espaciadas en comparación con la estructura (talud, túnel, etc.).

- ***Ecuación primaria presentada por Hook- Brown 1980***

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} + (m_i \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_c} + s)^{1/2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde.

σ_1 =Esfuerzo efectivo máximo (principal mayor) en la falla

σ_3 =Esfuerzo efectivo máximo (principal menor) en la falla

σ_c = Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa.

m_i =Valor constante en la matriz rocosa.

s = Valor constante en la matriz rocosa.

Los valores de m_i dependen del tipo de roca y del estado de fractura que se encuentre, Hoek y Brown establecieron una tabla donde se sugieren una serie de valores con un intervalo de aproximación, esta tabla fue incluida en el libro “fundamentos de ingeniería para la mecánica de rocas”. De esta manera dieron la responsabilidad a quien estudiara el estado de la roca determinando apoyado en su experticia y experiencia el tipo de roca y clasificarla según el intervalo de valores brindados en la tabla.

Tabla 1. Valores estimados para la constante m_i según clasificación de rocas

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates* (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)
						Marls (7 ± 2)
			Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
	Non-Clastic	Carbonates		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
		Evaporites				Chalk 7 ± 2
		Organic				
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated**		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Granodiorite (29 ± 3)			
	Hypabyssal		Gabbro 27 ± 3	Dolerite (16 ± 5)		
			Norite 20 ± 5			
	Volcanic	Lava	Porphyries (20 ± 5)	Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)	Peridotite (25 ± 5)
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Andesite 25 ± 5	Basalt (25 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)
			Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)		

* Conglomerates and breccias may present a wide range of m_i values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone to values used for fine grained sediments.

** These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

Fuente: Evaluación de parámetros de fractura para roca intacta [8]

Tabla 2. Valores aproximados para la constante m_i para la matriz rocosa

Tipo de roca y valor de la constante m_i				
Sedimentarias clásticas	Conglomerado	(22)	Lutita	4
	Arenisca	19	Grauvaca	(18)
	Limolita	9		
Sedimentarias no clásticas	Caliza margosa	7	Caliza micrítica	8
	Brecha caliza	(20)	Yeso	16
	Caliza esparítica	(10)	Anhidrita	13
Metamórficas	Mármol	9	Gneiss (*)	33
	Cuarcita	24	Esquisto (*)	4-8
	Migmatita	(30)	Filita (*)	(10)
	Anfibolita	25-31	Pizarra (*)	9
	Milonita	(6)		
Ígneas	Granito	33	Diorita	(28)
	Riolita	(16)	Andesita	19
	Granodiorita	(30)	Gabro	27
	Dacita	(17)	Basalto	(17)
Ígneas extrusivas piroclásticas	Aglomerado	(20)	Toba	(15)
	Brecha	(18)		

Fuente. Evaluación de parámetros de fractura para roca intacta [8]

3.1.3 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 1983

Hoek. E 1983. Fuerza de macizos rocosos articulados, Conferencia Geotecnia 1983-223.

Numerosas dudas y dificultades se presentaban al realizar los diseños aplicando la ecuación presentada por Hoek-Brown en los diferentes software de la época, la definición de las constantes del macizo rocoso m y s según su estado y cualidades geológicas, y que todos los programas de diseño se en contaban en términos de las ecuaciones de Mohr – Coulomb, estos dos impedimentos eran los mayores a resolver, por tanto era necesario definir ciertas correlaciones para que este fuera utilizado en los software.

El Dr. John W. Bray, desarrollo una solución teórica exacta a este problema (para el criterio original de Hoek-Brown) desarrollado por el Dr. John W. Bray en el Imperial College of Science and Technology. Esta solución se publicó por primera vez en la conferencia de Rankine de 1983, cuya solución también amplió algunos de los conceptos publicados por Hoek y Brown en 1980 y representa la discusión más completa sobre el criterio original de Hoek Brown.

Del estudio presentado por el Dr. Jhon W. Bray se destaca como aporte para la investigación la determinación de esfuerzos las constantes m y s del material rocoso en términos de esfuerzos de compresión uniaxiales basados en los resultados de pruebas de laboratorio.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (\sigma_c m_b \sigma_3 + s \sigma_c^2)^{1/2} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Se definió la siguiente nomenclatura.

$$y = m \sigma_c x + s \sigma_c^2 \quad \text{Ecuación (3)}$$

Se puede expresar (y) y (x) como.

$$y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad \text{y} \quad x = \sigma_3 \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$\sigma_c^2 = \frac{\sum y}{n} - \left[\frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \right] \frac{\sum x}{n} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$m = \frac{\sum y}{\sigma_c} - \left[\frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \right] \quad \text{Ecuación (6)}$$

n = número de ensayos realizados en laboratorio.

Se determino que para cuando la roca que a ensayar se pueda clasificar como una roca intacta la constante s = 1, la resistencia a la compresión uniaxial σ_c y la constate m determinan con las ecuaciones 5 y 6.

- Para la roca quebrada o muy fracturada las contantes s y m se determinan con las siguientes ecuaciones

$$s = \frac{1}{\sigma_2^2} - \left[\frac{\sum y}{n} - m \sigma_c \frac{\sum x}{n} \right] \quad \text{Ecuación (7)}$$

- Cuando el coeficiente de la ecuación anterior sea negativo entonces tome el valor de $s = 0$.
- La constante m estará dada por la siguiente expresión.

$$m = \frac{\sum y}{\sigma_c \sum x} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Estimación de la fuerza de las articulaciones de las masas rocosas

Con base en análisis de los resultados de las pruebas en modelos macizos rocosos fracturados y escollera Hoek & Brown (1980), propusieron un método aproximado para estimar la resistencia de los macizos rocosos fracturados. Este método, suministro diversos valores inscritos en la tabla 3 para estimar los valores de las constantes empíricas (m y s) a partir de una descripción y características geológicas del macizo rocoso.

Tabla 3 Valores aproximados para las constantes m y s Hoek – Brown 1983

Empirical failure criterion $\sigma_1' = \sigma_3' + (m\sigma_c \sigma_3' + s\sigma_c^2)^{1/2}$ σ_1' = major principal stress σ_3' = minor principal stress σ_c = uniaxial compressive strength of intact rock m, s = empirical constants	Carbonate rocks with well developed crystal cleavage, e.g. dolomite, limestone and marble	Lithified argillaceous rocks, e.g. mudstone, siltstone, shale and slate (tested normal to cleavage)	Arenaceous rocks with strong crystals and poorly developed crystal cleavage, e.g. sandstone and quartzite	Fine grained polymineralic igneous crystalline rocks, e.g. andesite, dolerite, diabase and rhyolite	Coarse grained polymineralic igneous and metamorphic crystalline rocks, e.g. amphibolite, gabbro, gneiss, granite, norite and quartzdiorite
Intact rock samples Laboratory size samples free from pre-existing fractures Bieniawski, 1974b (CSIR)* rating 100 Barton <i>et al.</i>, 1974 (NGI)† rating 500	$m = 7$ $s = 1$	$m = 10$ $s = 1$	$m = 15$ $s = 1$	$m = 17$ $s = 1$	$m = 25$ $s = 1$
Very good quality rock mass Tightly interlocking undisturbed rock with rough unweathered joints spaced at 1 to 3 m Bieniawski, 1974b (CSIR) rating 85 Barton <i>et al.</i>, 1974 (NGI) rating 100	$m = 3.5$ $s = 0.1$	$m = 5$ $s = 0.1$	$m = 7.5$ $s = 0.1$	$m = 8.5$ $s = 0.1$	$m = 12.5$ $s = 0.1$
Good quality rock mass Fresh to slightly weathered rock, slightly disturbed with joints spaced at 1 to 3 m Bieniawski, 1974b (CSIR) rating 65 Barton <i>et al.</i>, 1974 (NGI) rating 10	$m = 0.7$ $s = 0.004$	$m = 1$ $s = 0.004$	$m = 1.5$ $s = 0.004$	$m = 1.7$ $s = 0.004$	$m = 2.5$ $s = 0.004$
Fair quality rock mass Several sets of moderately weathered joints spaced at 0.3 to 1 m, disturbed Bieniawski, 1974b (CSIR) rating 44 Barton <i>et al.</i>, 1974 (NGI) rating 1	$m = 0.14$ $s = 0.0001$	$m = 0.20$ $s = 0.0001$	$m = 0.30$ $s = 0.0001$	$m = 0.34$ $s = 0.0001$	$m = 0.50$ $s = 0.0001$
Poor quality rock mass Numerous weathered joints at 30 to 500 mm with some gouge. Clean, compacted rockfill Bieniawski, 1974b (CSIR) rating 23 Barton <i>et al.</i>, 1974 (NGI) rating 0.1	$m = 0.04$ $s = 0.00001$	$m = 0.05$ $s = 0.00001$	$m = 0.08$ $s = 0.00001$	$m = 0.09$ $s = 0.00001$	$m = 0.13$ $s = 0.00001$
Very poor quality rock mass Numerous heavily weathered joints spaced at 50 mm with gouge. Waste rock Bieniawski, 1974b (CSIR) rating 3 Barton <i>et al.</i>, 1974 (NGI) rating 0.01	$m = 0.007$ $s = 0$	$m = 0.010$ $s = 0$	$m = 0.015$ $s = 0$	$m = 0.017$ $s = 0$	$m = 0.025$ $s = 0$

* CSIR Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.

† NGI Norway Geotechnical Institute.

Fuente. Actualización del criterio de Hoek-Brown 1983

Estas estimaciones, junto con la resistencia a la compresión uniaxial de las piezas intactas de roca, pueden utilizarse para construir una envolvente de falla de Mohr aproximada para el macizo rocoso fracturado, como medio de descripción el macizo. Para la determinar los valor descritos en la tabla también se tuvo en cuenta los sistemas de clasificación de macizos rocosos propuestos por Bieniawski y Barton (1974), Lien y Lunde (1974) [18].

La experiencia de Bieniawski y Barton en el uso de los valores enumerados en la tabla anterior implica que, para el diseño práctico de ingeniería, estos valores son algo conservadores. En otras palabras, la resistencia real del macizo rocoso es muy difícil estimar debido a que las fuerzas pronosticadas son demasiado bajas, y obtener datos confiables es imposible a grandes profundidades. Sin embargo, en base a comparaciones entre el comportamiento observado y previsto en taludes rocosos y excavaciones subterráneas, el autor tiende a considerar las estimaciones de resistencia realizadas en la tabla número 3 como valores de límite inferior para fines de diseño[20].

La imagen expone las condiciones y grado de complejidad que según Hoek están presentes en el terreno cuando se realizan excavaciones.

Figura 1. Modelo que representa la estructura del macizo rocoso Hoek -Brown

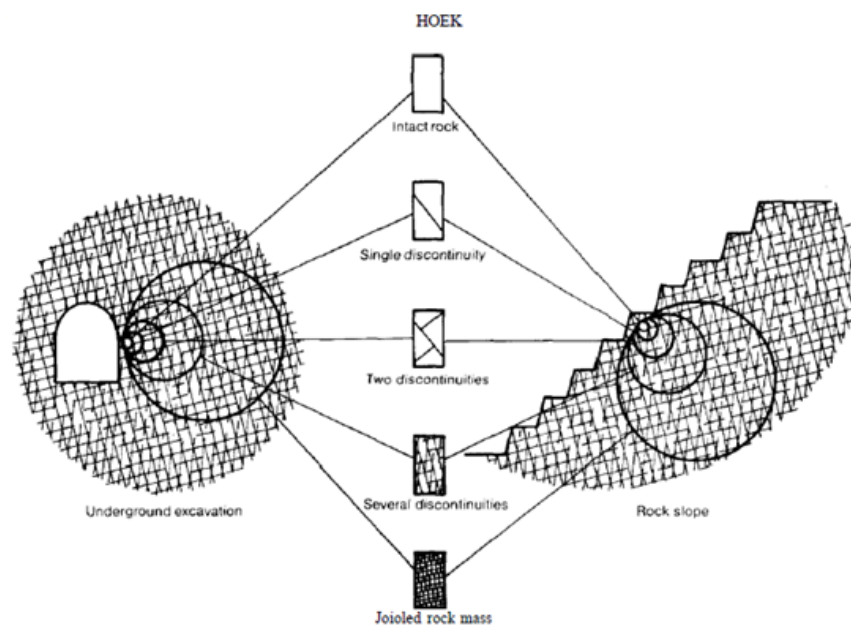


Fig. 21. Simplified representation of the influence of scale on the type of rock mass behaviour model which should be used in designing underground excavations or rock slopes

Fuente. Actualización del criterio Hoek-Brown 1983

3.1.4 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 1988.

El criterio de falla para rocas descrito por Hoek- Brown (1980) y actualizado por ingeniero Hock (1983), era ampliamente utilizado para estimar la resistencia de macizos rocosos fracturados, no obstante, a pesar de las aclaraciones brindadas por el profesor Ever Hoek existía confusión sobre algunos fragmentos del criterio y como establecer las diferentes limitaciones para su uso.

Fue entonces que surgió el artículo realizado por canadiense ed. J.H. Curran en 1998, del departamento de ingeniería Civil de la Universidad de Toronto, el cual presenta una abreviación de las ecuaciones que establecen el criterio de falla en términos de esfuerzos principales mayores y menores. Adicional analiza algunas correlaciones y aproximaciones entre las constantes m y s en base a la clasificación del macizo rocoso hecha por Bieniawski (1974) para macizos perturbados y no perturbados.

Principales aportes actualización criterio Hoek-Brown 1988

Tanto el planteamiento base del criterio de falla de presentado por Hoek-Brown 1980, como la actualización realizada por Hoek en 1983 están orientados originalmente para aplicaciones en el diseño de excavaciones subterráneas, por tanto, las ecuaciones J.H. Curran las expresó todas las ecuaciones en términos de esfuerzos principales, que actúan sobre el macizo.

La descripción más detallada del criterio de falla de Hoek-Brown se encuentra en la conferencia Rankine de Hoek (1983) y se utiliza en la actualización del criterio de año 1988 como la referencia sobre la cual se basan las actualizaciones presentadas en este documento. El criterio se derivó originalmente para aplicaciones en el diseño de excavaciones subterráneas, por lo tanto, se expresó en términos de los esfuerzos efectivos principales mayores y menores que actúan sobre un elemento del macizo rocoso.

La ecuación básica que define el criterio es.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma'_3 + s\sigma_c^2}$$

Ecuación (9)

Donde.

σ'_1 es el esfuerzo principal mayor en la falla.

σ'_3 es el esfuerzo principal menor en la falla.

m y s son las constantes del material rocoso.

σ'_c Es el esfuerzo uniaxial en la roca intacta

El parámetro σ'_c se determinan por medio de ensayos de laboratorio de compresión uniaxial, en rocas intactas, que no posean discontinuidades tales como juntas o planos de estratificación, las muestras deben medir 50 mm de diámetro y 100 mm de largo [21].

Curran en 1988 realizó una interpretación de las condiciones geológicas dadas en el terreno y propuso que la resistencia a la compresión uniaxial neta se obtiene de sustituir $\sigma'_3 = 0$.

$$\sigma'_{c\ mas} = \sqrt{s} \sigma_c \quad \text{Ecuación (10)}$$

Similar a lo anterior, J.H. Curran propone que, para obtener la resistencia a tracción del macizo, bastara con remplazar $\sigma'_1 = 0$.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_c}{2} \left(\frac{m - \sqrt{4s + m^2}}{2} \right) \quad \text{Ecuación (11)}$$

El canadiense ed. J.H. Curran identifico que el criterio se usaba ampliamente para una variedad de problemas de ingeniería de rocas, incluyendo análisis de estabilidad de taludes, aunque el criterio inicialmente se había desarrollado para condiciones confinadas que rodean las excavaciones subterráneas, el criterio fue aceptado dado que sus resultados eran muy acertados cuando se utilizaba en el análisis de fallas superficiales en taludes [18].

