



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO
DE MECÁNICA DE ROCAS PARA DEFINIR
PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO EN
EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y
SUBTERRÁNEAS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JOSÉ LUIS NAVARRETE PACHECO

DIRECTOR DE TESIS:

ING. CARLOS MANUEL CHÁVARRI MALDONADO



MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2007



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/073/06

Señor
JOSÉ LUIS NAVARRETE PACHECO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. CARLOS MANUEL CHÁVARRI MALDONADO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS"

- INTRODUCCIÓN
- I. TRABAJOS DE CAMPO
 - II. LAS PRUEBAS DE LABORATORIO
 - III. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS
 - IV. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 23 de Agosto del 2006.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/gar.

Vb Ba
[Firma]
Ing Carlos M. Chávarri Maldonado
12 Sep 2007

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por todo el apoyo que me han dado toda mi vida.

A mis hermanos que siempre han estado cuando los he necesitado.

A Ivette por brindarme todo su apoyo y cariño.

A todas las personas presentes en mi paso por la facultad de ingeniería.

A la UNAM, especialmente a la F.I.

A la empresa Consultec por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente, en especial al ingeniero Fermín Sánchez Reyes, al ingeniero José Antonio Bahena González por el apoyo brindado para elaborar esta tesis, a todos los laboratoristas del departamento de mecánica de rocas de CFE.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN

- 1.1 Antecedentes
 - 1.1.1 Objetivo de las pruebas de campo y de laboratorio.
 - 1.1.2 Normas aplicables al diseño de las pruebas de laboratorio de mecánica de rocas.
 - 1.1.3 Responsabilidades del laboratorio.
 - 1.2 Trabajos de campo
 - 1.2.1 Inspección y reconocimiento preliminar del sitio.
 - 1.2.1.1 Reconocimiento Geológico.
 - 1.3 Métodos, estudios e Interpretación de la exploración directa e indirecta.
 - 1.3.1 Métodos para la exploración de campo.
 - 1.3.1.1 Exploración directa
 - 1.3.1.2 Exploración Indirecta.
 - 1.3.2 Clasificación Geomecánica de la roca intacta.
 - 1.3.2.1 Índice de Calidad de la Roca (ICR o RQD).
- Página 7 – 45

2 LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

- 2.1 Funcionamiento e Instalaciones de un Laboratorio.
- 2.2 Planeación, Selección de Muestras y Programación de las Pruebas de Laboratorio,

2.3 Procedimientos para determinar las propiedades índice y geomecánicas de la roca intacta.

2.3.1 Contenido de agua.

2.3.2 Peso volumétrico.

2.3.3 Dureza.

2.3.4 Intemperismo acelerado.

2.3.5 Índice de alteración y absorción.

2.3.6 Compresión simple y con módulo de elasticidad $E_{t50\%}$.

2.3.6.1 Compresión simple.

2.3.6.2 Determinación del módulo de elasticidad.

2.3.7 Resistencia a la compresión triaxial no drenada en muestras cilíndricas de roca intacta.

2.3.8 Tensión indirecta (Brasileña).

2.3.9 Corte directo.

Página 46 - 93

3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS. APLICACIÓN REAL DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

3.1 Integración de los resultados.

3.2 Resultado del estudio de resistencia de la roca intacta.

Página 94 – 129

CONCLUSIONES.

Página 130 – 132

BIBLIOGRAFIA.

Página 133 – 134

ANEXOS

Anexo 3.1 Fichas de la integración geotécnica de los resultados de laboratorio.

Anexo 3.2 Descripción de las muestras de laboratorio.

Anexo 3.3 Fotografías de las muestras ensayadas.



**“MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO
EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS”**



1

“INTRODUCCIÓN”

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo trata las pruebas de laboratorio y los trabajos de campo mas elementales concernientes a un proyecto de excavación a cielo abierto y subterránea.

En el capitulo 3 de esta tesis realizo mi aportación a la ingeniería a través de la investigación realizada a las pruebas de laboratorio descritas en el capitulo 2, mediante la integración de los resultados de las pruebas de laboratorio como una aplicación real de los parámetros obtenidos al estudio de la roca intacta para definir parámetros geotécnicos de la traza de la carretera Durango-Mazatlán, en el tramo El Salto-La concordia municipio de Pueblo Nuevo en el estado de Durango, abarcando un total aproximado de 3366.00m.

Breve historia de la mecánica de rocas

Desde tiempos prehistóricos el hombre ha estado ligado al comportamiento de la roca, ya que esta le proporcionaba herramientas para la caza y un refugio.

En la edad de bronce el hombre realizaba excavaciones para la extracción de minerales de cobre y en Egipto hace 4000 años ya se utilizaba la roca caliza como material de construcción.

En los años de 1700 a 1800, Europa inicio la construcción de obras subterráneas (túneles carreteros y de ferrocarril). La excavación de los frentes se inicio labrando la roca con punzones y barretas por medio de impacto, se empleo el sistema de calentamiento y enfriamiento de la roca para provocar el fracturamiento.

En 1825, Se emplea la dinamita y la nitroglicerina por primera vez en Estados Unidos y en 1864, Se lanza al mercado la perforación con diamante.

En el año de 1873 Coulomb realizo pruebas en roca para la academia francesa de París.

Los ingenieros franceses comenzaron la construcción del canal de Panamá en 1884, lo que posteriormente fue continuado por el cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos,

En 1875, Alfredo Nobel moderniza el explosivo, al desarrollar la gelatina explosiva, que consiste en el 92% de nitroglicerina y 8% de nitrocelulosa. Con lo anterior se logra manejar sin riesgos el explosivo.

Inicio de la mecánica de rocas en el mundo

En 1921 Griffith propuso su teoría sobre la falla frágil de material de roca, y en 1931 Bucky comenzó a estudiar las fallas de minas bajo un modelo de carga gravitatoria.

Año de 1936, De manera individual el Ing. David Griggs de los Estados Unidos, encabeza los primeros estudios de Mecánica de Rocas, prácticamente como una especialidad reciente y fueron los pioneros al realizar las primeras pruebas de deformación de la roca.

Otros científicos e ingenieros que proporcionaron interesantes trabajos acerca del comportamiento de la roca fueron Von Karman (1911), King (1912), Ide y David Griggs (1936) y Terzaghi (1945). Todos ellos trabajaron en el comportamiento de la roca bajo carga.

En 1946, Los mineros forman la primer organización y publican las primeras especificaciones estandarizadas de rocas.

Entre los años 1950 y 1956 se llevan acabo los primeros simposios de mecánica de rocas, tanto en Europa como en Estados Unidos, en Europa por la Sociedad Geomecánica de Austria y en Estados Unidos por varias escuelas de Minas.

En 1962 se forma la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas ISRM (International Society of Rock Mechanics)

En el año de 1979 Muller funda la revista Geologie und Bawesen, lo que hoy en nuestros días se convirtió en la revista Rock Mechanics, y probablemente la primera que hizo énfasis en el estudio del comportamiento de las discontinuidades en una masa de rocas.

En tiempos mas recientes sobre todo en la década de los 80 Hoek y Brown realizan trabajos en recopilación de datos y pruebas de laboratorio para proponer un criterio de rotura empírico que relaciona el esfuerzo a compresión de la roca intacta y el macizo rocoso. Actualmente este criterio de rotura se encuentra muy extendido en el mundo de la mecánica de rocas junto con la ley de resistencia de Mohr-Coulomb.

Definición de la mecánica de rocas y su relación con otras ramas de las ciencias

Definición

Es una disciplina que permite facilitar los estudios de la ingeniería de rocas resolviendo el diseño, construcción y el mantenimiento de estructuras en roca.

Es la ciencia técnica y aplicada que trata de los campos de fuerza que actúan en el entorno físico de la roca, así como su comportamiento mecánico ante distintas sollicitaciones.

En otras palabras el objetivo fundamental de la mecánica de rocas es la determinación cuantitativa de las características mecánicas de las masas rocosas y el uso de estas propiedades para predecir su comportamiento ingenieril. Esta definición es prácticamente mecánica, ignorando el papel tan importante que juega la Geología en los estudios de la roca, en realidad la definición es mas amplia, ya que comprende los estudios de los mecanismos de deformación de los minerales sometidos a altas presiones y temperaturas, el comportamiento de la roca en el laboratorio.

La mecánica de rocas surge como una necesidad del ingeniero por comprender los fenómenos físicos y mecánicos que ocurren en los macizos rocosos, para realizar un diseño económico, seguro y funcional.

Relación con otras ciencias

La geología forma una parte fundamental en los diseños geotécnicos de las obras de ingeniería.

Dentro de los estudios geológicos necesarios se encuentran:

- La litología (origen, espesor, naturaleza, textura y propiedades de la roca).
- Discontinuidades (fallas, fracturas, juntas, forma, frecuencia y relleno de las mismas).
- Estratigrafía (origen, espesor, distribución y posición de las unidades de los suelos).
- Geomorfología (evolución de formas del subsuelo y su relación con otros fenómenos y accidentes geológicos).
- Topografía.
- Hidrológica (agua superficial y subterránea, composición y niveles).
- Geodinámica externa (erosión y movimientos en masa del terreno).
- Geodinámica interna (vulcanismo, focos sísmicos).

Lo ideal para el diseño geotécnico sería encontrarse con un material isotrópico y homogéneo, pero frecuentemente la realidad con la que se encuentran los ingenieros que se especializan en este ramo es otra, por un lado se encuentran con un macizo rocoso que es anisotrópico y todas y cada una de sus partes debe

ser estudiada y analizada desde diferentes perspectivas, al mismo tiempo en el laboratorio se deberán realizar diversas pruebas de este material para ver como se comportará el terreno de manera inmediata a las obras y a largo plazo durante operación de las obras, todo ocurre por el hecho de que son rocas de distinto origen geológico, con diferentes condiciones de fragmentación, grado de alteración y a al mismo tiempo ocurren fallas tectónicas, lo cual conlleva a que la roca contenga distintos estados de esfuerzos naturales que pueden variar en magnitud en todo el macizo rocoso.

La geología estructural es una herramienta fundamental para el ingeniero que le permitirá conocer los rasgos estructurales de estos macizos. La introducción a este aspecto de la ingeniería nos empieza a dar un enfoque para determinar los parámetros que necesitamos en el diseño y la interpretación que se vera en el ultimo capitulo de esta tesis.

En diversas obras de ingeniería civil e infraestructura en un macizo rocoso requiere de la participación de los ingenieros civiles, geólogos, topógrafos, mineros, geofísicos, geotecnistas etc. que estudian el comportamiento y proporcionan el diseño para garantizar la seguridad de las obras subterráneas, como túneles carreteros, minas, excavaciones a cielo abierto, etc.

Los profesionistas antes mencionados, proporcionan la información necesaria para analizar, evaluar, e identificar la problemática de cada proyecto previsto para construcción. Iniciando el estudio de gran visión o selección del sitio o sitios probables, continuando con el estudio básico preliminar y en el estudio de factibilidad o de construcción.

En todas las etapas de estudios en la que participan diversas disciplinas de la ingeniería es indispensable realizar estudios geológicos geofísicos que incluya las exploraciones directas e indirectas y realizar visitas técnicas al lugar de los trabajos, y ellos son los profesionistas que pueden realizar una descripción litológica, estratigráfica y geomorfológica detallada del macizo rocoso in situ.

Importancia de los estudios de mecánica de rocas

Diseño de obras de ingeniería

En una obra a cielo abierto alguien tiene que decidir que tan inclinados deben ser los taludes del corte de un cerro en un proyecto carretero o los tajos de acceso de un túnel, por un lado están los costos de construcción y por el otro el riesgo de accidentes.

En ocasiones, algunas cimentaciones profundas o excavaciones de túneles, cortes carreteros, etc. de obras civiles se ubican en macizos rocosos, requiriéndose en varios casos realizar voladuras con explosivos para las excavaciones a cielo abierto y subterránea en roca, y otros casos se requieren diseños de mezclas

para mejorar las propiedades geomecánicas o impermeabilizar la masa de roca en muchas ocasiones también se utiliza la misma roca como material de construcción para agregados de concreto o pedraplenes de compensación.

Sin duda alguna una excavación es una obra importante y varía en tamaños, pero existe otro problema al que se enfrenta la ingeniería; Durante las construcciones en macizos rocosos, es muy frecuente la diversidad litológica y la geología estructural como fallas y fracturas en la roca, estas discontinuidades suelen afectar la estabilidad de las obras de ingeniería.

Todas las obras de ingeniería civil e infraestructura como son: túneles, cavernas taludes, canteras, presas, galerías, carreteras, puentes, etc. Necesitan de una integración geotécnica precedida de una campaña de laboratorio, que aseguren un diseño geotécnico que contenga funcionalidad, seguridad y economía.

El ingeniero dedicado al diseño geotécnico su trabajo no solamente debe ser el gabinete donde planea y diseña, también debe acudir al sitio de los trabajos y saturar su mente de información de toda la diversidad litológica que aparece en la excavación, así como también debe aprender a analizar la roca partiendo de planos geológicos, geotécnicos, fotografías, sondeos, perfiles, etc.

Por lo que respecta al lugar que ocupa dentro de la tecnología de excavación de túneles. La mecánica de rocas se puede aplicar principalmente al control y la seguridad de la estabilidad de una excavación, al proporcionamiento del soporte, al dimensionamiento de la sección final de la excavación y al revestimiento definitivo.

En general toda obra de tuneleo se realiza en dos etapas, una que corresponde propiamente a la excavación, la segunda etapa se refiere a la instalación de los soportes para dicha excavación, estos soportes son diseñados para soportar los estados de esfuerzos naturales de la roca y que son proporcionados por las pruebas de campo y de laboratorio de mecánica de rocas, este soporte tiene la finalidad de la seguridad y permanencia de la excavación, mientras que se termina esta.

Existen algunos casos, en donde por razones imperiosas de seguridad, hay necesidad de ir sosteniendo tramos intermedios, cercanos al frente de ataque. La razón primordial de ejecutar el trabajo en dos etapas, la excavación, el soporte y revestimiento definitivo son tres operaciones distintas, difíciles muchas veces de conciliar.

Importancia del laboratorio y pruebas de campo

De los estudios antes señalados se obtienen los parámetros o propiedades de la roca intacta y de la masa de roca que necesita el ingeniero proyectista, estos son obtenidos en laboratorio y en campo.

Para lo anterior, es necesario realizar un programa de pruebas representativas y que cumplan con los objetivos del estudio asociado al proyecto de obra que se construirá, basado en el criterio del proyectista para elegir las muestras y las pruebas necesarias.

En campo se necesita elegir el equipo, la maquinaria, herramienta y el personal adecuado que ejecutara los trabajos, al mismo tiempo se requiere tener perfectamente ubicado el lugar donde se realizaran los sondeos, el tipo de maquinaria que asegure un buen rendimiento y el número de sondeos que se realizarán en base al estudio geológico del lugar y la envergadura del proyecto.

Son necesarias algunas pruebas en el laboratorio y ciertos análisis teóricos, y también tienen que hacerse algunas suposiciones simplificantes, pero para obtener resultados inmediatos, se necesita un procedimiento diferente. Primero que nada es necesario ir a la roca y ver que está sucediendo realmente antes de empezar los análisis, pruebas de laboratorio y conclusiones. De aquí se parte de un buen diseño geotécnico, ya que con las referencias previas del lugar de la excavación se obtendrán mejores resultados. Este procedimiento puede no gustarle a muchos ingenieros dedicados puramente al gabinete, porque se relaciona con trabajo pesado, sucio y toda clase de dificultades con la gente de trabajo, pero esta es la manera más apropiada en la que un laboratorio y pruebas de campo pueden arrojar buenos resultados.

Un factor muy importante en campo y en laboratorio es el control que se lleva de los sondeos, el equipo, el material, la herramienta y el personal.

También es indispensable que se cuente con certificados de calibración del equipo y la herramienta del laboratorio, contar con personal experto en las pruebas del laboratorio que garanticen resultados confiables de los ensayos de la roca intacta. Considerando que en el laboratorio se realizan ensayos representativos del macizo rocoso sin involucrar a los sistemas de fracturamiento de la masa de roca, que es un factor que habrá que considerar en los análisis de diseño por medio de tablas y clasificaciones geomecánicas.

Las muestras ensayadas en el laboratorio representan un porcentaje muy reducido del volumen de la masa rocosa, por lo que se debe de asegurar que los resultados sean representativos del sitio.

En esta tesis se tratarán los métodos de prueba del laboratorio para definir los parámetros de diseño necesarios para poder definir una galería, un túnel, una excavación a cielo abierto, etc.

Las discontinuidades, estratificaciones, diaclasas, fallas y fracturas del macizo rocoso representan un problema para la teoría conocida del medio continuo, en

este aspecto hasta hace poco no existían modelos de elementos finitos que sirvieran de herramienta para soportar las hipótesis y conjeturas derivadas de tablas y leyes del macizo rocoso propuestas por varios autores como Hoek y Brown y Mohr-Coulomb.

Ahora el ingeniero geotecnista cuenta con herramientas modernas como los programas Plaxis, slide, rockdata, etc. Para realizar un informe geotécnico con argumentos mucho más estudiados y mucho mejores resultados.

Por otro lado problemas tales como la estabilidad de taludes o el flujo de agua a través de una masa rocosa han sido resueltos, pero el investigador aun tiene un largo camino que recorrer para resolver numerosos problemas prácticos como los son: la acumulación de la energía que ocasiona los temblores, una falla tectónica, la influencia de las discontinuidades en la distribución de esfuerzos en una excavación subterránea en un macizo rocoso discontinuo, etc. Estos factores soportan el hecho de la importancia de un laboratorio de mecánica de rocas bien preparado para fines de investigación.

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 Objetivo de las pruebas de campo y laboratorio

El capítulo 1 se refiere a los trabajos de campo mas comunes que se emplean para el proyecto de una obra de ingeniería, los métodos de exploración y clasificaciones geomecánicas de la roca intacta para fines de diseño. El capítulo 2 se refiere a las pruebas de laboratorio de mecánica de rocas y los procedimientos requeridos para llevar a cabo las pruebas.

El desarrollo de las pruebas de campo y de laboratorio se basa en la comprobación experimental de algunas hipótesis establecidas en la mecánica de rocas. Lo que se pretende con las pruebas es obtener un parámetro de diseño y representar matemáticamente un fenómeno geológico por medio de una ley o ecuación, con el fin de obtener resultados aceptables al caso ingenieril que se pretende resolver. Dentro de estas ecuaciones que proporciona la teoría de la mecánica de rocas, solo unos cuantos conceptos podrán ser expresados cuantitativamente, mientras que otros tendrán que ser estimados en forma empírica.

En el laboratorio se realizaron pruebas para determinar parámetros de la roca intacta que sirvieron para diseñar las fases y etapas de una excavación, así como el soporte y revestimiento de las mismas.

Mientras que una campaña de pruebas geomecánicas in situ, servirá más para el seguimiento y análisis durante la construcción de las obras de ingeniería. Aunque

se puede dar el caso de que se necesiten algunas pruebas de campo durante el proceso de diseño.

Esta tesis no abarca todas las pruebas de laboratorio. Solo abarca las pruebas de laboratorio más sencillas con las que se puede realizar un análisis geotécnico para el diseño de la excavación y el sostenimiento de un túnel dentro de una maza rocosa, aunque el estudio está enfocado a cualquier obra de ingeniería que se proyecte sobre la carretera. Se profundizará en las pruebas que sirvieron para llevar a cabo la campaña de laboratorio para el estudio de la roca Matriz.

1.1.2 Normas aplicables al diseño de las pruebas de laboratorio de mecánica de rocas.

Las normas de un laboratorio, son lineamientos por los que se rigen los procedimientos para ejecutar las pruebas de laboratorio, así como también la determinación de parámetros de diseño que se obtienen con las diferentes pruebas que se realizan en el laboratorio de mecánica de rocas.

Dependiendo de los alcances que tenga el laboratorio se aplican diversas normas tales como la NMX-EC-17025-IMNC-2000. Esta norma cubre los requisitos que debe cumplir un laboratorio que se dedique al ensayo y calibración, la norma / ISO/IEC 17025-1999 que cubre los requisitos antes mencionados pero esta norma es el equivalente internacional de la NMX-EC-17025-IMNC-2000 que se deriva de las normas internacionales ISO. Las pruebas de laboratorio se apoyan en las normas ASTM e ISRM.

Existen otras tantas normas aplicables a distintos tipos de laboratorio, por ejemplo laboratorios clínicos, laboratorios de construcción, laboratorios químicos, etc. Para esta tesis la norma que nos interesa mencionar es la NMX-EC-17025-IMNC-2000, ya que esta es la que les da certificación a los laboratorios dedicados a realizar ensayos y calibración como en el caso de un laboratorio de mecánica de rocas y suelos.

También existen libros de ayuda para la elaboración de las pruebas de laboratorio como lo son el Anual Book of ASTM Standard, manuales de diseño de diferentes organismos como CFE o ICA y diferentes libros relacionados con el tema o revistas de investigación. Todo este material nos brinda las herramientas para determinar los resultados requeridos de las pruebas.

Durante esta tesis no se hará referencia a ningún libro o manual de laboratorio antes mencionado, ya que son procedimientos descritos de la experiencia personal en el servicio social y de la aplicación de los parámetros obtenidos de la experiencia laboral.

Certificación de un laboratorio

Para efecto de dar validez a la certificación, existe un organismo privado que tiene como objetivo acreditar a los organismos de evaluación, como lo son: los laboratorios de pruebas, laboratorios de calibración, organismos de certificación, y unidades de verificación u organismos de inspección.

La acreditación no es obligatoria para ningún laboratorio u organismo antes mencionado; sin embargo, es importante que se cuente con esta certificación, ya que este acto le da seguridad y avala al laboratorio en todas sus componentes de competencia laboral y de ejecutar las normas y estándares correspondientes a la ejecución de las pruebas de laboratorio, y de esta manera competir internacionalmente para ofrecer a la sociedad los servicios que requiere.

1.1.3 Responsabilidades del laboratorio.

La responsabilidad de un laboratorio no se limita simplemente a llevar a cabo una prueba a la perfección, obtener un parámetro de diseño y elaborar un informe de las pruebas ejecutadas. Los actores todos y cada uno de los que componen el laboratorio, desde el jefe de todo el personal, pasando por el jefe de oficina, el encargado de la geología, diseño, planeación, organización, el encargado de las excavaciones, el encargado de las mezclas de inyección, el encargado del laboratorio y los laboratoristas; todos tienen su responsabilidad específica.

El encargado del laboratorio tiene la responsabilidad de la supervisión durante la ejecución de todas las pruebas que se efectúen en el laboratorio, desde la recepción de las muestras, hasta el informe final de los resultados obtenidos.

Los laboratoristas son el personal operativo responsable de mantener en perfectas condiciones el equipo, de cuidar el material y las herramientas utilizadas durante las ejecución de las pruebas, de realizar el procedimiento conforme a las especificaciones, realizar los cálculos requeridos para la obtención de los parámetros de diseño y proporcionar al encargado del laboratorio los resultados para que este realice el informe de resultados.

Estas dos personas tanto el encargado del laboratorio, como el laboratorista necesitan de una retroalimentación entre si, ya que en una situación o un problema que se pueda presentar se necesita tanto del conocimiento teórico que lo dan los estudios como el conocimiento que proporciona la experiencia.

Es decir supongamos que un laboratorista se ha formado en el laboratorio y tiene todos los conocimientos del equipo y la ejecución de las pruebas, y por otro lado el encargado del laboratorio se ha formado con base en la teoría que proporciona la escuela, ¿Quién de los dos tiene mas probabilidades de solucionar un problema que ocurra con una prueba o un aparato?, la respuesta es relativa, ya que mucha gente pensaría que el laboratorista tendría mayor posibilidades, pero por otro lado

la colaboración conjunta de ambos podría ser una mejor opción y solucionar el problema efectivamente y mucho mas rápido que si lo hiciera uno solo.

Medidas de seguridad

Dentro de las medidas de seguridad que debe adoptar el laboratorio de mecánica de rocas se encuentran: las medidas de seguridad del personal, el almacenamiento del material ensayado, las acciones de emergencia ante accidentes en el laboratorio, el manejo de desechos tóxicos y la política de calidad del laboratorio.

Para mantener al personal seguro contra cualquier accidente, el laboratorio debe promover ante a los profesionales técnicos el uso adecuado del equipo de seguridad. Existen muchos pasos en los que el personal del laboratorio debe usar el equipo de seguridad como por ejemplo cuando se cortan los núcleos de las muestras que llegan al laboratorio, debe usar en este caso gafas, guantes y el equipo de seguridad para los oídos, tomando las medidas de seguridad del equipo.

Otro ejemplo del uso del equipo es cuando se meten las muestras falladas al horno a una temperatura de 105° C, en este caso es necesario el uso de los guantes de seguridad que protegen la piel de cualquier quemadura, y el uso de las pinzas para tomar el material a temperatura elevada.

Así como el personal necesita su equipo de seguridad, también necesita aprender a seguir las medidas de seguridad que proporciona el fabricante del equipo para la ejecución de las pruebas del laboratorio, en este aspecto no solo cuida su integridad física sino también protege el equipo de laboratorio.

Cuando una prueba es realizada el material sobrante de la muestra se almacena en bolsas con su debida etiqueta que contendrá, el nombre el proyecto al que pertenece, el barreno que realizo el sondeo, la ubicación (por ejemplo en una presa la ubicación se referirá a la parte de la presa en la que se realizo el sondeo, casa de maquinas, vertedor, cortina, etc.). Esta muestra ensayada se almacena en el laboratorio durante 5 años, ya que los ingenieros de proyecto ante cualquier duda que se pudiera tener de los resultados obtenidos recurrirán a los restos de las muestras para cualquier aclaración.

Durante la ejecución de las pruebas de laboratorio se manejan sustancias volátiles como aceite hidráulico, gasolina, tiner, etc.; así como también existen pruebas que requieren utilización de gases.

Para el manejo de estos elementos se requieren medidas de seguridad que puedan mitigar cualquier accidente al momento de utilizar estas sustancias. El laboratorio debe tener en sus instalaciones extintores para diversos usos, regaderas a presión para quitar cualquier derrame accidental en el cuerpo de una

persona, botiquín de primeros auxilios, aparte de extintores se debe contar con un equipo contra incendios.

El manejo de los desechos se hace en diferentes contenedores debidamente etiquetados y con un respectivo color, mediante el cual, el personal que labora en el laboratorio notara la diferencia de estos contenedores y separara el manejo de los desechos para su posterior traslado fuera del laboratorio.

Se ubican contenedores para los desechos sólidos, los desechos orgánicos, los desechos tóxicos, los desechos volátiles, los desechos ferrosos, los desechos eléctricos y los desechos propios de las pruebas de laboratorio.

Esto con el fin de mitigar el impacto ambiental que pueda traer consigo la labor del laboratorio, así como tampoco se deben derramar sustancias peligrosas al drenaje del laboratorio, se debe contar con un desarenador especial para este tipo de residuo.

Política de calidad del laboratorio.

Para proporcionar las ideas y objetivos de calidad a todos los involucrados en el laboratorio, este debe establecer, implantar y mantener un sistema de calidad apropiado al alcance de sus actividades.

El laboratorio debe documentar sus políticas, sistemas, programas, procedimientos e instrucciones en la extensión necesaria para asegurar la calidad de los ensayos, esta información debe ser comunicada a todo el personal, debe estar disponible y debe ser implantada por el personal adecuado.

Estos objetivos de calidad del laboratorio deben estar comprendidos en un manual, y deben resumirse en una declaración de política de calidad emitida por el jefe ejecutivo, y debe contener lo siguiente:

- El compromiso de la dirección del laboratorio con la buena practica profesional y con la calidad de sus ensayos en el servicio a sus clientes.
- Los objetivos de calidad del laboratorio.
- Una declaración de que el laboratorio realizara las pruebas respecto a la norma
- A la que esta sujeta, para asegurar la calidad de los resultados.

1.2 TRABAJOS DE CAMPO

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hablará de los trabajos de campo más comunes que son requeridos para el diseño de un proyecto de ingeniería.

Con algunos trabajos de campo como son los estudios de gran visión y de prefactibilidad se pueden seleccionar varios sitios para un posible proyecto que es una de las principales actividades que se realizan, continuando con pruebas de laboratorio para determinar los parámetros de diseño de las cuales se hablara más adelante.

Es necesario considerar el factor de escala correlacionado las pruebas de laboratorio y campo con la geología litológica y estructural

Se tienen que diferenciar los parámetros que se obtienen de las pruebas de laboratorio de la roca matriz y los parámetros que se obtienen del macizo rocoso derivados de las pruebas de laboratorio realizadas a la matriz rocosa que es una pequeña porción representativa del macizo rocoso.

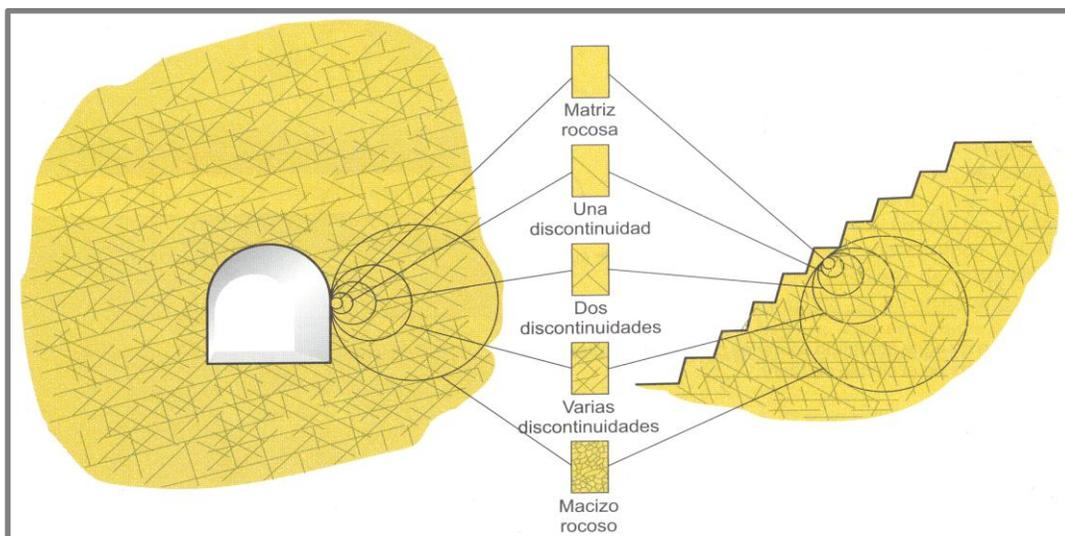


Figura 1.1. Relación de la roca intacta con el macizo rocoso.

La figura 1.1 relaciona la roca intacta con el macizo rocoso. Tomando en consideración que el círculo más pequeño representa la roca intacta (matriz rocosa), que en este caso sería una muestra para el ensayo de laboratorio, y como se puede observar en la figura no presenta discontinuidades; por otra parte, tomando en consideración que al aumentar los círculos de la masa rocosa van aumentando las discontinuidades hasta llegar a representar el total del macizo rocoso, se puede llegar a la conclusión de que la matriz rocosa es una pequeña porción representativa del total del macizo rocoso, y que por ningún motivo los parámetros obtenidos de los ensayos a la roca intacta deben ser definitivos para realizar un diseño de una excavación y sostenimiento de un túnel.

Esta es una de las causas por las que el diseño de una excavación requiere de pruebas de campo y de la determinación de distintos parámetros en el lugar (pruebas in situ), aunque esta tesis no tratara estas pruebas se pueden distinguir las pruebas mas comunes que son necesarias efectuar al macizo rocoso.

Tales pruebas son:

- Gato plano
- Roseta
- Leugon
- Placa flexible
- Corte directo
- Etc.

Que son las más comunes para determinar las deformaciones de la masa de roca, los estados de esfuerzos naturales del macizo y parámetros de resistencia de las discontinuidades.

Al desplantar una estructura en roca, se deben realizar diferentes métodos de exploración del terreno. Existen parámetros que no se pueden determinar en el laboratorio, como el caso del estado de esfuerzos naturales del macizo rocoso, la permeabilidad de la roca, la deformación, etc.

1.2.1 Inspección y reconocimiento preliminar Del Sitio

Objetivo

El objetivo principal de la inspección y reconocimiento preliminar de campo es para tener una evaluación inicial de las características y propiedades del macizo rocoso, que pueden verse afectadas por los métodos de excavación y al mismo tiempo por la calidad de la masa de la roca puede significar problemas predecibles de las futuras estructuras.

La exploración directa como la disciplina de geología, es una principal herramienta con la que cuenta el ingeniero para realizar esta tarea realizar dictámenes previos y definitivos.

Muchas veces el reconocimiento de campo se centran en lugares mas críticos como son: La geología estructural, fallas, contactos geológicos, y se deja de lado a las estructuras secundarias, la omisión de lo anterior, podría ocasionar algunos problemas durante la construcción como son retrasos e implícitamente costos extras.

Por esta razón es importante contar con la mayor información de Cartográfica, Topográficos, Geológicos, Hidrológicos, Geotécnicos, Estructurales y dependerá de la etapa de estudios en que se encuentre el proyecto.

Además de todo lo anterior es importante que el recorrido lo realice un ingeniero especialista en geotecnia acompañado de un geólogo.

1.2.1.1 Reconocimiento Geológico.

El ingeniero debe realizar un informe de las formaciones y unidades litológicas del macizo rocoso, y al mismo tiempo hará un reconocimiento visual de las características.

Cualquier diseño de una obra de ingeniería requiere de un reconocimiento preliminar del lugar, además se debe de contar con un arreglo de obras para orientar los estudios que permitan determinar las propiedades geomecánicas e índice de la roca intacta tales como la deformación, parámetros de resistencia, el estado de esfuerzos, capacidades de carga, etc.

La fotogrametría es Una herramienta muy importante para la geología, es muy importante para la interpretación preliminar de las características geológicas del sitio, tales como fallas, fracturas o fenómenos geodinámicos, etc. El ingeniero geólogo es el profesional entrenado para la interpretación de esta clase de herramienta.

El ingeniero que realice la exploración debe contar con suficiente experiencia para realizar la exploración y en la medida de lo posible recabar muestras de la primera visita, ya que sus conocimientos optimizaran los costos y los resultados de la exploración del macizo rocoso.

1.2.2 Métodos, Estudios e Interpretación De La Exploración Directa e Indirecta.

Una vez que se realizo la visita de campo al sitio, se deben programar las exploraciones necesarias para las diferentes etapas de estudio, las muestras que se seleccionen deben protegerse e identificarse adecuadamente para las maniobras y traslados necesarios.

El objetivo primordial de la exploración geotécnica es recabar información litológica del macizo rocoso, las condiciones de permeabilidad del medio y las propiedades geomecánicas del macizo (resistencia, modulo de deformabilidad, estado de esfuerzos, etc.)

1.2.2.1 Métodos Para La Exploración De Campo.

Introducción

Para investigar las condiciones de la roca en la superficie, el ingeniero civil no solo necesita, estudiar su exterior o cubierta superficial sino también necesita las propiedades del interior del macizo rocoso.

Los trabajos de campo deben coordinarse con los operarios, Jefe de proyecto y Jefe de Laboratorio.

El ingeniero civil debe planear su exploración a priori de conocer exactamente cual es el problema y el método de exploración que se necesita para tal caso, y al mismo tiempo debe hacer saber su requerimiento con un lenguaje accesible y claro al responsable de los trabajos de campo.

Quienes estarán a cargo de estos trabajos de campo deben estar bien informados, deben estar preparados para resolver cualquier contingencia con el personal y equipo.

El éxito de la toma de muestras dependerá de una buena coordinación de los ingenieros, operarios y Jefe del laboratorio para obtener resultados óptimos de la exploración.

Programación De Las Exploraciones

En base en la información recabada de la investigación preliminar el ingeniero deberá programar las exploraciones geotécnicas del macizo y así mismo fundamentarlas con la misma información preliminar, para el programa de la investigación de detalle debe tomar en cuenta el informe de geología y el tipo de roca al que se enfrenta, debe estar al tanto de el tipo de excavación, el tamaño y todo lo relacionado con el proyecto, así debe analizar los puntos mas favorables y los puntos mas difíciles de atacar durante las exploraciones.

Se deberá proporcionar datos del tipo de exploración, la cantidad de estas, el lugar preciso donde se realizará la exploración, detalles de la roca y detalles del equipo exploración, así como un programa con fecha y hora de los inicios de los trabajos y el término de estos.

Métodos De Exploración

Dentro de los métodos de exploración existen dos tipos; los métodos directos y los métodos indirectos.