Por lo anterior en 1998, se incluyó las condiciones de masas rocosas no perturbadas y perturbadas al criterio de Hoek-Brown, para conformar un método que se pudiera aplicar en los macizos rocosos cercanos a la superficie, esta actualización introdujo lineamientos específicos para el análisis estructural en estructuras superficiales cimentadas sobre macizos rocosos [21].

La metodología para la determinación de las constantes m y s cambia, para ello se tiene en cuenta la clasificación geomecánica de Bieniawski, donde las constantes queda en términos del sistema de clasificación para macizos (RMR), se asumió que las características de deformación eran las propuestas en 1974 por Bieniawski, Barton, Lén y Lunde [21].

Para macizos rocosos alterados m y s se calculan de la siguiente manera.

$$\frac{m_b}{m_i} = e^{\left(\frac{RMR-100}{14}\right)} \quad \text{Ecuación (12)}$$

La ecuación para la constante s.

$$S = e^{\left(\frac{RMR-100}{6}\right)} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Para macizos rocosos inalterados m y s se calculan de la siguiente manera.

$$\frac{m_b}{m_i} = e^{\left(\frac{RMR-100}{14}\right)} \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$S = e^{\left(\frac{RMR-100}{9}\right)} \quad \text{Ecuación (15)}$$

En esta actualización también se introdujo una ecuación en términos del RMR de Bieniawski para la determinación del módulo de deformación E.

$$E = 10^{\left(\frac{RMR - 10}{40}\right)} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Para la determinación de la resistencia a la compresión del macizo rocoso se consideró que el número de ensayos que se realizan permiten determinar una resistencia con mayor precisión y que este número de ensayos están en función de la condición del proyecto, por lo tanto, en la ecuación se incluyó el parámetro (n), que representa el número de pruebas de laboratorio.

$$\sigma_{1c}^2 = \frac{\sum y}{n} - \left(\frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \right) \frac{\sum x}{n} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Nota: en esta actualización 1988 se presentó una relación entre Mohr Coulomb y la ecuación presentada por Hoek-Brown, para la estimación de parámetros de fricción y cortante. Sin embargo, cortante no será objeto de estudio en el presente trabajo.

Limitaciones y condiciones para el uso del criterio de Hoek-Brown 1988

Los valores para los diferentes esfuerzos pueden verse afectados cuando no se determina un número significativo de exploraciones, adicional los resultados al analizar la estabilidad de taludes o excavaciones subterráneas cercanas a la superficie, donde los niveles de tensión son bajos, es necesario hacer una estimación de esfuerzos a tensiones bajas. En estas situación el criterio de Hoek-Brown no presenta precisión [21].

3.1.5 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 1992.

En esta actualización del criterio se establece que en los macizos rocosos completamente fracturados su resistencia a tracción es nula, es decir $\sigma_3 = 0$. Otra de las modificaciones más significativas es una nueva caracterización cualitativa simplificada para la estimación de los parámetros del macizo rocoso.

Para la roca intacta, el criterio de Hoek-Brown se puede escribir de la siguiente manera.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde.

σ_3' = es el esfuerzo principal mayor en la falla.

σ_1' = es el esfuerzo principal menor en la falla.

σ_c = resistencia de la compresión uniaxial en la roca intacta.

m_i = constante del macizo rocoso.

En la actualización de 1988, se planteó una tabla con valores aproximados para la clasificación de la resistencia a la compresión de la matriz rocosa, a esta tabla se recurría cuando no se contaba o no era posible realizar ensayos de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión uniaxial [22], la tabla incluye valores de esfuerzo muy bajos los cuales oscilan entre (0.25 - 1) Mpa, para macizos de muy mala calidad o muy fracturados, como también valores máximos entre (100 – 250) Mpa, para rocas de macizos que se consideren intactos o muy buena calidad.

Tabla 4. Valores estimados para esfuerzos de compresión uniaxial σ_c

Term	Uniaxial Comp. Strength σ_c MPa	Point Load Index I , MPa	Field estimate of strength	Examples*
Extremely Strong	>250	>10	Rock material only chipped under repeated hammer blows	Basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
Very Strong	100 - 250	4 - 10	Requires many blows of a geological hammer to break intact rock specimens	Amphibolite, andesite, basalt, dolomite, gabbro, gneiss, granite, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
Strong	50 - 100	2 - 4	Hand held specimens broken by single blow of geological hammer	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, slate
Medium Strong	25 - 50	1 - 2	Firm blow with geological pick indents rock to 5 mm, knife just scrapes surface	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
Weak	5 - 25	**	Knife cuts material but too hard to shape into triaxial specimens	Chalk, rocksalt, potash
Very Weak	1 - 5	**	Material crumbles under firm blows of geological pick, can be shaped with knife	Highly weathered or altered rock
Extremely Weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Clay gouge

* All rock types exhibit a broad range of uniaxial compressive strengths which reflect heterogeneity in composition and anisotropy in structure. Strong rocks are characterized by well interlocked crystal fabric and few voids.
 ** Rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results under point load testing.

Fuente. Actualización del criterio de Hoek-Brown 1988

De la misma exploración realizada para la determinación de los valores para la resistencia a la compresión uniaxial σ_c se determinó que la constante m dependía de la mineralogía del suelo y del tamaño del grano, esto basados en ensayos de pruebas uniaxiales en rocas, lo que permitió establecer una tabla simplificada para determinar los valores de la constante m_i [22]

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Tabla 5. Valores para la constante m_i para la roca intacta

Grain size	Sedimentary			Metamorphic		Igneous		
	Carbonate	Detrital	Chemical	Carbonate	Silicate	Felsic	Mafic	Mafic
Coarse	Dolomite 10.1	Conglomerate (20)		Marble 9.3	Gneiss 29.2	Granite 32.7	Gabbro 25.8	Norite 21.7
Medium	Chalk 7.2	Sandstone 18.8	Chert 19.3		Amphibolite 31.2		Dolerite 15.2	
Fine	Limestone 8.4	Siltstone 9.6	Gypstone 15.5		Quartzite 23.7	Rhyolite (20)	Andesite 18.9	Basalt (17)
Very fine		Claystone 3.4	Anhydrite 13.2		Slate 11.4			

Values shown were derived from statistical analysis of triaxial test data for each rock type. Values in parenthesis have been estimated.

Fuente. actualización del criterio de Hoek-Brown 1988

Cuando el lugar de estudio no pudiera calificarse como un macizo que presenta una resistencia a la tracción cero, se debe acudir al criterio de Hoek-Brown modificado, este criterio deberá ajustarse a las predicciones de resistencia dadas por el criterio original, el cual se puede expresar de la siguiente manera [23].

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + 1 \right)^a \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde.

m_i y a son constantes para la roca rota.

Para determinar las constantes de la matriz y el macizo rocoso " m_b , m_i , s " se consideró las diversas situaciones que se pueden presentar en el terreno tales como, masa en bloque, masa fracturada, entre otras. Dichas condiciones estudiadas posibilitaron la construcción de la siguiente tabla.

Tabla 6. Valores estimados m_b y α basados en la estructura de la superficie de la roca

MODIFIED HOEK-BROWN FAILURE CRITERION $\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} \right)^\alpha$ σ'_1 = major principal effective stress at failure σ'_3 = minor principal effective stress at failure σ_c = uniaxial compressive strength of <i>intact</i> pieces in the rock mass m_b and α are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass			SURFACE CONDITION VERY GOOD Unweathered, discontinuous, very tight aperture, very rough surface, no infilling GOOD Slightly weathered, continuous, tight aperture, rough surface, iron staining to no infilling FAIR Moderately weathered, continuous, extremely narrow, smooth surfaces, hard infilling POOR Highly weathered, continuous, very narrow, polished/slickensided surfaces, hard infilling VERY POOR Highly weathered, continuous, narrow, polished/slickensided surfaces, soft infilling			
STRUCTURE						
	BLOCKY - well interlocked, undisturbed rock mass; large to very block size	m_b/m_i α	0.7 0.3	0.5 0.35	0.3 0.4	0.1 0.45
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass; medium block sizes	m_b/m_i α	0.3 0.4	0.2 0.45	0.1 0.5	0.04 0.5
	BLOCKY/SEAMY - folded and faulted, many intersecting joints; small blocks	m_b/m_i α		0.08 0.5	0.04 0.5	0.01 0.55
	CRUSHED - poorly interlocked, highly broken rock mass; very small blocks	m_b/m_i α		0.03 0.5	0.015 0.55	0.003 0.6
						0.004 0.65

Fuente: Actualización del criterio Hoek-Brown 1988

3.1.6 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 1995

Este criterio adoptó una sola ecuación para los diferentes macizos que describía tanto perturbados como no perturbados, ya que se analizó que el criterio modificado era muy conservador cuando se utilizaba en macizos rocosos que no eran de mala calidad o dureza, por tanto, se introdujo el concepto del criterio de Hoek-Brown generalizado.

Otro aporte valioso considerado hasta hoy por el ingeniero Poul Marinos, es el abandono al RMR de Bieniawski para la determinación de las constantes m y s , dado que era muy difícil de aplicar a macizos rocosos de muy mala calidad, y que la relación de m y s no eran lineales en estos rangos, por tanto, se concluyó que fuera el investigador que a su juicio definiera que tipo de macizo era y lo clasificara según el índice de resistencia geológica GSI.

Por lo anterior, las ecuaciones para determinar las constantes s y m se dividieron en dos grupos, los cuales dependían del valor de clasificación del GSI.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Ecuación (21)}$$

Para un macizo clasificado con $GSI > 25$ para las ecuaciones m_i , m_b será.

$$\frac{m_b}{m_i} = e^{\left(\frac{GSI-100}{28} \right)} \quad \text{Ecuación (22)}$$

La constante s toma la siguiente estructura.

$$S = e^{\left(\frac{GSI-100}{9} \right)} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Al igual que lo descrito por Bieniawski, se tuvo en cuenta macizos pobres, también llamados macizos fracturados, por esto para determinar el parámetro “a” se modifica la ecuación para valores de GSI mayores y menores de 25 [18].

Cuando $GSI > 25$; $a = 0$.

para un $GSI < 25$; $a = 0.65 - GSI / 200$ Ecuación (24)

3.1.7 Actualización del criterio de rotura de Hoek-Brown 2002

En la actualización del criterio de Hoek - Brown se conserva la estructura de la ecuación primaria para el cálculo de la resistencia de la matriz, sin embargo, se incluyó nuevas condiciones que se pueden evidenciar en el terreno a la hora de realizar las diferentes exploraciones, por tanto, en el criterio de 2002 se incorpora una nueva constante para el cálculo tanto a , s y m_b , que hasta ahora habían sido constantes, se convierten en variables que dependen del GSI y el parámetro D, modificando levemente la ecuación del cálculo de los esfuerzo de rotura para la matriz rocosa, posibilitando esta vez ya el cálculo de esfuerzos para el macizo en general.

La nueva constante ‘D’ representa el grado de alteración y fisura que presenta el macizo rocoso, dicho grado de alteración puede ser producto del método de excavaciones, entre ellos voladuras, excavaciones con tuneladoras o fisuración por relajación de esfuerzos del macizo rocoso, por tanto, las ecuaciones para determinar m_b , s y a tomaron nueva forma de cálculo la cual se conserva hasta hoy en día [18].

Como se mencionó la ecuación de Hoek-Brown para la matriz rocosa no presento cambios, esta será la ecuación base de comparación para los resultados de esta investigación, su estructura está dada por.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ic} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Ecuación (25)}$$

Donde.

σ'_3 = es el esfuerzo principal mayor en la falla.

σ'_1 = es el esfuerzo principal menor en la falla.

σ_c = resistencia de la compresión uniaxial en la roca intacta.

m_i = constante del macizo rocoso.

a = Constante que depende del índice de resistencia geológica.

Que por lo general para la matriz rocosa intacta se adopta un valor de $s = 1$.

GSI = Índice de resistencia Geológica.

La ecuación que se estableció para el cálculo de los esfuerzos del macizo rocoso es la siguientes.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ic} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Ecuación (26)}$$

$$S = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$m_b = m_i * e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad \text{Ecuación (29)}$$

La nomenclatura para esfuerzos y constantes no presenta modificaciones [15].

σ_1 =Esfuerzo efectivo máximo (principal mayor) en la falla

σ_c = Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa.

σ_3 =Esfuerzo efectivo mínimo (principal menor) en la falla.

m_b = Constante según la composición del macizo rocoso.

S = Constante que depende del índice de resistencia geológica y de la constante m_i de la matriz inalterada.

GSI = Índice de resistencia Geológica.

Los valores para la constante D para el macizo rocoso se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Valores para la constante D del macizo rocoso.

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Fuente. Criterio de rotura Hoek-Brown 2002

D = describe el estado del macizo rocoso, según sea la condición de excavación se le asigna un valor entre ($0 \leq D \leq 1$).

Capítulo 4. MARCO CONCEPTUAL

4 PROPIEDADES ÍNDICE DE LAS ROCAS

Las propiedades índices de las rocas se refieren a todas las propiedades físicas y químicas que conforman ese elemento conformado por diferentes minerales que constituyen ese cuerpo sólido denominado roca. Las propiedades que se determinan en la presente investigación son.

4.1 Porosidad

La porosidad de la roca es esa relación que se encuentra entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra, la cual se expresa en porcentaje. Por tanto, es la capacidad de almacenaje de fluidos que posee la roca [23].

Está representada por la siguiente ecuación.

$$\eta (\%) = \frac{VV}{Vm} \times 100 \quad \text{Ecuación (30)}$$

La porosidad está muy ligada a la resistencia de las rocas ya que a mayor volumen de vacíos menor capacidad en su resistencia.

4.2 Peso específico

Con la porosidad en mente podemos determinar el peso específico, ya que es la relación que existe entre el peso de la sustancia sobre el volumen de la muestra, por tanto, es el peso de sólido por unidad de volumen [7].

$$\gamma = \frac{W}{Vm} \quad \text{Ecuación (31)}$$

4.3 Humedad

Está definida en la norma americana D2216-10 (ASTM, 2010b) como la razón en porcentajes entre, la masa de agua contenida en los espacios o poros y la masa de las partículas sólidas que conforman la roca, una temperatura estándar de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ es usada para determinar de manera individual esta última masa [7].

$$\% w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad \text{Ecuación (32)}$$

4.4 Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial

El ensayo de compresión es el procedimiento mediante el cual se determina el esfuerzo de compresión uniaxial, la razón de Poisson y el módulo de Young de un núcleo de roca [24].

Figura 2. Ilustración máquina universal para ensayo de resistencia a la compresión



Fuente. Propia abril de 2022

El parámetro de resistencia a compresión de la roca es fundamental para el diseño y para la estimación de algunas propiedades índices de la roca (ASTM, 2012). Diversas normas han estandarizado el método de ensayo, siendo las consultadas en esta investigación las siguientes:

- UNE 22-950-90/1 Propiedades mecánicas de la roca. Ensayos para la determinación de la resistencia.

- ASTM D-2938 -95 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.
- ASTM D-7012 -10 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.

Los requisitos para realizar el ensayo son similares en las normas indicadas. Si tomamos en consideración las normas UNE, podemos resaltar los siguientes aspectos:

Dispositivo de carga: Se debe utilizar una maquina con la capacidad de aplicar y medir la carga axial, de modo que la ruptura de la muestra se produzca entre los 5 y 10 minutos siguientes al comienzo de aplicación de la carga [25].

Elementos de contacto: Serán dos placas de acero de 58 Rockwell C de dureza y con forma de disco. Su diámetro estará comprendido entre D y $1.1D$, donde D es el diámetro de la probeta expresado en mm. El espesor de la placa debe ser por lo menos $D/3$. Las superficies de las placas deben estar rectificadas y su error de planitud debe ser inferior a 0.005 mm. Se debe incorporar al menos un asiento esférico entre los platos de la maquina o las placas de contacto con la superficie.

Respecto a la probeta a ensayar: deben ser cilíndricas, con las siguientes dimensiones:

- Relación altura/diámetro de 2.5-3.0
- Diámetro, superior a 10 veces el tamaño del mayor grano de la roca, y no inferior a 50 mm.
- La elaboración de las probetas se hace mediante perforación, corte, torneado y pulido o cualquier medio apropiado, la superficie de la probeta debe ser liza y sus bases paralelas y planas, perpendiculares a la línea longitudinal de la probeta [3].
- Se debe evitar el empleo de material de recubrimiento como igualadores, para conseguir el paralelismo en la base de la probeta. Si es necesario su uso debido a las características de la muestra, debe indicarse en el protocolo del ensayo [2].
- Humedad: Se debe tratar de conservar las condiciones de humedad “in situ” hasta el momento del ensayo, debido a su efecto significativo sobre la resistencia de la roca.

Tabla 8. Tolerancia de probetas de roca para el ensayo de compresión simple

Tolerancia respecto a:	Deformabilidad de la roca		
	Poca cuarcita	ej. Media ej. arenisca	Alta ej.: Lutita
Desviación de la generatriz respecto a la dirección axial	±0,3 mm	±0,4 mm	±0,5 mm
Planitud de la base	±0,02 mm	±0,5 mm	±0,1 mm
Desviación, respecto al ángulo recto, del ángulo del eje de la probeta con la base	10'	20'	30'

Fuente. Normas técnicas españolas UNE 22-950-90 [7].

Es importante resaltar que los requerimientos de la muestra a ensayar son complejos de efectuar, en algunas ocasiones resulta imposible, debido a diversas condiciones de la roca como son su dureza y fragilidad [7].

- ***Fases del ensayo uniaxial en rocas***

Según Goodman 1980 y Galván 2010, la muestra de roca ensayada presenta seis fases durante la realización del ensayo de compresión uniaxial, los cuales los describieron de la siguiente manera [25].

Fase 1. Cierre de fisuras, comportamiento inelástico: se empiezan a cerrar algunos poros y las fisuras. En gran parte de los casos la curva tensión-deformación es cóncava [7].

Fase 2. Comportamiento elástico: La relación entre la tensión y la deformación longitudinal y radial son lineales, el comportamiento es elástico. En esta fase se puede definir un coeficiente de Poisson constante y el Módulo de Young [7].

Fase 3. Las fisuras existentes son estables y aparecen nuevas fisuras: La relación entre la tensión y la deformación longitudinal se mantiene lineal, mientras que con la tasa de deformación radial aumenta con el incremento de carga, el coeficiente de Poisson crece y deja de ser constante. Se escuchan crujidos por la aparición de fisuras en la parte más tensionada (sección media de la probeta), estas fisuras son estables.

Fase 4. La relación tensión-deformación dejan de ser lineales: La relación entre la tensión y la deformación longitudinal y radial deja de ser lineal. Las grietas famadas pueden dar lugar a líneas semi-continuas de rotura (micro fallas). El punto C de la curva esfuerzo-deformación longitudinal-

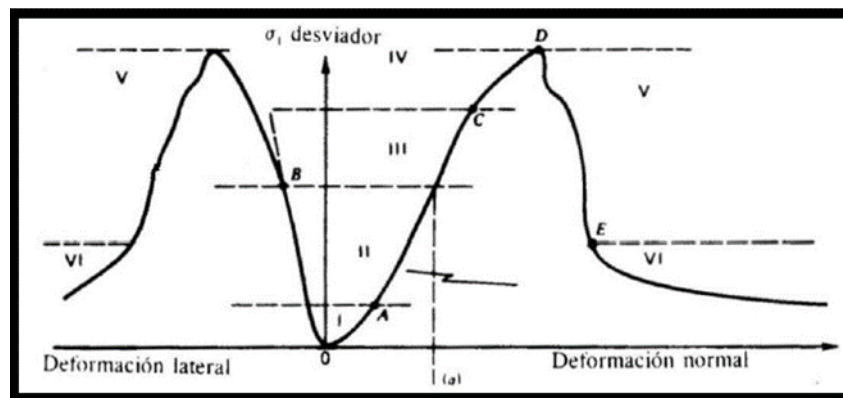
en el que inicia esta fase, identifica la plastificación de la probeta y formación de deformaciones irreversibles. El punto D con el que termina la fase, representa la ruptura [7].

Fase 5. La tensión cae y la resistencia baja. Se forman micro-fisura por unión de la micro-fisura: En esta fase la resistencia de la probeta baja. Se forman macro fisuras continuas, por la unión de la micro-fisura que han crecido.

Fase 6. Las macro fisuras se deslizan. La tensión se mantiene constante, se alcanza la resistencia residual En esta fase las macros fisuras se deslizan. La roca recupera una resistencia residual que sostiene de manera constante.

Las anteriores fases se pueden observar gráficamente en la siguiente imagen, en el transcurso de la aplicación de carga.

Figura 3. Fases de ensayo del ensayo de la resistencia a la compresión simple



Fuente. Goodman, 1989 Galván, 2010

4.5 Ensayo triaxial en rocas

Se sabe que la resistencia de la roca está en función de la presión de confinamiento que pueda soportar, por esta condición para la distinción de resistencia de la roca se usa la prueba de compresión triaxial, comúnmente ensayos de confinamiento son los más utilizados, sin embargo esto no describe las condiciones de tensión bajo las cuales se encuentran la mayoría de los macizos rocosos subterráneos, por esto se hace necesario un método que permita distinguir los esfuerzos tensionales y laterales, presentes en las condiciones naturales del terreno [2].

La prueba de ensayo triaxial es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de resistencia en una muestra de roca, este es un ensayo ampliamente utilizado en campo de investigación como en proyectos convencionales [11]. La prueba es confiable por las siguientes razones.

- Proporciona información de esfuerzo deformación de la roca intacta.
- Describe la flexibilidad de la muestra en términos de la trayectoria de la carga.
- Proporciona condiciones de esfuerzo de rotura.

Este método de prueba cubre la determinación de la resistencia de especímenes de núcleo de roca cilíndrica no drenado, estado bajo carga de compresión triaxial. La prueba proporciona datos útiles para determinar la resistencia y las propiedades elásticas de roca a saber: resistencias al corte a varias presiones laterales, ángulo de fricción interna, (ángulo de resistencia al corte), cohesión intercepto y módulo de Young. Debe observarse que este método no prevé medidas de presión intersticial. Por lo tanto, los valores de resistencia determinados son en términos de tensión total, es decir, no corregidos por las presiones intersticiales [26].

La norma que se tendrá en cuenta para la realización del ensayo triaxial es la siguiente.

- Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements [26]
-

4.6 Metodología de muestreo y tamaño de la muestra

Para determinar el tamaño de la muestra no existe un criterio generalizado, por tanto, se encuentran diferentes metodologías como determinarlas, dependiendo el tipo de estudio que se realice y el tamaño de la población que se tenga que puede ser finita o infinita.

De forma muy empírica y general algunos investigadores proponen utilizar el método estadístico basado en una prueba piloto, para su uso de debe contar con un rango de especímenes que se encuentra entre 10 - 20 muestras en estudios, con el fin de tener un intervalo representativo de la población muestreada, para poder realizar los ajustes estadísticos necesarios al muestreo.[7].

$$n = z_{\alpha}^2 \frac{s^2}{i^2} \quad \text{Ecuación (33)}$$

- z_{α}^2 = Valor correspondiente a la distribución de gauss (siendo el porcentaje de observaciones no representativas de la variable estudiada). Habitualmente se considera entre un 5% a 10% de observaciones despreciables siendo $z_{\alpha}^2 = 3.84$ y $z_{\alpha}^2 = 2.72$ respectivamente.

- i = Error de la estimación debido al hecho de obtener conclusiones del total de la población a partir del análisis de una parte de ella. Es el error que se prevé cometer o la máxima diferencia que se admita con relación a la media de la población (Mateu, 2003).
- Nivel de confianza ($1 - \alpha$): Probabilidad complementaria del error admitido, indica el porcentaje de observaciones aceptables.
- s^2 = Varianza o desviación típica, valor medio de la dispersión de las respuestas.

4.7 Método del muestreo

Generalmente se realizan dos métodos de muestreo, cuando se cuenta con una muestra probabilística, esta se da cuando todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser incluidos en la muestra y la muestra no probabilística cuando no se puede establecer esa probabilidad (Fuentelzas, 2004).

Diferentes condiciones limitan la selección de las muestras, entre ellas el costo de obtención, el acceso a la zona de extracción, el transporte de las muestras, por tanto se puede recurrir a muestras no probabilísticas por costos y practicidad de las investigaciones [7]

Las muestras no probabilísticas pueden obtenerse de tres formas:

- 1. Muestreo casual: Seleccionar la muestra de forma casual sin ningún tipo de consideración.
- 2. Muestreo intencional: Selección de casos típicos de una población, a criterio de un experto.
- 3. Muestreo por cuotas: Selección de muestras a partir de ciertas características predeterminadas.

4.8 Clasificación geológica de las muestras de estudio

La clasificación geológica de las rocas de estudio se debe realizar según su modelo de formación u origen, para determinar su grupo se ubican ya sean ígneas, sedimentarias o metamórficas, cada grupo de ellos contiene un diverso número de rocas que se diferencian en sus cualidades en cuanto su composición y textura (Servicio Geológico México).

4.8.1 Rocas ígneas

Son producto de la solidificación del magma, tanto fragmentado o compacto que se presenta sobre la corteza terrestre, la temperatura a la que se realiza dicha solidificación ocurre para los basálticos en 1250 °C, la composición mineralógica promedio de las rocas ígneas es 59% feldespatos, 12% cuarzo, 17% anfíboles, piroxenos 4% y minerales 8%.

La composición de la corteza terrestre está dada mayoritariamente por las rocas ígneas, puesto estas representan el 95 % contra el 5% de las sedimentarias, aunque las sedimentarias presentan un mayor afloramiento [27].

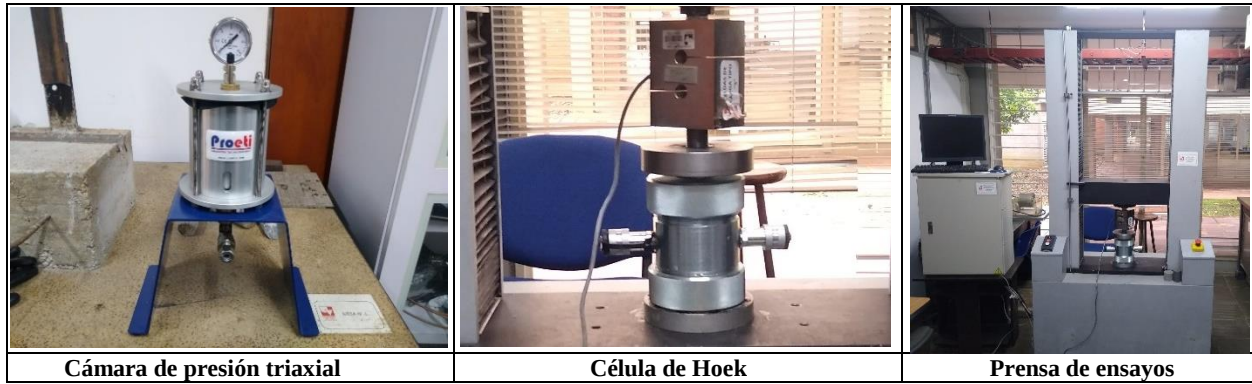
4.9 Equipos de laboratorio

Para la extracción de los núcleos de roca intacta se hará uso del taladro industrial muestreador de 2'' de diámetro, el cual se le instalarán brocas con punta diamantada para extracción de núcleos de Φ 55 mm.

Figura 4. imágenes de equipo para extraer núcleos [7]



Equipos para el ensayo compresión triaxial en rocas

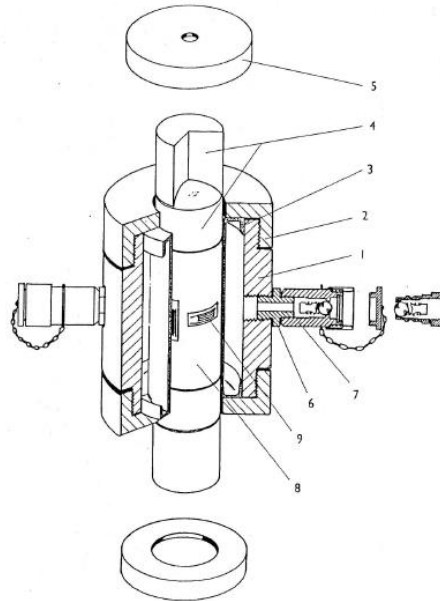


Fuente. Propia, abril 2022

Cámara de presión triaxial: dispositivo que permite regular la presión en el sistema de ensayo triaxial, este dispositivo también permite descomprimir el sistema una vez terminado el ensayo.

Célula de Hoek: La Célula Hoek para la determinación de la resistencia a la compresión triaxial de rocas consta de.

Figura 5. Célula de Hook Para ensayos triaxiales



Fuente. Manual de instrucciones Proeti [27]

1. Cuerpo de la célula de acero
2. Tapa de acero (2)
3. Camisa de goma de poliuretano
4. Conjunto de pistón y rótula, de acero endurecido (2)
5. Separador de carga con orificio central.
6. Junta estanca (2)
7. Válvula de desahogo (1)
8. Muestra con una relación longitud / diámetro de 2:1 (no se proporciona)
9. Bandas extensométricas (no se proporcionan)

Este dispositivo está diseñado para resistir las diferentes presiones, con una capacidad máxima de 70 Mpa de confinamiento, una vez instalado al sistema de ensayo permite determinar los esfuerzos principales de Hoek en rocas.

Prensa de ensayo: Sistema que genera las fuerzas de compresión para determinar la prueba de compresión uniaxial y ensayo triaxial, con una capacidad máxima de 140 Ton.

Capítulo 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

5 INTRODUCCIÓN METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo presenta el desarrollo cronológico de las actividades que se llevaron a cabo durante la presente investigación, proporcionando información detallada del procedimiento que se aplicó para obtener cada uno de los objetivos planteados.

Para seleccionar el lugar de muestreo de las rocas de donde se obtendrán los núcleos para los respectivos ensayos en el laboratorio se hizo uso del mapa geológico de INGEOMINAS, paralelo con la información del instituto Geológico una vez determinada la zona de muestreo se procede a recuperar fragmentos de tal manera que dichas muestras cumplan con las condiciones requeridas por las normas ASTM y UNE [3].