Los métodos directos son los que alteran la roca directamente con el fin de obtener una muestra representativa del lugar y ser analizada en el laboratorio o realizar una prueba directamente in situ, en el segundo caso la roca se ve modificada en su forma y estructura.

En el tipo de investigación directa se obtienen dos tipos de muestras: alteradas e inalteradas; el muestreo alterado es aquel en el que la estructura de las partículas de la muestra se ven alteradas significativamente debido al proceso de extracción, caso contrario en el muestreo inalterado en donde la estructura de las partículas se conservan, sin embargo no se puede evitar la relajación de esfuerzos del material y las consecuencias que esto implica en el comportamiento mecánico, por esta razón es importante realizar una cuidadosa extracción de una muestra inalterada.

Los métodos de exploración indirecta son aquellos donde la formación rocosa no se ve alterada en su forma ni en su estructura, ya que no se obtienen muestras representativas del lugar. Con estos métodos se hacen interpretaciones de resultados mediante los cambios en la estratificación del macizo

En esta tesis se hablará de los métodos mas usados en la exploración de la roca, mas no se profundizará en este tema, ya que el campo de la exploración es muy amplio y extenso y la base de esta tesis son las pruebas del laboratorio de mecánica de rocas y la aplicación de los parámetros obtenidos de la experiencia personal con un ejemplo real.

1.2.2.1.1 Exploración Directa

Dentro de los métodos de exploración directa se encuentran:

- Galerías y Trincheras
- Sondeos

Galerías y Trincheras

Una galería es un método de gran calidad para la exploración de la roca, ya que permite la observación a gran profundidad de la afectación del macizo por la estructura, sin embargo es un procedimiento muy costoso y solo se podrá utilizar cuando el proyecto sea de una gran magnitud, para que el costo de la galería no repercuta en el costo total de la obra o bien dejar la galería como parte de la obra, es decir que se utilice como una galería de drenaje o una galería de observación, etc. Al mismo tiempo debe ser aprovechada al máximo para realizar todo tipo de ensayos in situ.

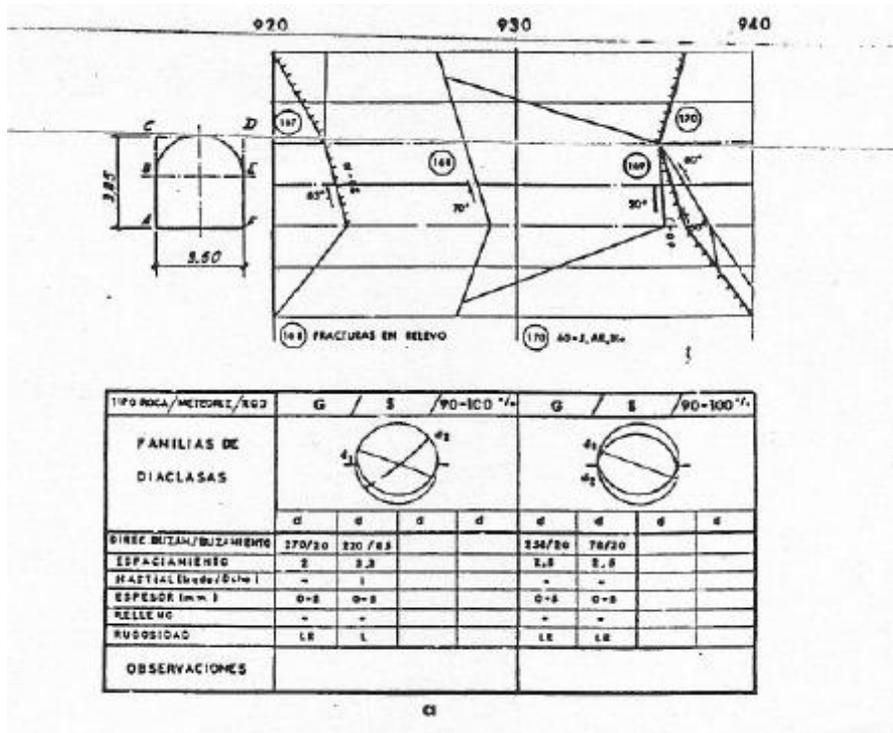


Figura 1.2 muestra una sección de una galería, así como los datos de la misma, como son estratigrafía, fracturas, etc.

Mediante el procedimiento de una trinchera o una zanja podemos observar la continuidad de la roca en afloramientos separados por derrumbios, estudiar la estratigrafía de una ladera del macizo, confirmar la situación, continuidad y anchura de algún accidente tectónico cubierto por acarreo y permitirá la toma de muestras siempre que estas sean necesarias. Las trincheras son hechas en roca blanda donde no se requiera el uso de explosivo y cuyas dimensiones serán tales que permitan la labor de un hombre con comodidad.

Sondeos

El sondeo es un reconocimiento vertical del terreno, es un método a profundidad que permite reconocer la estratigrafía del terreno y al mismo tiempo puede proporcionarnos datos de la ubicación del nivel freático. Aunque el objetivo primordial del sondeo es la obtención de testigos del terreno para realizar los ensayos de laboratorio y definir las características del macizo rocoso.

El ingeniero proyectista hará un programa para realizar los sondeos en lugares estratégicos, y si así lo requiere realizara un reconocimiento tridimensional del lugar distribuyendo los sondeos en distintas partes del macizo. La investigación se hará en función del levantamiento geológico previo, en consecuencia de las dudas que surgen de este.

Este método es el más común para realizar una investigación en roca, sin embargo está condicionado por dos factores importantes: por un lado está el tipo de sondeo que se realiza y por otro la calidad con la que se efectúa, con lo cual se obtendrá una información puntual del terreno.

Con este tipo de exploración se puede alternar el contraste entre la roca interna y la roca externa. Ya que la roca que está en la superficie ha estado expuesta a la meteorización y por lo tanto tiene un aspecto distinto de la roca interna, así mismo sus características y propiedades físicas y mecánicas son distintas.

Sondeo A Rotación

Es el método más usado en roca. Consiste en el avance de una columna de tuberías, en cuyo extremo hay un elemento cortante, broca. Consiste en un motor, una bomba que suministra agua a la excavación con el fin de regular la temperatura de la broca y esta no se caliente al ir avanzando eliminando el detrito. Contiene una torre o castillete que permite la extracción del barreno, con el fin de añadir tubería a la perforación o sacar el testigo. Este tipo de sondeos pueden trabajar en galerías o a cielo abierto.

El personal de campo debe estar familiarizado con la maquinaria, ya que ellos son los que decidirán la potencia requerida por el motor en base a la fuerza para hacer subir la tubería, así mismo debe tener nociones del tipo de roca al que se enfrenta.

Una de las partes más importantes de este procedimiento es la corona y el portatestigo; la corona que está situada en el extremo de la columna de tubos puede ser de dos tipos de Widia y de Diamante.

Las coronas de widia están hechas de carburo de wolframio con un 10% de cobalto y constituidas por un cilindro de acero. Este tipo de corona suele utilizarse en rocas blandas, llegando a emplearse para perforar calizas.

Las coronas de diamante están elaboradas con diamantes industriales, insertos de una aleación metálica de polvo de carburo wolframio, níquel, bronce y otros metales. Las coronas de diamante son utilizadas para perforar rocas duras y semiduras.

Las coronas de diamante pueden ser de dos tipos de concreción o de inserción superficial dependiendo de los quilates utilizados para su elaboración p.p.q. (piedras por quilate), y en función de los metros a perforar y la resistencia a la compresión de la roca.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (KG/CM ²)	TAMAÑO (P.P.Q.)	METROS A PERFORAR
100-500	15/20	100-500
500-1000	15/25	60-300
1000-2000	30/40	30-60
Más de 2000	55/75 o de concreción	15-30

Tabla 1.1. Relación de la resistencia de la roca con el tamaño de la corona y los metros de perforación.

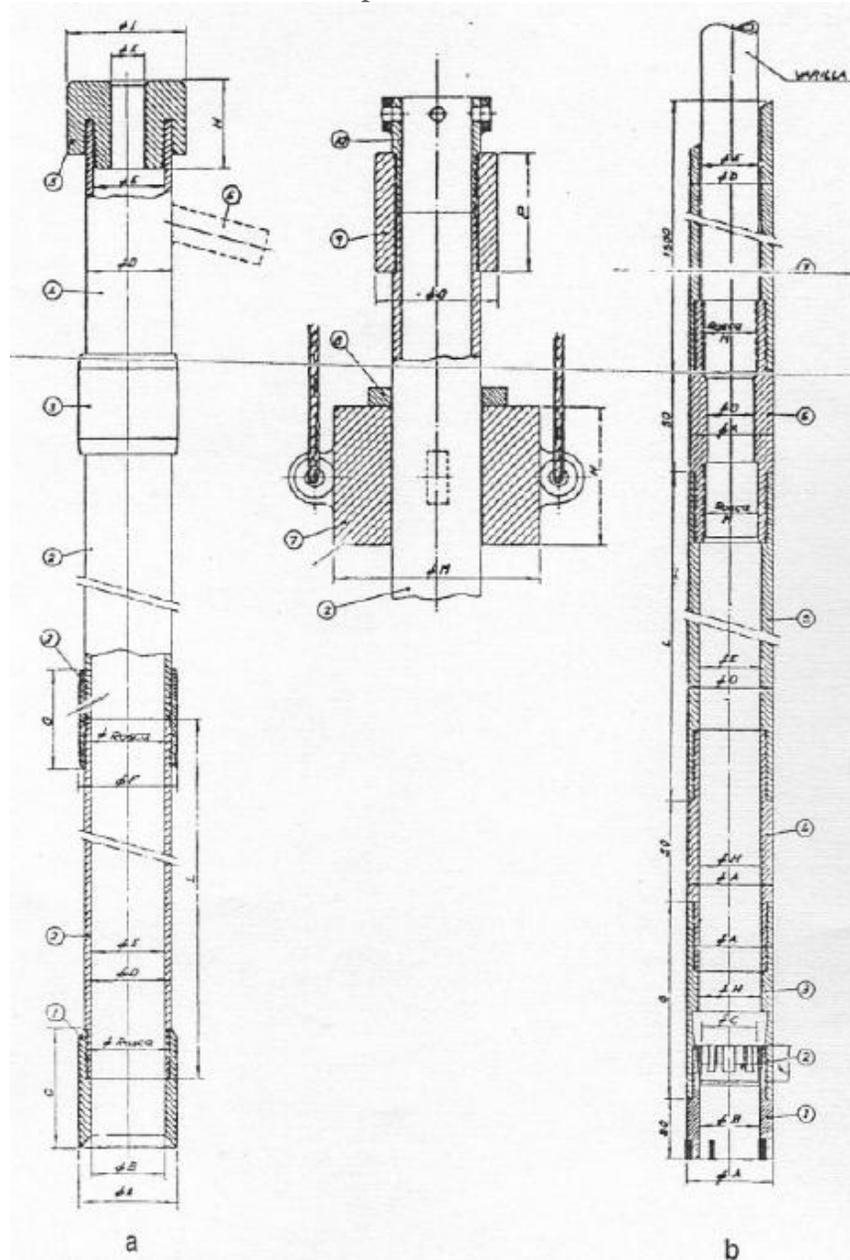


Figura 1.3. a) Batería de percusión. 1 Zapata para tubo. 2 Tubo. 3 Manguito Oliva. 4 Tubo cabeza de batida. 5 Cabeza de batida. 6 T de desagüe. 7 Contramasas. 8 Anillo de contrabatida. 10 Cabeza de extracción. b) Batería de rotación. 1 Corona normal. 2 Extractor para corona. 3 manguito porta-extractor. 4 Empalme entre manguito porta-extractor y tubo testigo. 5 Tubo testigo. 6 Empalme entre tubo testigo, tubo de sedimento y varilla. 7 Tubo sedimento. (Tomado de Mazariegos, 1982).

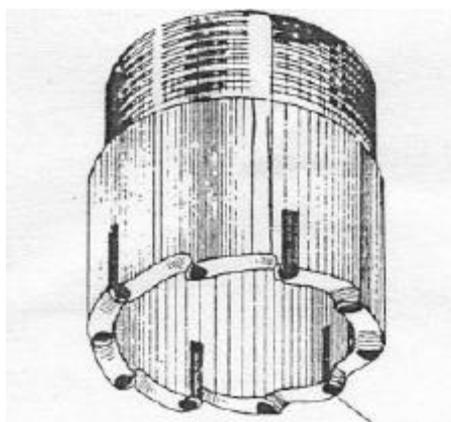


Figura 1.4. Corona de widia

En relación con estas maquinas debe tenerse en cuenta que se han diseñado para dos objetivos distintos: 1) para exploración minera y geológica, en la que predomina la perforación en roca y frecuentemente se realiza desde túneles y galerías; en este campo se requieren máquinas capaces de desplazarse en laderas, con velocidades de rotación mayores de 700rpm, de preferencia compactas y en las que la longitud de carrera del vástago de perforación no tiene mucha importancia; y 2) para exploración geotécnica se han desarrollado máquinas montadas en vehículos o remolques de gran movilidad, con velocidades de rotación menores de 800rpm y Longitud del vástago de perforación mayor de 1.5m 5ft.

Máquina	Peso, en kg	Capacidad, en m		Fuerza de empuje, en kg	Velocidad de rotación, en rpm	Par máximo, en kg-m	Carrera de perforación, en m	Potencia, en hp
		Espirales 4 1/2 in	Diámetro NW					
Longyear Mod. 34 (*)	1130		260	3200	22 - 1510		0.6	36
Mobile Drill Mod. B53	1826	75	300	8568	27 - 716	824	1.2	97
Mobile Drill Mod. B61	3721	90	450	4800	65 - 850	1230	1.7	97
Acker Mod. AD II	2310	76	300	7200	55 - 553	632	1.8	50
Acker Mod. MP50	1996	46	300	3200	43 - 287	518	1.8	48
SIMCO Mod. 2800 Hs	1200	35	90	2950	0 - 300	207	1.9	32

(*) Máquina para exploración minera y geológica

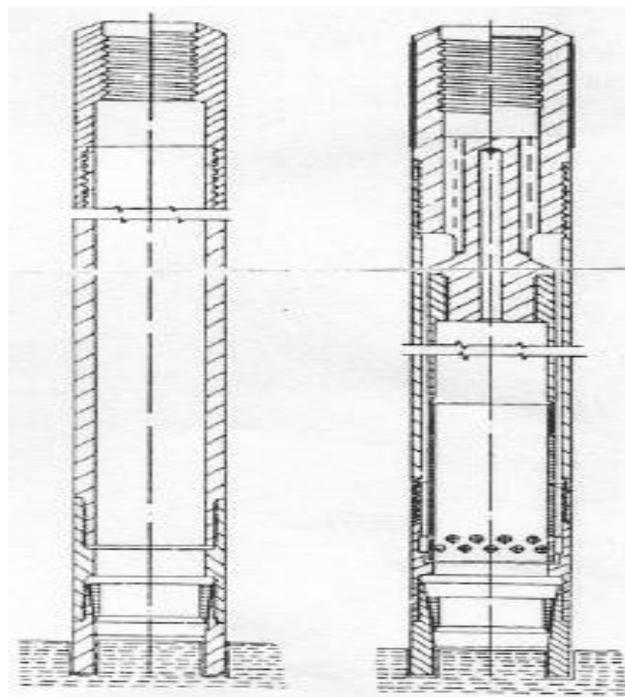
Tabla 1.2. Características de las maquinas de perforación

La bomba para perforación debe ser capaz de operar con lodos bentoníticos. Las bombas más comunes son las de cavidad progresiva, sin embargo, para sondeos poco profundos ($h < 50\text{m}$, 164ft) se han venido utilizando bombas centrífugas de alta presión, sabiendo que sus impulsores quedan sujetos a un desgaste importante.

La obtención de la muestra de roca es el fin primordial del sondeo, por lo que la otra parte importante del mecanismo del sondeo a rotación es el portatestigo, ubicado entre la corona y la tubería que sujeta el engranaje que hace girar el mecanismo.

Por encima del tubo portatestigos se encuentra el tubo de sedimentación donde se aloja el detrito que se va acumulando por el proceso de la perforación, y evita que el detrito quede entre los componentes de corte y los engranajes, lo que ocasionaría atascos al momento de retirar el portatestigos o cambiar la broca de corte.

Existen dos tipos de portatestigo que pueden ser sencillos o dobles, el primero es aquel en donde la muestra y el agua de refrigeración se mezclan, ya que el agua circula a través de el testigo y la pared del tubo; el segundo caso esta conformado por dos tubos en donde entre ellos circula el agua de refrigeración, por lo que este mecanismo evita que suceda la erosión dada con ciertas rocas blandas que pueden destruir la muestra.



a) b)
Figura 1.5. Tubos portatestigos; a) sencillo, b) doble.

Tamaños estadounidenses y canadienses				
Nombre	φ del taladro (in)		φ del testigo (in)	
6x7-3/4	7-3/4		6	"Large Series" doble tubo
5-1/2x4	5-1/2		4	swivel barrels
3-7/8x3-3/4	3-7/8		2-3/4	5
NX (entubación corona)	3-5/8		2-13/16	
NX	3		2-1/8	
BX (entubación corona)	3		2-3/16	
BX	2-3/8		1-5/8	
AX (entubación corona)	2-3/8		1-3/4	
AXT	1-7/8		1-9/32	
AX	1-7/8		1-3/16	
EX (entubación corona)	1-7/8		1-3/8	
EXT	1-1/2		1-5/16	
EX	1-1/2		7/8	
1-1/4" BH	1-1/4		3/4	
XRT	1-3/16		3/4	
Tamaños del sistema Wireline				
Nombre	φ del taladro		φ del testigo	
	(in)	(mm)	(in)	(mm)
PQ	4-53/64	122.6	3-11/32	85
HQ	3-25/32	96	2-1/2	63.5
NQ	2-63/64	75.8	1-7/8	47.6
BQ	2-23/64	60	1-7/16	38.5
AQ	1-57/64	48	1-1/16	27
Tamaños Casa Mind-B				
Nombre	φ del taladro (in)		φ del testigo (in)	
7s	6.290		4.375	
6s	5.318		3.750	
5s	4.347		3.063	
4s	3.630		2.625	
HXs	3.906		2.375	
NXs	2.980		2.155	

Tabla 1.3. Diámetros usuales de taladros y testigos

La longitud del tubo portatestigo es de alrededor de 1.5 a 3m. de longitud, por lo que una vez lleno el tubo es necesario sacarlo del sondeo y obtener la muestra del tubo; esta operación es repetitiva y cuando se trata de profundidades muy grandes es una operación que da lugar a retrasos en la ejecución de los trabajos, es por esta razón que se inventó el Wire Line, que es un tubo portatestigo con cable, el cual hace más fácil esta operación, ya que permite elevar el tubo portatestigo sin necesidad de elevar la batería.

El agua que es inyectada a la corona para la refrigeración de esta, es suministrada por una bomba por la parte superior de la tubería, por lo cual es importante que la

interacción de manguera varillaje se realice mediante un grillete hidráulico, lo que permite que el giro de la maquinaria no se transmita a la manguera y esta pueda realizar su función apropiadamente.

La gente de trabajo de campo debe tener precaución en la obtención del testigo, ya que en ocasiones sucede que al obtener la muestra esta se rompe o esta quebrada por un mal proceso en su obtención. Una vez que se llega a la zona en estudio se deja de taladrar, se introduce en la tubería una armadura con una lechada de cemento, con el fin de que esta atraviese el tramo de mala calidad obtenido y perforando el diámetro menor, después se perfora la zona del primer diámetro, donde se encuentra alojado el testigo y este queda completo gracias a la armadura y la lechada de cemento.

Los diámetros de un barreno para un sondeo en la etapa de diseño son el BQ y el NQ utilizados por las sondas Winkie y Longyear respectivamente



Figura 1.6. Operación de una sonda Winkie.

En la figura 1.6 se aprecia el proceso para la exploración directa mediante una sonda Winkie. Este aparato como se puede ver en la fotografía es pequeño y de fácil acceso a terreno difíciles como el que se puede apreciar. El inconveniente es que al ser pequeño, el diámetro que se obtiene por el sondeo también es pequeño y se debe realizar un ajuste en el laboratorio al diámetro obtenido, aparte de esta limitación, la sonda perfora solamente hasta 60m de profundidad. La figura 2.6 también nos muestra la tubería por donde se baja el tubo portatestigo.

La sonda Longyear suele utilizarse en terrenos de más fácil acceso y puede alcanzar profundidades de perforación hasta de 250m. Con un diámetro del portatestigo de 5cm. Esta sonda es la de uso mas frecuente en nuestro país.

De estos sondeos se desprende una clasificación de la roca a base del índice de la calidad de la roca o mejor conocido por sus siglas en ingles RQD (Rock Quality Designation) y que nos ayudara en la clasificación geomecánica del macizo para determinar el diseño del sostenimiento del túnel, así como las etapas de excavación.



Figura 1.7 Sonda Longyear.

Transporte y protección del sondeo

El transporte puede efectuarse por cualquier medio terrestre o aéreo, teniendo en cuenta que el sondeo debe ser protegido contra cualquier percance que pudiera afectar la recuperación del mismo.

Luego de ser extraído, el sondeo es protegido en cajas de madera o de plástico resistente, a las cuales se les rotulara la profundidad perforada y el número de caja subsiguiente, el nombre del proyecto y el lugar de procedencia.

Se colocan pedazos pequeños de madera o de plástico que indiquen los tramos del sondeo en los que la perforación fue avanzando para una caja en especial.



Figura 1.8 Extracción de la muestra del portatestigo para ser colocada en la caja para la protección y su posterior traslado.



Figura 1.9 Caja de sondeo con sus respectivos tramos perforados.

1.2.2.1.2 Exploración Indirecta

Los métodos indirectos de exploración son los denominados métodos geofísicos, que casi siempre necesitan del complemento que son los sondeos; en contraposición con los métodos exploración directa en donde se obtienen muestras de roca del sitio y el terreno no se ve alterado, ya que estos métodos no permiten la observación directa de el, los métodos geofísicos de exploración no se obtienen muestras para analizar en el laboratorio por lo que permiten la observación de la estratificación por medio de propiedades físicas y mecánicas a través de la medición de la variación de la velocidad de propagación de ondas sísmicas o de la resistividad eléctrica , y mediante su interpretación y correlaciones se deducen las características estratigráficas, posición del nivel freático y posibles tipos y propiedades de suelos y rocas. Estos métodos se utilizan para obtener información preliminar del subsuelo, para complementar la información geológica y para reducir el número de sondeos.

Existe un número muy grande de métodos geofísicos para realizar los estudios de los macizos rocosos, pero los más comunes en nuestro país son los siguientes:

- Los métodos geosísmicos; se basan en la propagación de ondas elásticas en el terreno
- Los métodos eléctricos; se basan en la propagación de ondas eléctricas y el comportamiento de estas ondas en la estratificación.

Método Geosísmico De Refracción Total

A grandes rasgos el método geosísmico de refracción total consiste en determinar el tiempo de arribo de las ondas longitudinales producidas por una explosión o el impacto de una masa a geófonos, y estos a su vez mandan las señales a un sísmógrafo que interpreta el tiempo de arribo de las ondas.

La teoría de la elasticidad permite el análisis del comportamiento de las ondas sísmicas, ya que la velocidad de transmisión depende de las constantes elásticas de los materiales en que se propagan tales como el Módulo de Young, la Relación de Poisson y el Módulo de Rigidez. En forma indirecta, el peso volumétrico de los materiales es una propiedad índice importante para inferir la posible velocidad de transmisión de las ondas en el medio.

En la práctica del método geosísmico de refracción, el propósito es conocer la distribución espacial del parámetro de velocidad de propagación de ondas sísmicas ó elásticas, de tal manera de poder zonificar los materiales del subsuelo en función de las variaciones de velocidad con que se transmiten las ondas sísmicas en los materiales que los constituyen, y de correlacionar tal parámetro con las condiciones geotécnicas tales como alteración, fracturamiento y compacidad.

No obstante que los parámetros obtenidos con este método son precisos, pudiera darse el caso de que el modelo sísmico no se correlacione totalmente con la geología del sitio, debido fundamentalmente a que las capas del subsuelo no satisfagan cualquiera de las siguientes dos condiciones.

- La velocidad de propagación de cada una de las capas del subsuelo debe incrementarse con la profundidad.
- Cada una de las capas debe tener un espesor suficiente, mayor que la longitud de onda, para poder ser detectadas.

Otro aspecto importante es la longitud de la línea sísmica, la cual debe ser cuando menos tres veces mayor que la profundidad que se desea investigar.

La onda directa viaja horizontalmente por la parte superior de la primera capa a una velocidad V_1 y la onda refractada sigue la trayectoria AB CD definida por el ángulo de refracción crítica $i_c = \text{arc sen } V_1/V_2$. De esta fórmula se desprende que es necesario que sea $V_2 > V_1$. Figura 2.10, para que exista dicho ángulo, se

pueda producir el fenómeno de refracción crítica y las primeras llegadas detectadas en la superficie del terreno contengan información sobre las características y profundidad a las que se encuentra el segundo estrato.

Esta técnica es ideal al momento de determinar el espesor de zonas alteradas de un macizo rocoso o la profundidad a la que se encuentra la roca por debajo de un relleno cuaternario. También puede proporcionar óptimos resultados a la hora de determinar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático en el terreno ya que dicho nivel constituye un refractor muy característico con velocidad de propagación de 1500 m/s (velocidad de propagación del sonido en el agua).

Es un método realmente bastante usado pues suele arrojar resultados de error en la estimación de profundidades incluso inferior al 10% de los realmente existentes.

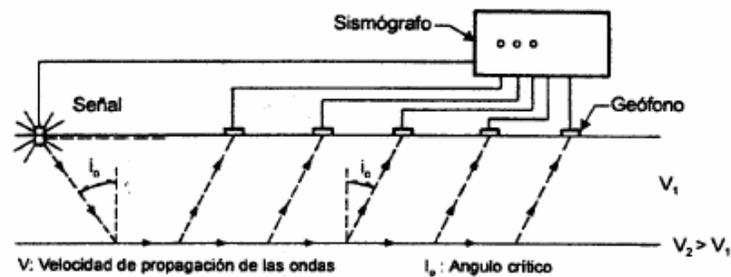


Figura 1.10. Modo de viajar de las ondas producidas por el método geosísmico

Según la teoría de elasticidad, el módulo de Young dinámico, E, viene dado en función de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales, y del coeficiente de Poisson ν por la siguiente fórmula:

$$V_L = \sqrt{\frac{E_{din}(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E_{din}}{2\rho(1+\nu)}}$$

Donde:

V_L ; velocidad de las ondas longitudinales en m/s.

V_T ; velocidad de las ondas transversales, en m/s.

ν ; relación de Poisson

E_{din} ; módulo de elasticidad dinámico del medio, en t/m^2

ρ ; densidad de masa del material en t/m^3

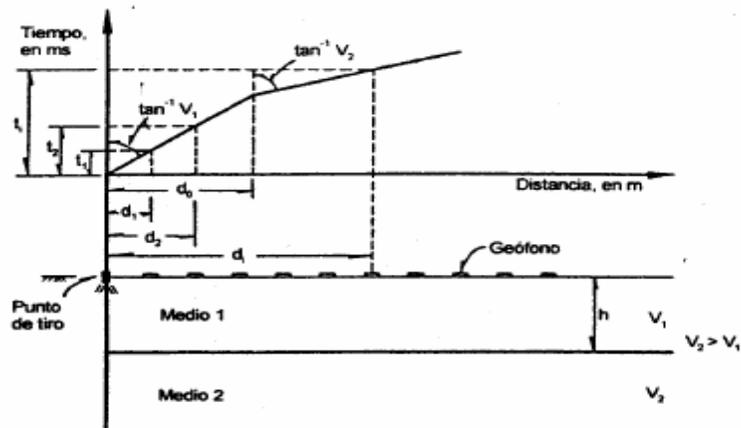
Es necesario correlacionar este método con la obtención de las muestras de roca del lugar, ya que muchas veces el método no detecta estratos de roca blanda que subyacen a otros más duros, debido a las condiciones de refracción que se

desarrollan. Es necesario también efectuar para cada línea de registro dos pruebas, una con un impacto en un extremo de la línea y la otra con un impacto en el otro extremo.

La predicción de la clasificación de los suelos y rocas se hace comparando las velocidades de propagación de ondas longitudinales con las correspondientes a casos conocidos.

Básicamente este método permite obtener los siguientes resultados:

- Interpretar la estratigrafía del sitio.
- Clasificar los suelos y rocas.
- Estimar el módulo elástico dinámico del medio.



V: Velocidad de propagación de las ondas

$$h = \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

donde d_0 es la distancia crítica del punto de generación de la onda al cambio de pendiente de la gráfica

Figura 1.11. Interpretación de una prueba de refracción sísmica.

Material	Velocidad (m/s) *
Suelo	170 – 500
Arcilla	1000 – 2800
Arcilla arenosa	975 – 1100
Arcilla arenosa cementada	1160 – 1280
Limo	760
Arena seca	300
Arena húmeda	610 – 1830
Aluvión	550 – 1000
Aluvión (terciario)	800 – 1500
Aluvión profundo	1000 – 2360
Depósito glaciar	490 – 1700
Dunas	500
Loess	375 – 400
Lutita	1800 – 3800
Arenisca	2400 – 4000
Marga	3000 – 4700
Creta	1830 – 3970
Caliza	3000 – 5700
Dolomita	5000 – 6200
Évaporita	3500 – 5500
Granito	4000 – 5600
Gneis	5100 – 7500
Esquistos o pizarra	2290 – 4700
Roca ígnea del basamento	5500 – 6600
Agua (dependiendo de la temperatura y contenido de sales)	1430 – 1680

Tabla 1.4. Intervalo aproximado de la velocidad de onda longitudinal
Para diversos materiales representativos

El equipo consiste en:

- Un dispositivo generador de la onda que puede ser un dispositivo para hacer una explosión o un marro instrumentado con un sensor del impacto.
- El conjunto de geófonos electromagnéticos que al vibrar con el suelo emiten una señal eléctrica.
- El sismógrafo receptor que recibe la señal de espejo y que la registra en papel fotosensible

Método De Resistividad Eléctrica

Existen muchas técnicas para este método, sondeo eléctrico vertical, calicata eléctrica, método de bloques y el método de Wenner. Este último es el más usado debido a su sencillez.

Todas las técnicas referidas a este método se basan en la distribución de la diferencia de potencial eléctrico, el que a su vez es proporcionado por un electrodo, que es hincado en el suelo y la resistividad que se genera depende del terreno en estudio.

Dicha propiedad, representada por el símbolo " P_a " y expresada en ohmios-metro, es una característica intrínseca al medio en que se determina, de la misma manera que lo es su densidad o permeabilidad al agua.

Cuando en un terreno homogéneo se hincan dos electrodos y se crea entre ellos una corriente continua de intensidad "I" se puede medir la diferencia de potencial eléctrico "V" entre otros dos electrodos y determinar la resistividad del terreno mediante la siguiente expresión:

$$p_a = 2\pi h \frac{V}{I}$$

Donde:

p_a ; resistividad aparente a la profundidad h. en ohm-m

h; distancia entre electrodos, en m

I; intensidad de la corriente, en amperes

V; diferencia de potencias, en volts

La estratigrafía se define en la observación del diagrama de isorresistividades. La clasificación tentativa de los materiales se hace por comparación de la resistividad eléctrica con valores típicos como los presentados en la Tabla 2.5. La posición del nivel freático se detecta fácilmente en la sección de isorresistividades.

Material	Resistividad, en ohm-m *
Granito	1×10^5
Diorita	1×10^4
Gabro	$10 - 1.4 \times 10^7$
Gneis	$2 \times 10^5 - 6 \times 10^8$
Pizarra	$6.4 \times 10^2 - 6.5 \times 10^4$
Conglomerado	$2 \times 10^3 - 1.3 \times 10^4$
Arenisca	$7 \times 10^1 - 7 \times 10^3$
Caliza	18
Marga	70
Arena	$4 - 2.2 \times 10^2$
Suelo	$10 - 1 \times 10^4$

Tabla 1.5. Resistividad eléctrica de diferentes tipos de rocas y suelos

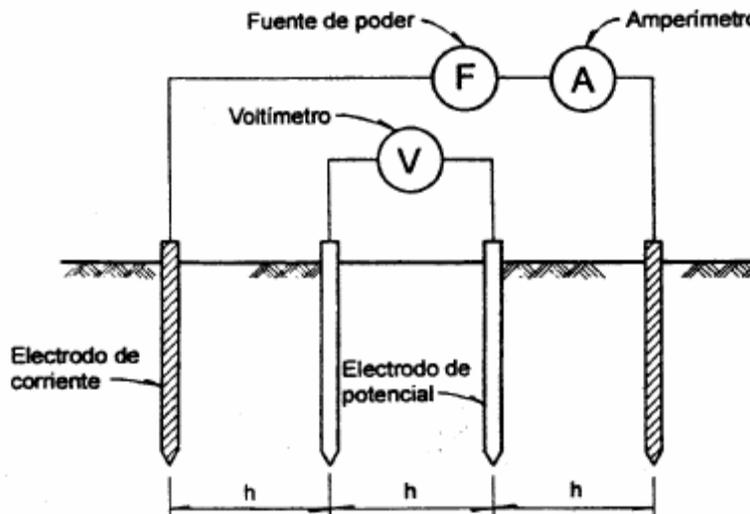


Figura 1.12. Equipo para determinar la resistividad del suelo (arreglo Wenner).

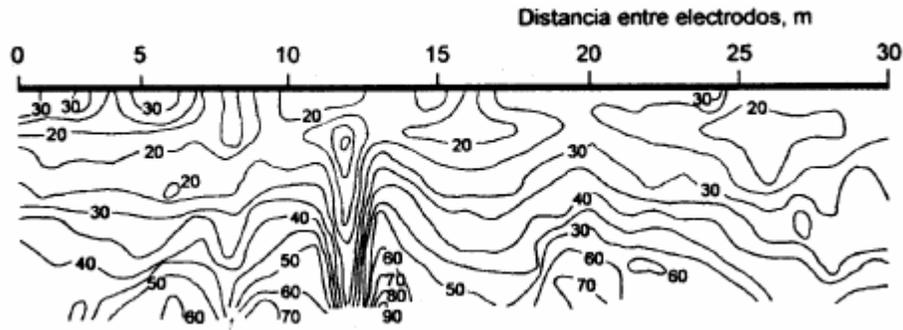


Figura 1.13. Sección de isorresistividades en ohm-m.

Este método no proporciona datos tan buenos como los proporcionados por el método de refracción sísmica, sin embargo, es mejor para predecir el nivel freático.

Los resultados que se obtienen con este método permiten:

- Definir la estratigrafía.
- Por correlación, clasificar los suelos y rocas del sitio.
- Definir la posición del nivel freático.

1.2.3 Clasificación Geomecánica De La Roca Intacta

Una vez realizadas las investigaciones en el interior del macizo, se debe obtener una clasificación Geomecánica de las unidades litológicas y los posibles contactos en el interior del macizo rocoso, así como también, la descripción de las muestras de roca obtenidas del sondeo.

Estas condiciones litológicas de la roca permiten al ingeniero saber con anticipación a que se esta enfrentando y por donde deben andar los parámetros que esta buscando. Al mencionar las características de la roca el ingeniero con la debida experiencia en el diseño de excavaciones ya tiene en su mente los parámetros que necesita obtener en el laboratorio y el tipo de material con el que va a trabajar.

<i>Clase</i>	<i>Descripción.</i>	<i>Resistencia a Compresión Simple.</i> <i>kg / cm²</i>
<i>A</i>	<i>Resistencia muy alta.</i>	<i>> 2.250</i>
<i>B</i>	<i>Resistencia alta</i>	<i>1.120 - 2.250</i>
<i>C</i>	<i>Resistencia media</i>	<i>560 - 1.120</i>
<i>D</i>	<i>Resistencia baja</i>	<i>280 - 560</i>
<i>E</i>	<i>Resistencia muy baja</i>	<i>< 280.</i>

Tabla 1.6. Clasificación de la roca en base a su resistencia

Basándose en los resultados de laboratorio, descripciones de las muestras, fotografías de los sondeos y la geología de detalle hará una Clasificación de las probetas ensayadas de laboratorio conforme a la tabla 6, que le servirán de apoyo para la fase de la integración de los resultados en el informe geotécnico.

La clasificación ingenieril de la roca intacta se basa en las propiedades de resistencia y/o la deformabilidad. En la tabla de la Figura 2.14 se presenta el sistema de clasificación la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) del año 1978.

Por su parte, Deere y Miller (1966), basándose en medidas de resistencia y deformabilidad, establecieron un sistema de clasificación. La clasificación de Deere y Miller utiliza dos parámetros: la resistencia última a la compresión simple (A, B ,...,E) y la relación de deformabilidad, que es el cociente del módulo de elasticidad (tangente al 50% de la resistencia) y la resistencia a la compresión simple (H para alta; M para media y L para baja). Figura 2.15.

Grade	Classification	Field identification	Unconfined compressive strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Examples
R0	Extremely weak	Indented by thumbnail	< 1	- ¹⁾	Stiff fault gouge
R1	Very weak	Crumbles under firm blows of geological hammer; can be peeled with a pocket knife	1-5	- ¹⁾	Highly weathered or altered rock, shale
R2	Weak	Can be peeled with a pocket knife with difficulty; shallow indentations made by a firm blow with point of geological hammer	5-25	- ¹⁾	Chalk, claystone, potash, marl, siltstone, shale, rock salt
R3	Medium strong	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife; specimen can be fractured with a single firm blow of geological hammer	25-50	1-2	Concrete, phyllite, schist, siltstone
R4	Strong	Specimen requires more than one blow of geological hammer to fracture	50-100	2-4	Limestone, marble, sandstone, schist
R5	Very strong	Specimen requires many blows of geological hammer to fracture	100-250	4-10	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, peridotite, rhyolite, tuff
R6	Extremely strong	Specimen can only be chipped with the geological hammer	> 250	> 10	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite

1) Point load tests on rocks with unconfined compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

Figura 1.14. Clasificación ISRM (1978)

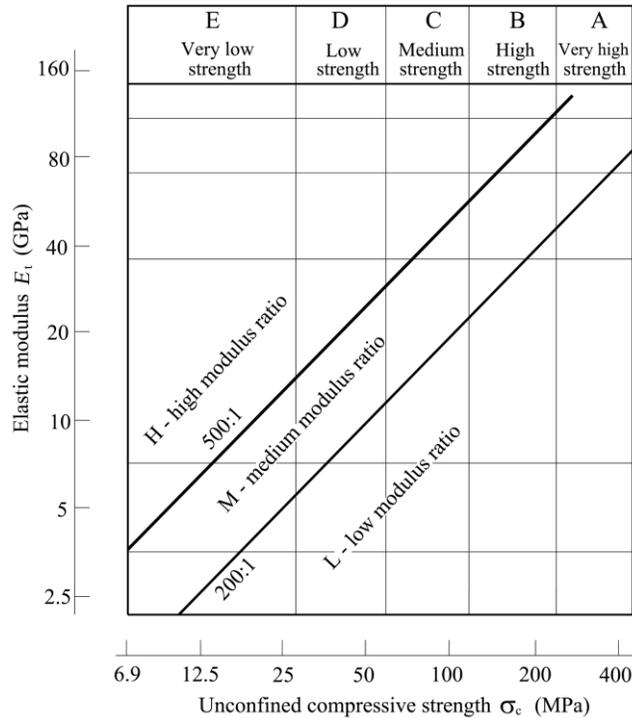


Figura 1.15. Clasificación de Deere y Miller (1966)

Las clasificaciones geomecánicas más difundidas en la ingeniería de túneles son las conocidas como Rock Mass Rating o sistema RMR de Z.T. Bieniawski (1989) y la clasificación del Instituto Geotécnico Noruego, o sistema Q, desarrollado por Barton, Lien y Lunde (1974). Ambas clasificaciones se basan en los datos de recuperación de núcleos, número de familias de discontinuidades, rugosidad y estado general de las juntas, presencia de agua y adicionalmente pueden considerar la resistencia de la roca matriz, la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación y el tipo de obra de que se trate. A continuación se describen cada uno de los dos sistemas.

a) Clasificación RMR_{89}

Toma en cuenta seis parámetros básicos que son:

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

Cada uno de estos parámetros tiene un valor numérico que se suma o resta definiendo cinco categorías de calidad de roca, de acuerdo con la tabla 1.7.

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

Tabla 1.7. Escala de calidades de la Clasificación *RMR*₈₉.

b) Sistema NGI (Q)

El índice de calidad "NGI" o sistema Q de Barton (1974), está basado en la evaluación de seis parámetros, cuyos rangos de valores están definidos de acuerdo a sus características y expresados matemáticamente de la siguiente manera:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

donde:

Q = Índice de calidad del macizo

RQD = Índice de calidad de la roca

J_n = Número de sistemas de juntas

J_r = Número de la rugosidad de las fisuras

J_a = Número de la alteración de las fisuras

J_w = Factor de reducción por la presencia de agua en las juntas

SRF = Factor de reducción por esfuerzos

En las tablas 1.7 y 1.8 se presentan las escalas de calidad geotécnica para cada una de las clasificaciones anteriormente descritas.

Q	CALIDAD
400-1,000	Excepcionalmente buena
100-400	Extremadamente buena
40-100	Muy buena
10-40	Buena
4-10	Regular
1-4	Mala
0.1-1	Muy mala
0.01-0.1	Extremadamente mala
0.-0.01	Excepcionalmente mala

Tabla 1.8. Escala de calidades de la clasificación Q

Es importante recalcar que las clasificaciones geomecánicas son una herramienta de gran utilidad y versatilidad en cada una de las fases de un proyecto relacionado con la mecánica de rocas. En la etapa de anteproyecto nos permiten estimar a grosso modo las características de los sistemas de estabilización y soporte y algunos de los parámetros mecánicos del macizo rocoso. Sin embargo, estas clasificaciones tienen un carácter altamente empírico y, por otro lado, se basan en lecturas de campo y datos extraídos de los sondeos, que son muy puntuales y difícilmente extrapolables a la totalidad del macizo rocoso. El diseño geotécnico definitivo de un túnel no se puede apoyar únicamente en estas clasificaciones y menos aun en los valores obtenidos en la etapa de proyecto. Para que estos métodos sean realmente representativos de la calidad del macizo y, por lo tanto, útiles en el diseño definitivo de los sistemas de estabilización, soporte y reforzamiento del terreno, es necesario llevar un seguimiento geotécnico durante la excavación del túnel e ir ajustando los valores de los diferentes parámetros conforme a lo observado en cada toma de datos.

1.2.3.1 Índice de Calidad de la Roca (ICR o RQD)

Existen parámetros menores que se obtienen directamente de la perforación del sondeo (ver figuras 1.8 y 1.9) como el Índice de Calidad de la Roca (ICR o RQD), basado en la recuperación del testigo al momento de realizar un sondeo. Este método depende también del número de fracturas y del estado en el que se encuentre el macizo (debilitamiento, alteración, intemperismo, etc.).

Se obtiene a partir de la recuperación de los sondeos, y será igual a la suma de los fragmentos de roca recuperados mayores de 10 cm. divididos entre la longitud total del sondeo.

En la siguiente figura se explica con mayor detalle el procedimiento para obtener este índice de calidad.

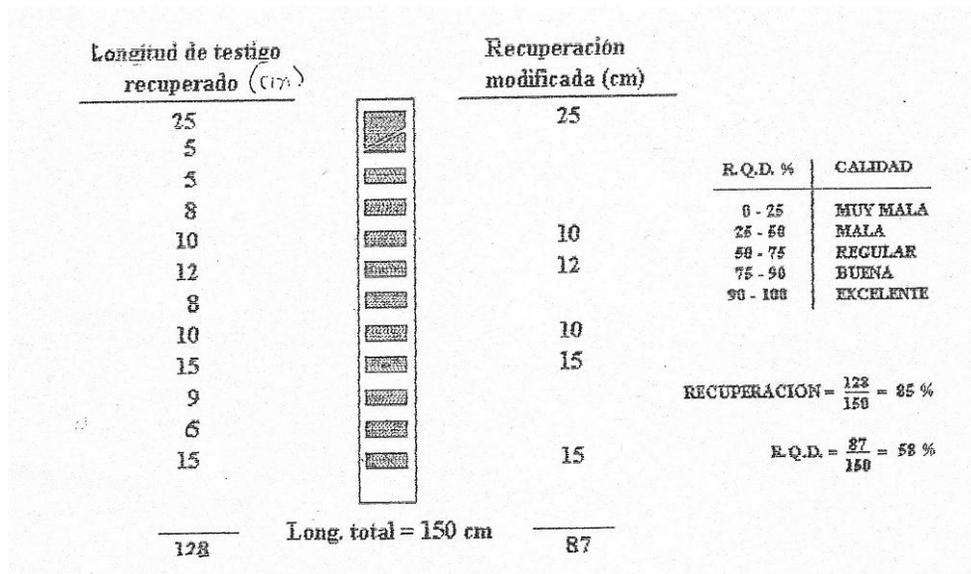


Figura 1.16. Obtención de la recuperación y el RQD.

La recuperación del sondeo en un cierto tramo será igual a la recuperación total del sondeo dividida entre la longitud total del sondeo en el tramo específico.

El RQD será igual a la suma de los fragmentos recuperados mayores de 10cm divididos entre la longitud total del sondeo en un cierto tramo, y el RQD de todo el sondeo será una media de los datos obtenidos de los RQD`s por tramos.

Con esta información se puede obtener un perfil estratigráfico del sondeo, y mediante este perfil se puede trazar un contacto hipotético del macizo rocoso en conjunto con los demás sondeos realizados.

Esta información nos será útil al momento de seleccionar un conjunto de muestras para los ensayos de laboratorio.

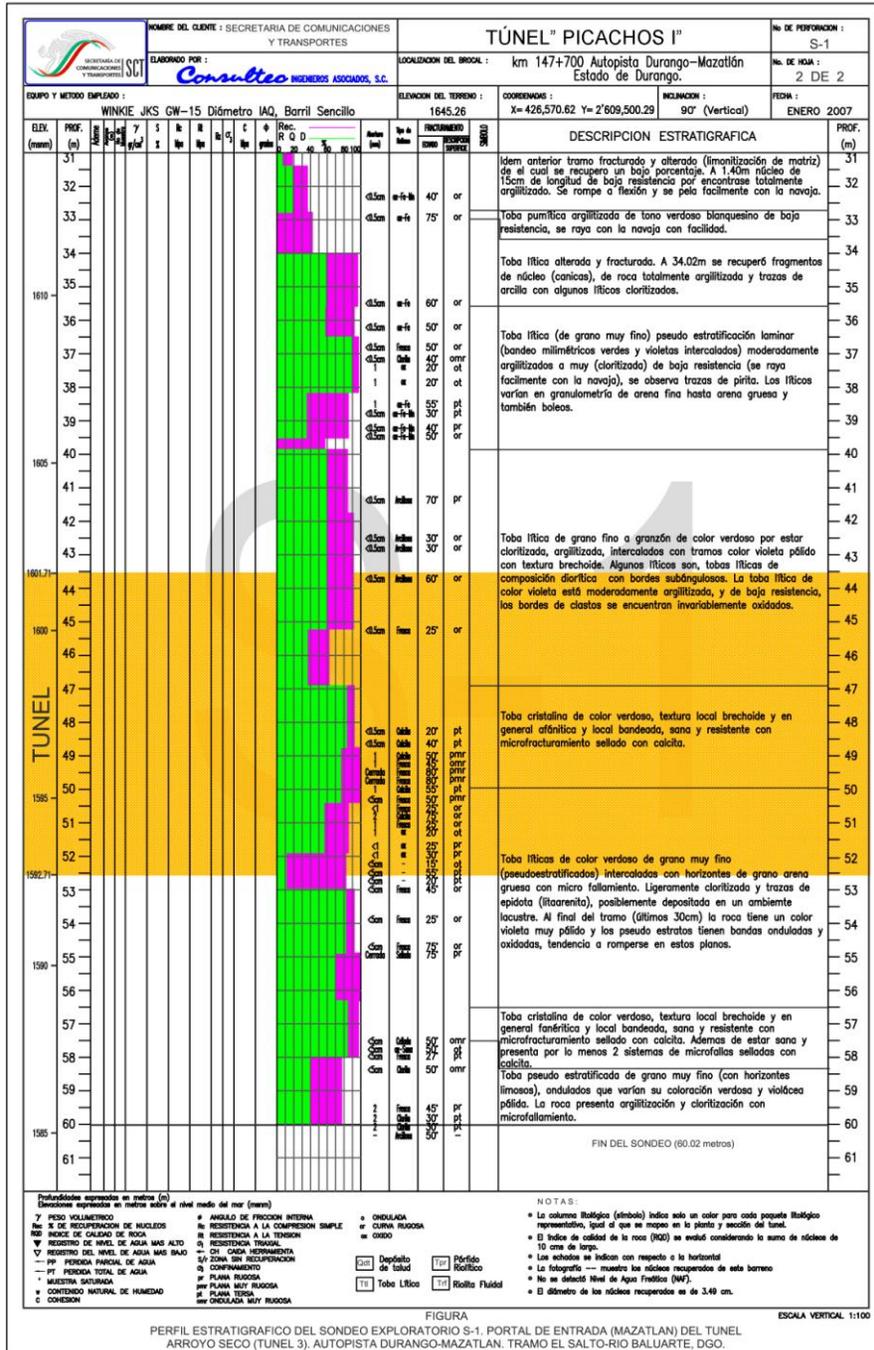


Figura 1.17. Perfil estratigráfico de un sondeo.

La figura 1.17 presenta un perfil estratigráfico de un sondeo, que nos ayudara a seleccionar las muestras de laboratorio para su ensayo. Se aprecia el RQD en color verde y la recuperación en rosa, como también la sección en profundidad donde se alojara el túnel en color amarillo.



**“MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO
EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS”**



2

“LAS PRUEBAS DE LABORATORIO”

2 LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

Introducción

Este capítulo comprende las pruebas de laboratorio necesarias para el diseño de las etapas de excavación, sostenimiento y revestimiento definitivo de un túnel o una excavación subterránea.

2.1 Funcionamiento e instalaciones de un laboratorio.

Para comenzar este capítulo debemos mencionar los procesos o etapas en las que se divide el laboratorio de mecánica de rocas, que son las siguientes:

- Proceso de recepción de muestras.
- Proceso de almacenamiento de núcleos.
- Proceso de obtención de núcleos de fragmentos irregulares de roca y cabeceo de probetas.
- Área para la preparación de muestras de inyección.
- Proceso de preparación de probetas para los distintos tipos de ensaye.
- Área para la ejecución de pruebas índice en especímenes de roca.
- Área para la ejecución de las pruebas mecánicas en especímenes de roca.
- Proceso de archivar el documental histórico.
- Proceso de cálculo e interpretación.

A manera de resumen se describen las áreas antes mencionadas. El detalle de las pruebas realizadas, el equipo y herramienta utilizada en estas áreas se describe mas adelante.

Proceso de recepción de muestras.

Mediante este proceso se reciben los especímenes recolectados en campo por los técnicos laboratoristas, utilizando técnicas de exploración directa, más comúnmente los sondeos. Así mismo, se debe tener un control preciso del material que entra y sale del laboratorio.

Una vez que se realiza la recepción de las muestras de campo, se procede a efectuar una inspección del material, del estado en el que se recibe, el tipo de

transporte, el lugar de procedencia o bien la ubicación del sondeo, el tipo de transporte y una descripción litológica común.

Una vez realizada la recepción se procede a rotular el material de acuerdo al proyecto al que pertenece, el tipo de ensaye que se efectuara, la profundidad a la que se recolecto y la fecha programada para su ensaye.

Proceso de almacenamiento.

Es el proceso mediante el cual se almacena el material sobrante representativo de las muestras ensayadas anteriormente, ya que siempre es conveniente contar con datos fidedignos de primera mano, en cuanto al tipo de rotura del material, su litología, etc. Por ejemplo en un diseño en el que se tenga dudas con los datos obtenidos de laboratorio, siempre se deben conservarse las por un periodo de tiempo establecido.

Por lo general debe ser un área amplia y a temperatura ambiente de tal manera que el material no se deteriore.

Proceso de corte y obtención de muestras regulares de roca intacta.

Introducción

Es el proceso que nos permite extraer los núcleos de roca irregulares y cortarlos a la medida necesaria para su particular tipo de ensaye.

Para la mayoría de los ensayes las muestras deben conservar una geometría o relación de esbeltez de la probeta de 2.5 veces el diámetro de la probeta.

Algunas muestras de roca que llegan al laboratorio son irregulares, por lo que se tienen que obtener los núcleos de roca correspondientes para los distintos ensayes. Los núcleos que se obtienen son de distintos diámetros.

El operador de la maquina debe tener especial atención en la velocidad del avance de la perforación de la muestra, ya que puede ser una roca blanda o muy dura, la velocidad de penetración podría ocasionar desviar el barreno u obtener una muestra irregular fuera de especificación.

Objetivo

Obtener muestras regulares de roca intacta.

Herramienta y equipo.

- Nucleadora,
- Brocas de distintos diámetros,
- Herramienta menor.

Procedimiento.

La muestra de roca se fija y ajusta en el centro de la maquina nucleadora. se empieza a bajar la broca hasta chocar con la muestra.

Se comienza a perforar la roca hasta obtener la muestra para el ensaye.



Figura 2.1 Maquina nucleadora



Figura 2.2 distintos diámetros de broca para la extracción de los núcleos



Figura 2.3 corte del núcleo de roca.

Área para la preparación de los diseños de inyección.

Proceso para diseñar lo que se conoce como lechadas (mezclas de agua, cemento, arena y aditivos) o mezclas químicas. Los macizos rocosos por lo general requieren un tratamiento de impermeabilización o la mejora de sus propiedades geomecánicas.

Proceso de preparación de probetas para los distintos tipos de ensaye.

Cada prueba requiere de una preparación especial de una probeta no basta con el solo corte de esta a una cierta medida; se deben perfilar sus caras para asegurar su horizontalidad, así como también se verifica la planicidad de la misma.

En esta área se asegura que la probeta pase por los estándares de calidad del laboratorio en cuanto a las dimensiones de la probeta.

Introducción

Este proceso es fundamental para tener óptimos resultados en el momento de realizar una prueba, ya que se parte del hecho de que el laboratorista ha dejado la probeta lista para ser montada en el equipo de pruebas.

Una ejemplo de mal preparación de las probetas de laboratorio puede suceder cuando las caras de una probeta no se han dejado paralelas, es decir, completamente horizontales. Esto ocasiona que al momento de aplicar carga axial a la probeta, exista una excentricidad y no se este aplicando la debida carga en el área efectiva de la probeta, y al mismo tiempo ocasiona roturas en la misma que no se tienen contempladas. Y es por eso que debe haber una buena preparación de la probeta y el debido cuidado de esta al momento de cortar las muestras para obtener los especímenes.

Todos los especímenes de roca que se ensayan de laboratorio tienen su particular preparación para ser montados en el equipo de ensaye de la prueba a efectuar; por ejemplo la prueba de corte directo en roca intacta tiene un acabado distinto que la prueba triaxial y la de compresión simple.

Este procedimiento se describe para las probetas de laboratorio cilíndricas con una relación de esbeltez de:

$$\frac{L}{D} = 2.5 \quad (2.1)$$

Donde:

L: es la longitud de la probeta en cm. y,

D= el diámetro de la probeta en cm.

Para esta prueba y las subsecuentes describiré el procedimiento para obtener las dimensiones mas usadas y con las cuales esta estandarizada la tolerancia de las dimensiones de la probeta que varían según el diámetro del sondeo o bien de la broca con la que se extraiga el núcleo de roca.

Objetivo

Obtener las dimensiones requeridas de las probetas para ser montadas en el equipo correspondiente de laboratorio para ejecutar la prueba en cuestión, así como verificar que tanto la planicidad de la probeta como la horizontalidad de las caras de la misma cumpla con los estándares del laboratorio de mecánica de rocas para poder realizar los ensayos programados.

Herramienta y equipo.

- Base lisa y plana,
- Base en forma V
- Lijas de agua y madera N° 300 y 400,
- escuadra,
- nivel de burbuja,
- polvo de esmeril del numero 400 y 300,
- soportes para indicador de caratula,
- indicador de carátula con resolución mínima de 0.0025mm y 0.01mm.

Procedimiento.

El aseguramiento de la horizontalidad de las caras de la probeta, así como de la verticalidad de la misma se hace de la siguiente manera.

Sobre la base lisa y plana se vierte un poco de polvo de esmeril o bien se coloca una de las lijas donde se pondrá una de las caras de la probeta y se comenzara a lijar de tal manera que se empiece a desgastar la zona que se encuentra a desnivel. Una vez que se ha lijado lo suficiente la zona que esta a desnivel se procede a tomar la horizontalidad con la escuadra.

Cuando la probeta esta lista en una de sus caras se procede a efectuar el acabado de la otra cara, ahora colocando la probeta sobre la cara que ha sido elaborada sobre una superficie plana y asegurando que esta superficie se encuentra completamente horizontal, de tal manera que con el nivel de burbuja se puede dar cuenta de donde esta el desnivel de la otra parte de la cara.

Una vez que las dos caras de la probeta han sido elaboradas, entonces se procede a tomar las lecturas de las diferencias entre las superficies de las caras; el procedimiento es el siguiente:

A las dos caras de la probeta se le dibujan tres círculos uno en el centro otro a la mitad y otro mas en el extremo y con el indicador de 0.0025mm debidamente colocado sobre su soporte se van tomando las lecturas en cuanto a las diferencias de elevaciones sobre la superficie de la cara de la probeta.

Para que la probeta este debidamente elaborada es necesario que no rebase la lectura de 0.038mm de izquierda a derecha, en caso de ser así la probeta será rechazada por el encargado del laboratorio que tiene la obligación de inspeccionar este proceso.

Para el caso de la verticalidad no es necesario ningún tipo de desgaste de la probeta, ya que este hecho si puede afectar el proceso de la prueba, lo que se hace en este caso simplemente es tomar las lecturas de las diferencias longitudinales de la siguiente manera:

Sobre la cara de la probeta se trazan ángulos a cada 270° , se trazan las proyecciones de estos ángulos sobre la pared de la probeta, y se coloca sobre una superficie que permite la libre rotación de la probeta para que el micrómetro debidamente colocado en su soporte tome las lecturas verticales de la probeta siguiendo la traza de los ángulos antes referidos.

La probeta debe tener una lectura máxima de 0.58mm de diferencia entre toda la longitud, en caso de no ser así la probeta no es rechazada, simplemente se hace la anotación de las lecturas que se tomaron.

Cuando las muestras de campo provienen de sondeos, es común que los barrenos de la perforación no estén completamente verticales y es por esta razón que las probetas puedan estar curvas, del mismo modo afecta la astucia y la experiencia que tenga el sondista para realizar los trabajos.

Aparte de realizar la elaboración de la probeta y tomar las lecturas, es responsabilidad del laboratorista verificar que los micrómetros cuenten con su certificado de calibración que los acredite para efectuar las lecturas en óptimas condiciones.

Una vez que se termino de elaborar la probeta los resultados de las lecturas tomadas del levantamiento de las probetas son colocadas en su respectivo formato de laboratorio.

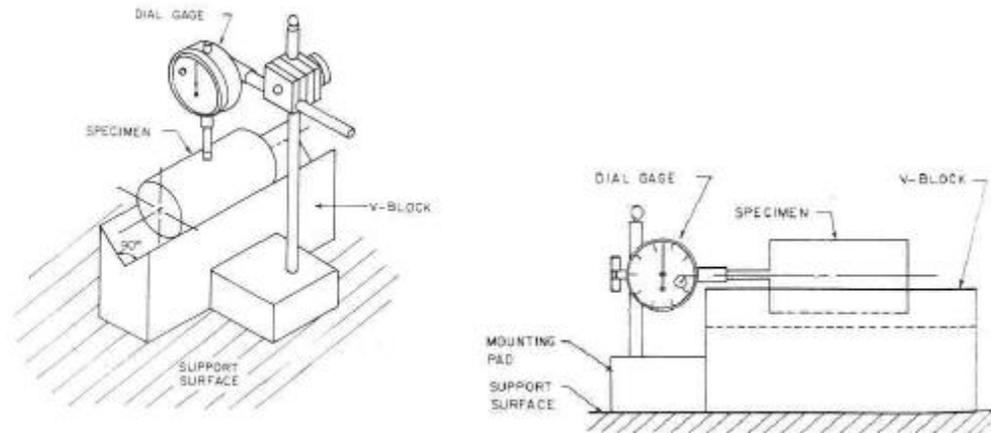


Fig. 2.4. Dispositivos para medir la horizontalidad y la planicidad de la probeta.

Área para la ejecución de pruebas índice.

En esta área se realizan las siguientes pruebas a los especímenes de roca intacta:

- Contenido de agua.
- Índice de alteración y absorción de la roca.
- Intemperismo acelerado.
- Dureza
- Obtención del peso volumétrico, húmedo y seco.
- Saturación al vacío.

Área para la ejecución de las pruebas mecánicas en especímenes de roca.

En esta área se realizan las siguientes pruebas a los especímenes de roca intacta:

- Consolidación y Corte directo.
- Velocidad sónica.
- Compresión simple y con módulo de deformabilidad ($E_{t50\%}$).
- Resistencia a la tensión indirecta (brasileña).
- Resistencia a la compresión triaxial no drenada.

Proceso de archivar el documental histórico.

Proceso mediante el cual se almacenan los resultados e informes técnicos de las diferentes pruebas y proyectos realizados en el laboratorio, realizadas a lo largo de cierto tiempo. El laboratorio debe contar con un espacio amplio debiéndose hacer una apropiada selección, clasificación y control para su localización inmediata.

Proceso de obtención de los resultados.

Proceso mediante el cual se capturan, grafican y analizan los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio. Cuando se efectúa un ensayo de laboratorio y una vez terminada la prueba los resultados son plasmados en su correspondiente formato y registro, obteniéndose parámetros geomecánicos, de resistencia, de deformabilidad, etc. información que se emplea para los análisis de diseño

2.2 Planeación, selección de muestras y programación de las pruebas de laboratorio.

Las pruebas de laboratorio se programan de acuerdo a la problemática y proyectos de las futuras obras y se establecen prioridades de estudios.

Además de conocer las normas y procedimientos de las pruebas de laboratorio, se debe tener conocimiento sobre la operación de los equipos de laboratorio.

La selección de las muestras debe hacerse en función del proyecto, litología y representatividad del sondeo.

Este es un procedimiento y análisis de laboratorio, es básico para obtener buenos resultados, si se realiza una mala selección de las muestras los resultados no serán confiables para los diseños geotécnicos.

Una buena selección de muestras de laboratorio depende de la calidad de la roca y del tipo y calidad del sondeo realizado, y algunas veces también dependerá del lugar donde se realice el sondeo.

La maquinaria utilizada y experiencia del perforista influye en la calidad de las muestras que se obtienen.

Las muestras de roca intacta seleccionadas no deben tener planos de fractura o microfisuras que puedan influir en los resultados del ensaye.

Los elementos para realizar una buena selección de las muestras son los perfiles litológicos que permiten identificar las unidades litológicas por donde pasara la excavación.



Figura 2.5 Muestra de roca

La figura 2.5 nos muestra la probeta del lado izquierdo y la misma probeta del lado derecho después de ensayarse, nótese que la muestra contiene fracturas y microfisuras con relleno de alteración de la misma roca que influirán en malos resultados, lo que indica que es una mala selección de la probeta, aunque si la roca intacta es la mas representativa de la masa de roca, la selección es apropiada.



Figura 2.6 juego de probetas para el ensaye triaxial

En la figura 2.6 se puede observar un juego de probetas para el ensayo de compresión triaxial, se puede observar que la litología de las probetas es homogénea y anisótropa, la desviación de los resultados será reducida, solo habrá que asegurarse que las muestras sean representativas de la formación litológica o de la masa rocosa.

2.3 Procedimientos para determinar las propiedades índice y geomecánicas de la roca Intacta.

Introducción

Para obtener los parámetros geomecánicos de la roca intacta que se empleará en el diseño geotécnico de excavaciones debemos enlistar las pruebas del laboratorio

que se mencionaran en este capítulo; se mencionaran por cada prueba el objetivo, el equipo, la herramienta y los cálculos necesarios para llevar a cabo los ensayos.

1. Contenido de agua.
2. Peso volumétrico.
3. Dureza.
4. Intemperismo acelerado.
5. Índice de alteración y absorción.
6. Compresión Simple y con Módulo de Elasticidad (Modulo de Young).
7. Compresión triaxial.
8. Tensión indirecta.
9. Corte directo

2.3.1 Contenido de agua.

Introducción

El contenido de agua es la relación entre el agua total que existe en una muestra de roca y la masa total del material solidó dentro de esta expresado en porcentaje.

Objetivo.

Determinar la cantidad de agua total contenida en la muestra.

Herramienta y equipo.

- Horno de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C.
- Balanza digital de 0.01g de resolución mínima,
- Recipientes de vidrio (refractario),
- Pinzas y guantes.

Procedimiento;

Antes de iniciar la prueba es necesario verificar que la herramienta se encuentre en óptimas condiciones al mismo tiempo verificar que tanto el horno como la balanza digital cuenten con su certificado de calibración vigente.

Con la balanza digital se obtiene el peso de la muestra más el peso del recipiente de vidrio. Una vez hecho esto se introduce la muestra dentro del horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ c durante 12 a 24 hrs. o bien hasta que la diferencia de pesos de la masa sea menor al 0.01% del peso inicial.

Una vez que se realizo el procedimiento anterior se saca la muestra del horno con el equipo de seguridad para operar el horno (guantes y pinzas), se deja a temperatura ambiente alrededor de 15 min. y se vuelve a tomar el peso de la muestra mas el recipiente de vidrio.

Cálculos:

Contenido de agua de la muestra en gramos.

$$W = \frac{W1 - W2}{W2 - Wc} \times 100 \quad (2.2)$$

Donde:

W: es el contenido de agua.

W1: es el peso del recipiente más la muestra húmeda medida en g.

W2: es el peso del recipiente mas la muestra seca en g.

Wc: es el peso del recipiente que contiene a la muestra en g.

2.3.2 Peso volumétrico.

Introducción

El peso volumétrico se puede obtener para muestras de roca irregulares o bien para probetas; al mismo tiempo también se puede obtener el peso volumétrico seco o el peso volumétrico húmedo.

La diferencia entre el peso volumétrico húmedo y el seco es que el húmedo se deja saturando y el seco se mete al horno para determinar su valor.

Objetivo.

Determinar el peso de la muestra por unidad de volumen que abarca la muestra.

Peso volumétrico en una muestra de roca irregular.

Herramienta y Equipo.

- Picnómetro de sifón.
- Probeta graduada de 0.5 a 1L.
- Balanza electrónica de 0.01g de resolución.
- Horno de $110 \pm 5^{\circ}$ C.
- Herramienta menor.

Procedimiento

Para obtener el peso volumétrico húmedo se pone a saturar la probeta hasta que todos los vacíos de la probeta queden completamente saturados, para la obtención del peso volumétrico seco se mete la probeta al horno a una temperatura de 110 ± 50 C de 12 a 24 hrs. o hasta que la diferencia de masas sea de 0.01% del peso inicial.

Se llena el picnómetro de sifón con agua a una temperatura de $22^0 \pm 1^0$, enseguida se tapa la salida y se introduce la muestra evitando introducir burbujas de aire, una vez que la superficie del agua esta en completo reposo se tapa la salida de agua y se deposita en una probeta graduada, la cual estará recibiendo el volumen de la muestra.

Una vez que se obtuvo el peso de la muestra en el paso anterior se divide entre el volumen desplazado por la muestra en la probeta graduada.

Cálculos:

Entonces el peso volumétrico húmedo queda de la siguiente manera

$$g = \frac{W}{V_d} \quad (2.3)$$

Donde:

g: peso volumétrico de la muestra (seco o húmedo) en kg/m³.

W: peso (seco o húmedo) de la muestra en kg.

V_d: Volumen desplazado de la muestra en m³.

Para el peso volumétrico en probetas cilíndricas

Herramienta y Equipo.

- Vernier.
- Balanza electrónica de 0.01g de resolución.
- Horno de 110 ± 5^0 C.
- Herramienta menor.

Procedimiento.

Para obtener el peso volumétrico húmedo se pone a saturar la probeta hasta que todos los vacíos de la probeta queden completamente saturados.

Para la obtención del peso volumétrico seco se mete la probeta al horno a una temperatura de 110 ± 50 C de 12 a 24 hrs. o hasta que la diferencia de masas sea

de 0.01% del peso inicial. Una vez realizado esto se pesa la probeta en la balanza electrónica.

Con el vernier se toman tres valores de las lecturas del diámetro en forma longitudinal de la probeta arriba, en medio y abajo y se obtiene el promedio de los diámetros y se determina el área de esta. Se toma la lectura de la altura de la probeta y se obtiene el volumen de la misma.

Cálculos:

Con el peso obtenido de la probeta se obtiene el peso volumétrico de la siguiente manera:

$$g = \frac{W}{V} \quad (2.4)$$

Donde:

g: Peso volumétrico de la muestra (seco o saturado) en kg/m³.

W: peso de la muestra (seco o saturado) en kg.

V: Volumen de la probeta en m³.

2.3.3 Dureza.

Introducción

La dureza. Que es una propiedad que esta relacionada directamente con la resistencia de la roca, y depende directamente del grado de alteración y de la composición mineralógica (mientras más mineralizada este una roca mayor sera su resistencia).

La forma más común para medirla es con el martillo Schmidt o esclerómetro. Donde se mide el rebote de martillo y se relaciona con la compresión simple.

A continuación se presenta la escala de Mohs.

Mineral o roca	Índice de dureza	Característica
Diamante	10.0	
Cuarzo	7.0	
Basalto	7.0	
Silex	6.5	
Feldespató	6.2	
Gneis	5.2	

Esquisto	5.0	se raya con un cuchillo
Dolomita	3.7	
Caliza	3.3	
Esquisto-pizarra	3.1	
Calcita	3.0	se raya con una moneda de cobre
Antracita	3.0	
Mármol	3.0	
Carbón bituminoso	2.5	
Mica	2.3	
Yeso	2.0	se raya con la uña
Talco	1.0	

Tabla 2.1. Índice de dureza de la roca.

2.3.4 Intemperismo Acelerado

Introducción.

Esta prueba se realiza en especímenes de roca irregulares y de tamaño pequeño.

Generalmente cuando se realizan los cortes de los núcleos de roca y se obtienen los especímenes que se van a utilizar para los distintos ensayos sobran pedazos de muestras, estos pedazos sobrantes son utilizados para la prueba de intemperismo acelerado.

Esta prueba se realiza a elementos de roca que estarán sometidos en constante contacto con el agua, el sol, la lluvia, el viento, etc. Y por tal motivo se necesita conocer las características con las que cuenta para soportar el intemperismo al que estará sometido.

Objetivo.

Determinar el porcentaje de pérdida de peso y masa debido al intemperismo acelerado.

Herramienta y equipo

- Horno de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C.
- Balanza digital
- Sulfato de sodio.

Procedimiento.

La muestra a la que se le aplica esta prueba es una muestra irregular pequeña representativa de las condiciones litológicas del macizo.

Lo primero es lavar las muestras hasta que la superficie de las muestras quede libre de polvo e impurezas que podrían alterar los datos de la prueba.

Se mete al horno a 1050 C. durante 24 hrs. Una vez transcurridas las 24 hrs. Se pesa la muestra en la balanza digital y se obtiene el peso seco de la muestra que será el peso a comparar al final de la prueba.

Una vez completado lo anterior se comienza el primer ciclo de la prueba que comienza metiendo las muestras en sulfato de sodio, el sulfato de sodio será el agente que intemperice a la muestra junto con el calor del horno y el frío de el agua en la que se pondrá a enfriar a temperatura ambiente.

La muestra durara 24 hrs. en el sulfato de sodio, se sacan las muestras de la sustancia y se dejan escurrir durante 15 min.

Una vez que están secas se vuelven a meter al horno a 105⁰ C. durante 6 hrs. Y de esta manera se completa el primer ciclo.

Este es el procedimiento que se tendrá que repetir hasta completar 5 ciclos, y al concluir el último ciclo las muestras se lavan con agua caliente cada media hora hasta quitarles los residuos del sulfato de sodio.

Al quedar completamente limpias del sulfato de sodio se vuelven a meter al horno durante 24 hrs. Y se obtiene el nuevo peso seco de las muestras que será comparado con el primero que se tomo.

Cálculos.

Se trata de obtener la perdida de peso y el porcentaje de perdida de material de la siguiente forma:

La perdida de peso será:

$$\text{Perdida de peso} = \text{Peso inicial} - \text{Peso final.}$$

El porcentaje de perdida de material será:

$$\text{Porcentaje de perdida de masa} = (\text{perdida de peso} / \text{peso inicial}) \times 100.$$

2.3.5 Índice de alteración y absorción.