Las muestras recuperadas fueron trasladadas a las instalaciones del Laboratorio de Geología y Mecánica de Rocas de la Universidad del Valle, se procede a la toma de núcleos respetando el número de especímenes para generar confiabilidad en los resultados, cuya cantidad está referenciada respecto a los proyectos de grado anteriormente realizados y métodos estadísticos referentes a la obtención de núcleos para ensayos en roca, teniendo como base científica principal las consideraciones de las normas ASTM D4543-08 y UNE 22-950-90.

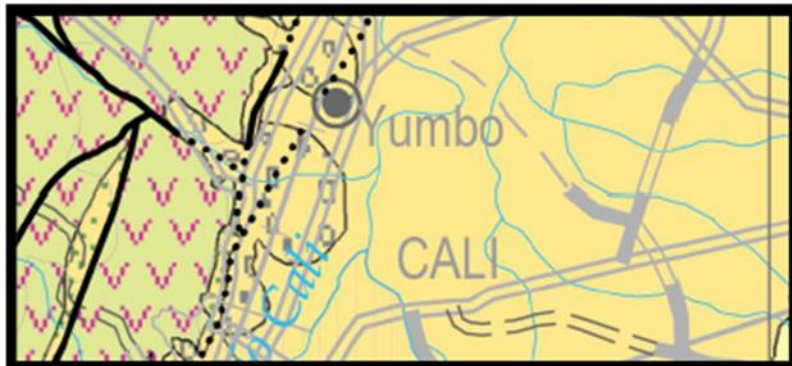
Los núcleos extraídos, se caracterizan determinando las propiedades índices que los componen, entre ellas el peso específico, humedad, porosidad, posteriormente se evaluara el comportamiento mecánico mediante las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial y resistencia de ensayos triaxiales, dichos resultados que se exponen en las actividades posteriores.

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos se hace uso de herramientas computacionales para el procesamiento y comparación de los resultados, utilizando diferentes conceptos teóricos y estadísticos, esta información se presenta en gráficas y tablas para un mejor entendimiento, cumpliendo con los objetivos planteados en la investigación. Al final se presentan conclusiones académicas prácticas que contribuyen al desarrollo del ámbito académico y laboral local y nacional relacionado con la Geología y Mecánica de Rocas.

5.1 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La salida a campo se realizó el día 2 de abril del 2022, se visitó una cantera de agregados localizada en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca), municipio que Ingeominas posee clasifica K2 que representa una edad de formación geológica aproximada entre (86 - 87± 3) millones años.

Figura 6. Detalle de la unidad cono-estratigráfica de Cali y Yumbo

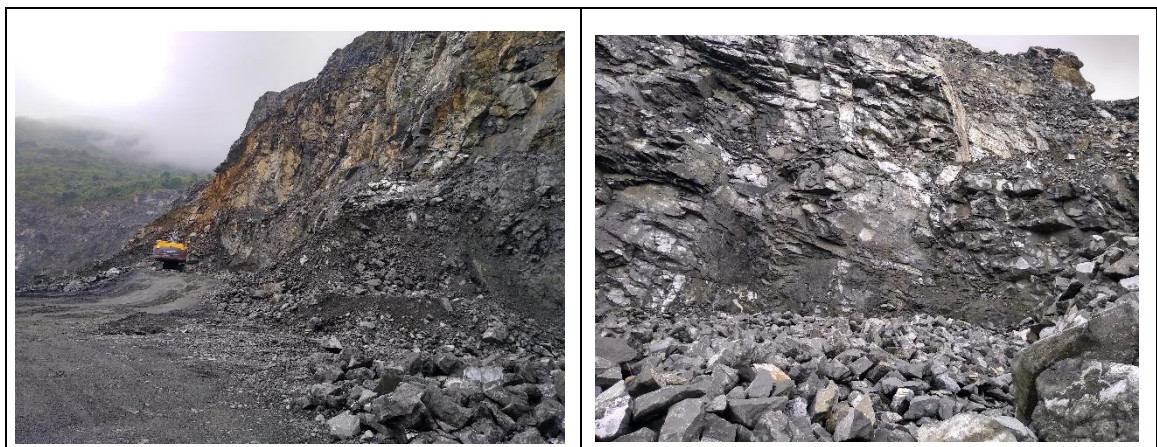


Fuente. INGEOMINAS, 2017

- Yumbo: Suelo de la época Pleistoceno - holoceno, depósito Abanico de la provincia litosférica Continental Mezo-proterozoica Grenvilliana (Q1Q2-Q ca, PLCMG) [7].

La zona de donde se toman las muestras es un talud de exploración para la producción de agregados, se realizan métodos de exploración por explosión controlada y mecánica.

Figura 7. Imágenes de la zona de toma de muestras



Fuente. Propia, abril 2022

5.1.1 Método del muestreo

Se realizó un muestreo al azar de fragmentos de roca que fueran característicos y representativos del macizo rocoso, con características similares en tamaño y geometría, se agruparon para su posterior transporte hasta el laboratorio.

5.1.2 Descripción de la muestra de estudio

La selección de las rocas muestreadas representa diferentes partes del talud y cumplen las condiciones geométricas necesarias para la toma de los núcleos (requerimientos de la ASTM-D4543), para ensayos de compresión uniaxial y triaxial. Las muestras seleccionadas se caracterizaron según su composición geológica, textura, color, valores y cualidades que la describen. Dicha clasificación se anuncia en la tabla 9.

Tabla 9. Especificaciones de la geología estudiada

Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil y Geomática Laboratorio de Geología y Mecánica de Rocas.(MERO)		Muestreo: se emplearon 400 gramos de muestra para la elaboración de los ensayos, no se evidenció diferencia significativa entre las matrices rocosas, por tanto se presenta una sola descripción.
IDENTIFICACIÓN DE LA ROCA		
a) Grupo Genético	Ígnea Plutónica (intrusiva)	
b) Estructura	Masiva	
c) Tamaño de grano	Grano medio	
d) Composición mineralógica	Minerales melanocreticos y leucocráticos, posiblemente piroxeno y feldespatos.	
DESCRIPCIÓN DE LA ROCA		
a) Color	Gris Verdoso jaspeado Claro	
b) Matriz	Doleritas	
c) Meteorización/alteración	Sana	
d) Contenido de carbonatos	1. En la superficie se manifiesta libre de carbonato, 2. En las foliaciones blancas reacciona como calcárea.	
e) Estabilidad de la roca	Después de 24 horas bajo el agua la roca se fracciona a través de los planos foliación (débilmente estable), los bloques de roca sana se mantienen estables.	
f) Resistencia a compresión simple	Resistente, entre 50 a 100 MPa	

Fuente. Propia, julio 2022

5.1.3 Determinación del tamaño muestral

Como primer dato muestral se considera que la población estudiada es infinita, ya que es imposible determinar con precisión el número de elementos que componen el macizo, por lo anterior y debido a la ausencia de un modelo generalizado que permita estimar el tamaño muestral de este tipo de estudios, se recurre a un software que considera variables estadísticas que se han determinado previamente el cual determina el tamaño muestral que se debería contar para obtener datos confiables.

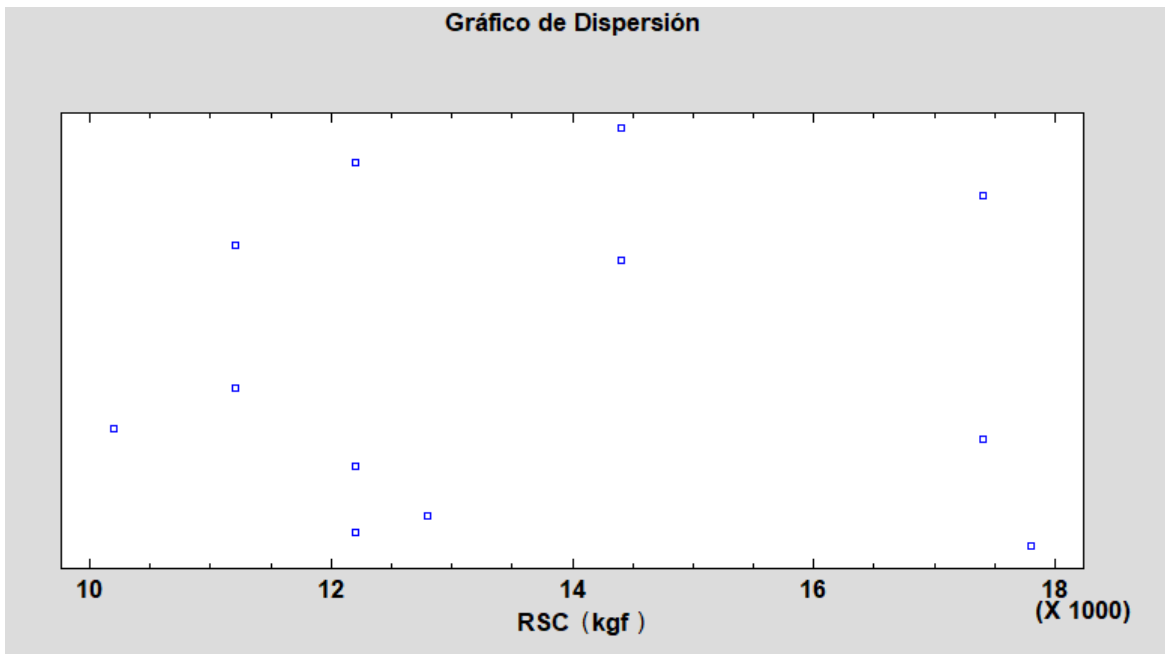
Por recomendación del director de la investigación se hace uso del programa de análisis estadístico Statgraphics, el cual cuenta con métodos estadísticos que permiten calcular tamaños muestrales donde la población se considera infinita. Dicho calculo lo realiza teniendo en cuenta diferentes variables estadísticas de una prueba piloto representativa de la población estudiada, la cual se debe haber realizado previamente al uso del programa.

Consecuentemente fue necesario realizar como parte del desarrollo de la investigación, una prueba piloto a compresión uniaxial para obtener datos representativos de la geología del Valle del Cauca, para realizar dicha prueba piloto se fallaron 12 núcleos, distribuidos equitativamente entre las tres muestras tomadas el macizo.

El método estadístico que se utilizó para determinar el tamaño muestral en Statgraphics está fundamentado principalmente en el número de datos de la prueba piloto, la media, la desviación estándar y el nivel de confiabilidad que se defina para la investigación, este último se definió basados en los resultados de la prueba piloto y apoyados en diversos estudios donde el objetivo era determinar un tamaño muestral en condiciones similares [27].

Los datos, resultados y análisis obtenidos por medio de Statgraphics fueron los siguientes.

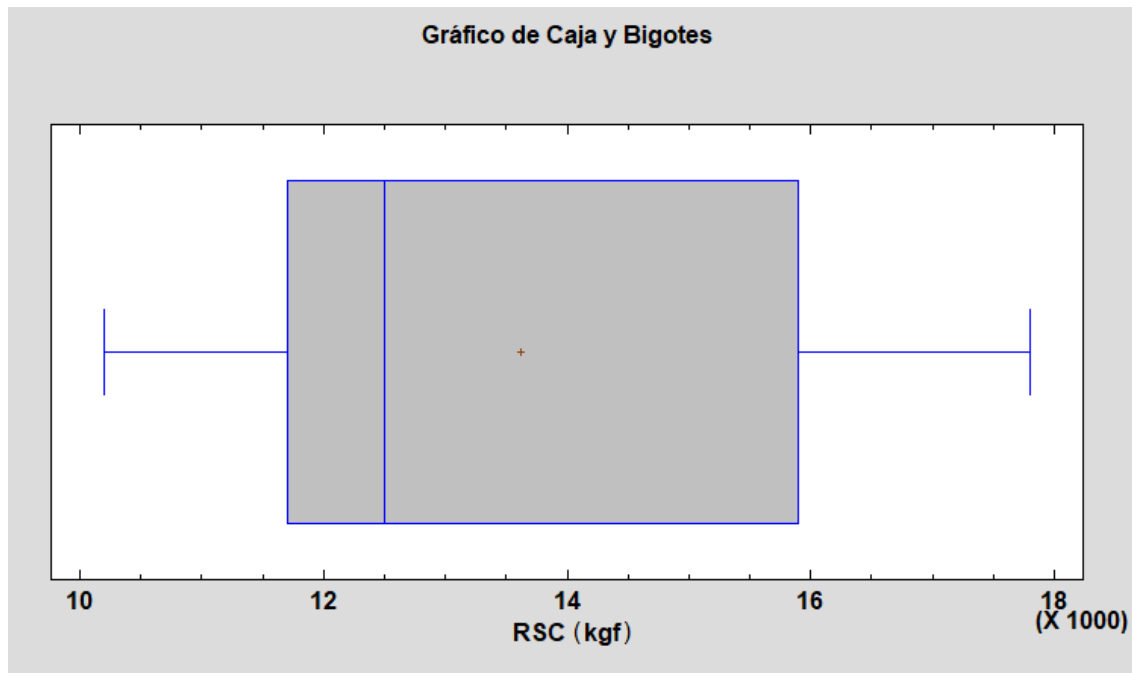
Figura 8. Gráfica de dispersión resultados compresión prueba piloto



Fuente. Propia, junio 2022

La figura 5 contiene los resultados de los ensayos a compresión para la prueba piloto que se realizó como base para determinar el tamaño muestral de la investigación, se puede observar en las 12 muestras ensayadas una gran dispersión entre las diferentes pruebas, sin embargo, no se obtuvieron datos atípicos de resistencias de compresión entre las muestras estudiadas.

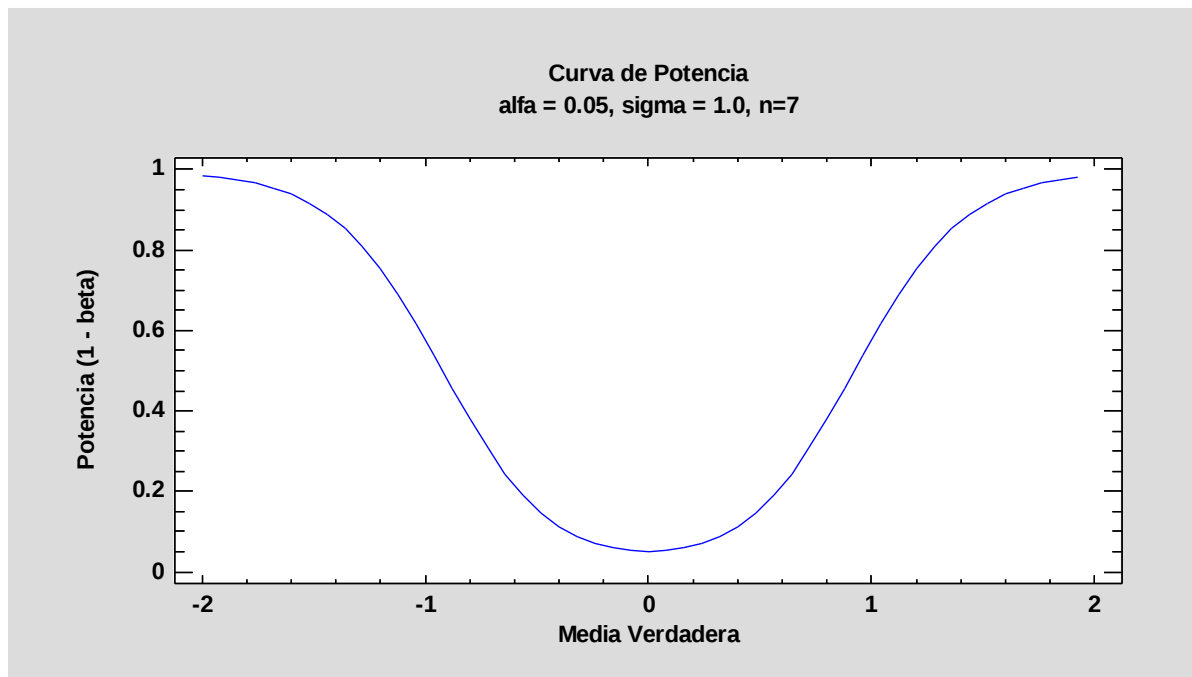
Figura 9. Diagrama de bigotes para los resultados de compresión prueba piloto



Fuente. Propia, junio 2022

El diagrama de caja y bigotes generado por el programa Statgraphics describe el intervalo de carga máxima obtenida de la muestra piloto ensayadas a compresión uniaxial, se observa que dichos valores se encuentran entre 9000 a 18000 kgf, se observa que el 25 % de las muestras ensayadas presentan una resistencia menor a 12000 kg, que el 25 % de ellas poseen una resistencia mayor a 16000 kgf y el 50% restante están entre 11500 a 16000 kgf.