Al igual que la prueba de intemperismo acelerado la prueba se aplica para elementos que estarán en constante contacto con el agua.

Esta prueba se aplica a muestras del tamaño de las de tensión indirecta (brasileña).

Es en si una prueba muy sencilla la cual requiere solamente de sumergir las muestras en agua y tomar mediciones en la balanza digital.

Objetivo.

Determinar la absorción y el índice de alteración para muestras de roca inalteradas.

Herramienta y equipo.

- Balanza digital
- Recipiente con agua
- Horno de $110 \pm 5^{\circ}$ C.

Procedimiento.

La prueba es una de las mas sencillas se trata de meter en agua las muestras y tomar los valores de cuanto agua han absorbido en el tiempo.

Se lavan las muestras hasta que la superficie de estas quede totalmente limpia y libre de polvo e impurezas que pudieran afectar los resultados de la prueba.

Se dejan escurrir durante 15 min. y se meten al horno a una temperatura de 105° C. durante 24 hrs. Al terminar este lapso de tiempo se sacan de horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente y se toma su peso seco con la balanza digital.

Se sumergen las muestras en un recipiente totalmente lleno de agua y se toman las lecturas de su peso al pasar 0.5 hrs, 1hr, 1.5 hrs, 3 hrs, 6 hrs, 12hrs, 24, hrs, 48, hrs, 72, hrs, etc. O bien hasta que el peso de la muestra sea igual a 0.001g de la lectura final.

Las muestras a las que se les aplica este tipo de pruebas son muestras de dimensiones pequeñas, existen varios diámetros pero los mas usados son de 3.5 y 4.5 cm. aproximadamente, con una altura alrededor de 2.5 cm.

Cálculos.

Se calcula el porcentaje de absorción de la siguiente manera:

$$\%_a = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \quad (2.5)$$

Donde:

Ph = Peso húmedo de la probeta; en g.

Ps = Peso seco de la probeta; en g.

La grafica del porcentaje de absorción contra el tiempo quedaría de la siguiente manera:

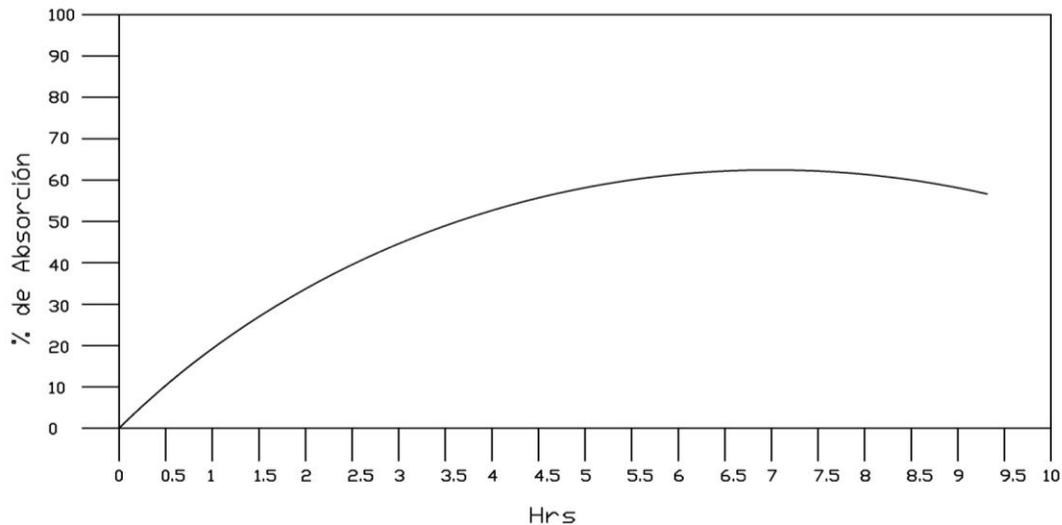


Figura 2.7. Porcentaje de absorción contra el tiempo.

2.3.6 Compresión simple y con Modulo de Elasticidad Et50%

Introducción

Este ensaye tiene el objetivo de determinar la resistencia a la compresión simple y el modulo de elasticidad de una muestra cilíndrica de roca intacta.

La compresión simple es la capacidad que presenta un elemento para soportar una carga en forma axial soportando una deformación en el estado elástico lineal.

Estos parámetros de resistencia de carga axial y modulo de elasticidad son los mas utilizados en el prediseño de excavaciones.

Aunque estos parámetros son estimativos, ya que al momento de realizar las excavaciones debe haber un control en cuanto a las mediciones y ensayes geotécnicos in situ, que den una idea mas clara de los parámetros geomecánicos con los que se esta trabajando.

Esta prueba se puede dividir en dos, ya que por un lado tenemos la resistencia a compresión simple y por el otro el modulo de elasticidad, que pueden hacerse en una sola prueba.

Primero se explicara lo que es simplemente la prueba a compresión simple y después la obtención del modulo de elasticidad.

Antes de operar la prensa de carga se debe verificar que cuente con su certificado de calibración vigente y que se encuentre en condiciones óptimas para ser operada. Las prensas de carga trabajan bombeando aceite por lo que se debe verificar que cuando la prensa esta apagada las válvulas de carga deban estar abiertas media vuelta.

La prensa debe contener un instructivo básico para ser operada, así como la información necesaria de los contrapesos que esta utiliza para las diferentes condiciones de carga que requieren los distintos tipos de material.

Para comenzar la ejecución de la prueba se debe tener en cuenta que el equipo trabaja con una velocidad de carga, por lo que esta velocidad dependerá del material que se este ensayando.

Las fallas pueden ser de tipo frágil y la probeta se puede llegar a desintegrar provocando accidentes sino se cuenta con algún tipo de protección. Es importante por este motivo que los laboratoristas usen su equipo de protección.

La prueba requiere que la probeta sea colocada sobre una base uniforme preferentemente de acero que evite cualquier tipo de desnivel al momento de comenzar la carga.

Como ya se menciona, la prensa trabaja con velocidad por tal motivo existe una relación entre esta velocidad y el tipo de material con el que se esta trabajando. El laboratorista debe tener experiencia en el tipo de material y un contar con valor aproximado de la carga ultima de este, entonces utilizara una carátula especifica (la prensa utiliza diferentes tipos de carátulas referidas a un cierto tonelaje requerido para el ensaye) y cierta masa para el contrapeso del equipo.

Los incrementos de velocidad los dictaminara el equipo al momento de ir ejecutando la prueba la probeta se debe cargar a una velocidad aproximada de 200 kg/min.

Esta debe ser una velocidad constante y por este motivo las pruebas que se ejecuten con la prensa de carga deben hacerse con el uso de un cronometro, del tal forma que el laboratorista siempre debe estar pendiente del tiempo de carga con el fin de ir graduando la velocidad para tener los incrementos de carga deseados.

A continuación se describe brevemente en que consiste la prensa de carga

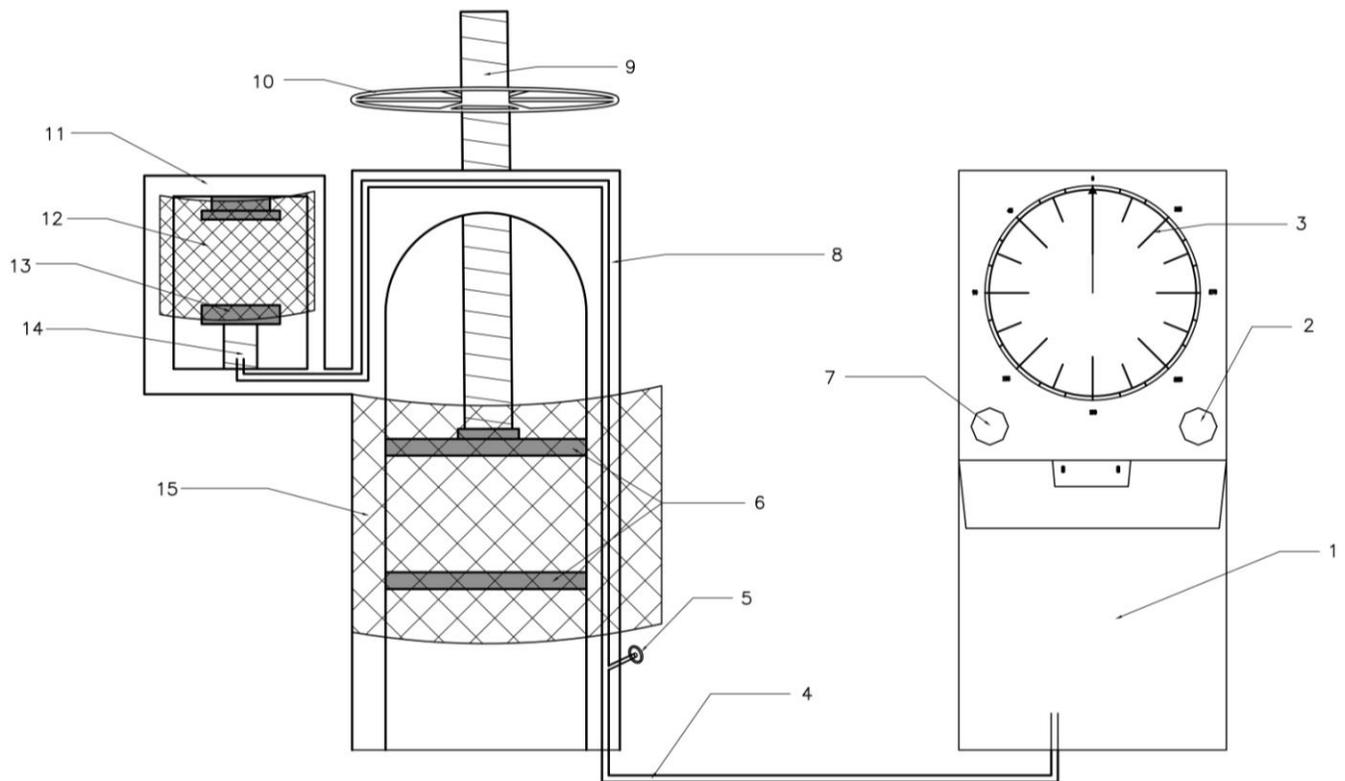


Figura 2.8. Esquema de una prensa de carga sencilla.

1. Mando de control
2. Válvula de velocidad
3. Carátula (de distintos tipos de peso)
4. Tubería de aceite
5. Llave de paso
6. Platinas de acero
7. Válvula de descarga
8. Tubería de aceite
9. Carrete del marco mayor (para pruebas con cilindros mas grandes)
10. Marco de carga menor.
11. Marco menor
12. Platinas de carga del marco menor
13. Carrete del marco menor
14. Protección del marco mayor.

2.3.6.1 Compresión simple

Objetivo.

Determinar la resistencia a la compresión simple de la roca intacta debida a una carga axial.

Herramienta y equipo.

- Prensa de 300 toneladas (con sus respectivos contrapesos y carátulas para realizar diferentes tipos de carga)
- Balanza digital
- Vernier
- Recipientes de vidrio (refractario de varios tamaños)
- Horno de $110 \pm 5^{\circ}$ C.
- Cronometro.

Procedimiento.

Con la balanza digital se toma el peso ambiente de la probeta y se sumerge en un recipiente lleno de agua durante 24 hrs antes de la prueba.

Con el vernier se toman los diámetros superior medio e inferior y se toma el promedio de las lecturas para obtener el área de la probeta, se toma la altura de la probeta y se obtiene el volumen de la probeta. Esto para obtener el peso volumétrico seco y húmedo una vez terminado el ensaye.

Colocar las platinas de metal que servirán de soporte para crear un área efectiva de aplicación de la carga.

Para la prueba de compresión simple no hace falta más que un laboratorista que ejecute la prueba dada la sencillez que esta implica, por lo tanto un solo laboratorista será el encargado de realizar los preparativos de la prueba y la ejecución de la misma.

La velocidad de carga debe ser constante por lo que no se debe perder de vista cualquier variación en la carga que se aplica en función del tiempo, ya que puede suceder que el material en un lapso dado no reaccione con la velocidad que se maneja en un principio por lo que se deberá ajustar nuevamente la velocidad con el cronometro en mano.

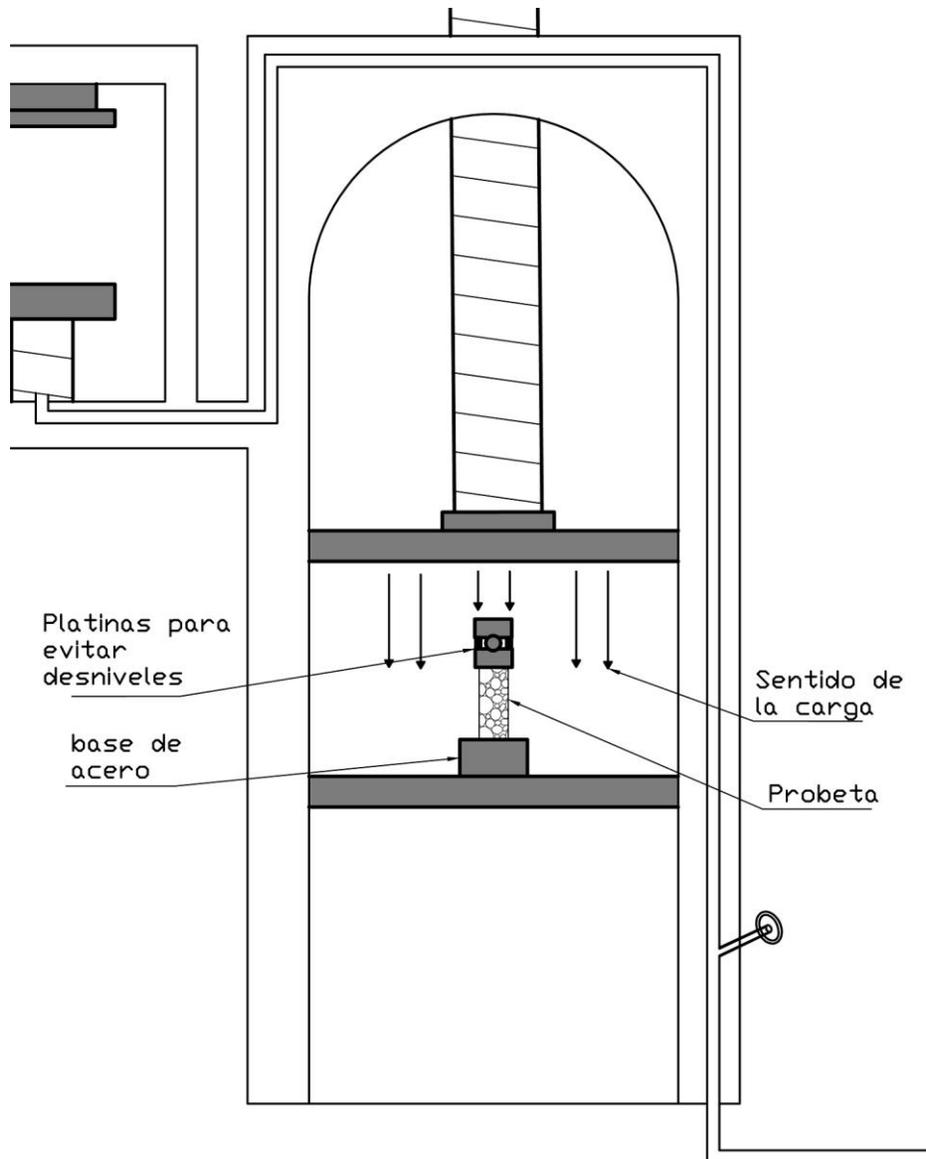


Figura 2.9. Esquema del montaje de la probeta en la prensa.

Una vez que la probeta ha fallado se retiran los restos del material y se colocan en un recipiente de vidrio (refractario).

Se cierra la válvula de carga y se abre la válvula de descarga, que como su nombre lo dice inicia la descarga de la prensa.

Se apaga el equipo y se desmontan los contrapesos así como la carátula utilizada; se limpia el equipo de cualquier sobrante que haya quedado del material fallado y se colocan los utensilios en su respectivo lugar dentro del laboratorio. Al apagar el equipo se cierran las dos válvulas (carga y descarga) y se dejan abiertas media vuelta para evitar que el aceite que circula pueda llegar a atorar las válvulas.

Se toma el peso de la muestra ensayada y se introduce en el horno a una temperatura de 105°C . durante 24 hrs.

Una vez que transcurrieron las 24 hrs dentro del horno se sacan y se pesan en la balanza digital y se obtiene el peso seco de la muestra después del ensaye,

Cálculos:

Todos los datos obtenidos se colocan en el formato correspondiente de la prueba y se hacen los siguientes cálculos:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

Donde:

σ_c : es el esfuerzo a compresión simple en kg/cm^2 .

F: carga ultima de la probeta en kg.

A: área de la probeta en cm^2 .

El contenido de agua de la probeta tanto seco como húmedo se obtiene como se menciona en la prueba del mismo nombre, así como también el peso volumétrico húmedo y seco antes y después de la prueba.

2.3.6.2 Determinación del módulo de elasticidad

El modulo de elasticidad es la medida en la que un elemento puede soportar deformaciones debidas a una carga antes de su rotura.

Objetivo.

Determinar el módulo de elasticidad en una muestra de roca intacta de forma cilíndrica.

Herramienta y Equipo.

- Prensa de 300 toneladas (con sus respectivos contrapesos y carátulas para realizar diferentes tipos de carga)
- Balanza digital
- Vernier
- Recipientes de vidrio (refractario de varios tamaños)
- Horno de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Cronometro.

- Dispositivo para medir las deformaciones de la probeta (Strain-Gage o Indicadores de carátula de 0.001mm).
- Soportes para los indicadores de carátula.

Procedimiento.

Se debe verificar que las bases de acero de la prensa de carga se encuentren libres de cualquier residuo peligroso o remesas de pruebas anteriores.

Con la balanza digital se toma el peso ambiente de la probeta y se sumerge en un recipiente lleno de agua durante 24 hrs antes de la prueba.

Con el vernier se toman los diámetros superior medio e inferior y se toma el promedio de las lecturas para obtener el área de la probeta, se toma la altura de la probeta y se obtiene el volumen de la probeta. Esto para obtener el peso volumétrico seco y húmedo una vez terminado el ensaye.

Colocar las platinas de metal que servirán de soporte para crear un área efectiva de aplicación de la carga.

Para la obtención del modulo de elasticidad en la prensa de carga mediante indicadores de carátula, la prueba requiere de dos anillos metálicos, uno de ellos sirve para sujetar los indicadores de carátula y el segundo sirve de base para el vástago de los indicadores que ira marcando las deformaciones de la probeta.

Esta prueba requiere de dos laboratoristas para su ejecución; el que operara el equipo y el que tomara las lecturas de los indicadores de carátula.

Se necesitan por lo menos 10 lecturas para poder obtener el E50%. Por lo que el laboratorista que aplique las cargas deberá tener atención especial en como se va deformando la probeta; es decir, si al momento de aplicar las cargas se observa que dos lecturas anteriores son muy similares es momento de aplicar un ligero aumento en la velocidad de carga, sin descuidar el limite de rotura de la probeta, aquí interviene la astucia del laboratorista para observar el tipo de material con el que esta trabajando y saber cuales son los incrementos de carga que aplicara para obtener las 10 lecturas que se necesitan para determinar el modulo de elasticidad al 50%.

Una mala aplicación de la carga podría generar que el material no soportara la velocidad con que se esta cargando y llegara al limite de rotura antes de obtener mínimo 10 lecturas de los indicadores o cualquier dispositivo de deformación con el que se cuente (se pueden utilizar strain-gages) para realizar el ensaye.

Los indicadores deben ser colocados de tal manera que la distancia a la probeta sea equidistante para los dos dispositivos de medición, cercanos a la mitad de la altura de la probeta.

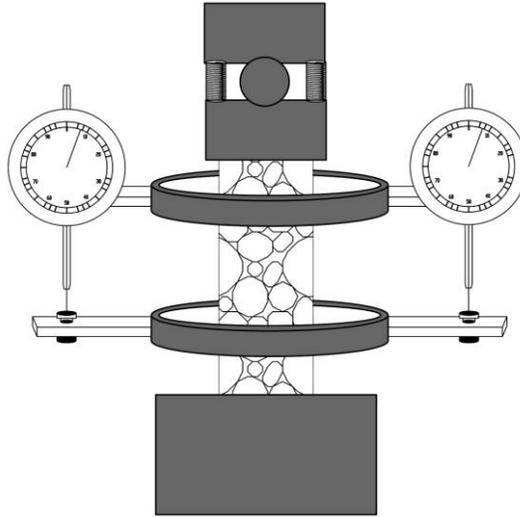


Figura 2.10. Esquema de los elementos necesarios para medir las deformaciones.

El laboratorista que tomara las lecturas de los indicadores de carátula tiene la obligación de dictar las deformaciones de forma clara y estar al tanto de las deformaciones de la probeta; el laboratorista que opere el equipo tiene la obligación de ir graduando la velocidad de carga e indicar 5 segundos antes el momento de realizar las lecturas de los indicadores.

La carga será de forma constante hasta que las lecturas de las deformaciones sean iguales, de manera que la probeta fallara de 5 a 15 min. después de iniciar la carga.

Una vez que se obtuvieron las suficientes mediciones para determinar el modulo de elasticidad al 50% y obtener la grafica esfuerzo deformación, se para la carga, se cierra la válvula de carga y se abre la válvula de descarga para desmontar los anillos que soportan a los deformímetros, se vuelve a montar la probeta pero sin estos soportes de manera que ahora solamente se aplicara la carga sin realizar mediciones hasta llegar a la ruptura de la muestra y obtener el esfuerzo final.

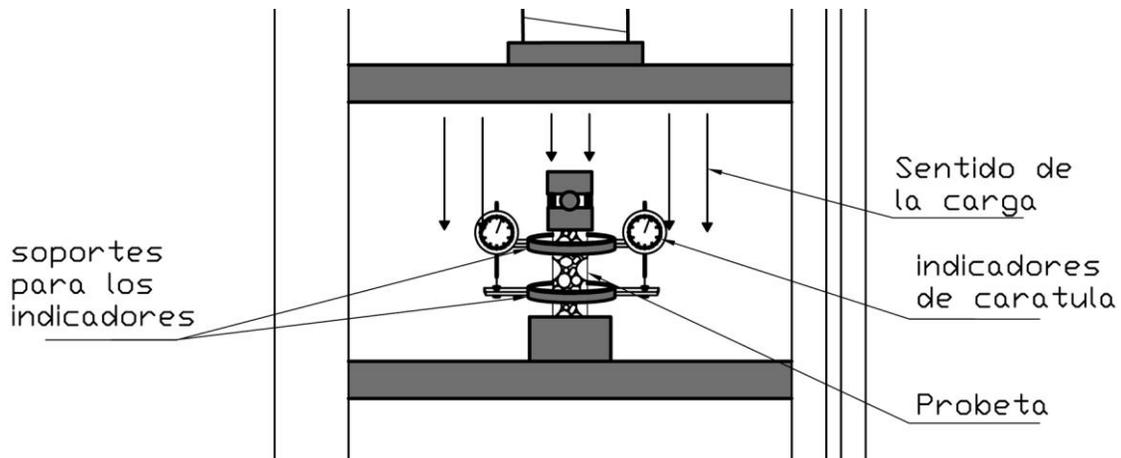


Figura 2.11. Esquema de la aplicación de la carga de la prueba para la determinación del E50%.



Figura 2.12. Probeta montada con el equipo de laboratorio.

Cálculos.

Primero de debe calcular la deformación axial, esta operación depende del equipo que se use; es decir para los strain-gage. La deformación axial será dada automáticamente por estos lectores de deformación, mientras que para los indicadores de carátula la deformación tendrá que ser calculada de la siguiente manera.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.7)$$

Donde:

ε_a : deformación axial unitaria.

ΔL : deformación axial

L: longitud total de la probeta.

El siguiente paso es calcular el esfuerzo a compresión, con la carga última y el área obtenida antes de la prueba.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

Donde:

σ_c : es el esfuerzo a compresión simple en kg/cm².

F: carga ultima de la probeta en kg.

A: área de la probeta en cm².

Existen varias formas de determinar el modulo de elasticidad; en este caso utilizaremos la forma mas practica y común en un laboratorio que es obtenerlo como la relación de la variación del esfuerzo a compresión y la deformación axial unitaria.

Directamente de la grafica de Esfuerzo-Deformación obtenida durante el proceso de la prueba de laboratorio; se tiene lo siguiente:

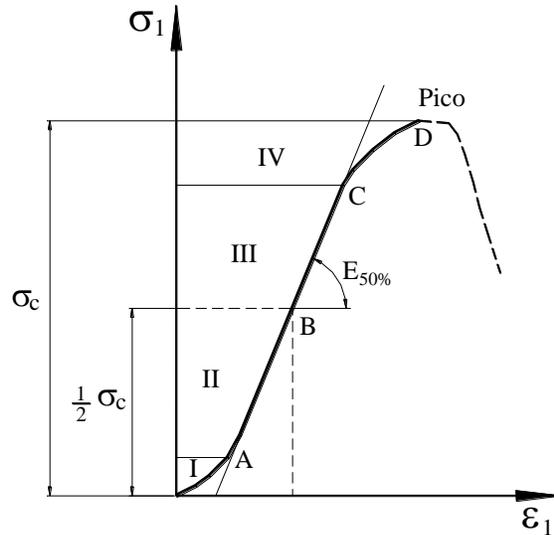


Figura 2.13. Esfuerzo- Deformación axial unitaria para poder obtener el E50%

La zona I de la grafica representa un estado inelástico en el que la probeta comienza a experimentar un cierre de pequeñas fisuras y porosidad inherente a la roca.

La zona II es una zona elástico-lineal, en el que el material sufre un comportamiento de "roca virgen"; y es en este momento en el que tanto el modulo de elasticidad y el modulo de Poisson se encuentran relacionados con las deformaciones mediante la ley de Hook.

En la zona III comienza el microfisuramiento de la roca, al mismo tiempo el material comienza a perder la linealidad que presentaba a partir de la zona II para entrar en la etapa de plasticidad. En esta zona la propagación de las microfisuras es directamente proporcional al esfuerzo s , por lo tanto la muestra esta condicionada a los incrementos de carga.

En la zona IV la muestra comienza a presentar fracturamiento y es en este momento en el que las deformaciones y el fracturamiento del material ya no dependen de s ; es decir, una vez que se para la carga de la maquina, la probeta sigue sufriendo los estragos de el esfuerzo axial.

Una vez que se obtuvieron los datos de la prueba se grafican los datos de esfuerzo axial y deformación unitaria para entonces obtener el modulo de elasticidad.

Existe la relación del diámetro de la probeta para determinar el modulo de elasticidad de esta donde el modulo estará determinado directamente en función del diámetro de la probeta. Es decir la deformación unitaria quedaría como sigue:

$$\epsilon_d = \frac{\Delta d}{d} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_d = \Delta d/d.$$

Donde:

d: Es el diámetro original de la probeta, en cm.

Δd : deformación lateral.

La grafica esfuerzo deformación quedaría exactamente igual solo que relacionada con el diámetro de la probeta. Y de aquí partimos para obtener el modulo de Poisson de la relación que existe entre la deformación longitudinal y la deformación axial. De la siguiente manera:

$\nu = - E \text{ de la curva axial} / E \text{ de la curva lateral}$; Es decir;

El modulo de Poisson será la relación entre el modulo de Young de la curva esfuerzo deformación de forma axial E_a y el modulo de Young de manera lateral E_d

A continuación se presentan algunos valores del modulo de elasticidad de roca y suelos mas comunes.

Rocas:	E =
Basalto	800000
Granito de grano grueso y en general	100000 - 400000
Cuarcita	100000 - 450000
Mármol	800000
Caliza en general	100000 - 800000
Dolomita	100000 - 710000
Arenisca en general	20000 - 636000
Arenisca calcárea	30000 - 60000
Arcilla esquistosa	40000 - 200000
Gneis	100000 - 400000

2.3.7 Resistencia a la compresión triaxial no drenada en muestras cilíndricas de roca intacta.

Introducción.

La resistencia a la compresión triaxial no drenada es una prueba que en mecánica de rocas y en suelos trata de representar las condiciones de esfuerzos in situ.

Para esto existen condiciones de confinamiento que varían en incrementos constantes para cada ensayo triaxial.

Esta prueba permite conocer el esfuerzo a compresión y las propiedades elásticas de la roca, así como la resistencia a un esfuerzo cortante debido a varios esfuerzos laterales ocurridos por el esfuerzo desviador, lo que provoca una falla lateral con un ángulo que casi siempre es entre 45° o mayor y que comúnmente se le conoce como falla tipo Mohr-Coulomb, al mismo tiempo se obtiene el ángulo de fricción interna, la cohesión y el módulo de Young de la roca gracias a las graficas que se obtienen de las probetas ensayadas del mismo tipo de material.

Para esta clase de pruebas se preparan tres pares de muestras del mismo tipo de material, ya que deberá existir una relación entre estas muestras ensayadas que nos permita graficar los círculos de Mohr y poder obtener una ley de resistencia para el tipo de roca a ensayar.

Este procedimiento no contempla la presión de poro, así que los datos obtenidos estarán en función del esfuerzo total.

Las muestras de laboratorio que se eligen para los ensayos de compresión triaxial deben ser juegos de tres muestras de la misma litología, y deben ser escogidas a profundidades continuas de diferentes secciones de la excavación, es decir, el juego de muestras triaxiales serán escogidas en la clave de la excavación, a la mitad de esta y en la subrasante.

Al estar escogidas a diferentes profundidades las pruebas triaxiales tendrán distintas presiones de confinamiento, a mayor profundidad las presiones de la masa rocosa son mas grandes, entonces se tendrá que las muestras seleccionadas conforme a la profundidad a la que estén se les asignaran valores de confinamiento por ejemplo de 7.5, 15 y 30 Mpa.

Los especimenes tendrán que ser seleccionados a partir de su formación litológica y de que tan representativos son del macizo rocoso. Esto se puede hacer observando el material y tomando en consideración los minerales que contiene, la forma, el tamaño, el color de los clastos y de la probeta, fisuras, porosidad, etc.; y como ya se menciono anteriormente se tendrán que escoger tres pares de probetas del mismo material para distintos esfuerzos confinantes.

La cámara triaxial es un dispositivo que permite reproducir las condiciones del sitio mediante un fluido confinante que varia en presión. A continuación se presenta un esquema común de la cámara triaxial

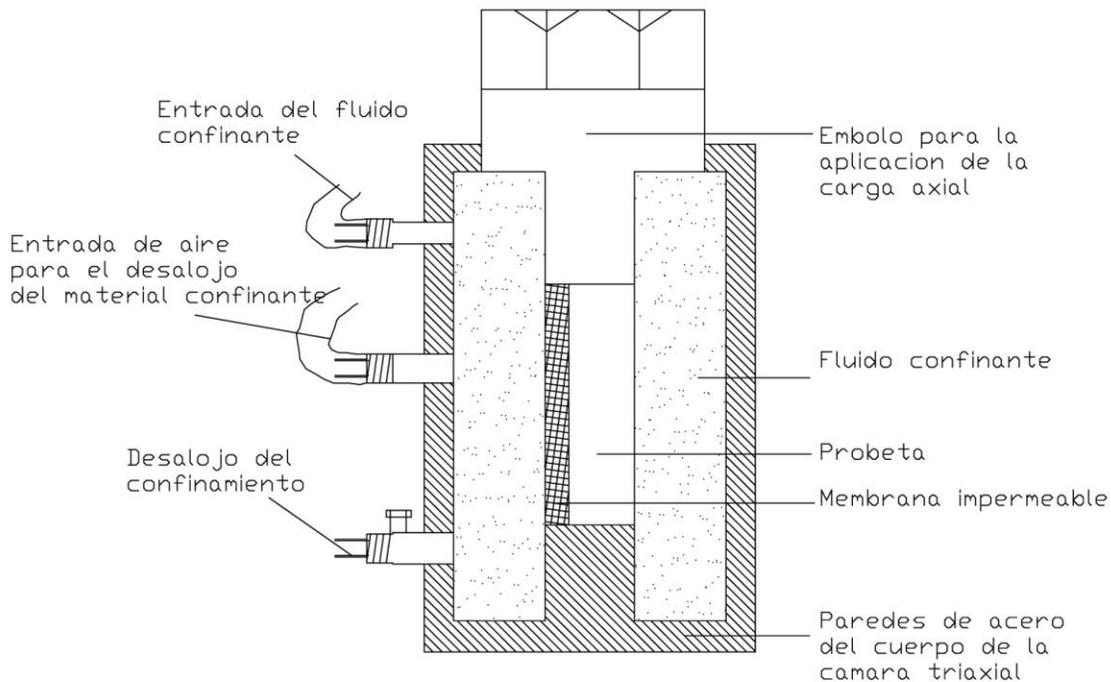


Figura 2.14. Esquema de una cámara triaxial común utilizada para los ensayos en roca.

El funcionamiento de la cámara es el siguiente: La cámara triaxial contiene tres entradas una para el confinamiento, otra para el aire a presión que se encargara de vaciar la cámara una vez terminada la prueba, y la ultima de estas salidas es para el confinamiento excedente y para sacar el total de este una vez terminada la prueba (figura 2.14).

El confinamiento puede ser a base de agua, glicerina, aceite o cualquier material que pueda proporcionar cierta presión y tenga cierta viscosidad, normalmente se acostumbra usar aceite hidráulico para el confinamiento de la probeta.

Se pueden usar strain-gage o indicadores de carátula para las mediciones que la prueba requiere. El strain-gage dará lecturas directas a una computadora, mientras que para los indicadores de carátula se tendrá que hacer lecturas directas y pasarlas después a mano a una hoja de Excel o bien pasarlos directamente al programa predefinido.



Figura 2.15. Equipo y material para la prueba de compresión triaxial

Objetivo.

El objetivo es reproducir las condiciones de esfuerzos in situ en el laboratorio y obtener los parámetros geomecánicos de la roca.

Herramienta y equipo.

- prensa hidráulica de 300 ton.
- balanza electrónica o digital de 0.01g de resolución.
- Refractario básico de laboratorio.
- Cámara triaxial capaz de soportar presiones de confinamiento de 100 Mpa,
- Talco.
- Herramienta menor de laboratorio (martillo, llaves, desarmadores, etc. Para la manipulación de la cámara triaxial).
- Dispositivo de medición de las deformaciones (Strain-Gage o indicadores de carátula con resolución mínima de 0.001mm).
- Horno de $110 \pm 5^{\circ}$ C.

Procedimiento.

Esta prueba viene precedida por la saturación de las muestras a ensayar en agua 24 hrs antes de la ejecución de la misma (este tiempo de saturación varia de acuerdo al tipo de roca pudiendo llegar hasta días saturando).

Se toma el peso húmedo de la probeta, así como las dimensiones de esta, se dibuja sobre el espécimen las fracturas o fisuras considerables que este pudiera

tener, de tal manera que se hace referencia a los posibles modos de falla que la probeta puede llegar a sufrir debido a fisuras y fracturas.

Se prepara el equipo a utilizar y se verifica que todo el equipo cuente con su certificado de calibración vigente para ser operado.

Se verifica que la prensa se encuentre en buen estado, así como que los contrapesos estén calibrados. La cámara triaxial debe encontrarse además de en perfectas condiciones para su uso, limpia y sin residuos de pruebas anteriores, se debe verificar que los mecanismos de la cámara funcionen correctamente (llaves de paso, cierre, embolo, etc.).

El dispositivo para aplicar la presión de confinamiento debe tener indicadores que marquen la presión de confinamiento correctamente y que este no contenga fugas de ningún tipo del fluido confinante.

Todas las mangueras y conexiones que requiere la prueba, tanto para el paso del confinamiento como para el paso del aire a presión para terminar de desalojar el material, deben estar en buenas condiciones para su uso, no deben contener enmendaduras ni roturas por donde pudiera escapar el material de confinamiento.

Se aplica una cierta cantidad de talco a la probeta para evitar que esta sufra algún tipo de fricción debido al material aislante impermeable que se le colocara para evitar el contacto con el confinamiento.

Normalmente en suelos se utiliza un material de látex para realizar las compresiones triaxiales, en roca se utilizara una membrana de hule lo suficientemente fuerte que permita la presión del material de confinamiento sin romperse, pero al mismo tiempo lo suficientemente dócil como para pasar desapercibido durante la ejecución de la prueba. El material de hule es colocado con el cuidado de no provocar alguna fractura en la muestra o fisura de consecuencia que afecte la ejecución de la prueba.

Dependiendo del equipo que se utilice para realizar las mediciones, la prueba requerirá ya sea de dos laboratoristas o tres laboratoristas. En el primer caso se tratara de strain-gages que mandan los datos directamente a un equipo de cómputo, de tal manera que un laboratorista se encargara de aplicar la carga axial y otro de mantener la presión de confinamiento estable. En el segundo caso se tratara del laboratorista que aplica la carga axial y el que aplica la presión de confinamiento y uno más que tendrá que leer los indicadores de carátula.

Cuando los dispositivos para las mediciones están listos se comienza tomando un cero

Se comienza cargando la probeta un poco con la prensa, hasta que las agujas de la prensa se muevan un poco, en ese momento se para la carga y se comienza a operar lentamente el dispositivo para generar el confinamiento requerido,

manteniendo este en la presión de diseño requerida. Una vez que la presión de confinamiento esta lista se comienza a cargar la probeta axialmente de manera constante e ininterrumpida, de tal manera que esto debe ser simultaneo para evitar deformaciones debidas al esfuerzo desviador. Dependiendo del proceso de la prueba, la velocidad de carga podrá ir aumentando o disminuyendo apartir de 200 kg/min.

El mando de la prueba lo tendrá el laboratorista encargado de operar la prensa hidráulica, ya que será este quien aplicara los incrementos de carga axial a la probeta, el segundo laboratorista como ya se menciona anteriormente se encargara de mantener la presión de confinamiento; por lo que será el primer laboratorista quien con reloj en mano dicte los tiempos para tomar lecturas o regular la carga.

Una vez que el espécimen ha fallado se descarga la prensa y se cierran las válvulas de carga. Se deja pasar un tiempo en lo que las platinas de la prensa se relajan para poder sacar la cámara triaxial y se descarga poco a poco de la presión confinante. Una vez que la cámara esta libre se abre la llave de descarga para sacar el confinante y se conecta la manguera del aire a presión para terminar de sacar todo el liquido que se pudiera haber quedado pegado en las paredes y piso de la cámara triaxial.

Se obtiene la probeta con el cuidado de no dañar los fragmentos de la muestra. Se quita con cuidado el hule que sirvió para proteger el espécimen dentro de la cámara, se obtiene la muestra ensayada y se coloca en uno de los refractarios, donde se anotara el número de refractario y la muestra que se coloco.

Una vez terminado este proceso la muestra es introducida en el Horno de 110 ± 50 C. por un lapso de 24 hrs. Donde una vez pasado este tiempo se tomara el peso seco de la probeta y se realizaran los cálculos correspondientes.

Como ya se menciona con esta prueba obtenemos una ley de resistencia de la roca intacta por los círculos de Mohr, y es por esta razón que se requiere que las pruebas de este tipo se hagan en juegos de tres probetas de materiales similares ya que debe existir una correlación entre los resultados para poder realizar las graficas correspondientes y obtener resultados satisfactorios.

No se pueden elegir dos pares idénticos y uno que no sea del mismo material, ya que el resultado podría generar resultados inesperados, o bien elegir tres probetas muy distintas en cuanto a litología. La elección de las muestras debe hacerse partiendo de la misma profundidad del sondeo.

Esta prueba requiere un control por parte de los laboratoristas en cuanto a la hora de comienzo de la prueba y la hora de término de la prueba, el laboratorista encargado de la prueba hará una pequeña descripción de la probeta y trazara una posible trayectoria de la rotura de la muestra.



Figura 2.16. Cámara triaxial montada en la prensa de carga junto con indicadores de carátula

En la figura 2.16 se muestra la configuración de la cámara triaxial montada en la prensa de carga, en este caso los aparatos de medición de deformaciones son indicadores de carátula con una resolución mínima de 0.01mm, y al mismo tiempo se observa que los aparatos son colocados en cada esquina de las placas de carga de la prensa, de tal manera que las deformaciones finales serán calculadas como el promedio de las cuatro mediciones por carga aplicada.

Cálculos:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$

Donde:

σ_c : es el esfuerzo a compresión simple, en kg/cm².

F: carga ultima de la probeta, en kg.

A: área de la probeta, en cm².

Como ya se menciona la deformación axial será en este caso el promedio de las mediciones de los cuatro indicadores de carátula;

Indicador 1	indicador 2	indicador 3	indicador 4	carga aplicada
Lectura 1	lectura 2	lectura 3	lectura 4	carga axial

$$\text{Deformación axial} = (\text{lectura inicial} - (\text{lectura 1} + \text{lectura 2} + \text{lectura 3} + \text{lectura 4} / 4)) / \text{Área}$$

Deformación axial unitaria = Deformación axial / Longitud inicial.

El siguiente paso es graficar los círculos de Mohr que servirán para determinar la ley de resistencia de la roca intacta.

Esta grafica se construye utilizando los valores de los esfuerzos principales mayor y menor que fueron utilizados para realizar el ensaye.

De la siguiente manera:

σ_1 : Esfuerzo principal mayor

σ_3 : Esfuerzo principal menor

El esfuerzo principal menor es el esfuerzo de confinamiento que fue aplicado a la muestra mediante el fluido en la cámara triaxial, este esfuerzo normalmente va en función de la profundidad de la muestra en estudio, y la gran mayoría de las veces se utilizan esfuerzos del orden de 7.5, 15 y 30 Mpa, dependiendo en gran parte del diámetro de la probeta y de la profundidad (a mayor profundidad los esfuerzos aumentan).

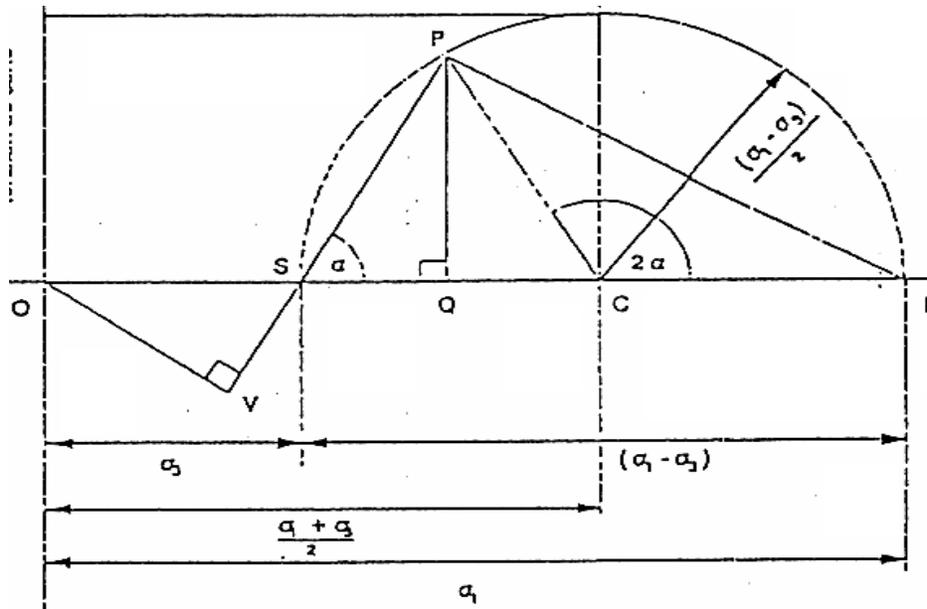


Figura 2.17. Representación de la construcción de los círculos de Mohr.

Donde:

El eje horizontal representa el esfuerzo normal σ , y el eje vertical representa el esfuerzo cortante τ .

Los extremos del diámetro del círculo, están definidos por los valores de σ_3 y σ_1 , medidos desde el origen.

El punto P, tiene por coordenadas los esfuerzos normales y los esfuerzos cortantes sobre un plano inclinado en un ángulo con respecto a la horizontal.

Por otra parte P puede ser encontrado trazando un radio desde el centro C a un ángulo 2α con respecto a la horizontal. En un plano inclinado de α , el esfuerzo normal es igual a OQ y el esfuerzo cortante es igual a PQ.

El diámetro del círculo es igual a $(\sigma_1 - \sigma_3)$, la diferencia de tensiones principales es conocida como “esfuerzo desviador”, y esta dada por la formula:

$$\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2.11)$$

La máxima tensión de corte es representada por el punto P (punto más alto del círculo), y es igual al radio.

$$R = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \quad (2.12)$$

Un plano sobre el cual ocurre la máxima tensión de corte, esta inclinado en 45° con respecto a la horizontal.

El centro del círculo C, esta a una distancia:

$$OC = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2}; \text{ Desde el origen} \quad (2.13)$$

Gracias a que la prueba triaxial trata de representar las condiciones in situ, esta suele revelar alguna superficie de falla relacionada con la litología de la zona de estudio, aunque las presiones de confinamiento sean una aproximación de las condiciones reales de la zona.

Así mismo se puede llevar un riguroso control sobre la interacción de las deformaciones con las presiones que se le aplican a la probeta.

Mediante los resultados obtenidos con la prueba triaxial se pueden obtener indirectamente otros parámetros de diseño en túneles y excavaciones, como por ejemplo los parámetros de Hoek & Brown o Singh & Singh, los parámetros de diseño de tablas para excavación y sostenimiento en túneles, etc. Pero esto se vera con mas detalle en el capitulo de consideraciones y aplicaciones de diseño.

Además de las posibles microfisuras, porosidad, forma y sentido de los clastos, es decir de la litología de la roca. Otro elemento que influye directamente en la forma de rotura de la roca es la presión de confinamiento, ya que al variar este se pueden tener cuatro tipos de forma de rotura de la probeta.

A una presión confinante nula, la forma de rotura de la probeta es frágil en forma de lascas verticales por la matriz de la probeta.

Cuando el esfuerzo confinante es moderado y regulado la forma del tipo de rotura de la roca es del tipo Mohr-Coulomb, con un ángulo de falla a 45 grados pasando por la matriz de la probeta.

Este tipo de rotura se contempla en dos estados que se presentan en la curva esfuerzo-deformación; por un lado se tiene el estado elástico en el cual al dejar de cargar la probeta esta regresara a su estado natural y por el otro lado tenemos la deformación en el rango plástico en el que la roca ya no depende de la carga puesto que el material ya sufre deformaciones permanentes y la rotura describe el ángulo de rotura de Mohr-Coulomb.

Las dos formas restantes en las que influye el esfuerzo confinante tienen que ver con el estado elasto-plástico del material.

Cuando el material sufre de una presión confinante muy elevada, este tiende a cerrar todas sus fisuras y la relación de vacíos comienza a disminuir, esto afecta directamente en la deformación de la probeta y en el tipo de rotura, el material se ve plastificado por los efectos de las altas presiones del esfuerzo confinante y la acción del esfuerzo desviador.



Figura 2.18. Tipo de rotura cuasifrágil en lascas verticales, en donde el esfuerzo de confinamiento fue nulo.



Figura 2.19. Tipo de rotura Mohr-Coulomb por la matriz en el estado Elástico-lineal.



Figura 2.20. Tipo de rotura Mohr-Coulomb en el estado plástico. Este tipo de rotura también pudo haber sido condicionado por los clastos de la probeta y alguna recristalización de los minerales de la roca.



Figura 2.21. Probeta plastificada, en este tipo de rotura el material ha sido sometido a un esfuerzo de confinamiento mayor del que se tenía previsto y el esfuerzo desviador plastifico el material.

2.3.8 Tensión indirecta (brasileña).

Introducción:

La prueba brasileña fue desarrollada en la década de los 50, del siglo pasado con el fin de evaluar la resistencia a la tensión del concreto. Más tarde se comenzó a realizar este ensayo en rocas y en suelos compactados o cementados.

Esta es una prueba muy simple ya que solamente se trata de cargar la muestra con dos placas rígidas en la prensa de carga,

Las placas generan esfuerzos a lo largo de la circunferencia y para disminuir estos esfuerzos se anteponen semicircunferencias de metal, de esta manera se evita que el espécimen falle por aplastamiento, y los esfuerzos siguen un plano de falla normal a la superficie de la probeta que corresponde al plano vertical en que actúan las cargas.

De esta manera los esfuerzos generan tensiones en el interior de la probeta y esta adquiere una rotura vertical.

Los datos obtenidos de esta prueba están ligados con los obtenidos de la prueba triaxial y la compresión simple como se vera en el siguiente capítulo.

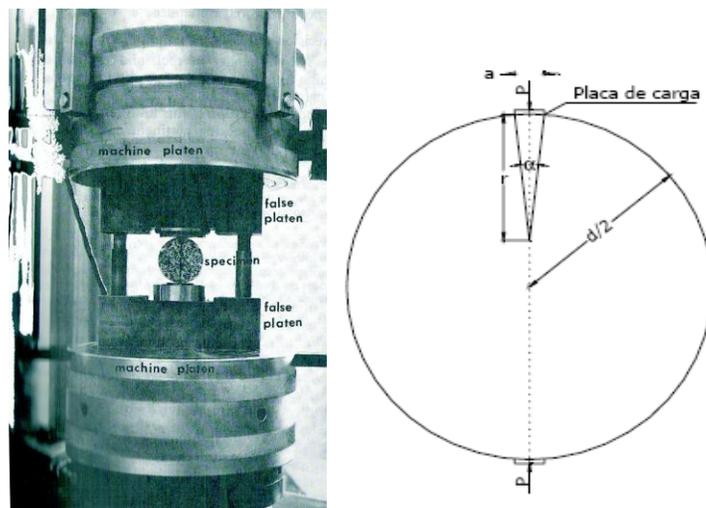


Figura 2.22. Esquema de la prueba de tensión indirecta (brasileña)

Objetivo.

Obtener el esfuerzo a tensión indirecta del espécimen de roca intacta.

Herramienta y Equipo.

- Prensa de 300 toneladas (con sus respectivos contrapesos y carátulas para realizar diferentes tipos de carga)
- Balanza digital
- Vernier

- Recipientes de vidrio (refractario de varios tamaños)
- Horno de $110 \pm 5^{\circ}$ C.
- Cronometro.

Procedimiento.

Con el vernier se toman las medidas del diámetro de la probeta y se anotan en el formato correspondiente de laboratorio, se prepara la prensa hidráulica con la carátula que corresponda para el peso a aplicar y se toman las medidas de seguridad pertinentes para realizar la prueba sin contratiempos, así como también se debe verificar que los contrapesos sean los indicados para el tipo de ensaye a realizar.

Para esta prueba solamente se necesita un laboratorista por la sencillez de la misma, este laboratorista tomara la precaución de sincronizar el cronometro con los incrementos de carga necesarios que necesita la prensa.

Antes de aplicar la carga se hace una pequeña descripción de la muestra haciendo referencia a un posible ángulo de falla y si la muestra contiene ciertas características que influirán en la forma de la rotura de la muestra.

Se comienza a cargar la muestra a intervalos de velocidad no mayores de 200 kg/min. graduando la velocidad de aplicación de la carga según lo requiera la probeta.

Una vez que la muestra alcanzo su máxima resistencia y ha fallado, se toma de las placas y se deposita en uno de los refractarios para ser introducida en el horno de 110 ± 50 C durante 24 hrs. y obtener el peso seco de la muestra y realizar los cálculos correspondientes:

Cálculos.

El esfuerzo a la tensión se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi HD} \tag{2.14}$$

Siendo:

σ_t : El fuerza a la tensión en Mpa

P: La máxima carga aplicada a la muestra, en kg.

H: Es la altura del espécimen, en m.

D: Es el diámetro de la muestra, en m.

Mediante esta prueba también se puede conocer lo que es la abrasividad o el desgaste de la roca. Una cuestión muy útil cuando se necesita conocer el coste de una perforación por medios mecánicos.

$$F = \frac{Q\phi_m\sigma_t}{100} \quad (2.15)$$

F = Coeficiente de desgaste o abrasividad, en kg/cm.

Q = Porcentaje de cuarzo en %.

ϕ_m = Diámetro del grano de cuarzo, en cm.

σ_t = Resistencia a la tensión, en kg/cm².

Tipo de roca	% de SiO ₂
Arenisca silicea	98
Otras areniscas	80-95
Arcosas	70-80
Granito	70
Grauwaca, granodiorita	60-70
Pizarra, sienita	50-65
Basalto, gabro	50
Arcilla	40
Caliza, dolomia	2-10

Coeficiente de desgaste	Rozabilidad	
	calificación	m ³ /h
0.2-0.3	Muy buena	45-65
0.3-0.4	Buena	30-45
0.4-0.5	Moderada	20-30
0.5-0.6	Reguiar	15-20
0.6-0.8	Mala	10-15
0.8-1	Muy mala	6-10

CLASIFICACION	INDICE DE CERCHAR	TIPO DE ROCA
Extremadamente abrasiva	>4,5	Gneis, pegmatita, granito
Altamente abrasiva	4,25 — 4,5	Anfibolita, granito
Abrasiva	4,0 — 4,25	Granito, gneis, esquistos, piroxenita, arenisca Darleg Dale
Moderadamente abrasiva	3,5 — 4,0	Arenisca
Abrasividad media	2,5 — 3,5	Gneis, granito californiano, dolerita
Poco abrasiva	1,2 — 2,5	Arenisca Portland
Muy poco abrasiva	<1,2	Caliza

Figura 2.23. Abrasividad índice Cerchar.

ROCAS ÍGNEAS				
DUREZA Y ABRASIVIDAD				
ROCAS	ABRASIVA	INTERMEDIA	POCO ABRASIVA	DESCOMPUESTA
		Riolita Apilita Felsita Granodiorita Pegmatita Porfido cuarcítico Granito	Basalto olivínico Dacita Dunita Gabro olivínico Diorita cuarcífera	Andesita Basalto Tracita Dolerita Diorita Gabro Sienita
PERFORACIÓN	Martillos en cabeza pesados de 50 - 230 mm ∅ Martillos en fondo de 102 - 150 mm ∅ Perforadoras rotativas pesadas 150 mm ∅		Perforadoras rotativas pesadas 150 mm ∅	Perforación rotativa por corte Perforación percusión si existe roca sana.

ROCAS METAMÓRFICAS				
DUREZA Y ABRASIVIDAD				
ROCAS	DURA Y ABRASIVA	INTERMEDIA	POCO ABRASIVA	
		Esquisto cuarcífero Cuarcita Gneis Granulita	Corneana Esquisto micáceo Mármol dolomítico	
PERFORACIÓN	Perforadoras rotopercutivas grandes Perforadoras rotativas muy grandes			Perforadoras rotopercutivas medianas y grandes Perforadoras rotativas medianas-grandes en rocas blandas

ROCAS SEDIMENTARIAS					
DUREZA Y ABRASIVIDAD					
ROCAS	ABRASIVA DURA	ABRASIVA MENOS DURA	ABRASIVA FRIABLE	ABRASIVA FRIABLE	NO ABRASIVA BLANDA
		Conglomerados de cuarzo Areniscas Grauvacas Ortocuarcitas	Ceniza volcánica Calizas silíceas Areniscas de grano grueso Tobas	Areniscas friables Areniscas calcáreas Gravas consolidadas	Calizas Arcilla esquistosa Cretas
PERFORACIÓN	Perforadoras rotopercutivas grandes Perforadoras rotativas grandes	Perforadoras rotopercutivas medianas Perforadoras rotativas grandes	Perforadoras rotativas grandes, medianas y pequeñas	Perforadoras rotopercutivas medianas y grandes Martillos en fondo o perforadoras rotativas grandes	Perforadoras rotativas con tricono

Figura 2.24. Relación entre Dureza-Abrasividad y los métodos de perforación.

2.3.9 CORTE DIRECTO

Introducción

Este procedimiento de laboratorio se aplica para muestras de roca de diversos tamaños, dependiendo también de las muestras obtenidas en campo.

Son muestras cúbicas de 10 X 10 cm. o bien mas grandes de aproximadamente 50 x 50 x 30 cm., a estas ultimas muestras se les hará la prueba en un marco metálico mayor debido a sus dimensiones; y la muestra menor será ensayada en un marco mas pequeño.

Aunque sean de diferentes tamaños, los procedimientos para ensayar las muestras son los mismos; por lo que describiré el procedimiento sin mencionar dimensiones.

Es una prueba muy común en la etapa de diseño, pero normalmente esta referenciada al diseño y la estabilidad de taludes.

Es más común diseñar una excavación con los parámetros geomecánicos que se obtienen de las pruebas de compresión simple y triaxiales.

Objetivo.

Determinar la resistencia al corte directo y el ángulo de fricción interna en una muestra de roca intacta.

Herramienta y equipo.

- Marco metálico para llevar a cabo la prueba de las dimensiones requeridas por la muestra.
- Dispositivo hidráulico para bombear el aceite hidráulico para generar la carga normal y la carga tangencial.
- Gatos hidráulicos.
- Dispositivos para medir deformaciones (indicadores de carátula con resolución mínima de 0.05 mm y carrera de 20mm, así como también pueden ser usados dispositivos electrónicos como lo son Strain-Gages. Que interpretaran de forma inmediata las deformaciones en una PC).
- Manómetros para la lectura de la fuerza aplicada durante la prueba con una resolución mínima del 2% de la máxima fuerza alcanzada durante la prueba.
- Soportes para los dispositivos a utilizar durante la ejecución de la prueba (bases magnéticas, dispositivos para fijar los aparatos al marco metálico, etc.).
- Cronometro.
- Equipo y herramienta menor (equipo y herramienta para realizar la preparación de la muestra).

Procedimiento.

La preparación de la muestra es a base de dos cabezales de concreto. Aquí depende del tamaño de la muestra, ya que para una muestra grande los cabezales de concreto llevarán un armado y para una muestra pequeña solamente concreto simple.

Entre estos dos cabezales se deja un espacio a la muestra de tal forma que los dos cabezales sirven de base para que el plano de falla sea más claro.

La muestra debe ser analizada en cuanto a sus discontinuidades y posibles planos de falla, de tal manera que la posición en la que las cargas serán aplicadas coincida con dichos elementos.

Para la muestra obtenida será necesario aplicarle diferentes valores de carga normal, de tal manera que se realizaran tres ensayos del mismo plano de falla para tres diferentes valores del esfuerzo normal.

Una vez que la muestra es preparada con sus cabezales de concreto, se le coloca arena como protección entre los cabezales, removiendo esta arena hasta el último momento cuando la probeta ya está montada en el marco metálico.

Una vez que la muestra es colocada en el marco metálico, se remueve la arena y con pedazos de algodón se humedece un poco la parte de la muestra que está expuesta.

Se debe tener cuidado en colocar la muestra lo más centrada posible en el marco metálico de tal manera que las cargas aplicadas sean efectivas tanto normal como tangencialmente.

Se colocan los dispositivos de medición de la forma en que se presenta en la figura 39, se colocan los dispositivos para realizar las cargas normales y tangenciales.

El laboratorista debe ser capaz de analizar el comportamiento de la muestra durante la etapa de la consolidación, ya que el valor obtenido durante esta etapa puede dar una idea de cuánto más o menos podrá soportar de carga tangencial.

El laboratorista debe tener cuidado con la sincronización con los tiempos de carga para incrementar la carga normal al máximo de lo especificado cuando hayan transcurrido un mínimo de 5 incrementos, así mismo se anotarán los desplazamientos que generan las cargas aplicadas y el tiempo en que ocurren estas.

La consolidación ocurrirá cuando las diferencias de las cuatro últimas lecturas de los desplazamientos sean menores de 0.005 mm/min. de por lo menos 10 minutos de haber sido incrementada la última carga.

La aplicación de la fuerza de cortante estará en función de dos componentes; una vertical y una tangencial.

La componente vertical será sumada a la carga normal aplicada a la muestra durante la etapa de consolidación.

La fuerza de corte se deberá aplicar en incrementos constantes hasta llegar a la resistencia máxima de la muestra.

Al mismo tiempo se genera una resistencia residual de la muestra para mantener bajo control el desplazamiento cortante que se presente.

Los incrementos de carga se darán cuando los desplazamientos entre una y otra lectura sean menores de 0.01 mm/min. dentro del intervalo de 10 min. de haber iniciado una carga.

Una vez que la muestra alcanza la resistencia máxima, se comienzan a tomar lecturas de los desplazamientos a razón de 0.2 mm/min. dentro de un intervalo de 10 min.

Para mantener esta velocidad constante y obtener el esfuerzo residual se debe mantener constante la carga tangencial de tal manera que se mantiene la velocidad de corte.

Cuando la muestra ha pasado por la etapa de consolidación, posteriormente la etapa de corte y por último la etapa de corte residual, se dice que se acaba un ciclo y la muestra debe volver a ser consolidada bajo una carga normal mayor. Hasta completar tres ciclos para distintas cargas de diseño.

Una vez que se han completado los tres ciclos de la muestra, se hace la descripción de la muestra en cuanto a las condiciones en las que se encuentra al plano de falla (rugosidad, echado, buzamiento, alteraciones visibles, etc.).

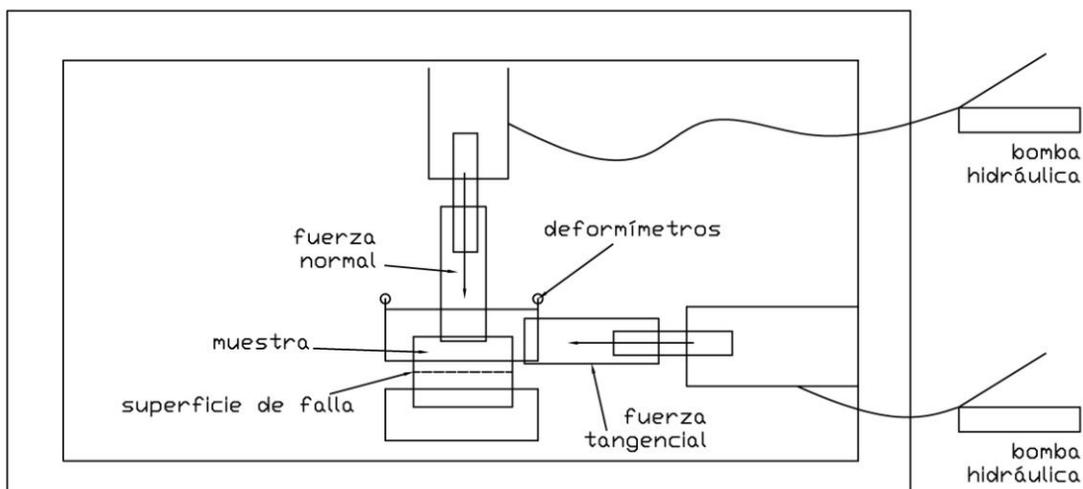


Figura 2.25. Arreglo para la prueba de corte.

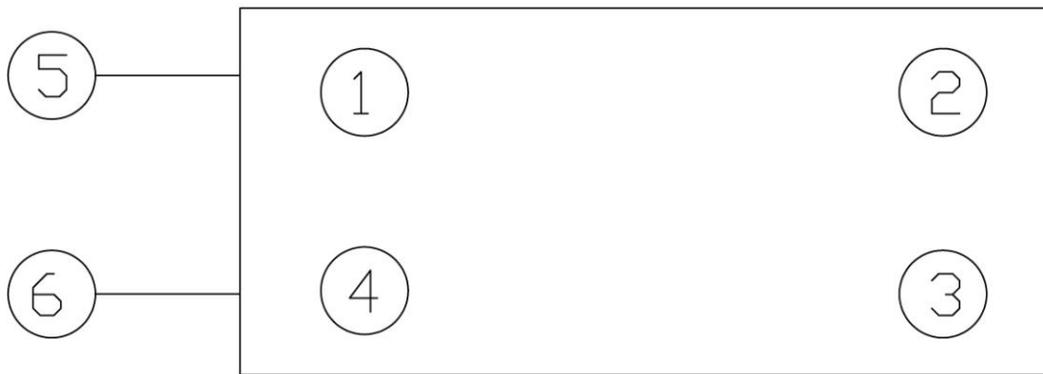


Figura 2.26. Arreglo de los indicadores de carátula para la prueba de corte.

Cálculos:

$$\tau = \frac{P_s}{A} = \frac{P_{sa} (\cos \alpha)}{A} \quad (2.16)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante; en Mpa.

P_s : Fuerza de corte total.

P_{sa} : fuerza cortante aplicada.

α : Es el ángulo de la fuerza de corte medido con respecto al plano de corte.

A: Es el área de la superficie de corte.

$$\sigma_n = \frac{P_n}{A} = \frac{(P_{na} + P_{sa} (\sen \alpha))}{A} \quad (2.17)$$

donde:

σ_n : Es el esfuerzo normal; en Mpa.

P_n : Es la fuerza normal total.

P_{na} : Es la fuerza normal aplicada.

α : Es el ángulo de la fuerza de corte medido con respecto al plano de corte.

A: Es el área de la superficie de corte.

Cuando α es mayor que cero entonces la fuerza normal debe reducirse conforme aumenta la componente vertical de la fuerza de corte P_{sa} ($\text{sen}\alpha$).

La ecuación para reducir la carga normal aplicada queda en función del aumento en el desplazamiento de corte.

$$P_{nr} = \frac{\Delta_s P_n}{700} \quad (2.18)$$

Donde:

P_{nr} : Fuerza normal reducida.

Δ_s : Variación del desplazamiento del corte.

El ángulo de fricción interna y la cohesión son parámetros obtenidos directamente de las graficas de resistencia al corte VS esfuerzo normal.

Que se presentan a continuación:

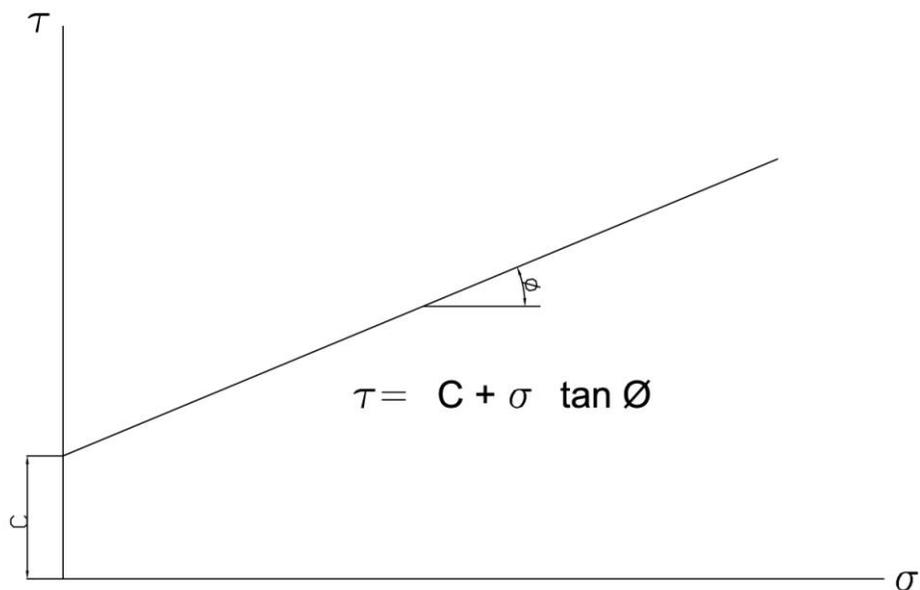


Figura 2.27. Parámetros obtenidos de la prueba de corte directo (C y ϕ).



**“MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO
EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS”**



3

“ANÁLISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS. APLICACIÓN REAL DE LOS PARAMETROS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO”

3. Análisis e interpretación de los resultados. Aplicación real de los parámetros obtenidos de las pruebas de laboratorio

Introducción

Como ejemplo real para esta tesis y como experiencia profesional del autor, en el presente capítulo se describen los procedimientos llevados a cabo para integrar los resultados de laboratorio del denominado *Estudio de resistencias de la roca matriz para los túneles de la carretera Durango-Mazatlán*, elaborado por la empresa Consultec, Ingenieros Asociados S.C. Dicho estudio incluye los ensayos de laboratorio de 16 proyectos y en la fecha de conclusión de esta tesis aun se encuentra en proceso de redacción. Por lo anterior y con objeto de no abarcar un volumen de información que sobrepasaría los alcances de una tesis de licenciatura, se seleccionaron únicamente los resultados de 5 túneles, pertenecientes al tramo El Salto - Concordia, de la citada carretera, en el Municipio de Pueblo Nuevo, estado de Durango.

En este trabajo se pretende determinar de forma aproximada las propiedades de resistencia y deformabilidad de la roca matriz de las distintas unidades litológicas presentes en el tramo. El estudio de las litologías y la campaña de laboratorio se llevaron a cabo sobre muestras obtenidas dentro del trazado de la nueva carretera en proyecto, el cual atravesará la Sierra Madre Occidental. Esta provincia geológica es la más grande de México y del Mundo en su tipo y está formada básicamente por rocas ígneas extrusivas comprendiendo una superficie aproximada de 250,000 km² y constituyendo el parteaguas entre el Océano Pacífico y la región de "Bolsones" de la Mesa Central y Chihuahua.

Investigación geológica.

El área que comprende el estudio se encuentra localizada a unos 70 Km. al sureste del poblado El Salto, dentro del polígono que forman las coordenadas UTM X= 426,078 a 426,982 (geográficas 105° 42.5' a 105° 42.7' de longitud oeste) y Y = 2'609,192 a 2'610,315 (geográficas 23° 35.8' a 23° 36.0' de latitud norte) en la región occidental del estado de Durango.



Figura 3.1. Localización de la zona en estudio.

Las investigaciones geológicas realizadas a lo largo de la traza de los proyectos de túneles, consistieron en identificar y cartografiar, las diferentes unidades litológicas y sus contactos, recabar los datos estructurales de las principales discontinuidades (fracturas, pseudo-estratificaciones, presencia de agua, etc.) y definir la existencia de estructuras geológicas mayores tales como fallas, las cuales se estudiaron a partir de los afloramientos expuestos en las cañadas de los arroyos, en zonas de portales y áreas aledañas a los túneles.

El estudio se enriqueció con la información foto geológica y el análisis de los núcleos de roca recuperados de los sondeos exploratorios, de los cuales se determinó la litología, las condiciones y características de fracturamiento y los parámetros de recuperación (REC) e índice de calidad de la roca (RQD).

Estudio de resistencias.

En formaciones volcánicas como las de la provincia geológica de la Faja Ignimbrítica Mexicana, las distintas unidades litológicas que conforman la orografía suelen tener un carácter altamente complejo, no sólo por las muy distintas composiciones mineralógicas de las formaciones rocosas, sino también por la gran variabilidad de propiedades físicas y mecánicas que poseen. Esta variabilidad obedece a diferentes factores entre los que destacan: el origen (composición de los materiales piroclásticos, distintos tipos de erupción, flujos de lava, arrastres, depósitos de nubes ardientes, procesos de sedimentación, etcétera); la tectónica regional (periodos compresivos, distensivos, zizallamientos); procesos físicos como la erosión y el metamorfismo, este último producido por la diferencia de presiones y temperaturas. Estos procesos se fueron combinando a lo largo de millones de años, dando como resultado las diferentes características litológicas de la región.

Objetivo del estudio y aplicaciones

El objetivo de este estudio es contribuir a la obtención más precisa de los parámetros mecánicos de los macizos rocosos a partir de una integración rigurosa de los resultados de laboratorio.

Los parámetros geotécnicos obtenidos del estudio de la roca intacta, analizados a distintas profundidades del macizo rocoso y para las distintas litologías presentes en el tramo de estudio se basa, tanto en los ensayos de laboratorio, como en las descripciones detalladas y fotografías de las muestras de roca intacta. Al obtener rangos bien acotados de las resistencias de las distintas litologías se contribuye a tener una mejor percepción de las condiciones mecánicas de las rocas que se cruzarán con la obra y a integrar los resultados para cada túnel de manera sencilla y eficiente. Lo anterior también resultará de gran utilidad para futuros proyectos sobre el tramo descrito y como base para futuros estudios de la roca intacta toda la traza de la carretera Durango-Mazatlán.”

En el estudio de resistencias que Consultec realizó para las distintas unidades litológicas del tramo de carretera en cuestión, resultó especialmente útil esta forma de aproximar los parámetros mecánicos y contribuyó a tener una idea mucho más clara de cuáles litologías son más (o menos) cohesivas, cuales más (o menos) friccionantes, cuáles más resistentes, cuáles más débiles, cuáles más frágiles, cuáles más dúctiles, etcétera.

Para elaborar los modelos geomecánicos de los túneles se integraron los resultados de las investigaciones geológicas, geofísicas y los análisis de laboratorio. A partir de estos modelos es posible zonificar geotécnicamente la carretera para futuros proyectos, a efectos de clasificación, comportamiento del macizo rocoso y diseño.