Figura 10. Curva de determinación del tamaño muestral



Fuente. Propia, junio 2022

El software permite determinar el tamaño de muestra requerido, para lograr lo anterior se estima la media por medio de una distribución normal. Asumiendo que la desviación estándar se encuentra dentro de una distribución normal, se requieren 7 observaciones para estimar la media dentro de un error estimado de ± 1.0 , con un nivel del 95.0% de confianza en los datos obtenidos. Los valores de nivel de confiabilidad y el error permitido se definieron por recomendación del tutor de la investigación, basados la credibilidad y aceptación que se espera tenga la investigación.

Tabla 10. Resumen del cálculo del tamaño muestral Statgraphics

Recuento	12
promedio	13616.7
Desviación estandar	2652.7
Coeficiente de variación	19.48%
Minimo	10200
Máximo	17800
Rango	7600
Sesgi estabdarizado	0.870356
Curtuosis estandarizada	-0.750326

Fuente. Propia, junio 2022

Esta tabla muestra los diferentes resultados estadísticos en resumen para las cargas máximas de la prueba sw resistencia a la compresión (RSC). Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo y la curtosis estandarizados, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal.

Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

5.2 ESTUDIOS DE LABORATORIO

A continuación, se describen los procedimientos de laboratorio llevados a cabo en el desarrollo de la investigación, la información se presenta de manera resumida, sin dejar de lado la normativa técnica que establece el procedimiento que se debe tener en cuenta para realizar cada actividad.

Nota. Todos los ensayos de laboratorio se realizaron con apoyo de los laboratorios de Mecánica de Rocas y Geología y Laboratorio de Suelos y Pavimentos, pertenecientes a la Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.

5.2.1 Determinación del contenido de humedad (ASTM D 2216 -98)

Equipos.

- Horno ventilado marca Humboldt con temperatura máxima de 250 °C.
- Balanza de precisión marca Mettler Toledo con capacidad máxima de 1500 gr.

El procediendo realizado fue.

1. Selección de 3 fragmentos de roca para realizar el ensayo de humedad.
2. Determinación de los pesos de las muestras a humedad natural.
3. Se introducen las muestras de roca al horno a una temperatura de 110 +/- 5 °C y se permite su secado hasta obtener masa o peso constante (periodo de tiempo superior a 12 horas)
4. Se extraen las muestrán y se pesan para obtener los pesos secos.

5. Se obtienen la diferencia de pesos por medio de la ecuación 33 para obtener el contenido de humedad.

$$\% w = \frac{mw}{ms} \times 100 \quad \text{Ecuación (34)}$$

La tabla 101 presenta los resultados de los especímenes llevados a la prueba de humedad. En anexo se encuentran la humedad por cada núcleo de roca fallado, con su respectiva descripción geométrica.

Tabla 11. Valores de humedad para las rocas A, B Y C

Descripción	Humedad (%)
Roca A	0.90
Roca B	0.51
Roca C	0.25

Fuente. Propia, junio 2022

5.2.2 **Determinación del peso específico**

Se define como la relación de masa respecto al volumen del espécimen, cuyo procedimiento se realiza con el uso de una balanza que permita determinar masas en el “aire” y masas sumergidas.

$$\gamma = \frac{W}{Vm} \quad \text{Ecuación (35)}$$

La determinación del peso específico se realizó para las muestras ensayas, los resultados se representan en la tabla 11, dichos valores se determinaron por el método de hidrometría y los detalles de la prueba de laboratorio se en cuentan en los anexos 1 y 2.

Tabla 12. Valores de peso específico rocas A, B y C

	Volumen de sólidos en matraz (cm ³)	Masa de los sólidos (gr)	Factor de corrección por temperatura	Gravedad específica de los sólidos (g/cm ³)
Muestra A	14.83	47.62	0.999	3.21
Muestra B	16.48	53.31	0.999	3.23
Muestra C	17.62	54.39	0.999	3.08

Fuente. Propia, Julio 2022

5.2.3 *Determinación de la porosidad*

Medida del volumen de vacíos presentes en cada espécimen, para ello se recurre a los resultados obtenidos en la prueba de gravedad específica de los sólidos, G_s , donde una porción de la roca es reducida a tamaños de partícula inferior a 75 micras, y de esta calcular, mediante el procedimiento en laboratorio con picnómetro, la masa de los sólidos y el volumen que estos sólidos ocupan.

$$\eta (\%) = \frac{VV}{Vm} \times 100 \quad \text{Ecuación (36)}$$

Tabla 13. Datos de porosidad rocas A, B y C

	Porosidad de las rocas A, B y C			Observaciones
	Muestra A	Muestra B	Muestra C	
Volumen total de la muestra (cm ³)	80.84	132.85	203.33	N.A
Volumen de los sólidos (cm ³)	74.00	121.52	190.20	N.A
Volumen de huecos total (cm ³)	6.84	11.33	13.13	N.A
Porosidad total (%)	8.46	8.53	6.46	Dentro del promedio para basaltos
Volumen de huecos accesibles (cm ³)	1.2	1.38	1.36	N.A
Porosidad eficaz (%)	1.5	1.0	0.7	Dentro del promedio para basaltos

Fuente. Propia, Julio 2022

5.3 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS PRINCIPALES POR MEDIO DE LA ECUACIÓN DE HOOK-BROWN PARA LA MATRIZ ROCOSA

Una vez definido el tamaño muestral, se le asignó una nomenclatura simple a cada una de las muestras de roca tomadas en la cantera, por consiguiente, para un mejor entendimiento, las muestras serán identificadas para la presente investigación: A, B, C.

A cada una de las muestras: A, B, C, se les tomó mediante la extracción núcleos un total de nueve especímenes para la determinación de la resistencia a la compresión, cada núcleo con especificaciones de relación diámetro-longitud establecidas por las normas ATM y UNE, para el ensayo a compresión en rocas.

Como primera actividad, se realizaron los ensayos de laboratorio en la máquina universal para determinar las resistencias máxima de compresión que soportan los núcleos para cada roca A, B, C. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos, se determinó el promedio para cada una de las rocas y este será el valor que se utilizará para la aplicación de la ecuación de Hoek-Brown en la determinación del esfuerzo principal mayor.

Además de determinar la resistencia RSC de las diferentes rocas en esta actividad se proponen valores de esfuerzo σ_3 , esto se realizó estratégicamente, proponiendo valores cerrados para los sistemas de medición de presión de confinamiento con los que se cuenta en el laboratorio de Geología y Mecánica de Rocas, los valores propuestos fueron 200, 600 y 800 psi, (1.375, 4.137 y

5.516 MPa) siendo 800 psi el mayor valor que se puede aplicar limitado por las características del equipo con que se cuenta. Finalmente, por medio de la ecuación teórica para la matriz rocosa de Hoek-Brown, se determinaron los esfuerzos máximos principales de resistencia σ_1 que soportara cada roca.

Los resultados teóricos, σ_1 , al desarrollar matemáticamente la ecuación 36, con valores $m_i = 25$, $s = 1$ y $a = 0.5$ (capítulo 3) se presentan en las tablas 11, 12 y 13

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Ecuación (25)}$$

Tabla 14. Valores de compresión y σ_3 propuestos roca A

Esfuerzos de Hoek-Brown roca A					
σ_3 (Mpa)	σ_{ci} (Mpa)	m_i	s	a	σ_1 (Mpa)
1.375	47.38	25	1	0.5	63.609
4.137	47.38	25	1	0.5	88.662
5.516	47.38	25	1	0.5	99.204

Fuente. Propia, junio 2022

Tabla 15. Valores de compresión y σ_3 propuestos roca B

Esfuerzos de Hoek-Brown roca B					
σ_3 (Mpa)	σ_{ci} (Mpa)	m_i	s	a	σ_1 (Mpa)
1.375	60.71	25	1	0.50	77.352
4.137	60.71	25	1	0.50	103.960
5.516	60.71	25	1	0.50	115.321

Fuente. Propia, junio 2022

Tabla 16. Valores de compresión y σ_3 propuestos roca C

Esfuerzos de Hoek-Brown roca C					
σ_3 (Mpa)	σ_{ci} (Mpa)	mi	s	a	σ_1 (Mpa)
1.375	62.04	25	1	0.5	78.716
4.137	62.04	25	1	0.5	105.456
5.516	62.04	25	1	0.5	116.889

Fuente. Propia, junio 2022

5.4 ENSAYO TRIAXIAL EN ROCAS POR MEDIO DE LA CÉLULA DE HOOK

Para la efectuar los ensayos triaxiales en los diferentes núcleos de las diferentes rocas, se indujeron esfuerzos σ_3 en la célula de Hook, como lo había mencionado el apartado 6.5 y como lo indican las tablas 10, 11 y 12.

Para alcanzar dicha presión y poder mantenerla constante fue necesario acoplar diferentes equipos al sistema de ensayo, para esto se diseñó un sistema cerrado que consiste entre la célula de Hook, bomba hidráulica, cámara de presión constante, con funciones particulares cada uno.

1. Bomba hidráulica: esta permite generar una presión máxima de 10 Ton, dicha presión se induce por medio de un sistema hidráulico que funciona a base de aceite, la imagen se indica en anexos.
2. Cámara de presión: este dispositivo permite regular y mantener la presión, mediante el acople de unos aditamentos permite la distribución de aceite entre la bomba y el manómetro de regulación que es donde se fija la presión deseada para el ensayo.
3. Célula de Hook: acciona la presión triaxial sobre el núcleo, el cual se encuentra inmerso en una Camisa de goma de poliuretano en confinamiento total. La carga máxima de soporte de la célula es de 70 Mpa.

Sumado al sistema cerrado, se requiere de una prensa hidráulica de gran capacidad la cual genera la carga axial, está la proporciona a una velocidad de carga de 0.75 KN/S y posee una capacidad máxima a compresión de 150 Ton, el sistema completo se representa en el anexo 15.

Se decidió realizar tres ensayos a la misma presión σ_3 , u obtener el esfuerzo principal σ_1 , cuyo objetivo principal de obtener resultados promedio confiables, dado el caso poder contar con un intervalo de variación posible.

Los resultados generados en los diferentes ensayos se representan por medio de las tablas 13, 14 y 15, estos fueron organizados en forma descendente y por separado para una mayor facilidad en comprensión e interpretación.

Tabla 17. Resultados ensayo triaxial roca A

Ensayo triaxial para la roca A			
Muestra	Esfuerzo σ_3 (Mpa)	Esfuerzo σ_1 (Mpa)	Observación
A1	1.375	92.366	N.A
A2	1.375	93.628	N.A
A3	1.375	98.725	N.A
A4	4.126	136.788	N.A
A5	4.126	131.860	N.A
A6	4.126	127.845	N.A
A7	5.516	159.443	N.A
A8	5.516	191.502	N.A
A9	5.516	145.913	N.A

Fuente. Propia, junio 2022

Tabla 18. Resultados ensayo triaxial roca B

Ensayo triaxial para la roca B			
Muestra	Esfuerzo σ_3 (Mpa)	Esfuerzo σ_1 (Mpa)	Observación
B1	1.375	97.706	N.A
B2	1.375	97.915	N.A
B3	1.375	96.978	N.A
B4	4.126	122.095	N.A
B5	4.126	108.251	N.A
B6	4.126	119.123	N.A
B7	5.516	144.739	N.A
B8	5.516	143.911	N.A
B9	5.516	156.977	N.A

Fuente. Propia, junio 2022

Tabla 19. Resultados ensayo triaxial roca C

Ensayo triaxial para la roca C			
Muestra	Esfuerzo σ_3 (Mpa)	Esfuerzo σ_1 (Mpa)	Observación
C1	1.375	100.040	N.A
C2	1.375	99.662	N.A
C3	1.375	105.682	N.A
C4	4.126	123.370	N.A
C5	4.126	127.528	N.A
C6	4.126	140.510	N.A
C7	5.516	151.666	N.A
C8	5.516	165.862	N.A
C9	5.516	167.986	N.A

Fuente. Propia, junio 2022

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

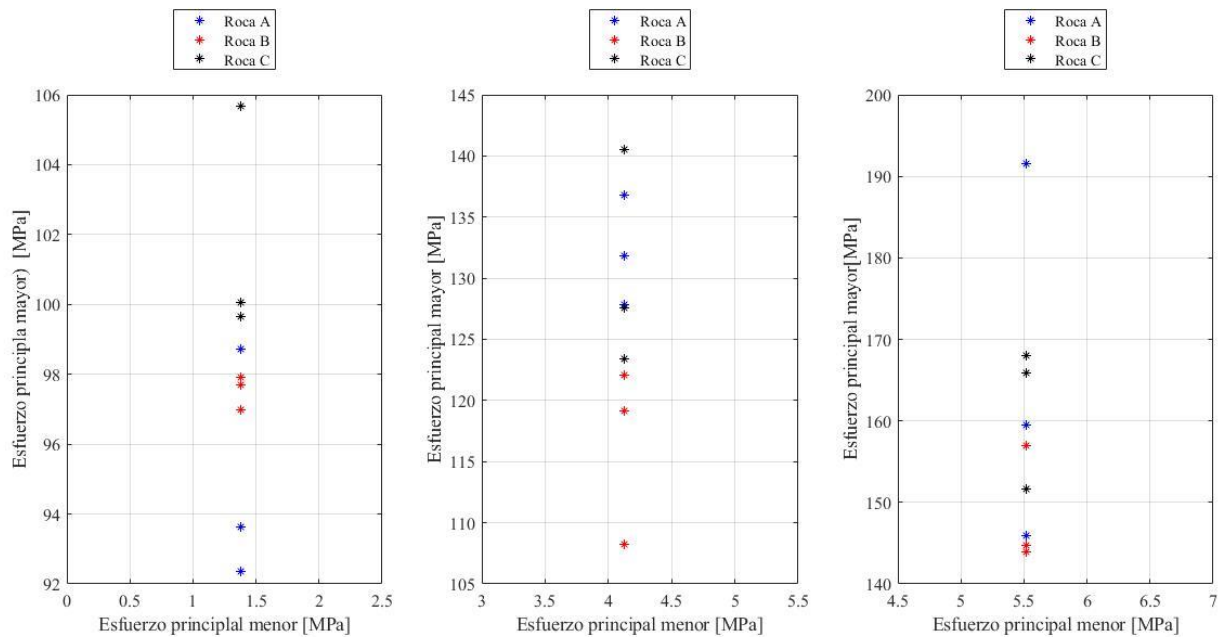
El siguiente capítulo se presenta el análisis de los resultados del proceso investigativo, la descripción se realiza por medio de tablas, graficas e imágenes. Cada elemento que se presenta en este presente capitulo está acompañado de su respectiva interpretación teórica, fundamentados en los resultados teóricos de la ecuación de Hook-Brown.