Sin afán de definir a la geología de esta región utilizando el calificativo de “caótica”, sí es factible asegurar que el grado de complejidad de sus formaciones es muy alto y que lo anterior dificulta de manera importante la caracterización física y mecánica (con fines de ingeniería) de las distintas unidades litológicas por las que atraviesa el trazado de la carretera Durango-Mazatlán.

En un tramo de escasos cientos de metros es posible cortar múltiples unidades en las que las condiciones geotécnicas, dadas, por ejemplo, por la litología, el fracturamiento y las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, cambien radicalmente.

Este trabajo está derivado de los ensayos pertenecientes a los proyectos de túneles elaborados por Consultec; el estudio de resistencias está hecho por

litologías y no por túneles. Lo anterior quiere decir que se agruparon las probetas por litologías, no importando que provinieran de túneles distintos. Esto permite tener poblaciones más grandes con fines estadísticos para futuros proyectos sobre la misma carretera antes citada.

En esta tesis no se profundizará en el tema del diseño de los túneles puesto que el objetivo principal es el estudio de la resistencia de la roca intacta. Sin embargo se mencionarán los nombres de estos para fines de identificación de los ensayos en el anexo de este capítulo.

Los túneles estudiados son:

- La Tortuga,
- Siete Víboras,
- El Venado,
- Picachos I y
- Picachos II

En las fichas de integración de los resultados que se presentan en el anexo de este capítulo se utiliza la nomenclatura del siguiente ejemplo para referirse a las probetas enviadas en laboratorio.

Muestra	Sondeo	Túnel
Mtx _{1,1}	1	7V

Mtx_{1,1}-S1-7V

Muestra	Sondeo	Túnel
Mcs	1	7V

Mcs-S1-7V

Muestra	Sondeo	Túnel
Mbr	1	7V

Mbr-S1-7V

Donde:

- Mtx_{1,1}:** Muestra triaxial uno del primer conjunto de tres muestras
Mcs: Muestra a compresión simple
Mbr: Muestra brasileña
S1: Es el sondeo 1

TT:	Túnel La Tortuga
T7V:	Túnel Siete Víboras
TV:	Túnel El Venado
TPI:	Túnel Picachos I
TPII:	Túnel Picachos II

El túnel “La Tortuga” se encuentra ubicado entre los kilómetros 145+194.00 y 146+070.00; la litología más representativa de este túnel es la toba lítica de composición ignimbrítica.

El túnel “Siete Víboras”. Se encuentra ubicado entre los kilómetros 146+313.82 y 146+614.29; las litologías más frecuentes en esta zona de la carretera son las tobas líticas de composición riolítica e ignimbrítica, que aparecen también en el túnel la tortuga, la toba lítica cloritizada y la riolita fluidal.

El túnel “El Venado” se localiza entre los kilómetros 147+003.54 y 147+479.53; las litologías más representativas de la zona son la toba lítica, la toba lítica cristalina y la toba lítica cloritizada

El túnel “Picachos I” se localiza entre los kilómetros 147+651.32 y 148+079.29; las litologías más representativas en este tramo son la toba microlítica, la toba lítica alterada y la brecha andesítica.

Finalmente, el túnel “Picachos II” se localiza entre los kilómetros 148+030 y 148+560; sus litologías más representativas son las ignimbritas (de diferente composición que las de la tortuga), la toba microlítica y una toba brechoide presente en la zona.

En total, la longitud estudiada para las litologías presentes en estos 5 túneles de la carretera Durango-Mazatlán, es de aproximadamente 3,366 m.

Las muestras que se seleccionaron para ser enviadas al laboratorio se clasificaron litológicamente no importando el proyecto del que provenían, de tal manera que se mezclaron proyectos entre si (por probetas de laboratorio y ensayos) debido a la cercanía de éstos como se presenta en la figura 3.2.

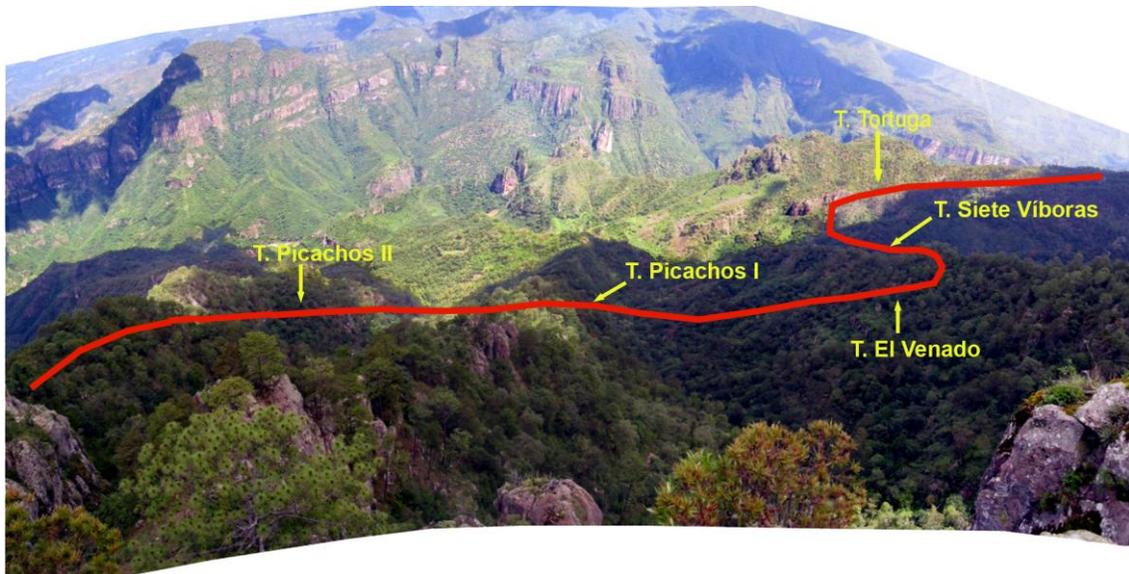


Figura 3.2. Panorámica del tramo de los cinco túneles indicando el trazado de la carretera.

Se obtuvieron las descripciones de las probetas haciendo observaciones en cuanto a cualquier plano de falla predefinido, alteración general de la probeta, fisuras y discontinuidades, porosidad y estado general de la matriz; con la finalidad de obtener una descripción general de cada probeta, además de la unidad litológica a la que pertenecen. En el anexo 3.2 (Descripción de las muestras de laboratorio) se presentan las descripciones detalladas de todas las probetas estudiadas.

Se tomaron fotos de detalle de las probetas antes y después del ensayo, de tal forma que, para cualquier resultado obtenido, se podrían apreciar aspectos tales como calidad aparente, textura, existencia de grietas, fisuras, porosidad, etcétera, pero sobre todo detectando la presencia de algún posible plano potencial de rotura (estos últimos fueron marcados para su posterior verificación, una vez fallada la probeta).

Las fotografías fueron realizadas con una cámara Nikon digital profesional, un lente Nikon 105 Macro 2.8, se utilizó un plateau fotográfico de fondo azul con una lámpara luz de día color azul de 250 watts.

Todas las fotos de las probetas antes y después de los ensayos a los que se sometieron fueron tomadas en la empresa Consultec por el autor de esta tesis, las descripciones de las muestras fueron realizadas por un geólogo.

A pesar de que, para evitar al máximo la dispersión de resultados, se procuró que las muestras seleccionadas para labrar las probetas fueran lo más homogéneas posible, hay detalles que no se pueden controlar a simple vista, como por ejemplo, una mayor porosidad, un microfisuramiento más abierto, un cierto grado de alteración en el interior de la muestra u otros defectos que quedan ocultos y que condicionan la resistencia de la roca matriz.

Las litologías que presentaron una mayor dispersión fueron subdivididas a su vez en un grupo de probetas de resistencia mayor y un grupo de resistencia menor. Una vez rotas, las probetas que tuvieron una resistencia menor se inspeccionaron detalladamente y en muchos casos se pudo determinar que la causa de la rotura fue ajena a la naturaleza intacta de la roca, es decir, que se produjo por alguno de los defectos anteriormente mencionados. Por lo anterior, se considerará roca intacta, únicamente el grupo de probetas de resistencia mayor, mientras que el grupo de resistencia menor será considerado como roca matriz, pero defectuosa y por lo tanto con el conjunto de propiedades resistentes más bajo.

5.1 Integración de los resultados

Las pruebas realizadas fueron:

- Resistencia a la compresión simple en muestras de roca intacta.
- Resistencia a la compresión triaxial no drenada en muestras de roca intacta.
- Resistencia a la tensión indirecta (Brasileña).

Todas la probetas provienen de sondeos realizados con equipo Winkie JKS GW-15 Diámetro IAQ (3.5 cm. interior), barril sencillo.

Los ensayos triaxiales se realizaron para presiones de confinamiento de, $\sigma_3 = 7.5, 15$ y 30 (MPa), aumentando la presión axial σ_1 hasta la falla. Este proceso se repitió con tres probetas similares para los distintos σ_3 aplicados, dibujando los círculos de Mohr correspondientes en una grafica $\sigma_N - \tau$.

Se debe tener en cuenta que los resultados de una probeta de diámetro pequeño (por ejemplo 35mm, que es el diámetro de una sondeadora Winkie), deben ser corregidos mediante un factor de reducción, como el propuesto por Hoek (1980):

$$F.R. = \frac{1}{(50/D)^{0.18}} \quad (3.1)$$

Donde:

F.R: Factor de Reducción.

D: Diámetro de la probeta, en mm.

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio y estudiado la litología de cada muestra, se comenzaron a realizar correlaciones entre las probetas para definir los parámetros geotécnicos de cada unidad litológica definida.

Criterios para la integración.

Por lo general, la obtención adecuada de los parámetros mecánicos para el diseño de una obra que interactuará con el terreno, es complicada y requiere de estudios de campo y laboratorio extensos.

Para fines de análisis de una excavación subterránea en roca es necesario distinguir entre los parámetros que definen el comportamiento de la roca intacta (E_i , ν_i , c_i y ϕ) y los que definen el comportamiento del macizo rocoso (E_m , ν_m , c_m y ϕ_m).

Efectuando una buena campaña exploratoria y de laboratorio y mediante un estudio estadístico adecuado, es posible aproximarse a valores representativos de los parámetros de la roca matriz.

Al extrapolar estos valores al macizo rocoso, se encuentran serias dificultades que pueden conducir a la determinación de parámetros erróneos. Debe tomarse en cuenta que, a medida que el dominio es más grande, el comportamiento del macizo rocoso difiere cada vez más de aquel que presentó el material en el laboratorio.

Debido a un número muy importante de factores y fenómenos físicos que definen las condiciones in situ de la roca, la modelación del comportamiento de una obra subterránea se convierte en una ardua labor, que requiere de un entendimiento profundo de la mecánica de este tipo de problemas y del dominio de una amplia gama de herramientas geotécnicas y matemáticas.

Las clasificaciones geomecánicas para la caracterización de macizos rocosos, también suelen ser útiles para estimar los parámetros mecánicos (así como sus posibles rangos de variación) que definirán el comportamiento mecánico de la obra y que además permiten tener una primera aproximación sobre los tratamientos más adecuados que requiere el terreno para ser estable durante la excavación.

Estas herramientas, son muy útiles siempre y cuando se tenga un conocimiento profundo de las condiciones del terreno y para esto es fundamental haber realizado una campaña de laboratorio muy completa.

Criterio de rotura de Hoek y Brown (2002).

Hoek y Brown realizaron un extenso trabajo de recopilación de datos y pruebas de laboratorio y en los años 80's propusieron un criterio de rotura empírico que actualmente está muy extendido en el mundo de la mecánica de rocas y que representa de manera adecuada el comportamiento de la roca intacta y del macizo rocoso para ciertos niveles de fracturamiento.

a) Roca intacta

La ecuación de la ley de resistencia de Hoek y Brown para la roca intacta se escribe como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c^i \sqrt{\left(m_i \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_c^i} + 1\right)} \quad (3.2)$$

Donde σ_c^i es la resistencia a la compresión simple de la roca matriz y m_i es un parámetro asociado con la resistencia cohesiva-friccionante del material, también correspondiente a la roca intacta.

Para la determinación de los parámetros m_i y σ_c^i de la roca intacta es necesario llevar a cabo una campaña de laboratorio rigurosa, aunque acorde con los alcances de los estudios previos al proyecto.

El criterio de selección de las muestras debe de tener por objeto estudiar tanto las condiciones favorables como las desfavorables por las que atravesará la obra del túnel.

Para la obtención de la envolvente de rotura en el espacio de Mohr se utiliza la solución de Balmer (1952).

$$\sigma_N = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\partial\sigma_1/\partial\sigma_3 + 1} \quad (3.3)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{\partial\sigma_1/\partial\sigma_3} \quad (3.4)$$

Donde:

$$\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3} = 1 + \frac{m\sigma_c^i}{2(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (3.5)$$

Para la resistencia a la tensión indirecta se tiene lo siguiente:

$$\sigma_t = \frac{m\sigma_c^i - \sqrt{\sigma_c^{i2}(m^2 + 4)}}{2} \quad (3.6)$$

En túneles de carretera, relativamente cortos, y cuando los recursos para la exploración son limitados, también es común hacer uso de las tablas que los

propios autores de este criterio han publicado al respecto. En las figuras 3.3 y 3.4 se presentan las tablas de Hoek & Brown (1988) y Hoek (1995) donde se relacionan las distintas calidades de roca y diferentes litologías con el parámetro m_i

Criterio de rotura empírico		Constantes del material: m y s .	Rocas carbonatadas: dolomías, calizas y mármol.	Rocas arcillosas: argilitas, limolitas, lutitas y pizarras.	Rocas areniscosas: areniscas y cuarcitas	Rocas ígneas cristalinas de grano fino: andesitas, doleritas, diabasas y rholitas.	Rocas cristalinas ígneas de grano grueso y metamórficas: anfibolitas, gabros, gneises, granitos, noritas y cuarzozonitas.
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_{ci}\sigma_3 + s\sigma_{ci}^2}$ σ_1 y σ_3 : esfuerzos principales mayor y menor σ_{ci} : esfuerzo compresivo uniaxial de la matriz rocosa m y s : constantes empíricas del macizo rocoso							
<i>Valores para el macizo rocoso sin alterar (undisturbed)</i>							
Muestras de roca intacta Muestras de tamaño de probeta de laboratorio sin discontinuidades. RMR = 100 Q = 500	m	7,0	10,0	15,0	17,0	25,0	
	s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
	m	7,0	10,0	15,0	17,0	25,0	
	s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	

Figura. 3.3. Extracto de la tabla de Hoek y Brown (1988) que relaciona la litología con las constantes del criterio de resistencia para la roca intacta.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Course	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19	Siltstone 9	Claystone 4
			← Greywacke (18) →			
	Non-Clastic	Organic	← Chalk 7 →			
			← Coal (8-21) →			
		Carbonate	Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone 8	
	Chemical		Gypstone 16	Anhydrite 13		
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24	
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 31	Mylonites (6)	
	Foliated*		Gneiss 33	Schists (10)	Phyllites (10)	Slate 9
IGNEOUS	Light		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
			Diorite (28)		Andesite 19	
	Dark		Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalt (17)	
			Norite 22			
Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)		

*These values are for intact rock specimens tested normal to foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a foliation plane (Hoek, 1983).

Figura 3.4. Tabla de Hoek et al. (1995) para estimar los valores de m_i de la roca intacta. Los valores entre paréntesis son estimativos.

b) Macizo rocoso

De forma generalizada, para un macizo rocoso fracturado, este criterio supone una relación no lineal entre las componentes de esfuerzo principal efectivo, σ'_1 y σ'_3 de la forma:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c^i \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_c^i} + s \right)^a \quad (3.7)$$

Donde m_b es la constante de Hoek y Brown que depende del ángulo de fricción, s el parámetro que relaciona la resistencia a la compresión simple de la roca intacta con la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso, a una constante que depende de las características de la masa de roca y σ_c^i la resistencia a la compresión simple de la roca intacta.

La ecuación (3.7) del criterio de rotura de H&B, graficada en el espacio de Mohr ($\sigma_N - \tau$) resulta una parábola cuyo origen está definido por la resistencia a la tensión:

$$\sigma_t^m = \frac{\sigma_c^i}{2} \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad (3.8)$$

El proceso utilizado por Hoek y Brown en la derivación de su criterio de rotura se basó en un exhaustivo proceso de prueba y error y el empleo de la estadística.

Aunque la hipótesis de partida proviene de la teoría de fractura de Griffith, no existe ninguna relación fundamental entre las constantes empíricas utilizadas con las características físicas de la roca.

La ecuación (3.8) no tiene ninguna utilidad práctica a menos que las constantes m y s sean estimadas correctamente.

Hoek y Brown (1988) sugirieron que tales constantes pueden relacionarse de alguna manera con el índice de calidad RMR (actualmente con el GSI) si se suponen condiciones totalmente secas y una orientación de las discontinuidades favorable a la excavación. El índice GSI equivale al RMR de Bieniawski según la definición de 1976 para un macizo rocoso seco, o el RMR – 5 según la versión de 1989.

En el año 2002 Hoek, et al. Publicaron el “Criterio de rotura generalizado”, el cual incluye un nuevo coeficiente “D” factor de daño.

Este nuevo coeficiente esta relacionado con el daño al macizo rocoso ocasionado por la excavación y la relajación del macizo.

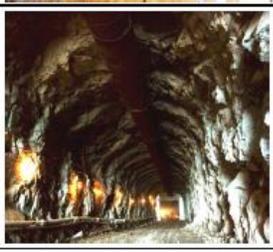
Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) 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.	$D = 0.8$

Figura 3.5. Tabla de Hoek et al. (2002) para estimar los valores del parámetro de daño D

Las relaciones entre m_b/m_i , s y a con el “GSI” y el “ D ” propuestos, para excavación con explosivos, y que a su vez permiten calcular la resistencia a compresión del macizo rocoso son:

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right); \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3.9)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \quad \sigma_c^m = \sigma_c^i s^a$$

Donde m_b y m_i corresponden con el macizo rocoso y la roca intacta respectivamente.

Existen tablas que permiten estimar los parámetros de la ley de resistencia, de acuerdo a la experiencia del autor. Cuando no se cuenta con datos de laboratorio, dichas tablas suelen ser de gran ayuda para obtener los parámetros del macizo de acuerdo a la experiencia del autor.

Criterio de rotura empírico $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_1^2 + s\sigma_3^2}$		Constantes del material: m y s .	Rocas carbonatadas: dolomitas, calizas y mármol.	Rocas arcillosas: argilitas, arcillas, lutitas y pizarras.	Rocas areniscosas: areniscas y cuarcitas.	Rocas ígneas cristalinas de grano fino: andesitas, doleritas, diabasas y rollitas.	Rocas cristalinas ígneas de grano grueso: granitos, gneises, granitos, anfibolitas, gabros, ortocuarzos, cuarcodioritas.
Valores para el macizo rocoso alterado o afectado por voladoras (<i>disturbed</i>) Valores para el macizo rocoso sin alterar (<i>undisturbed</i>)							
Muestras de roca intacta							
Muestras de tamaño de probeta de laboratorio sin discontinuidades.	m	7,0	10,0	15,0	17,0	25,0	
RMR = 100	s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Q = 500	m	7,0	10,0	15,0	17,0	25,0	
	s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Macizo rocoso de muy buena calidad							
Bloque de roca sana. Juntas sin meteorizar y con espaciado de 1 a 3 m.	m	2,40	3,43	5,14	5,82	8,56	
RMR = 85	s	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	
Q = 100	m	4,10	5,85	8,78	9,95	14,63	
	s	0,189	0,189	0,189	0,189	0,189	
Macizo rocoso de calidad buena							
Bloques de roca sana o ligeramente meteorizada, con juntas espaciadas de 1 a 3 m.	m	0,575	0,821	1,231	1,395	2,052	
RMR = 65	s	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293	
Q = 10	m	2,006	2,865	4,298	4,871	7,163	
	s	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	
Macizo rocoso de calidad media							
Varias familias de discontinuidades moderadamente meteorizadas con espaciados de 0,3 a 1 m.	m	0,128	0,183	0,275	0,311	0,458	
RMR = 44	s	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	
Q = 1	m	0,947	1,353	2,030	2,301	3,383	
	s	0,00198	0,00198	0,00198	0,00198	0,00198	
Macizo rocoso de calidad mala							
Numerosas juntas meteorizadas con algo de relleno. Brechas compactas sin rellenos. Espaciado de 0,03 a 0,5 m.	m	0,029	0,041	0,061	0,069	0,102	
RMR = 23	s	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003	
Q = 0,1	m	0,447	0,639	0,959	1,087	1,598	
	s	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	
Macizo rocoso de calidad muy mala							
Numerosas juntas intensamente meteorizadas con rellenos. Espaciado < 0,05 m. Brechas con rellenos arcillosos.	m	0,007	0,010	0,015	0,017	0,025	
RMR = 3	s	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	
Q = 0,01	m	0,219	0,313	0,469	0,532	0,782	
	s	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	

Figura 3.6. Tabla de Hoek y Brown (1988) que relaciona calidad del macizo y la litología con las constantes del criterio de resistencia

GENERALISED HOEK-BROWN CRITERION		SURFACE CONDITION	VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_1'}{\sigma_c} + s \right)^a$ <p> 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 of rock m_b, s and a are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass </p>							
STRUCTURE							
	BLOCKY -very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	m_b/m_s 0.60 0.190 a 0.5 E_m 75,000 ν 0.2 GSI 85	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20,000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3,000 0.25 34	
	VERY BLOCKY-interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	m_b/m_s 0.40 0.062 a 0.5 E_m 40,000 ν 0.2 GSI 75	0.29 0.021 0.5 24,000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5,000 0.25 38	0.07 0 0.53 2,500 0.3 25	
	BLOCKY/SEAMY-folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks	m_b/m_s 0.24 0.012 a 0.5 E_m 18,000 ν 0.25 GSI 60	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	
	CRUSHED-poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks	m_b/m_s 0.17 0.004 a 0.5 E_m 10,000 ν 0.25 GSI 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	0.04 0 0.60 1,000 0.3 10	

Note 1: The in situ deformation modulus E_m is calculated from Equation 4.7 (page 47, Chapter 4). Units of E_m are MPa.

Figura 3.7. Tabla de Hoek (1995) que relaciona calidad del macizo

La primera versión de la tabla de valores de los parámetros m_b y s , que aparece en el libro clásico "Underground Excavations in Rock" de 1980, se obtienen a partir de las ecuaciones:

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right)$$
(3.10)

En 1988 se publicó una versión actualizada de dicha tabla (Figura 3.6) donde se incluyó la segunda pareja de valores m_b y s , y se especificó que la primera pareja corresponde con un macizo alterado o afectado por voladuras, mientras que la segunda pareja de valores corresponde al macizo rocoso sin alterar. Los valores de m_b/m_i y s que se presentan en la tabla de la Figura 3.7. y

que corresponden con la segunda pareja de valores de la tabla de la Figura 3.6. se obtienen de las expresiones:

$$\frac{m_b}{m_1} = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad \text{y} \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad (3.11)$$

La Figura 3.7 y las ecuaciones (3.11) se recogen en el libro “Support of Underground Excavations In Hard Rock” (1995).

Al utilizar estas fuentes es muy importante tener en cuenta que en la versión antigua (1980) aun no se incluía la corrección para roca sin alterar, mientras que en la versión más moderna (1995) sólo se presentan los valores para dicha corrección, con ciertas restricciones para $GSI < 25$, que actualmente existe la versión 2002 del criterio, que incluye el factor “D” y nuevas expresiones para los tres parámetros básicos, incluido “a” y ya no existen restricciones para GSI .

Al utilizar indistintamente una u otra tabla se obtienen valores de los parámetros resistentes ciertamente distintos. Desafortunadamente, este argumento se omite en casi todas las publicaciones que incluyen estas correlaciones.

Lo que se expresó en el inciso b) del criterio de Hoek y Brown de esta tesis corresponde al macizo rocoso únicamente.

Criterio de Singh & Singh (2005).

El criterio de rotura de Singh y Singh considera el estado crítico del material, en el que éste pierde totalmente la resistencia friccionante. Se trata de una envolvente parabólica que considera que en estados de altos de confinamiento, el esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) es incapaz de seguir aumentando, tal y como sucede en realidad en los geomateriales. El límite del esfuerzo confinante para el cual se da esta situación, según sus autores, es igual a la resistencia a la compresión simple σ_c^i . La expresión que define este criterio, en el espacio de los esfuerzos principales, se escribe como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c^i + A\sigma_3 - \frac{A\sigma_3^2}{2\sigma_c^i} \quad (3.12)$$

Donde:

$$A = \frac{2\text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi}; \text{ para } \phi \text{ en presiones de confinamiento bajas.}$$

σ_1 = Esfuerzo principal mayor.

σ_3 = Esfuerzo principal menor.

σ_c = Resistencia a la compresión simple de la roca intacta.

Para obtener el parámetro σ_c^i se utiliza la derivada de la expresión (5.9).

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + A - \frac{A \sigma_3}{\sigma_c^i} \quad (3.13)$$

Cuando la derivada del esfuerzo desviador es igual a cero; el esfuerzo de confinamiento es igual a la resistencia a la compresión (Singh 2005). Esta situación representa el estado crítico del material:

$$\frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \sigma_3} = 0; \sigma_3 = \sigma_c \quad (3.14)$$

Para la obtención de la resistencia a la tensión indirecta con el criterio de Singh & Singh se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = \sigma_c^i \frac{1 + A - \sqrt{1 + A(A + 4)}}{A} \quad (3.15)$$

Para obtener la envolvente de rotura en el espacio de Mohr se emplean las siguientes ecuaciones para ambos criterios (Solución de Balmer, 1952):

$$\sigma_N = \sigma_3 + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} + 1} \quad (3.16)$$

$$\tau_C = (\sigma_N - \sigma_3) \sqrt{\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}} \quad (3.17)$$

Las figuras x y y muestran las envolventes del criterio de Singh y Singh en el espacio de los esfuerzos principales y en el espacio de Mohr, respectivamente.

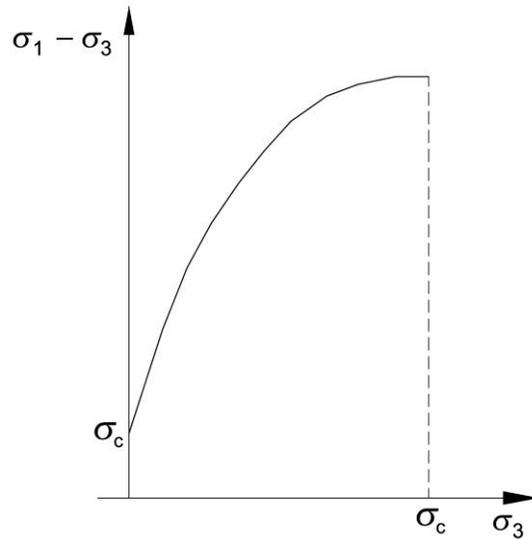


Figura 3.8. Representación gráfica del estado crítico del material en el espacio de los esfuerzos principales.

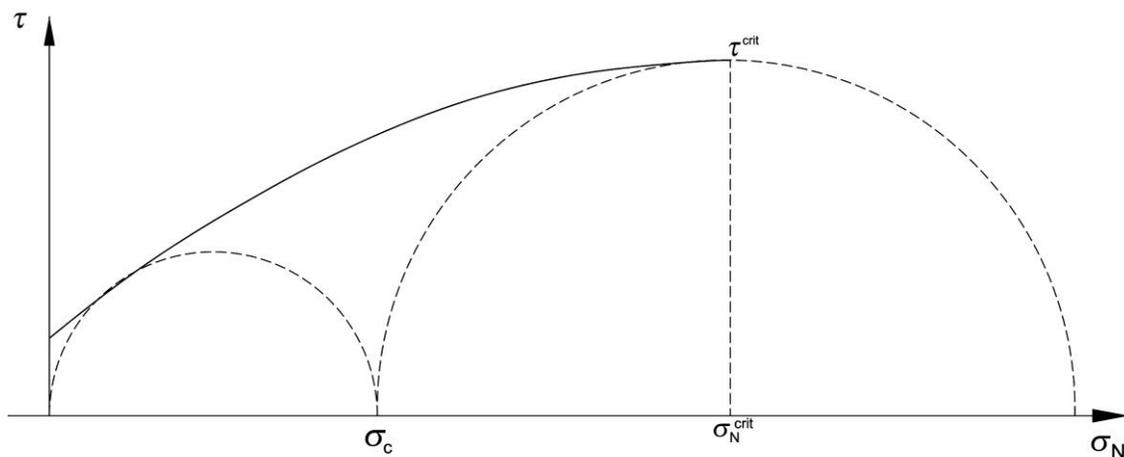


Figura 3.9. Representación gráfica del estado crítico del material en el espacio de Mohr.

Criterio de Mohr-Coulomb.

La fórmula que se utilizó para el análisis de la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb en el espacio de los esfuerzos principales es la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (3.18)$$

Donde

c = La cohesión del material.

ϕ = El Angulo de fricción interna del material.

La ecuación del esfuerzo cortante en el espacio de los esfuerzos principales:

$$\tau = c + \sigma_N \tan \phi \quad (3.19)$$

Donde

τ = El esfuerzo cortante.

c = Cohesión.

σ_N = Esfuerzo normal.

ϕ = Angulo de fricción Interna.

En este estudio de resistencias el modelo de Singh y Singh se utiliza para estimar los parámetros de Mohr-Coulomb de la roca matriz y el procedimiento es como sigue: mediante un proceso de regresión no lineal se calculan los parámetros σ_c^i y A de este criterio; posteriormente, el ángulo de fricción interna y la cohesión del material se calculan con las siguientes expresiones.

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{A}{2 + A} \right) \quad (3.20)$$

$$c = \sigma_c^i \left(\frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \right) \quad (3.21)$$

Conocer los valores de la cohesión y el ángulo de fricción interna de la roca matriz ayuda especialmente en el proceso de caracterización de la resistencia debido, sobretodo, a que son parámetros con los que los ingenieros están familiarizados, lo cual no siempre sucede con parámetros como el m_i de Hoek & Brown o el A de Singh & Singh.

3.2 Resultados del estudio de resistencia de la roca intacta.

Como resultado de las investigaciones geológicas y de las pruebas de laboratorio, se obtuvieron nueve litologías básicas del tramo en estudio que abarcan los 5 proyectos de túneles carreteros de la carretera Durango-Mazatlán que trata esta tesis

Las litologías derivadas de la interpretación geológica y los resultados de las pruebas de laboratorio se mencionan a continuación:

- Toba Riolítica con textura ignimbrítica.
- Riolita fluidal.
- Toba lítica cloritizada.
- Toba fluidal.
- Brecha andesítica hematizada.
- Toba brechoide.
- Toba lítica de color gris, grano fino y textura afanítica
- Toba lítica alterada.
- Toba lítica cristalina.

A continuación se presentan los resultados de este estudio en forma de resumen de cada unidad, en el anexo 3.1 de este capítulo se integra la ficha de resultados completa producto del estudio antes descrito. En el anexo 3.2 se describen las litologías de las probetas ensayadas y en el anexo 3.3 las fotografías de las probetas.

Las ecuaciones descritas en los criterios para la integración de los resultados fueron capturadas en el programa grapher 3.0, con el cual también se realizó el ajuste de curvas por medio del algoritmo de Levenberg-Marquardt, el cual provee una solución numérica al ajuste de curvas por la dispersión de resultados y minimizar el error que pudiera resultar para una gráfica no lineal; así mismo se plasma en cada litología el coeficiente de correlación (R^2) producido por cada criterio utilizado.

Ttl **Toba lítica:** tobas líticas de composición riolítica, sanas y silicificadas de tonalidad rosácea, con una matriz de pasta (vidrio) fina y algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas y varios de riolitas e ignimbritas, algunos de ellos con textura fluidal, la matriz también está formada por líticos tamaño arena fina. Poseen un microfracturamiento sellado con sílice.

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos y de acuerdo con el criterio de la ISRM (1978), se le define como una roca de dureza importante, alta resistencia y baja deformabilidad. Dada la dispersión inicial de resultados, la población de probetas fue dividida en



un grupo de menor resistencia y un grupo de mayor resistencia. La densidad húmeda promedio resultó de 23.14 (kN/m³) en el caso de las probetas de resistencia mayor y de 22.95 en el caso de las probetas de resistencia menor.

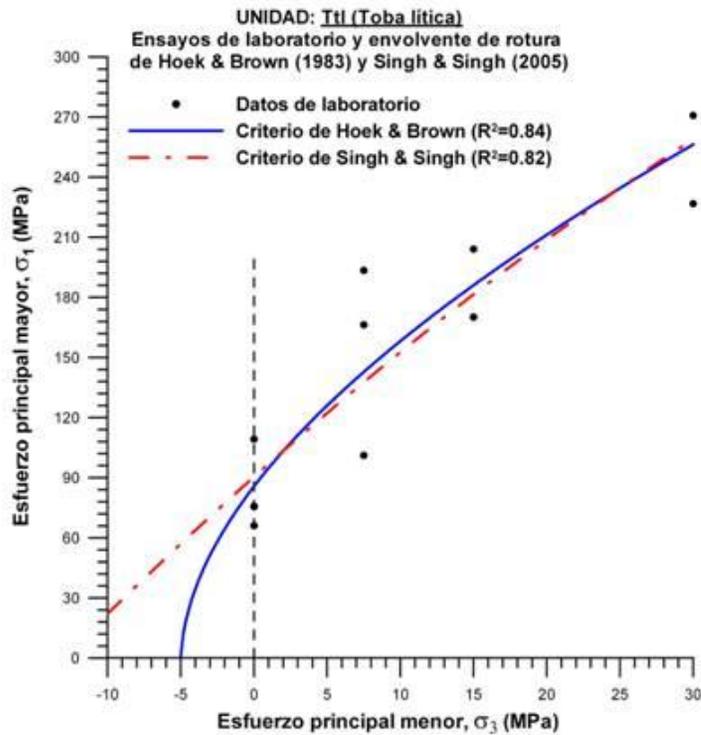


Figura 3.10. Envolturas de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad Ttl (Toba lítica)

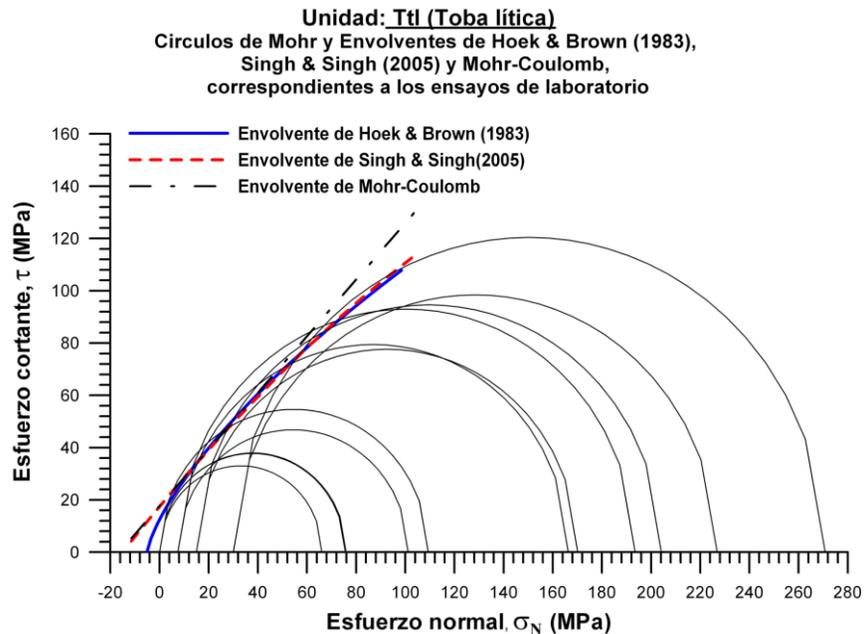


Figura 3.11. Envolturas de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad Ttl (Toba lítica).

Unidad Ttl (Toba lítica)				
Criterio	Parámetro			Coef. de correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	17	86	5	0.84
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	5.50	90	13	0.82
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ (°)	σ_c^i (MPa)	
	18	47	90	

Tabla 3.1. Parámetros de resistencia para la unidad Ttl.

Tr

Riolita fluidal: Riolita fluidal de color rosa anaranjado, sana con clastos asimilados de color rojizo por estar hematizados. La textura puede cambiar de fluidal a granular (de grano fino) y texturas locales de ignimbritas fluidales y brechoides; los tramos brechoides tienen una matriz lítica muy dura y resistente. Roca de muy baja porosidad.

A partir de los ensayos se deduce que es una roca de muy alta resistencia y dureza. Tiene muy baja deformabilidad. Su densidad húmeda promedio resultó de 22.79 (kN/m³).

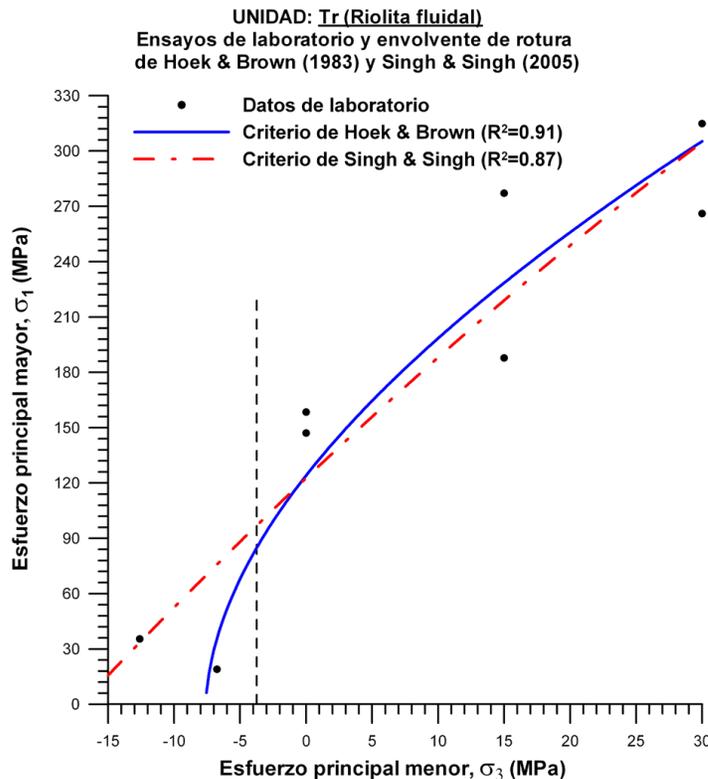


Figura 3.12. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad Tr (Riolita fluidal)

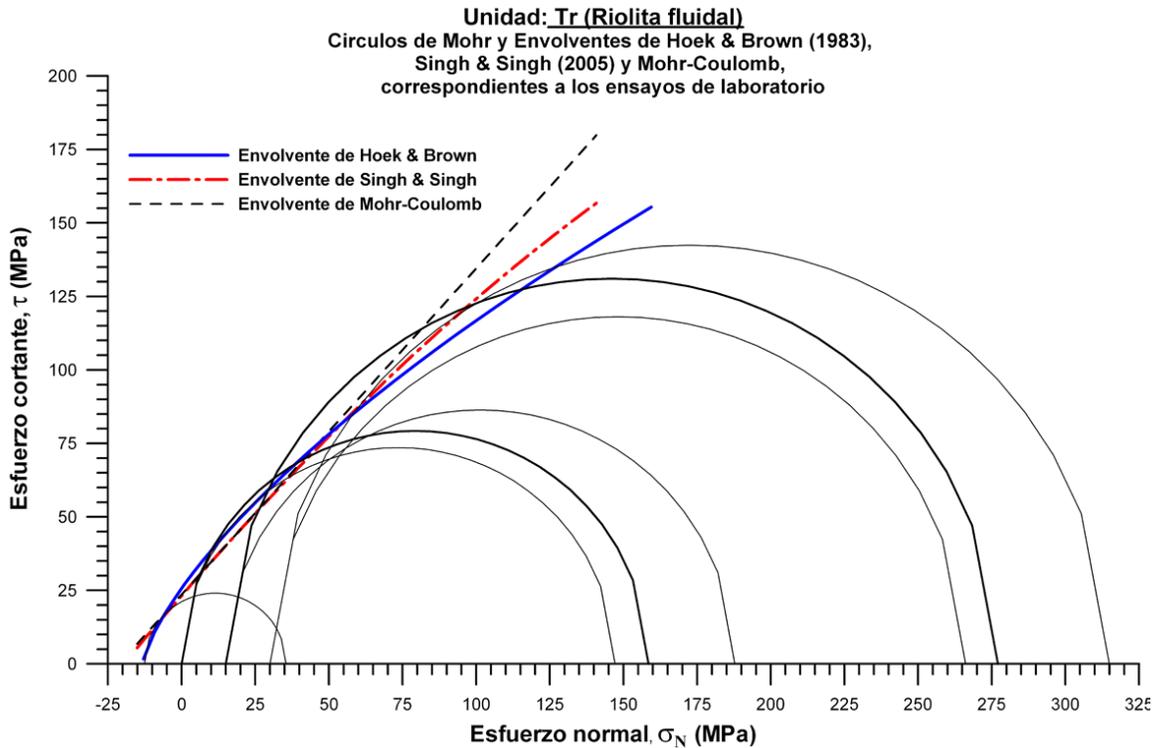


Figura 3.13. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad Tr (Riolita fluidal)

Unidad Tr (Riolita fluidal)				
Criterio	Parámetro			Coef. De correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	6.22	124	7.6	0.91
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	5.78	123	17.1	0.87
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ ($^\circ$)	σ_c^i (MPa)	
	23.6	48	123	

Tabla 3.2. Parámetros de resistencia para la unidad Tr.

Tt1c

Toba lítica cloritizada: Toba lítica de composición riolítica de color gris claro y blanquecino, con algunos clastos de tonos verdosos por estar en mayor o menor proporción cloritizados. También presenta clastos de pómez, riolitas, pórfidos y rocas afaníticas de basaltos o andesitas. La matriz que une a los clastos es heterogénea, granular y con textura arenosa y ligeramente porosa. Puede estar en mayor o menor grado cloritizada y representa un 25% de la muestra, Puede estar microfisurada con respaldos oxidados.



De acuerdo con los ensayos y el criterio de la ISRM (1978) se le clasifica como una roca débil, o de baja resistencia y de deformabilidad

alta. Por la dispersión de resultados también fue subdividida en dos grupos: de mayor y menor resistencia. La densidad húmeda promedio resultó de 23.68 (kN/m³) en el caso de las probetas de resistencia mayor y de 22.64 (kN/m³) en el caso de las probetas de resistencia menor.

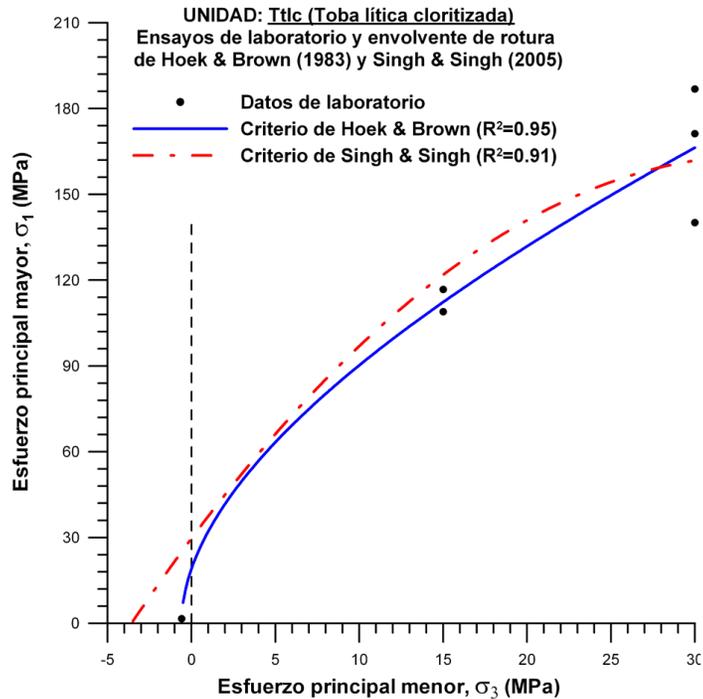


Figura 3.14. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad Ttlc (Toba lítica cloritizada)

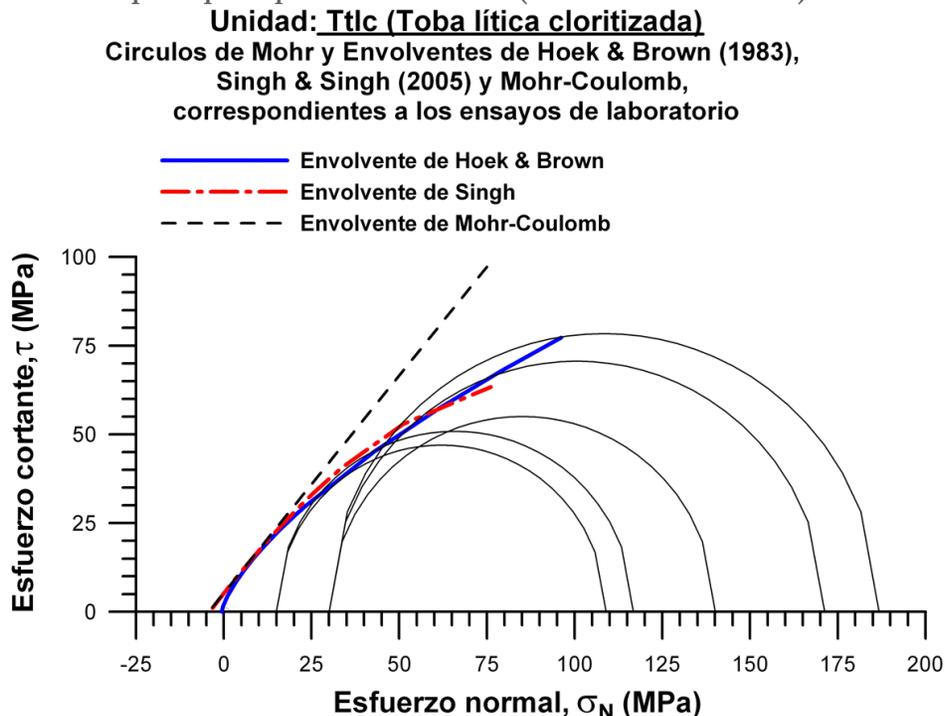


Figura 3.15. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad Ttlc (Toba lítica cloritizada)

Unidad Ttlc (Toba lítica cloritizada)				
Criterio	Parámetro			Coef. de correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	31.9	19	0.6	0.95
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	6.90	29.7	3.6	0.91
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ (°)	σ_c^i (MPa)	
	5.3	51	29.7	

Tabla 3.3. Parámetros de resistencia para la unidad Ttlc.

Tign

Toba fluidal: Toba fluidal de color gris-rosáceo, textura brechoide, fracturada y hematizada. Sana y resistente (compacta). Microfisuras selladas con cuarzo.



De los resultados de laboratorio se deduce que es una muestra de resistencia alta y baja deformabilidad. El valor de densidad húmeda promedio fue de 24.71 (kN/m3).

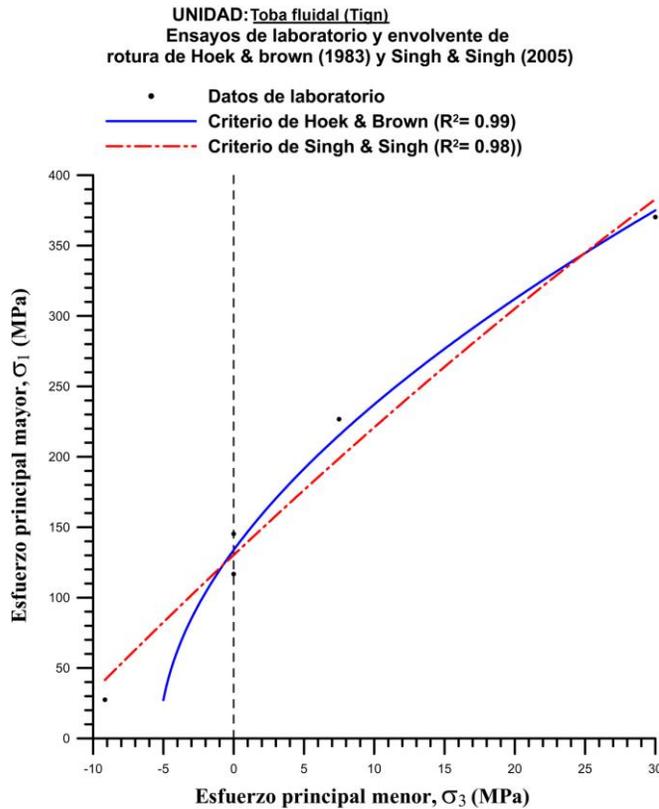


Figura 3.16. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad Tign (Toba fluidal).

UNIDAD: Toba fluidal (Tign)
Circulos de Mohr y Envolventes de Hoek & Brown (1983), Singh & Singh (2005)
y Mohr-Coulomb, correspondientes a los ensayos
a compresion simple + triaxiales

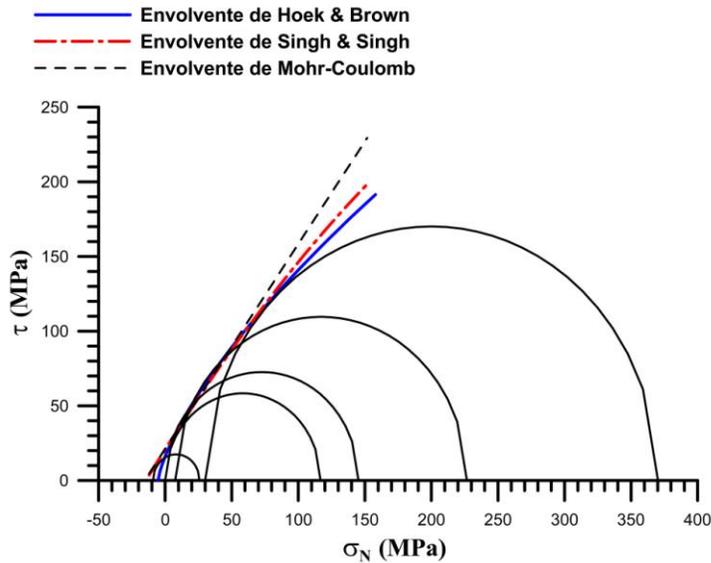


Figura 3.17. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad Tign (Toba fluidal).

UNIDAD Tign (Toba fluidal)				
Criterio	Parámetro			Coef. de correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	25.2	133,76	5.3	0.99
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	8.39	130.23	13.27	0.98
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ (°)	σ_c^i (MPa)	
	21.25	53.85	130.23	

Tabla 3.4. Parámetros de resistencia para la unidad Tign (Toba fluidal).

T-bah

Brecha andesítica hematizada: De color rojizo. Con fisuras selladas con calcita.



Los resultados de laboratorio demostraron que el material posee alta resistencia y baja deformabilidad. El valor de densidad húmeda promedio fue de 24.09 (kN/m³).

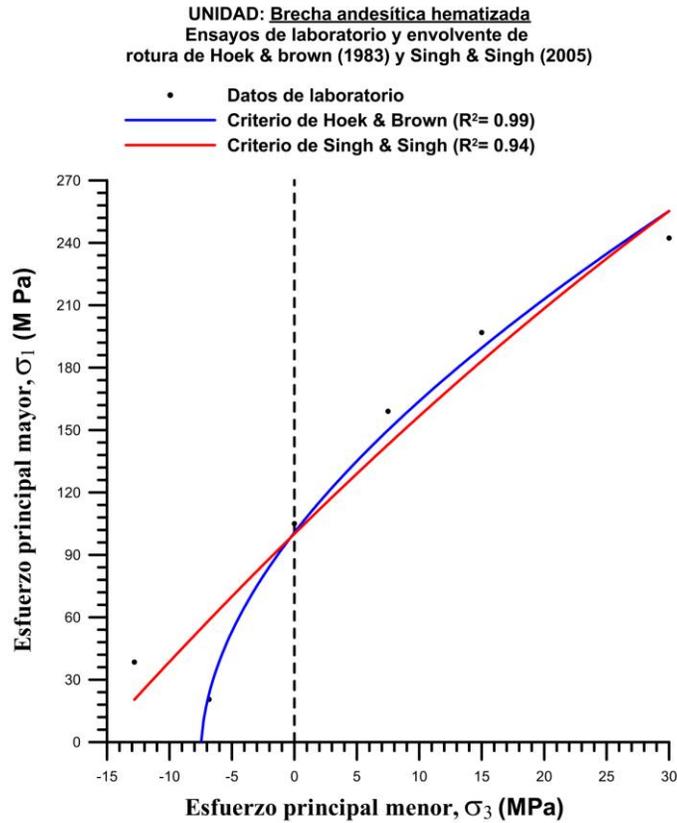


Figura 3.18. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad T-bah (Brecha andesítica hematizada).

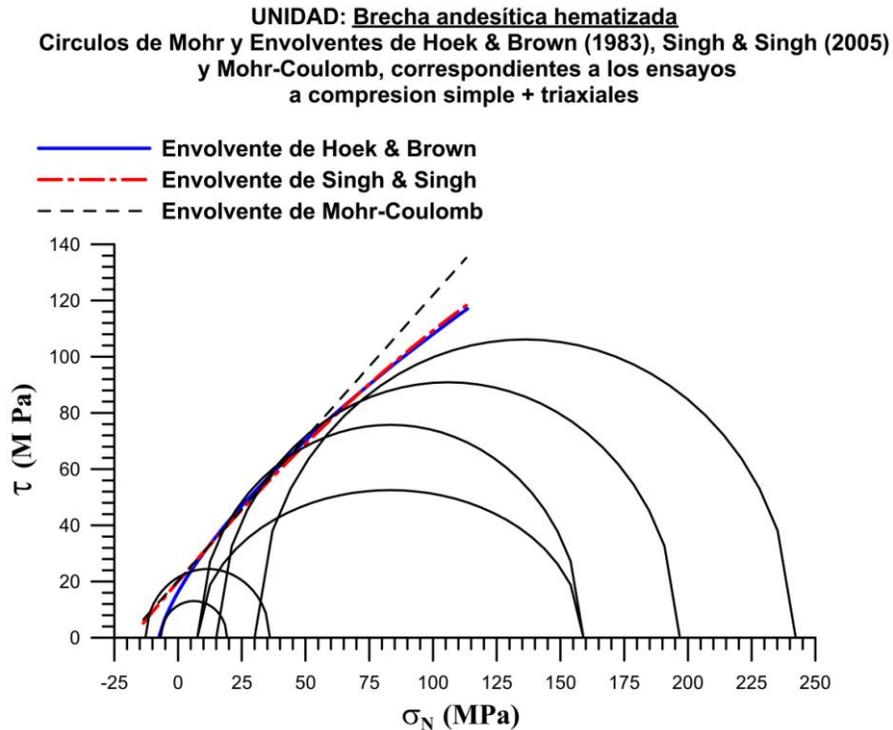


Figura 3.19. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad T-bah (Brecha andesítica hematizada).

UNIDAD T-bah (Brecha andesítica hematizada)				
Criterio	Parámetro			Coef. de correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	13.44	100.74	7.45	0.99
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	4.96	99.26	15.63	0.94
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ ($^\circ$)	σ_c^i (MPa)	
	20.33	45.45	99.26	

Tabla 3.5. Parámetros de resistencia para la unidad T-bah (Brecha andesítica hematizada).

Ttbr

Toba brechoide: Toba brechoide de grano grueso color violeta, sano y compacto, con textura heterogénea brechoide (clastos tamaño arena gruesa subredondeados y redondeados de color rojizo). Los clastos de tonos rosados, rojizos, grises y violetas son tamaño granzón, no presenta fisuras ni fracturas. Contiene algunos clastos de pómece.



Según el criterio del ISRM (1978) se le clasifica a la muestra como de resistencia media. El valor de densidad húmeda promedio fue de 24.09 (kN/m³).

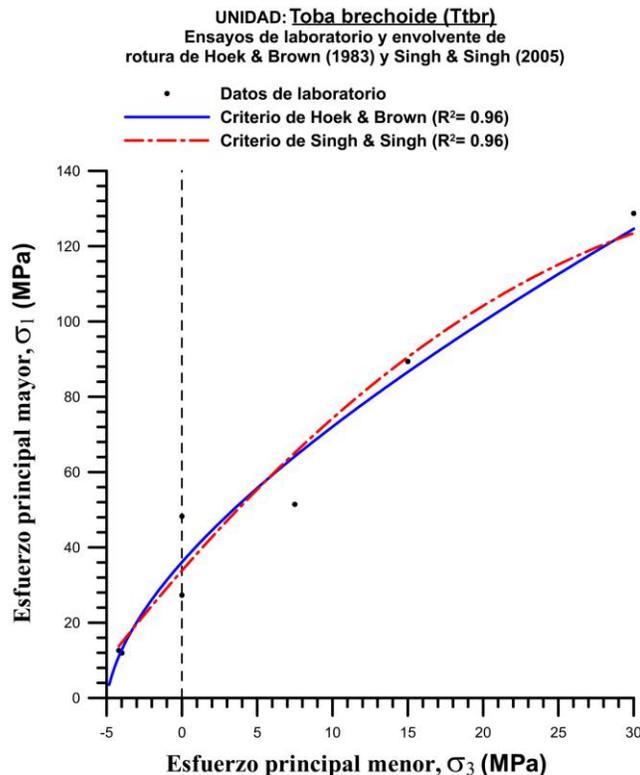


Figura 3.20. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad Ttbr (Toba brechoide).

UNIDAD: Toba brechoide (Ttbr)
Circulos de Mohr y Envolventes de Hoek & Brown (1983), Singh & Singh (2005)
y Mohr-Coulomb, correspondientes a los ensayos
a compresion simple + triaxiales

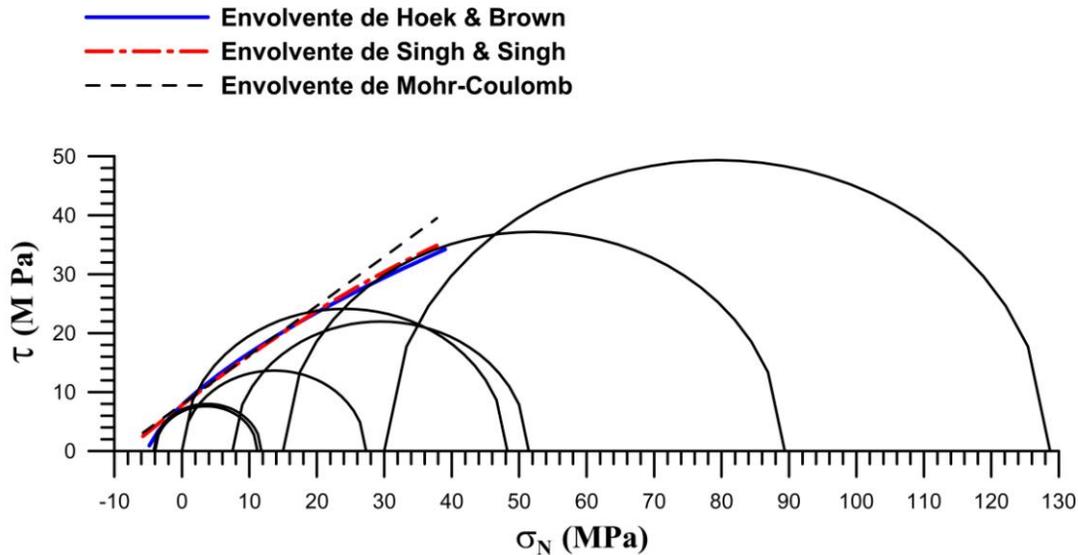


Figura 3.21. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad Ttbr (Toba brechoide).

UNIDAD Ttbr (Toba brechoide)				
Criterio	Parámetro			Coef. de correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	7,07	36.04	5.00	0,96
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	3,57	33,82	6,86	0,96
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ (°)	σ_c^i (MPa)	
	7,91	39.86	33,82	

Tabla 3.6. Parámetros de resistencia para la unidad Ttbr (Toba brechoide).

Ttl-alt

Toba lítica alterada. Toba lítica de color verde claro a blanquecino, con una incipiente a moderada alteración. La toba presenta un grano fino (tamaño arena) y una matriz con textura afanítica. Algunos clastos están limonitizados. Algunas de las muestras tienen moderada porosidad (baja densidad) y pequeñas microfisuras abiertas y oxidadas. En general es una roca de muy mala calidad.



De acuerdo con los ensayos y el criterio de la ISRM (1978) se le clasifica como una roca débil, o de baja resistencia y de deformabilidad alta. La densidad húmeda promedio resultó de 22.20 (kN/m³).

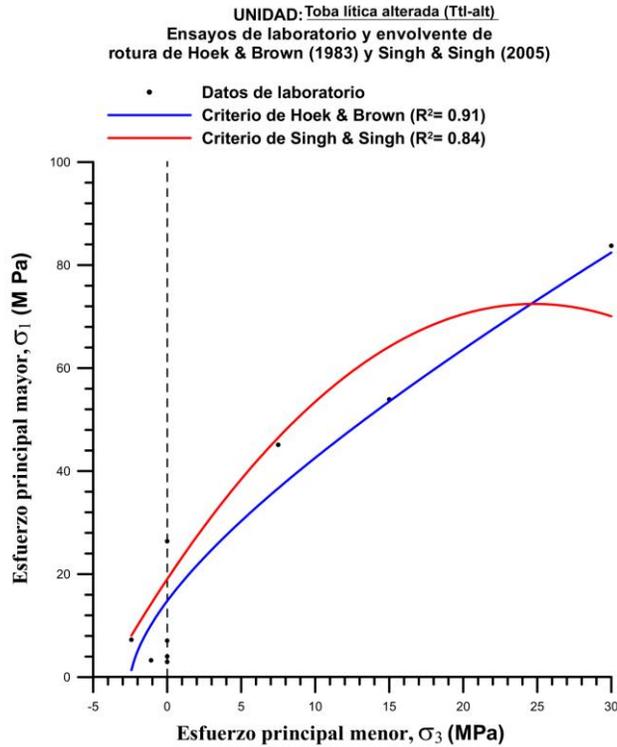


Figura 3.22. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad Ttl-alt (Toba lítica alterada).

UNIDAD: Toba lítica alterada (Ttl-alt)
Circulos de Mohr y Envolventes de Hoek & Brown (1983), Singh & Singh (2005) y Mohr-Coulomb, correspondientes a los ensayos a compresión simple + triaxiales

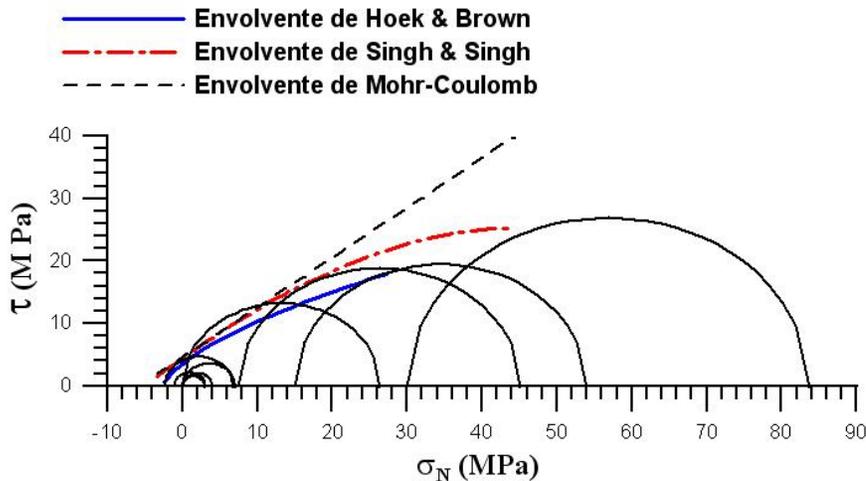


Figura 3.23. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad Ttl-alt (Toba lítica alterada).

UNIDAD Ttl-alt (Toba lítica alterada)				
Criterio	Parámetro			Coef. de correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	5.70	14.78	2.52	0.91
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	3.31	19.03	4.08	0.84
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ ($^\circ$)	σ_c^i (MPa)	
	4.58	38.56	19.03	

Tabla 3.7. Parámetros de resistencia para la unidad Ttl-alt (Toba lítica alterada).

Tb-c

Toba lítica cristalina. Toba lítica de color negro con clastos tamaño grava y bloques de pórfidos verdosos, la matriz es heterogénea y sana. Presenta cristales de plagioclasas y feldespatos, poca mica y diminutos cristales de ferromagnesianos; y pocos cristales de cuarzo blanquecino. Además, destacan líticos diminutos afaníticos y de color negro tamaño arena.



A partir de los ensayos se deduce que es una roca de muy alta resistencia y dureza. Tiene muy baja deformabilidad. Su densidad húmeda promedio resultó de 25.19 (kN/m3).

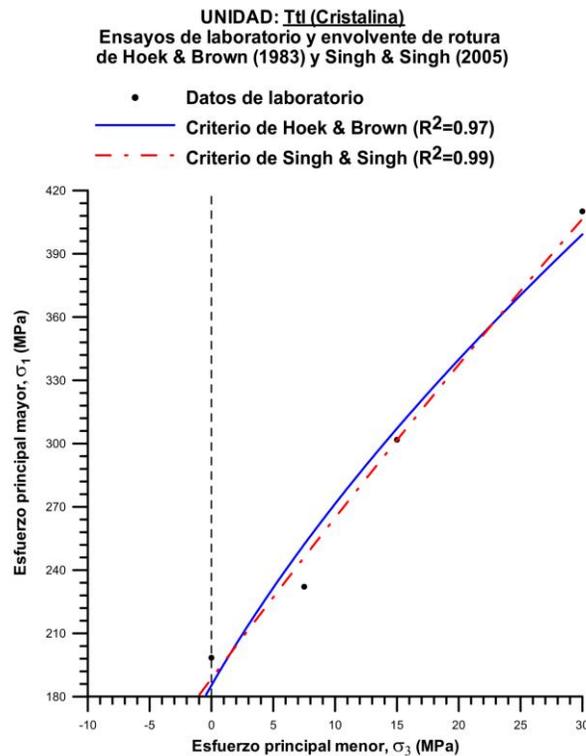


Figura 3.24. Envolventes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad Tb-c (Toba lítica cristalina).

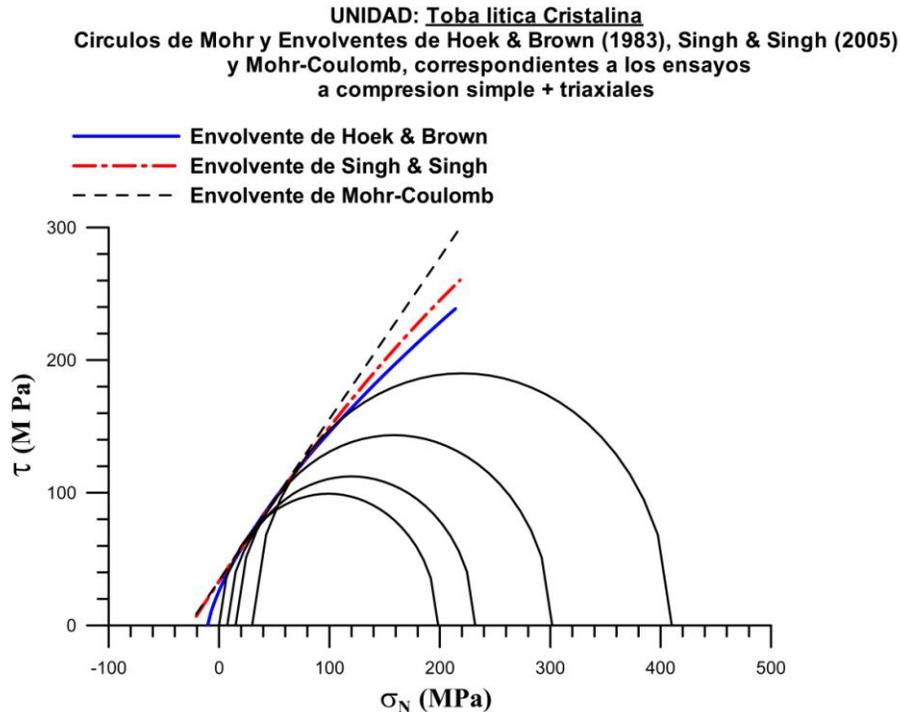


Figura 3.25. Envoltentes de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad Tb-c (Toba lítica cristalina).

UNIDAD Tb-c (Toba lítica cristalina)				
Criterio	Parámetro			Coef. de correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	18.33	185.38	10.08	0.97
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	6.81	188.55	22.93	0.99
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ (°)	σ_c^i (MPa)	
	33.73	50.62	188.55	

Tabla 3.8. Parámetros de resistencia para la unidad Tb-c (Toba lítica cristalina).

Ttg **Toba lítica de color gris, grano fino y textura afanítica.**
 Toba lítica de grano muy fino de colores grises, violetas y rojizos con textura afanítica homogénea y escasos líticos tamaño arena. La matriz puede estar ligeramente cloritizada y algunos líticos hematizados. Roca en general sana y compacta.

De acuerdo con los ensayos y el criterio de la ISRM (1978) se le clasifica como una roca de resistencia alta y de deformabilidad baja. Por la dispersión de resultados también fue subdividida en dos grupos: de mayor y menor resistencia. La densidad húmeda promedio resultó



de 25.30 (kN/m³) en el caso de las probetas de resistencia mayor y de 24.42 (kN/m³) en el caso de las probetas de resistencia menor.

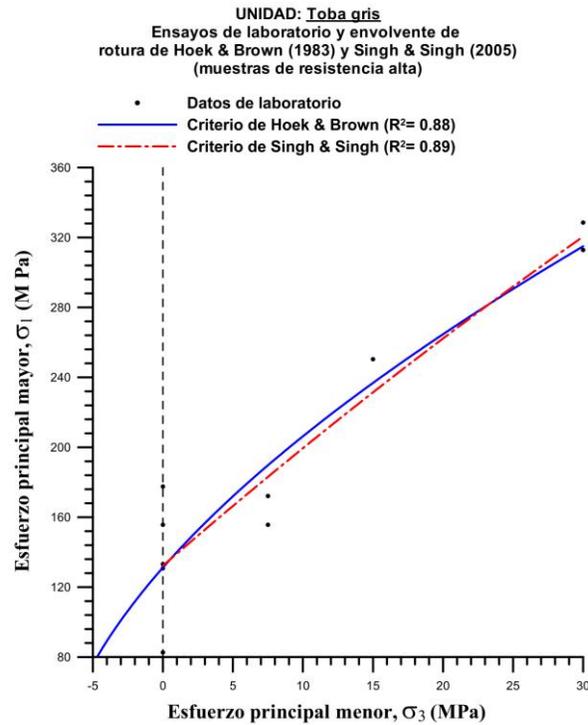


Figura 3.26. Envolturas de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de los esfuerzos principales para la unidad Ttg (Toba gris).

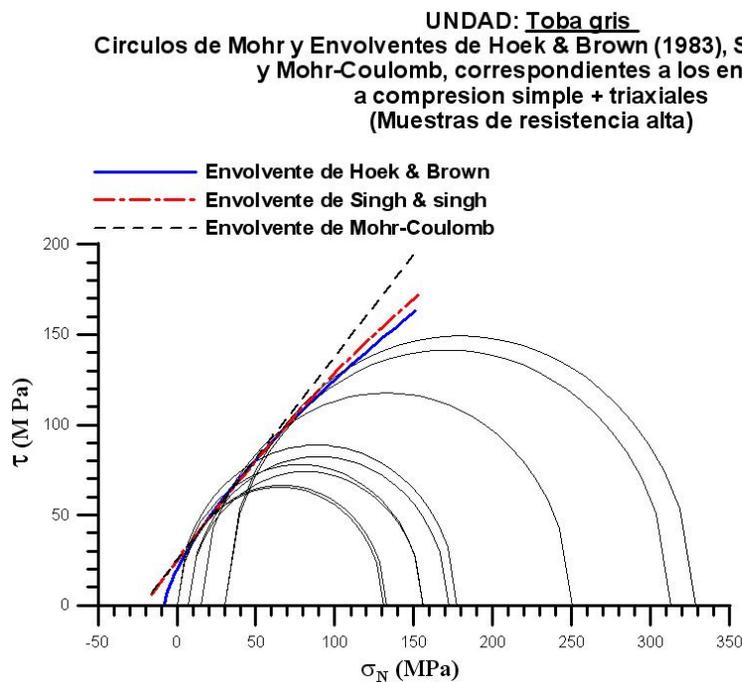


Figura 3.27. Envolturas de rotura y resultados de laboratorio en el espacio de Mohr para la unidad Ttg (Toba gris).