Basados en el objetivo general de la investigación, el cual es realizar la comparación de los resultados triaxiales en rocas del Valle del Cauca versus la ecuación teórica de rotura de Hook-Brown, se realizó un procesamiento de los datos en el programa estadístico Statgraphics y Matlab, de donde se determinan las diferentes tendencias, similitudes y diferencias entre los resultados experimentales y teóricos para la matriz rocosa.

Cada proceso es explicado detalladamente, lo cual permite abrir una ventana nueva de investigación e interrogantes para aquel estudiante que desee ampliar o validar las apreciaciones realizadas sobre el tema, ya que como se ha mencionado reiteradamente esta es una investigación pionera y el estudio de la resistencia de las rocas continua en desarrollo y ajuste diferentes criterios, en caso particular, el criterio de rotura de Hook-Brown cuya aplicación y su fundamentación teórica se continua ampliando en la actualidad.

6.1 GRÁFICA DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Figura 11. Gráfica para los valores experimentales sin corregir



Fuente. Propia, Julio 2022

Como lo indica la figura número 8, el primer paso que se realizó una vez realizados los 9 ensayos respectivos, en cada una de las diferentes rocas, fue graficar los datos sin realizarles ningún ajuste de error posible, dicha grafica representa los valores reales obtenidos.

Se puede observar que hay una gran dispersión para cada uno de los valores de esfuerzo principal σ_1 obtenidos a partir de los esfuerzos principales menores σ_3 , inducidos en el ensayo triaxial. Dicha variabilidad se atribuye a diferentes propiedades geológicas propias de las rocas, en particular que las rocas no pueden considerarse un material propiamente isotrópico, aunque su resistencia a la compresión es muy alta, generalmente para un tipo de roca como el que se estudió en la presente investigación, dicha resistencia puede verse variaciones abruptas por diferentes circunstancias.

Una de las principales condiciones para tener en cuenta, del por qué las rocas no pueden considerarse como un material isotrópico, es decir, sus esfuerzos no son iguales al evaluarlos por todas sus caras, ejemplo. Los esfuerzos evaluados en la cara (X, X) no serán iguales a los evaluados en las cara (Y, Y), aun tomando núcleos de la misma matriz, en su mismo plano de falla como lo demuestra la figura 8, las variaciones en la misma roca pueden llegar hacer muy grandes.

Dicha variación se presenta por diversos factores geológicos propios de la composición geológica y mineral de las rocas, entre ellos, la presencia de algunas diaclasas o betas dentro de su estructura,

meteorizaciones que hayan soportado y hayan modificado su estructura o compacidad, exposiciones a grandes esfuerzos, relajamiento de esfuerzos, entre otros.

Por lo anteriormente mencionado, algunos criterios utilizados en determinar la resistencia máxima en diferentes materiales no pueden ser aplicados en forma directa, para determinar la resistencia máxima de las rocas, tal es el caso del criterio de Mohr Coulomb, donde la resistencia a la compresión se considera que se puede linealizar. Tales consideraciones no son posibles en rocas.

6.2 DETERMINACIÓN DE PROMEDIO Y AJUSTE DE DATOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS

Una vez graficados los datos obtenidos experimentales, se determinó calcular el promedio por roca, para cada esfuerzo, esto se realizó para tener una separación de los datos y tener un análisis individual para posteriores ajustes. Los resultados de determinar el promedio están inscritos en las tablas siguientes.

Tabla 20. Promedio de los ensayos triaxiales roca A

Ensayo triaxial para la roca A			
Muestra	Esfuerzo σ_3 (Mpa)	Esfuerzo σ_1 (Mpa)	Observación
A	1.375	94.906	Promedio de 3 ensayos
A	4.126	132.164	Promedio de 3 ensayos
A	5.516	165.619	Promedio de 3 ensayos

Fuente. Propia, Julio 2022

Tabla 21. Promedio de los ensayos triaxiales roca B

Ensayo triaxial para la roca B			
Muestra	Esfuerzo σ_3 (Mpa)	Esfuerzo σ_1 (Mpa)	Observación
B	1.375	94.906	Promedio de 3 ensayos
B	4.126	132.164	Promedio de 3 ensayos
B	5.516	165.619	Promedio de 3 ensayos

Fuente. Propia, Julio 2022

Tabla 22. Promedio de los ensayos triaxiales roca C

Ensayo triaxial para la roca C			
Muestra	Esfuerzo σ_3 (Mpa)	Esfuerzo σ_1 (Mpa)	Observación
C	1.375	94.906	Promedio de 3 ensayos
C	4.126	132.164	Promedio de 3 ensayos
C	5.516	165.619	Promedio de 3 ensayos

Fuente. Propia, Julio 2022

Como es particular en las pruebas experimentales se da cabida a un posible error por diferentes aspectos, entre ellos, errores humanos, errores de aditamentos, errores de equipos. Por tanto, para el ajuste de los datos de la investigación se dio lugar a dos tipos de correcciones, una por errores de lectura y aditamentos (Humanos), otra por errores previamente conocidos de la maquina universal la cual se utilizó para los ensayos triaxiales.

Errores estimados

Tabla 23. Errores para ajuste de datos experimentales

Concepto error	Error en Kgf
Máquina universal	100.00
Lectura y aditamentos	200.00

Fuente. Propia, Julio 2022

Anterior mente en el ítem de determinación de esfuerzos principales por medio de la ecuación de Hoek-Brown en las tablas 10, 11 y 12 se habían presentado los valores tanto para el esfuerzo principal menor que se supuso, y el esfuerzo principal mayor que se determinaba por medio de la ecuación teórica de Hook-Brown. Este proceso se realizó de forma individual para las rocas A, B y C. Basados entre otros parámetros propios de la geología, su respectiva resistencia a la compresión.

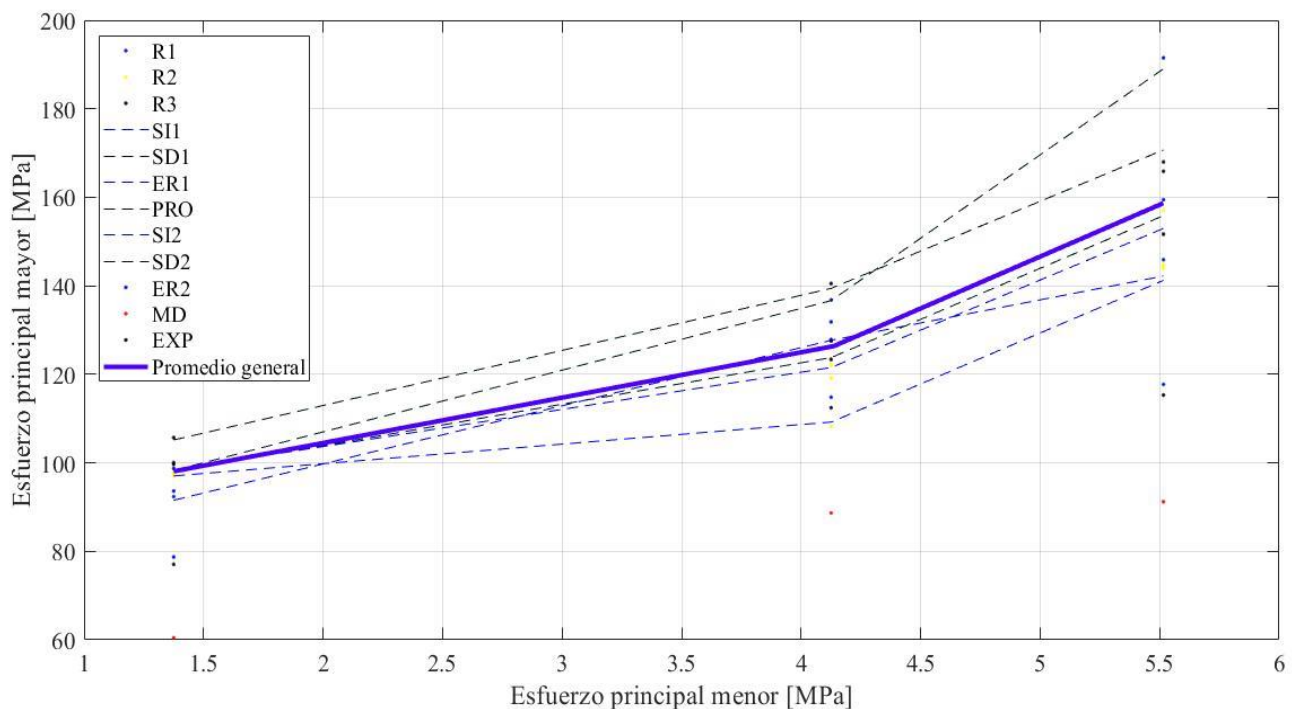
Dichos valores también se ajustaron por error posible al determinar la resistencia a la compresión con un error posible de 100 kgf. Luego de ajustar los valores experimentales y teóricos, se consideró la aplicación del método determinista de Monte Carlo, para obtener una simulación a gran escala de los posibles valores que se pudieran llegar a obtener considerando esos posibles

errores, sin embargo, el resultado de aplicar dicho método al tener un intervalo tan pequeño fue una nube de puntos alrededor de cada resistencia determinada, por tanto se descartó este análisis general, sin embargo se consideró los valores simulados máximos y mínimos estimados por el método.

Además de lo anteriormente descrito, se tuvo en cuenta parámetros estadísticos como son la media y la varianza, dichos datos también se incluyeron como datos posibles a obtener, lo cual permitió tener un número más robusto de datos, el cual contenía. Los datos experimentales, datos ajustados con posible error, datos máximos y mínimos de la simulación de Monte Carlo y datos con parámetros estadísticos generales.

Los anteriores análisis, ajustes y simulaciones se realizaron en Matlab y se graficaron para observar la tendencia adoptada.

Figura 12. Grafica de primer ajuste estadístico



Fuente. Propia, Julio 2022

Donde.

R1. Representa los valores de esfuerzos de la roca A.

R2. Representa los vales de esfuerzos la roca B.

R3. Representa los valores de esfuerzos la roca C.

SI1. Representa los valores de esfuerzos máximos de la simulación realizada.

SD1. Representa la desviación estándar por encima de la media.

ER1. Representa el valor de error sumado a la media.

PRO. Representa los valores de esfuerzos del valor promedio de los datos experimentales.

SI2. Representa los valores de esfuerzos menores de la simulación realizada.

SD2. Representa la desviación estándar por debajo de la media.

ER2. Representa el valor de error por debajo de la media a la media.

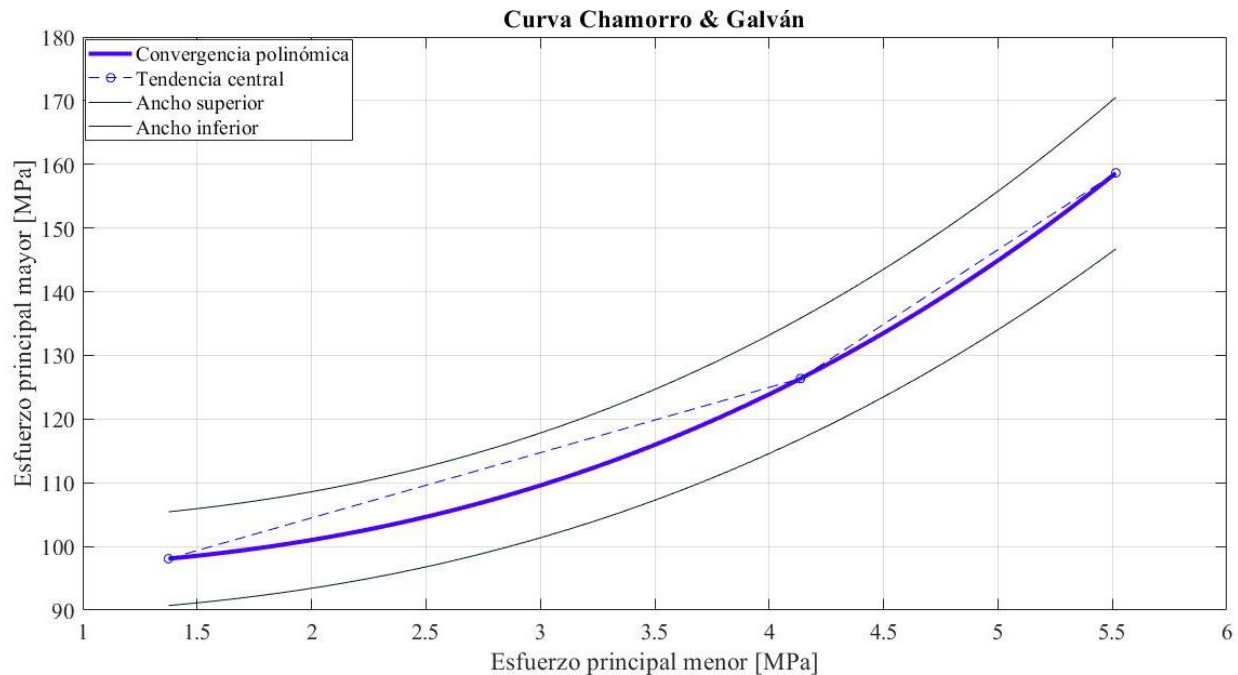
MD. Representa la media de los esfuerzos de todos los datos analizados.

Una vez realizado el primer ajuste estadístico entre los valores experimentales, las variables estadísticas y simulaciones mencionadas, como reto de la investigación se fijó como un objetivo correlacionar los datos y encontrar una ecuación que permitiera realizar una comparación más “precisa”, punto a punto respecto a los datos que se obtuvieron con la ecuación de Hook-Brown.

Para esto se volvió a determinar los promedios de todos los datos, esta vez teniendo en cuenta los datos de error posible, tendencia estadística y la simulación previamente mencionada, esto se realizó con el objetivo de generar una tendencia que fuera representativa de todos esos datos posibles tanto experimentales como los probabilísticamente posibles, y al final encontrar una posible convergencia central de esos datos y una banda posible de datos probabilísticos que representaran la resistencia de las rocas del Valle del Cauca en la zona de estudio.

Para una mejor comprensión nuevamente se grafica la tendencia obtenida producto llevar a cabo esa convergencia numérica entre los diferentes datos.

Figura 13. Convergencia polinómica respecto a datos estadísticos y simulación



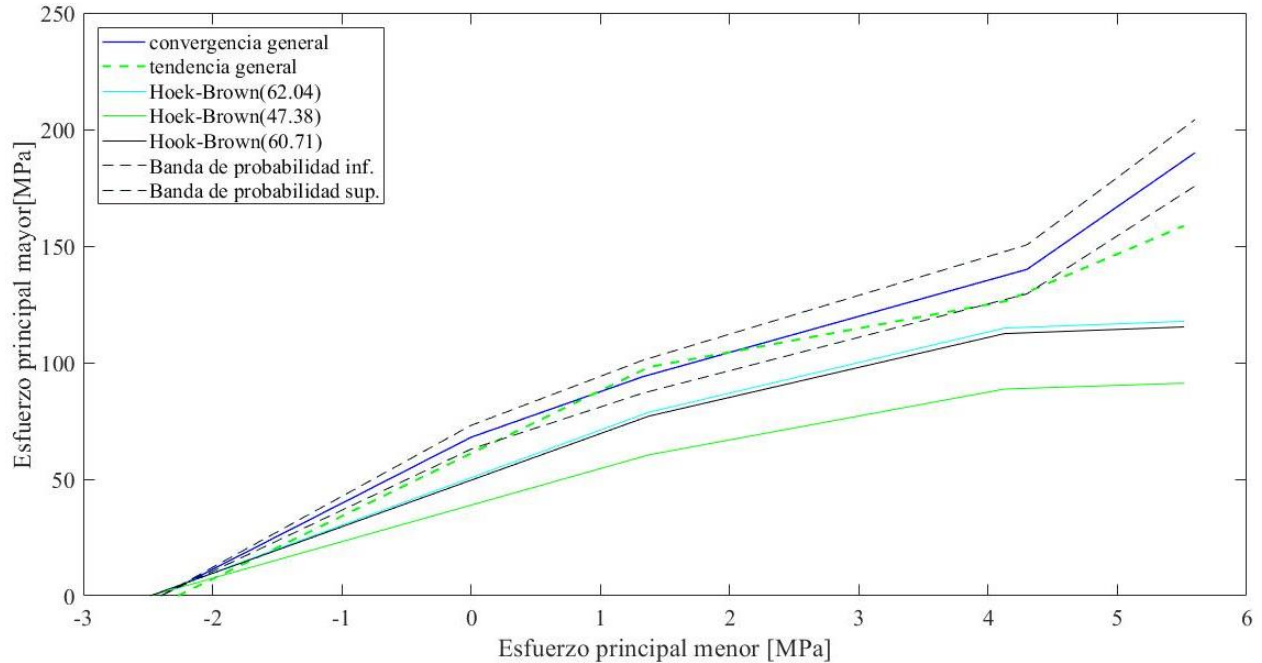
Fuente. Propia, Julio 2022

Previamente en los ensayos de laboratorio se había obtenido los resultados para la ecuación teórica de Hook-Brown, estos resultados se incluyen a partir del siguiente análisis, otro de los valores que se incluye es el valor para la resistencia a tracción de la matriz rocosa, este último no se había incluido en los análisis hasta ahora por que para valores menores a $\sigma_3 < 1.315$ (Mpa), no se realizaron pruebas experimentales, por tanto esta variación no se incluyó en la simulación y variables estadísticas promedio, porque no se tiene información como se comportan las rocas en estudio en este intervalo de esfuerzo.

El paso siguiente fue graficar todos los puntos que se tienen, tanto para los datos que resultaron de la convergencia polinómica, la cual incluye los datos experimentales y los diferentes ajustes hasta ahora mencionados, como también los resultados teóricos de la ecuación de Hook-Brown, para las rocas estudiadas, para los mismos valores de esfuerzo σ_3 del ensayo triaxial experimental.

Los resultados en principio se grafican sin presentar ningún ajuste polinómico, esto para ver las tendencias de los resultados teóricos para cada roca en su forma natural y poder observar a escala la diferencia encontrada.

Figura 14. Convergencia de datos experimentales y teóricos sin ajuste

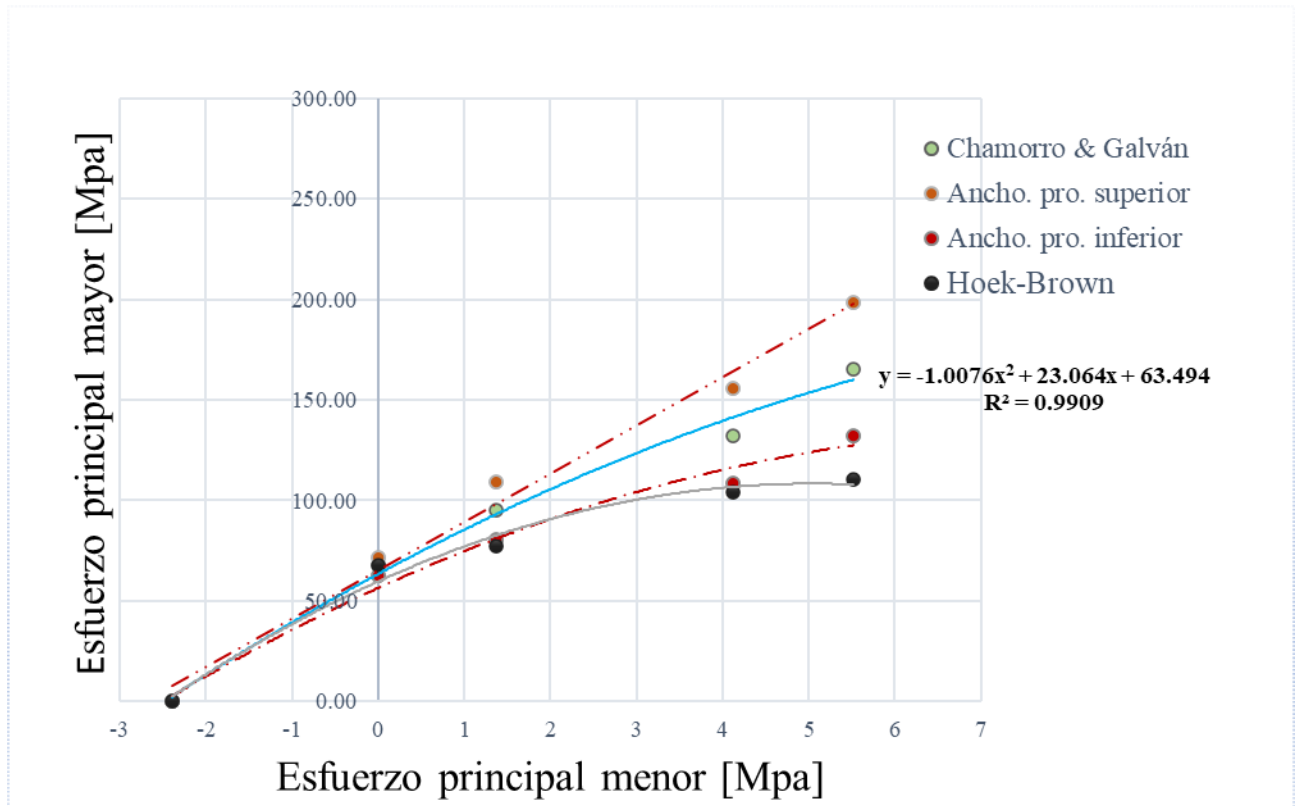


Fuente. Propia, Julio 2022

Para finalizar el análisis de los resultados, se realizó un ajuste polinomial nuevamente, con la finalidad de proponer una ecuación que represente la resistencia de las rocas que se componen la geología de la zona del Valle del Cauca que se investigó.

La figura que resulta del ajuste anterior sirve como comparativo de la investigación, ya que contiene la ecuación propuesta y el coeficiente de determinación de los datos experimentales en color cian, también representa la gráfica de la ecuación teórica para la ecuación de Hoek-Brown, para realizar la gráfica de Hoek-Brown se determinó los promedios de los valores teóricos obtenidos para las rocas A, B y C, este se representa en color gris como lo indica la figura 12.

Figura 15. Comparación Hoek-Brown versus datos experimentales



Fuente. Propia, Julio 2022

Dicha ecuación será utilizada y ajustada a futuro en investigaciones próximas que se esperan se continúe realizando en la Universidad del Valle, podrá ser utilizada por quien desee para fines académicos, como se mencionó en la justificación de la investigación, será un aporte a todas las entidades laborales e investigativas del país relacionadas con la geología y mecánica de rocas.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados y análisis de esta investigación son un aporte importante en Mecánica de rocas del departamento del Valle es importante aclarar que los resultados presentados en este documento son representativos y aplicables para la zona de estudio del Valle del Cauca.

Esta información estará disponible para investigaciones futuras relacionadas con los parámetros de falla de la matriz rocosa, lo cual favorecerá el estudio de otras litologías de las diferentes zonas del país.

Las siguientes son las conclusiones generales a las que se llegó luego de realizar la investigación.

- Se determinaron los esfuerzos máximos y mínimos de falla para la matriz rocosa para las muestras de roca de una cantera del departamento del Valle del Cauca, tanto para la ecuación teórica de Hoek-Brown, como para los resultados experimentales.
- Respecto a los valores experimentales se propuso una ecuación la cual se obtuvo mediante un ajuste polinómico de grado 2, dicha ecuación permite determinar los valores del esfuerzo máximo σ_1 de manera más precisa y representativa respecto a la geología existente en el Valle del Cauca.

Tabla 24. Ecuación propuesta para la resistencia de la matriz rocosa de la litología del Valle del Cauca estudiada

	Ecuación	R	R ²
Chamorro & Galván	$\sigma_1 = -1.0076 \times \sigma_3^2 + 23.064 \times \sigma_3 + 63.494$	0.97	99%

Fuente. Propia, Julio 2022

- Se realizó la comparación de resultados obtenidos por medio de las 2 ecuaciones, la teórica y la experimental, este se realizó avaluando los mismos valores de esfuerzo σ_3 y para un valor $\sigma_{ci} = 60.7$ Mpa, el resultado fue el siguiente.

Tabla 25. Ecuaciones teórica y experimental

Ecuaciones	
Hoek-Brown	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$
Chamorro & Galván	$\sigma_1 = -1.0076 \times \sigma_3^2 + 23.064 \times \sigma_3 + 63.494$

Fuente. Propia, Julio 2022

Tabla 26. Comparación de resultados teóricos versus experimentales

	σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)
Hoek-Brown	1.375	77.342	4.137	103.950	5.516	115.31
Chamorro & Galván	1.375	93.302	4.137	141.660	5.516	160.06

Fuente. Propia, Julio 2022

Los resultados de la tabla 23 evidencian que a partir de cada esfuerzo principal menor σ_3 propuesto, el esfuerzo principal mayor σ_1 que se obtiene por medio de la ecuación experimental es mayor que la ecuación teórica de Hoek-Brown, por tanto, se concluye que la ecuación teórica de Hoek-Brown es conservadora para la geología de la zona de estudio.

Respecto a la figura 15, se presenta la ecuación que representa la litología estudiada y el ancho probabilístico de posibles valores para los resultados de esfuerzos máximo y mínimos de rotura en la matriz rocosa para rocas de Valle del Cauca, a esta aproximación se ha llegado luego de realizar la campaña experimental.

De la simulación realizada en Matlab se determina el ancho probabilístico superior e inferior de la línea de tendencia construida a partir de la ecuación experimental presentada, dicha banda de resultados se podría ajustar ampliando el tamaño muestral en investigaciones futuras, sin embargo, para efectos de la investigación es diciente y de muestra que los valores obtenidos se encontraran por encima de los resultados teóricos de Hook–Brown.

Se puede observar que para los valores de esfuerzo σ_3 mayores, tal es el caso del esfuerzo $\sigma_3 = 5.516$ la diferencia es amplia, y aunque no es el objetivo de la investigación desvirtuar el criterio de Hoek-Brown, los resultados para los esfuerzos principales σ_1 no serian representativos de la geología de la zona del Valle del Cauca. estudiada

Para la ecuación experimental se puede concluir que presenta un nivel de corrección elevado respecto a los valores teóricos, para condiciones litológicas iguales. Esto se puede evidenciar en valor del coeficiente de correlación $r = 0.97$.

Respecto a las propiedades índice de las rocas utilizadas en la investigación, se determinan sin ninguna observación, se encuentran dentro de los rangos establecidos, tanto la humedad, la porosidad y gravedad específica.

7.1 RECOMENDACIONES

Incluir muestras de roca de otras litologías del departamento del Valle del Cauca, permitiendo ampliar y robustecer la base de datos experimental, esto permitirá obtener nuevas correlaciones, logrando mejorar la ecuación presentada en esta investigación.

Diseñar e incorporar un sistema de adquisición de datos automatizado en el equipo triaxial, esto permitirá disminuir los errores de lectura humanos y recolectar datos de carga versus deformación en el tiempo punto a punto.

Considerar la inclusión de sistemas de medición de deformación como galgas extensiométricas dentro de los núcleos que permita medir las deformaciones hasta el momento de falla.

Incluir en investigaciones futuras correlaciones que incluyan parámetros del macizo en general, esto conllevará a realizar diseños de las estructuras con austeridad, con un buen desempeño en servicio y durabilidad.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] NSR-10, “Título A: Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente,” *Nsr 10*, p. A-83, A-139, A-140, 2010.
- [2] ASTM, “Standard method of test for elastic moduli of rock core specimens in uniaxial compression,” *Int. Soc. rock Mech.*, vol. 04, no. April 1997, pp. 138–140, 1970.
- [3] UNE, “PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS,” 1992.
- [4] NSR-10, “Nsr 10 Título H — Estudios Geotécnicos,” *Reglam. Colomb. Diseño y Constr. Sismo Resist. NSR-10*, p. 72, 2010.
- [5] E. P. Calle and J. C. Suarez, “La resistividad de rocas y su relación con la resistencia a compresión simple en mina,” *Univ. del Azuay, Fac. Cienc. y Tecnol. Esc. Ing. en Minas*, vol. 24, pp. 61–67, 2020.
- [6] P. Lunardi, “Diseño y construcción de túneles con el sistema de análisis de la deformación controlada en rocas y suelos,” *Tunnels Tunneling Int.*, pp. 1–69, 1998.
- [7] A. Restrepo & M. Galvan, “CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAXIAL CON LA HUMEDAD Y POROSIDAD EFICAZ DE ROCAS DE LA CANTERA CACHIVI EN EL VALLE DEL CAUCA,” Universidad del Valle, 2012.
- [8] W. Marín, “Evaluación de parámetros materiales de fractura en roca intacta,” p. 39, 2017, [Online]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/62569/1/71636410.2017.pdf>.
- [9] A. K. Chopra, *Dinámica de Estructuras*. 2004.
- [10] M. V. BORAO, “Trabajo Fin de Grado,” 2014.
- [11] J. V. Quezada Sedano, “Comportamiento Triaxial de la Roca intacta para las unidades Villa Ayala, Rey de Plata, Ahuhuetla - Mina Rey de Plata,” 2018.
- [12] T. Placencia, “UNIVERSIDAD DE LOS ANDES DE INVESTIGACIÓN EN GEOLOGÍA APLICADA.”
- [13] P. Ramírez and L. Alejano, *Problemas de Mecánica de Rocas - Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. 2004.
- [14] S. Blanco and F. Paterneli, “Proyecto Final Máquina de Ensayo Triaxial,” vol. 399, no. 1106, 2014.
- [15] E. Hoek and B. Corkum, “El criterio de rotura de Hoek-Brown – Edición 2002 Hoek-Brown

- failure criterion – 2002 Edition,” no. 1, pp. 1–8, 2016.
- [16] R. Rojas, R. M. Arriagada, E. D. E. La, and R. D. E. Macizos, “Paper hoek.”
 - [17] S. Peng and J. Zhang, *Enginioneerig Geology for Underground Rock*. 2007.
 - [18] E. Hoek and P. Marinos, “A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion,” *Soils and Rocks*, vol. 30, no. 2, pp. 85–92, 2007.
 - [19] S. Sergio, “Resistencia de Macizos Rocososo,” vol. 1, p. 8, 2014.
 - [20] E. Hoek, “Strength of jointed rock masses,” *Geotechnique*, vol. 33, no. 3, pp. 187–223, 1983, doi: 10.1680/geot.1983.33.3.187.
 - [21] E. Hoek, “The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update,” *Proc. 15th Can. Rock Mech. Symp*, no. February, pp. 31–38, 1988.
 - [22] E. Hoek, D. Sc, N. Industrial, and R. Mechanics, “Modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 30, no. 4, p. A215, 1993, doi: 10.1016/0148-9062(93)91795-k.
 - [23] C. Alexand, “Propiedades índice de las rocas,” pp. 4–6, 2008.
 - [24] “Elementos de Mecánica de Rocas Parámetros de la Mec . De Rocas,” 2008.
 - [25] UNE, “I Propiedades mecánicas de las rocas ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA I,” pp. 1–4, 1990.
 - [26] ASTM D 2664, “Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements,” *Annu. B. ASTM Stand.*, no. 12, pp. 1–4, 1995, [Online]. Available: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2664-95A.htm>.
 - [27] L. JHON & M. GALVAN , “DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA Y LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN INCONFINADA DE UNA ROCA BASÁLTICA DEL SUR-OCCIDENTE COLOMBIANO JHON,” *Gastron. ecuatoriana y Tur. local.*, vol. 1, no. 69, pp. 5–24, 1967.

ANEXOS

- ANEXO PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

Anexo 1. Tabla de densidades muestras A Y B

GRAVEDAD ESPECIFICA DE LAS PARTICULAS SOLIDAS (INV E 128 - 13)		
Muestra	A	B
Masa del matraz + agua +solidos (g)	686.02	664.78
Temperatura (°C)	24	24
Masa del matraz + agua (g)	649.25	647.36
Masa de los sólidos + recipiente (g)	125.62	112.36
Masa del recipiente (g)	71.23	62.35
Masa de los sólidos (g)	54.39	50.01
Volúmenes sólidos en matraz (cm ³)	17.62	32.59
Factor de corrección por temperatura	0.99909	1.99909
Gravedad especifica de los sólidos (g/cm ³)	3.084	3.068

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo 2. Tabla de densidades muestras C

Muestra	C1	C2
Masa del matraz + agua +sólidos (g)	682.04	686.85
Temperatura (°C)	24	24
Masa del matraz + agua (g)	649.25	650.02
Masa de los sólidos + recipiente (g)	125.63	140.26
Masa del recipiente (g)	78.01	86.95
Masa de los sólidos (g)	47.62	53.31
Volúmenes sólidos en matraz (cm ³)	14.83	16.48
Factor de corrección por temperatura	0.99909	0.99909
Gravedad específica de los sólidos (g/cm ³)	3.208	3.232

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo 3. Tabla de porosidades muestras A, B y C

	Muestra A	Muestra B	Muestra C
Peso de la muestra natural (gr)	238.44	393.51	585.03
Peso de la muestra saturada superficial mente seca (gr)	238.75	393.89	587.19
peso de la muestra sumergida(gr)	157.91	261.04	383.86
Peso de la muestra seca (gr)	237.55	392.51	585.83
Volumen total de la muestra (cm ³)	80.84	132.85	203.33
Gravedad especifica de los sólidos (g/cm ³)	3.21	3.23	3.08
Volumen de los sólidos (cm ³)	74.00	121.52	190.20
Volumen de huecos total (cm ³)	6.84	11.33	13.13
Porosidad total (%)	8.46	8.53	6.46
Volumen de huecos accesibles (cm ³)	1.2	1.38	1.36
Porosidad eficaz (%)	1.5	1.0	0.7
Volumen de huecos no accesibles(cm ³)	5.64	9.95	11.77

Fuente. Propia, Julio 2022

• ANEXO PROPIEDADES GEOLOGÍCAS Y DE RESISTENCIA DE LAS ROCAS

A, B Y C

Anexo 4. Propiedades de la muestra fallada AI

Muestra AI					
Muestra		Imagen antes de falla		Imagen de falla	
					
Diametro (mm)	Longitud (mm)	Masa (gr)	Humedad(%)	Carga (Kgf)	Esfuerzo (Mpa)
53.44	139.96	916	0.89	12200	54.39
γ (g/cm ³)	Humedad (%)	Color	Clasificación	Roca	Observación
3.20	0.90	Gris	Ignea	basalto	N.A

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo 5. Propiedades de la muestra fallada AII

Muestra AII					
Tamaño muestral de falla		Imagen antes de falla		Imagen de falla	
					
Diametro (mm)	Longitud (mm)	Masa (gr)	Humedad(%)	Carga (Kgf)	Esfuerzo (Mpa)
53.70	138.62	892	0.89	12800	56.52
γ (g/cm ³)	Humedad (%)	Color	Clasificación	Roca	Observación
3.20	0.90	Gris	Ignea	basalto	N.A

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo 6. Propiedades de la muestra fallada BI

Muestra BI					
Tamaño muestral de falla		Imagen antes de falla		Imagen de falla	
					
Diametro (mm)	Longitud (mm)	Masa (gr)	Humedad(%)	Carga (Kgf)	Esfuerzo (Mpa)
53.44	139.96	916	0.51	12200	54.39
γ (g/cm ³)	Humedad (%)	Color	Clasificación	Roca	Observación
3.22	0.90	Gris	Ignea	basalto	N.A

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo 7. Propiedades de la muestra fallada BII

Muestra BII					
Muestra		Imagen antes de falla		Imagen de falla	
					
Diametro (mm)	Longitud (mm)	Masa (gr)	Humedad(%)	Carga (Kgf)	Esfuerzo (Mpa)
53.43	132.79	876	0.51	8000	35.68
γ (g/cm ³)	Humedad (%)	Color	Clasificación	Roca	Observación
	0.90	Gris	Ignea	basalto	N.A

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo 8. Propiedades de la muestra fallada CI

Muestra CI					
Muestra		Imagen antes de falla		Imagen de falla	
					
Diametro (mm)	Longitud (mm)	Masa (gr)	Humedad(%)	Carga (Kgf)	Esfuerzo (Mpa)
53.50	138.10	921	0.25	17800	79.18
γ (g/cm ³)	Humedad (%)	Color	Clasificación	Roca	Observación
	0.90	Gris	Ignea	basalto	N.A

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo 9. Propiedades de la muestra fallada CII

Muestra CII					
Muestra		Imagen antes de falla		Imagen de falla	
					
Diametro (mm)	Longitud (mm)	Masa (gr)	Huendad(%)	Carga (Kgf)	Esfuerzo (Mpa)
53.13	128.59	829.5	0.25	10200	46.00
γ (g/cm ³)	Humedad (%)	Color	Clasificación	Roca	Observación
	0.90	Gris	Ignea	basalto	N.A

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo10. Descripción de las muestras ensayadas a compresión uniaxial rocas A, B Y C

Descripción núcleos para ensayo a compresión									
Muestra	Diámetro (mm)			Longitud (mm)			Masa (g)	Pro. Diámetro	Pro. Altura
A1	54.72	54.73	54.73	113.78	112.45	113.43	916.00	54.65	113.237
A2	54.7	54.71	54.71	113.5	113.49	113.51	876.00	54.71	113.500
A3	54.69	54.71	54.7	141	139.98	139.4	921.00	54.70	140.127
B1	54.73	54.7	54.72	112.5	112.46	112.42	904.00	54.73	112.460
B2	54.68	54.69	54.7	113.4	113.43	113.42	917.00	54.69	113.417
B3	54.72	54.72	54.71	138	138.12	138	892.00	54.72	138.040
C1	54.72	54.73	54.71	123.48	128.7	128.3	807.00	54.72	126.827
C2	54.73	54.73	54.71	123.47	128.7	128.7	892.00	54.72	126.957
C3	54.7	54.69	54.68	140.6	140.45	140.4	847.00	54.69	140.483

Fuente. Propia, Julio 2022

Anexo11. Tabla de resistencias de compresión uniaxial rocas A, B Y C

Esfuerzo a compresión σ_{ci} (Mpa)				
Muestra	Carga Kgf	Esfuerzo (Mpa)	Promedio	Observación
A1	12000	50.95	62.04	Promedio de 3 ensayos
A2	17400	73.88		
A3	14400	61.28		
B1	9000	38.30	47.38	Promedio de 3 ensayos
B2	11200	47.66		
B3	13200	56.17		
C1	17800	75.75	60.71	Promedio de 3 ensayos
C2	12800	54.47		
C3	12200	51.92		

Fuente. Propia, Julio 2022

- **ANEXO PROPIEDADES DE LAS MUESTRAS DE ROCA PARA ENSAYOS TRIAXIALES**

- *Anexo12. Tabla propiedades geométricas de la roca A ensayo triaxial*

Descripción núcleos roca A para ensayo triaxial									
Muestra	Diámetro (mm)			Longitud (mm)			Masa (g)	Pro. Diámetro	Pro. Altura
MA-1	54.74	54.73	54.73	109.48	109.47	109.47	730.0	54.73	109.47
MA-2	54.73	54.73	54.74	109.46	109.46	109.47	724.5	54.73	109.46
MA-3	54.74	54.74	54.74	109.48	109.48	109.48	718.5	54.74	109.48
MA-4	54.74	54.74	54.73	109.49	109.48	109.48	737.0	54.74	109.48
MA-5	54.74	54.73	54.74	109.49	109.49	109.49	742.5	54.74	109.49
MA-6	54.72	54.73	54.73	109.48	109.48	109.49	702.0	54.73	109.48
MA-7	54.74	54.74	54.73	109.46	109.46	109.47	712.0	54.74	109.46
MA-8	54.73	54.74	54.74	109.48	109.48	109.48	720.0	54.74	109.48
MA-9	54.74	54.74	54.73	109.48	109.48	109.48	721.5	54.74	109.48

Fuente. Propia, Julio 2022

- *Anexo13. Tabla propiedades geométricas de la roca B ensayo triaxial*

Descripción núcleos roca B para ensayo triaxial									
Muestra	Diámetro (mm)			Longitud (mm)			Masa (g)	Pro. Diámetro	Pro. Altura
MB-1	54.74	54.74	54.74	109.47	109.47	109.47	725	54.74	109.47
MB-2	54.74	54.73	54.74	109.48	109.48	109.47	725	54.74	109.48
MB-3	54.74	54.74	54.74	109.48	109.48	109.48	715	54.74	109.48
MB-4	54.74	54.73	54.73	109.49	109.49	109.49	736	54.73	109.49
MB-5	54.74	54.74	54.74	109.49	109.49	109.49	743	54.74	109.49
MB-6	54.73	54.73	54.73	109.48	109.48	109.49	722	54.73	109.48
MB-7	54.73	54.74	54.74	109.48	109.48	109.47	713	54.74	109.48
MB-8	54.74	54.74	54.74	109.48	109.48	109.48	721	54.74	109.48
MB-9	54.74	54.74	54.73	109.49	109.48	109.49	722	54.74	109.49

Fuente. Propia, Julio 2022

- *Anexo14. Tabla propiedades geométricas de la roca C ensayo triaxial*

Descripción núcleos roca C para ensayo triaxial									
Muestra	Diámetro (mm)			Longitud (mm)			Masa (g)	Pro. Diámetro	Pro. Altura
MC-1	54.73	54.73	54.73	109.48	109.47	109.47	725	54.73	109.47
MC-2	54.74	54.74	54.75	109.46	109.46	109.47	724	54.74	109.46
MC-3	54.73	54.74	54.74	109.48	109.48	109.48	715	54.74	109.48
MC-4	54.74	54.73	54.73	109.49	109.48	109.48	737	54.73	109.48
MC-5	54.74	54.73	54.74	109.49	109.49	109.49	742	54.74	109.49
MC-6	54.73	54.73	54.73	109.48	109.48	109.49	702	54.73	109.48
MC-7	54.73	54.74	54.73	109.46	109.46	109.47	712	54.73	109.46
MC-8	54.73	54.74	54.74	109.48	109.48	109.48	720	54.74	109.48
MC-9	54.74	54.73	54.73	109.48	109.48	109.48	722	54.74	109.48

Fuente. Propia, Julio 2022

- **ANEXO SISTEMA DE ENSAYO TRIAXIAL COMPLETO**

Anexo15. Sistema de ensayo triaxial



Fuente. Propia, Julio 2022

- **ANEXO RESUMEN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MUESTRAS DE ROCA A, B Y C PARA LOS ENSAYOS TRIAXIALES**

Anexo16. Tabla propiedades geométricas de la roca C ensayo triaxial

Id	Núcleos	Contenido de Humedad (%)	Porosidad (%)	Densidad ρ_r (g/Cm ³)	Esfuerzo principal menor σ_3 (Mpa)	Esfuerzo principal mayor σ_1 (Mpa)
1	MA-1	0.90	8.46	3.20	1.375	92.366
2	MA-2	0.90	8.46	3.20	1.375	93.628
3	MA-3	0.90	8.46	3.20	1.375	98.725
4	MA-4	0.90	8.46	3.20	4.126	136.788
5	MA-5	0.90	8.46	3.20	4.126	131.860
6	MA-6	0.90	8.46	3.20	4.126	127.845
7	MA-7	0.90	8.46	3.20	5.516	159.443
8	MA-8	0.90	8.46	3.20	5.516	191.502
9	MA-9	0.90	8.46	3.20	5.516	145.913
10	MB-1	0.25	8.53	3.22	1.375	97.706
11	MB-2	0.25	8.53	3.22	1.375	97.915
12	MB-3	0.25	8.53	3.22	1.375	96.978
13	MB-4	0.25	8.53	3.22	4.126	122.095
14	MB-5	0.25	8.53	3.22	4.126	108.251
15	MB-6	0.25	8.53	3.22	4.126	119.123
16	MB-7	0.25	8.53	3.22	5.516	144.739
17	MB-8	0.25	8.53	3.22	5.516	143.911
18	MB-9	0.25	8.53	3.22	5.516	156.977
19	MC-1	0.51	6.46	3.23	1.375	100.040
20	MC-2	0.51	6.46	3.23	1.375	99.662
21	MC-3	0.51	6.46	3.23	1.375	105.682
22	MC-4	0.51	6.46	3.23	4.126	123.370
23	MC-5	0.51	6.46	3.23	4.126	127.528
24	MC-6	0.51	6.46	3.23	4.126	140.510
25	MC-7	0.51	6.46	3.23	5.516	151.666
26	MC-8	0.51	6.46	3.23	5.516	165.862
27	MC-9	0.51	6.46	3.23	5.516	167.986
V. maximos		0.90	8.53	3.23	5.52	191.50
V.minimos		0.25	6.46	3.20	1.38	92.37
D. Estandar		0.273	0.986	0.013	1.779	29.608
Varianza		0.072	2.401	0.331	3.067	1134.525

Fuente. Propia, Julio 2022

- **ANEXO IMÁGENES GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN**

Anexo17. Imágenes del desarrollo de la investigación

		
Bomba generadora de presión	Población de núcleos extraídos	Sistema de ensayo triaxial
		
Prueba de Hidrometría	Núcleos ensayos triaxial	Ensayo a compresión
		
Muestra de hidrometría	Maquina compresión uniaxial	Núcleo fallado
		
Muestra de roca ensayada	Zona de exploración de cantera	Taladro Hilti

Fuente. Propia, Julio 2022