UNIDAD Ttg (Toba gris)				
Criterio	Parámetro			Coef. de correlación
Hoek & Brown (1983)	m_i	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	16.26	131.17	8.04	0.88
Singh & Singh (2005)	A	σ_c^i (MPa)	σ_t (MPa)	R^2
	5.95	132.23	17.98	0.89
Mohr-Coulomb	c (MPa)	ϕ (°)	σ_c^i (MPa)	
	25.08	48.45	132.23	

Tabla 3.9. Parámetros de resistencia para la unidad Ttg (Toba gris).

En la siguiente tabla a manera de resumen se muestran los resultados del módulo de elasticidad promedio y la resistencia a la compresión simple de cada litología estudiada, bajo los criterios antes descritos de Deere y Miller y la clasificación del ISRM (1978) descritos en el capítulo 1 de esta tesis.

Unidad	Módulo de elasticidad promedio E_{50}^{\tan} (GPa)	σ_c^i (MPa) Promedio	$\frac{E_{50}^{\tan}}{\sigma_c^i}$	Clasificación Deere & Miller, (1966)	Clasificación ISRM (1978)
Ttl	20.2	88	230	CM, resistencia media, relación de deformabilidad media	R4, resistente
Ttle	15.1	24	629	EH, muy baja resistencia, alta relación de deformabilidad	R2, débil
Tr	20.6	124	166	BL, alta resistencia, baja relación de deformabilidad	R5, muy resistente
Tign	34.33	130.23	263.61	BL, alta resistencia, baja relación de deformabilidad	R5, muy resistente
T-bah	27.18	99.26	273.79	BL, alta resistencia, baja relación de deformabilidad.	R4, resistente
Ttbr	10.91	33.82	322.75	DM, resistencia media, relación de deformabilidad media	R3, resistencia media
Ttl-alt	3.51	19.03	184.66	EL, resistencia muy baja, relación de deformabilidad baja	R2, débil
Tb-c	33.72	188.55	178.84	BL, alta resistencia, baja relación de deformabilidad	R5, muy resistente

Ttg	35.11	132.23	267.65	BL, alta resistencia, baja relación de deformabilidad	R5, muy resistente
------------	-------	--------	--------	---	--------------------

Tabla 3.10. Tabla resumen de los resultados obtenidos de la resistencia de la roca intacta.

La siguiente gráfica muestra los resultados de las diferentes litologías analizadas plasmadas en la grafica de Deere y Miller.

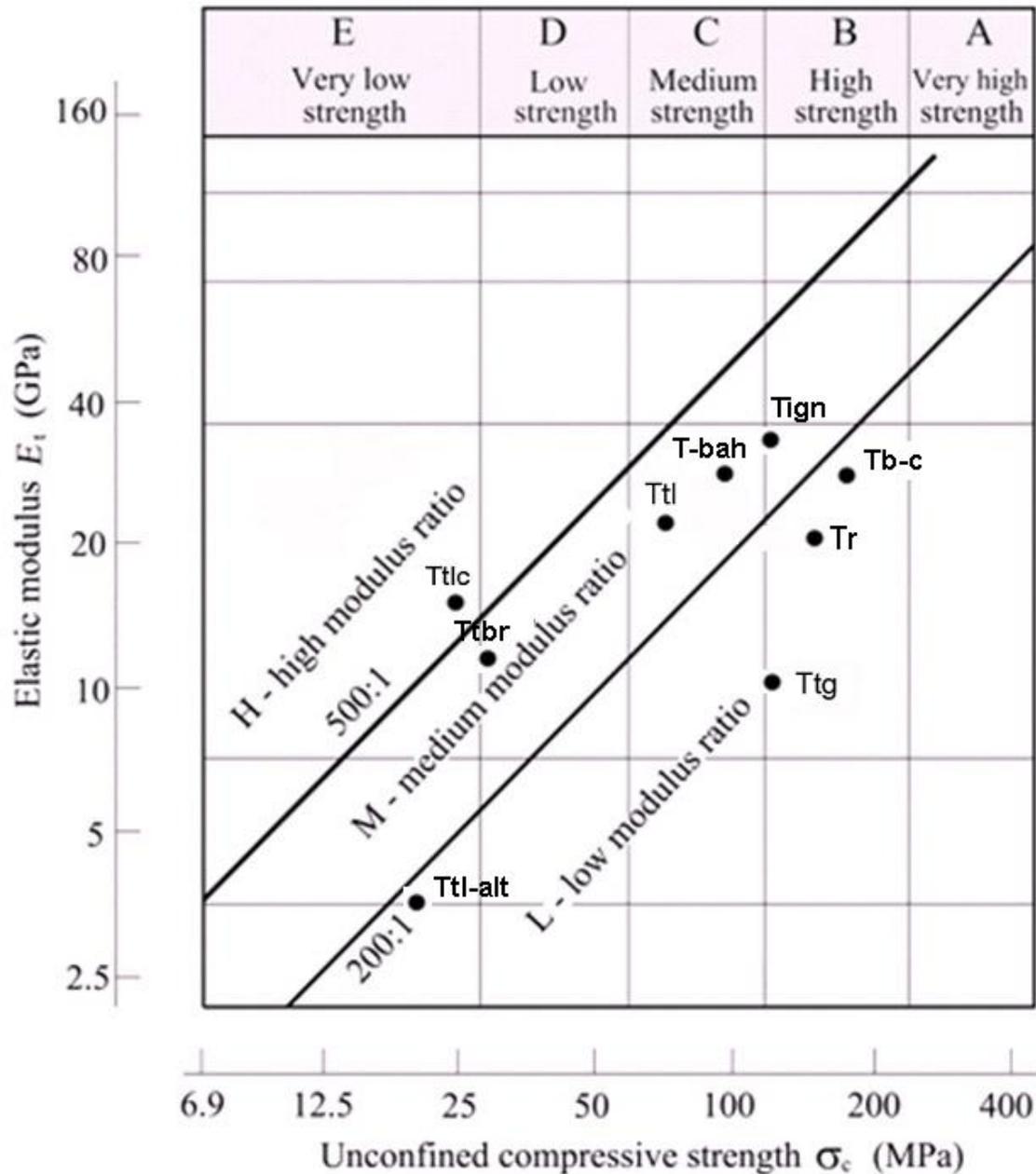


Figura 3.28. Grafica de Deere y Miller para las litologías estudiadas.

En la figura 3.28 se observa la posición que ocupan las diferentes litologías dentro de la grafica de Deere y Miller (1966).

Para el diseño de las etapas y soporte de una excavación:

Se caracterizaron las unidades, adjudicándoles su clasificación en términos cualitativos y cuantitativos. A las unidades de roca por excavar se les clasificó, según convino, de acuerdo a algunos de los sistemas más usuales de clasificación de masas rocosas para túneles, como son las clasificaciones geomecánicas de Barton (Q), Bieniawski (RMR) y Hoek (GSI). De dicha clasificación se desprendieron las recomendaciones preliminares para soporte de la excavación, tiempos de autosoporte y tamaño máximo del claro que no requiere de soporte. Se elaboró un perfil geotécnico integrado, el cual muestra la distribución de las unidades geotécnicas e indica las clasificaciones geomecánicas a lo largo del eje de los túneles.

Las clasificaciones geomecánicas se realizaron definiendo unidades que tuvieran propiedades de deformabilidad y resistencias similares, creando un modelo con el que se prepararon las bases para los análisis teóricos y numéricos del comportamiento tensodeformacional de las excavaciones en sus distintas etapas, y de la interacción con los elementos estructurales que se emplazarán dentro de los túneles.

Se realizaron los modelos en programas de elementos finitos a fin de corroborar lo propuesto en las bases teóricas del comportamiento de la excavación y del soporte.

De esta manera la investigación realizada a lo largo de la traza de los túneles descritos sobre la traza de la carretera Durango-Mazatlán en el tramo El Salto – Concordia, Municipio de Pueblo Nuevo cumple con el objetivo de simplificar el proceso para determinar las unidades geotécnicas de cualquier proyecto sobre la misma carretera a través de los ensayos de laboratorio realizados y el estudio de la roca intacta de la zona.



**“MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO
EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS”**



“CONCLUSIONES”

Conclusiones

El estudio de mecánica de rocas esta ligado profundamente a la geología, y es una de las herramientas básicas que tiene el ingeniero que se enfrente a problemas de diseño de una excavación, ya sea a cielo abierto o subterráneo.

Una buena descripción de los sondeos contribuye, así mismo a la realización de una selección de muestras de laboratorio adecuada, necesaria para una campaña de ensayos exitosa.

Los estudios de campo y las exploraciones directas e indirectas deben ser planeados de acuerdo al proyecto, en cuanto a magnitud y costo del mismo.

El laboratorio deberá dar garantía de las pruebas realizadas, mediante fotos y resultados coherentes de los mismos, así como reportar cualquier anomalía que pudiera suceder con alguna muestra seleccionada y dar un reporte del desarrollo de las pruebas realizadas.

De las pruebas más comunes en el laboratorio de mecánica de rocas se encuentran las pruebas de compresión simple, la determinación del modulo de elasticidad al 50%, la compresión triaxial no drenada y la prueba de corte directo. En estas pruebas se debe tener especial atención en el proceso y equipo que se utiliza, así como en los resultados que se obtienen.

El personal de laboratorio debe estar capacitado y tener conocimiento del material con el que trabaja antes de verificar los resultados obtenidos e informar cualquier anomalía que se pudiera presentar durante la ejecución de las pruebas.

El ingeniero que realiza la integración de los datos de laboratorio debe conocer los criterios de resistencia que representan mejor el comportamiento de la roca y decidir cual le conviene utilizar para ajustar mejor los resultados obtenidos.

Las litologías estudiadas en el capítulo 3 de esta tesis se analizaron por los criterios de Hoek & Brown, Singh & Singh y Mohr-Coulomb para los cuales se indica el coeficiente de correlación, así como los parámetros obtenidos de la regresión, dando un intervalo de valores necesarios para realizar la integración geotécnica.

Para esta tesis los resultados obtenidos fueron plasmados en fichas donde se describe la resistencia de la roca intacta y los criterios con los que se llevo a cabo el análisis de resistencia.

Las litologías presentes en esta tesis son las que predominan en la zona de estudio, de su análisis se puede concluir que: La resistencia en una roca esta muy

relacionada con la mineralización, planos de falla preexistentes, microfracturamiento, porosidad, densidad del material, grado de alteración (cloritización, limonitización, argilitización, etc.), entre mas contenido de minerales contenga la roca (cuarzo, ortoclasas, fenocristales, etc.) su resistencia es mayor. Las litologías estudiadas en el capítulo 3 se pueden dividir en tres grupos: de resistencia alta, media y baja a muy baja.

Grupo I		Deere y Miller(BL)
U. Litológicas	-Tb-c (Toba lítica cristalina) -Ttg (Toba gris) -Tign (Ignimbrita) -Tr (Riolita fluidal)	Resistencia alta, con una relación de deformabilidad baja

Grupo II		Deere y Miller(CM)
U. Litológicas	-Tbah (Brecha andesítica hematizada) -Ttl (Toba lítica)	Resistencia media, con una relación de deformabilidad media.

Grupo III		Deere y Miller(DM-EH)
U. Litológicas	-Ttbr (Toba brechoide) -Ttlc (Toba lítica cloritizada) -Ttl-alt (Toba lítica alterada)	Resistencia baja a muy baja, con una relación de deformabilidad de alta a baja.

Para ciertos materiales es conveniente utilizar el criterio de Singh & Singh o el criterio de Hoek & Brown, el criterio describirá la naturaleza mecánica de la roca,

Para esta tesis se utilizó el criterio de Singh & Singh para realizar la integración geotécnica de las litologías, porque a mi parecer los parámetros de Singh & Singh tienen un uso mas aplicado al comportamiento mecánico de los materiales que los parámetros de Hoek & Brown; sin embargo no se debe perder de vista la correlación que tienen los resultados de Hoek & Brown al momento de realizar la integración de los resultados de las pruebas de laboratorio con el fin de aproximar los parámetros del macizo.

La geología de la carretera Durango-Mazatlán en el tramo comprendido por los 5 túneles analizados puede variar en unos cuantos metros, los resultados de las pruebas de laboratorio fueron analizadas de tal manera que la integración geotécnica fuera lo mas riguroso posible, y así obtener los parámetros mecánicos de manera más precisa.

Las probetas de resistencia alta tienen una matriz afanítica de grano muy fino, y los fenocristales son mejor definidos, así como una mayor cantidad de minerales. Las probetas de baja resistencia son porosas, con minerales alterados, baja



densidad y el grano es más grueso Las probetas de resistencia media son una transición entre las bajas y las altas.

**MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO
EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS”**



“BIBLIOGRAFIA”

BIBLIOGRAFIA

Evert Hoek “Hoek-Brown Failure Criterion” –2002 Edition

Bhawani Singh and Rajnish K. Goel, “Tunnelling in weak rocks”; Elsevier Volume 5, 2006 edition.

Luís Gonzáles de Vallejo “Ingeniería Geológica”; Prentice Hall,

Dr. E. Hoek. “Rock Engeeniring Notes”;

Carlos López Jimeno, Íngeo túneles, edita Carlos López Jimeno, Madrid 2002

“Geology engineering”, geology 229, leture 6 Basic Rock Classification and Engineering Considerations

<http://www.monografias.com/trabajos/geologia>

www.rocscience.com/library/pdf/RL_1.pdf

http://es.wikipedia.org/wiki/Edad_de_Piedra

<http://www.xtec.es/~csoria1/apunts/castellano/metales.htm>

<http://www1.universia.es/CatalogaXXI/C10010PPESII1/S167619/P12800NN1/INDEX.HTML>

D.G.A. Whitten with J.R.V. Brooks “The Penguin Dictionary of Geology”; 1982.



**MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO
EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS”**



ANEXO 3.1

“FICHAS DE INTEGRACIÓN GEOTECNICA”

RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA ROCA INTACTA

FICHA DE RESISTENCIA PARA LA ROCA MATRIZ

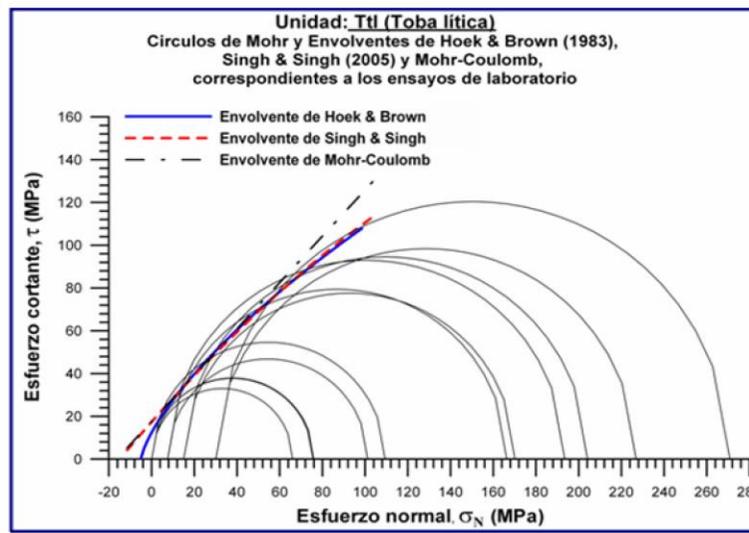
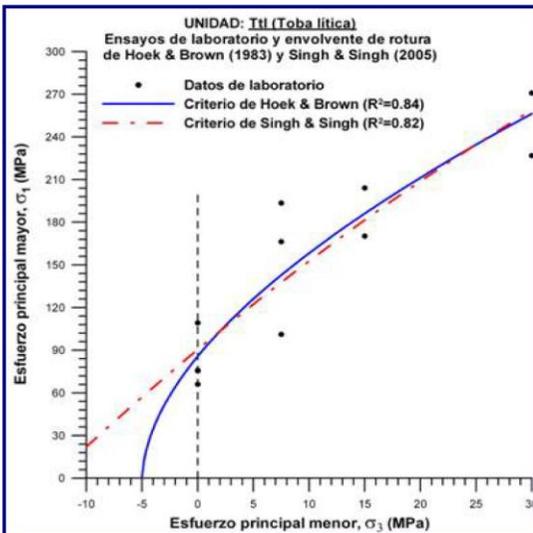
TÚNELES CARRETERA DURANGO-MAZATLÁN

Unidad Litológica	Descripción					Hoek & Brown	Singh & Singh	Mohr-Coulomb
Ttl (resistencia alta)	Toba lítica riolítica sana y silicificada de tonalidad rosacea, con una matriz de pasta (vidrio) fina y algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas y varios de riolitas e ignimbritas, algunos de ellos con textura fluidal, la matriz también está formada por líticos tamaño arena fina.					$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c^i \sqrt{\frac{m \sigma_3}{\sigma_c^i} + 1}$	$\sigma_1 = \sigma_c + A \sigma_3 - \frac{A \sigma_3^2}{2 \sigma_c} + \sigma_3$	$\sigma_1 = \frac{2 C \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$
								
Probeta (Muestra, probeta, sondeo)	Diámetro probeta (mm)	Factor de reducción FR=1/(50/d)^0.18	Esfuerzo confinante σ_3	σ_1	σ_1^*FR			
Mtx2,1-S2-T-7V	35	0.938	7.50	206.30	193.47			
Mtx2,2-S2-T-7V	35	0.938	15.00	181.50	170.21			
Mtx2,3-S2-T-7V	35	0.938	30.00	288.80	270.84			
Mtx1,1-S1-T-V	35	0.938	7.5	177.4	166.37			
Mtx1,2-S1-T-V	35	0.938	15	217.7	204.16			
Mcs1-S1-T-V	35	0.938	0	80.6	75.59			
Mcs2-S1-T-V	35	0.938	0	70.43	66.05			
Mcs-1,S4,T-T	35	0.938	0.00	80.96	75.93			
Mcs-2,S4,T-T	35	0.938	0.00	116.55	109.30			
Mtx2,1-S2-T-V	35	0.938	7.5	107.9	101.19			
Mtx2,3-S2-T-V	35	0.938	30	241.9	226.86			

CRITERIO DE HOEK Y BROWN			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
m	σ_c^i	σ_1	R ²
17.07	85.71	5.00	0.84

CRITERIO DE SINGH & SINGH			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
A	σ_c^i	σ_1	R ²
5.53	90.45	13.05	0.82

CRITERIO DE MOHR-COULOMB			
Cohesión	Angulo de fricción	RCS	
c	ϕ	σ_c^i	
17.70	47.26	90.45	



Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.

RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA ROCA INTACTA **FICHA DE RESISTENCIA PARA LA ROCA MATRIZ** **TÚNELES CARRETERA DURANGO-MAZATLÁN**

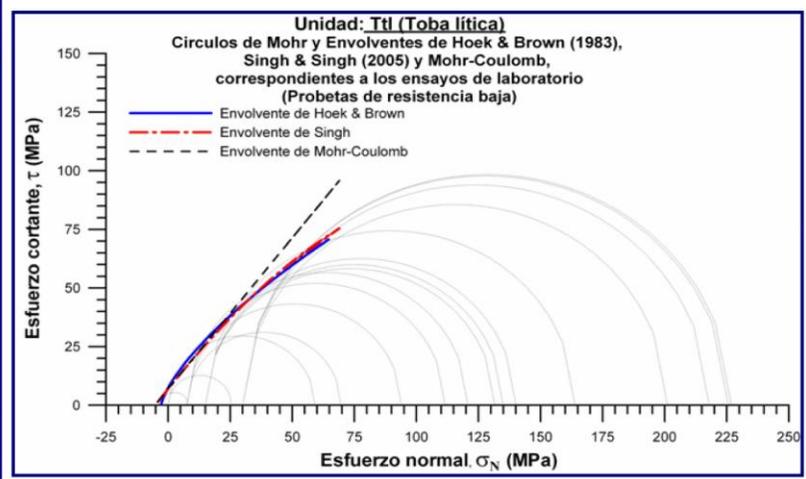
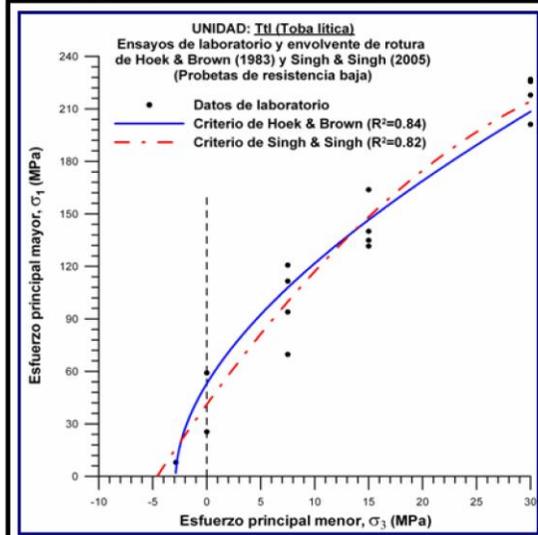
Unidad Litológica	Descripción				
Ttl (resistencia baja)	Tobas líticas con clastos de riolitas e ignimbritas, sanas a algo alteradas y algunas silicificadas de tonalidad rosácea, grisácea y violeta. Microfracturamiento sellado con sílice.				
					
Probeta (Muestra, probeta, sondeo)	Diámetro probeta (mm)	Factor de reducción FR=1/(50/d)^0.18	Esfuerzo confinante σ ₃	σ ₁	σ ₁ *FR
Mcs2-S2-T-7V	35	0.938	0.00	27.25	25.56
Mtx1.1-S2-T-7V	35	0.938	7.50	74.30	69.68
Mtx1.2-S2-T-7V	35	0.938	15.00	140.30	131.58
Mtx1.3-S2-T-7V	35	0.938	30.00	214.50	201.16
Mcs1-S2-T-7V	35	0.938	0	63.07	59.15
Mtx2.1-S1-T-V	35	0.938	7.5	100.2	93.97
Mtx2.2-S1-T-V	35	0.938	15	149.4	140.11
Mtx2.3-S1-T-V	35	0.938	30	232.4	217.95
Mtx1.3-S1-T-V	35	0.938	30.00	241.90	226.86
Mtx1.1-S4-T-T	35	0.938	7.50	128.76	120.75
Mtx1.2-S4-T-T	35	0.938	15	143.92	134.97
Mtx1.3-S4-T-T	35	0.938	30	240.63	225.67
Mtx2.1-S4-T-T	35	0.938	7.5	118.99	111.59
Mtx2.2-S4-T-T	---	1	15	174.77	163.902106
Mbr1-S1-T-V	---	1	-2.86	8.58	8.04646145

Hoek & Brown	Singh & Singh	Mohr-Coulomb
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c' \sqrt{\frac{m\sigma_3}{\sigma_c'} + 1}$	$\sigma_1 = \sigma_c + A\sigma_3 - \frac{A\sigma_3^2}{2\sigma_c} + \sigma_3$	$\sigma_1 = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$

CRITERIO DE HOEK Y BROWN			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
m	σ _c '	σ _t	R ²
18.25	53.01	2.90	0.94

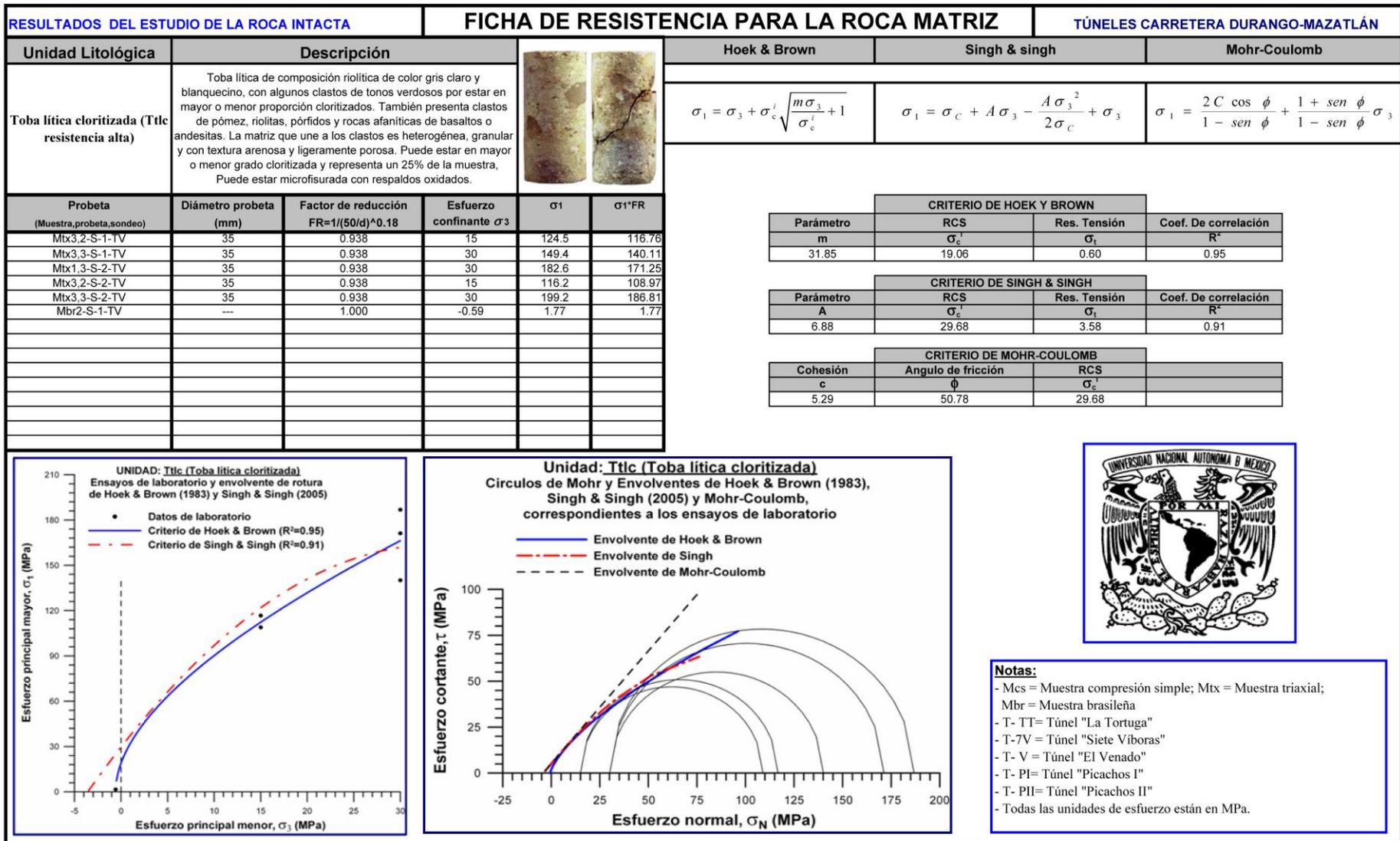
CRITERIO DE SINGH & SINGH			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
A	σ _c '	σ _t	R ²
7.51	41.14	4.61	0.95

CRITERIO DE MOHR-COULOMB			
Cohesión	Angulo de fricción	RCS	
c	φ	σ _c '	
7.051305185	52.1570233	41.14	

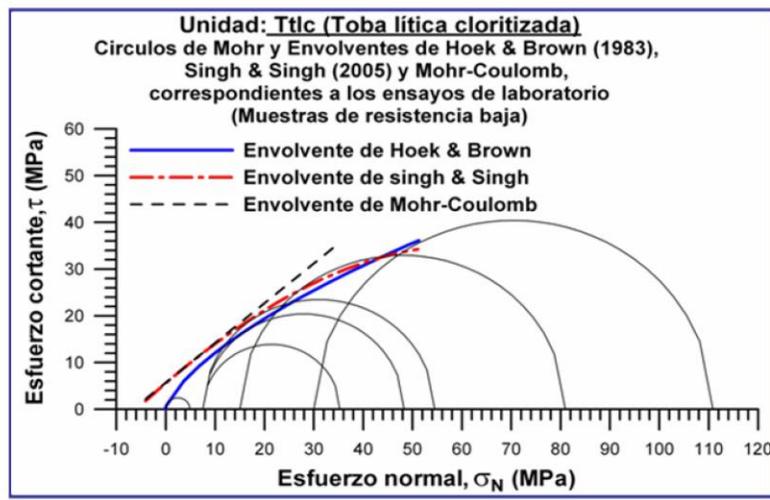
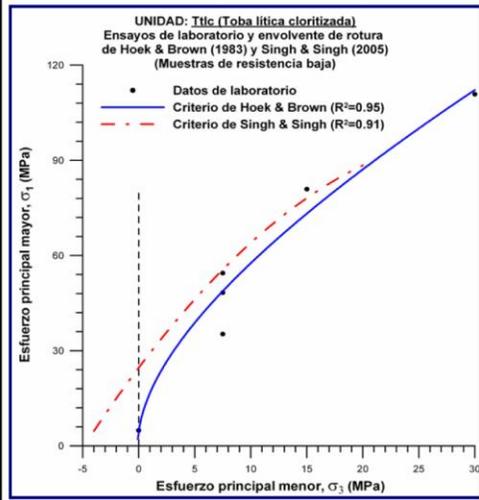


Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T- 7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA ROCA INTACTA		FICHA DE RESISTENCIA PARA LA ROCA MATRIZ				TÚNELES CARRETERA DURANGO-MAZATLÁN																																												
Unidad Litológica	Descripción			Hoek & Brown	Singh & Singh	Mohr-Coulomb																																												
Toba litica cloritizada (Tlc resistencia baja)	Toba litica de composición riolítica de color gris claro y blanquecino, con algunos clastos de tonos verdosos por estar en mayor o menor proporción cloritizados. También presenta clastos de pómez, riolitas, pórfidos y rocas afaníticas de basaltos o andesitas. La matriz que une a los clastos es heterogénea, granular y con textura arenosa y ligeramente porosa. Puede estar en mayor o menor grado cloritizada y representa un 25% de la muestra, Puede estar microfisurada con respaldos oxidados.			$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{\frac{m\sigma_3}{\sigma_c} + 1}$	$\sigma_1 = \sigma_c + A\sigma_3 - \frac{A\sigma_3^2}{2\sigma_c} + \sigma_3$	$\sigma_1 = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$																																												
				<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CRITERIO DE HOEK Y BROWN</th> </tr> <tr> <th>Parámetro</th> <th>RCS</th> <th>Res. Tensión</th> <th>Coef. De correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m</td> <td>σ_c^i</td> <td>σ_t</td> <td>R²</td> </tr> <tr> <td>49.61</td> <td>4.52</td> <td>0.09</td> <td>0.96</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CRITERIO DE SINGH & SINGH</th> </tr> <tr> <th>Parámetro</th> <th>RCS</th> <th>Res. Tensión</th> <th>Coef. De correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>σ_c^i</td> <td>σ_t</td> <td>R²</td> </tr> <tr> <td>3.68</td> <td>24.63</td> <td>4.88</td> <td>0.85</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CRITERIO DE MOHR-COULOMB</th> </tr> <tr> <th>Cohesión</th> <th>Angulo de fricción</th> <th>RCS</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>c</td> <td>ϕ</td> <td>σ_c^i</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5.69</td> <td>40.38</td> <td>24.63</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			CRITERIO DE HOEK Y BROWN				Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación	m	σ_c^i	σ_t	R ²	49.61	4.52	0.09	0.96	CRITERIO DE SINGH & SINGH				Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación	A	σ_c^i	σ_t	R ²	3.68	24.63	4.88	0.85	CRITERIO DE MOHR-COULOMB				Cohesión	Angulo de fricción	RCS		c	ϕ	σ_c^i	
CRITERIO DE HOEK Y BROWN																																																		
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación																																															
m	σ_c^i	σ_t	R ²																																															
49.61	4.52	0.09	0.96																																															
CRITERIO DE SINGH & SINGH																																																		
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación																																															
A	σ_c^i	σ_t	R ²																																															
3.68	24.63	4.88	0.85																																															
CRITERIO DE MOHR-COULOMB																																																		
Cohesión	Angulo de fricción	RCS																																																
c	ϕ	σ_c^i																																																
5.69	40.38	24.63																																																
Probeta (Muestra, probeta, sondeo)	Diámetro probeta (mm)	Factor de reducción FR=1/(50/d)^0.18	Esfuerzo confinante σ_3	σ_1	σ_1^{FR}																																													
Mcs2-S1-T-7V	35	0.938	0	5.23	4.90																																													
Mtx2,1-S-1-T-7V	35	0.938	7.5	51.5	48.30																																													
Mtx2,2-S-1-T-7V	35	0.938	15	86.3	80.93																																													
Mtx2,3-S-1-T-7V	35	0.938	30	118.2	110.85																																													
Mtx3,1-S-1-T-V	35	0.938	7.5	37.6	35.26																																													
Mtx3,1-S-2-T-V	35	0.938	7.5	58.1	54.49																																													



Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.

RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA ROCA INTACTA **FICHA DE RESISTENCIA PARA LA ROCA MATRIZ** **TÚNELES CARRETERA DURANGO-MAZATLÁN**

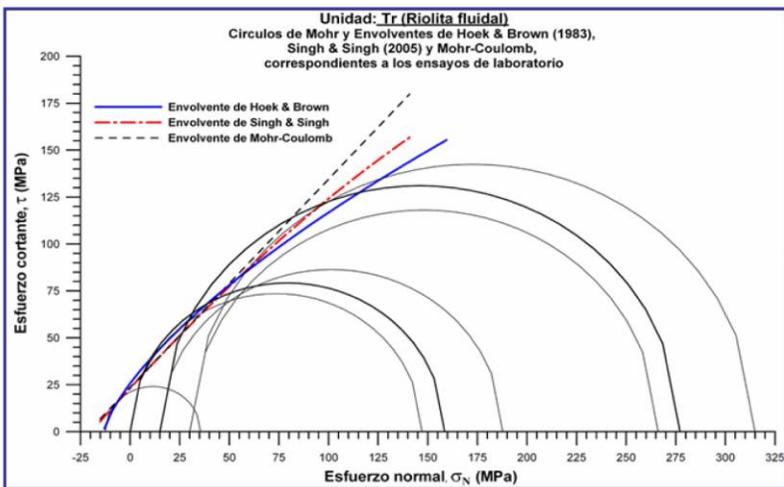
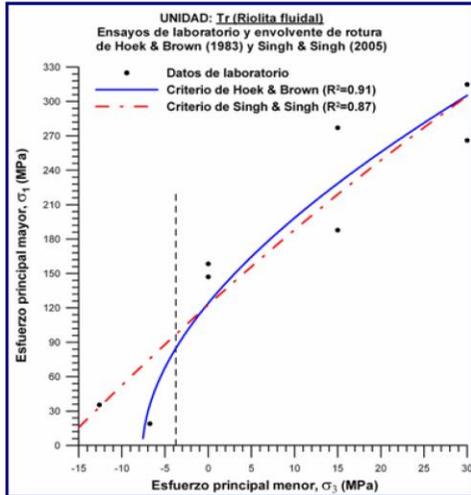
Unidad Litológica	Descripción	Imágenes			
Riolita Fluidal (Tr)	Riolita fluidal de color rosa anaranjado, sana con clastos asimilados de color rojizo por estar hematizados. La textura puede cambiar de fluidal a granular (de grano fino).				
Probeta (Muestra, probeta, sondeo)	Diámetro probeta (mm)	Factor de reducción FR=1/(50/d)*0.18	Esfuerzo confinante σ ₃	σ ₁	σ ₁ *FR
Mcs1-S1-T-7V	35	0.938	0	156.89	147.13
Mcs3-S1-T-7V	35	0.938	0	169.02	158.51
Mtx1.2-S1-T-7V	35	0.938	15	295.5	277.12
Mtx1.3-S1-T-7V	35	0.938	30	335.8	314.92
Mtx3.2-S1-T-7V	35	0.938	15	200.3	187.84
Mtx3.3-S1-T-7V	35	0.938	30	283.8	266.15
Mbr1-S1-T-7V	---	1.000	-12.61	37.83	37.83
Mbr1-S2-T-7V	---	1.000	-6.75	20.25	20.25

Hoek & Brown	Singh & Singh	Mohr-Coulomb
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{\frac{m\sigma_3}{\sigma_c} + 1}$	$\sigma_1 = \sigma_c + A\sigma_3 - \frac{A\sigma_3^2}{2\sigma_c} + \sigma_3$	$\sigma_1 = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$

CRITERIO DE HOEK Y BROWN			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
m	σ _c ¹	σ _t	R ²
16.22	124.06	7.62	0.91

CRITERIO DE SINGH & SINGH			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
A	σ _c ¹	σ _t	R ²
5.78	122.64	17.08	0.87

CRITERIO DE MOHR-COULOMB		
Cohesión	Angulo de fricción	RCS
c	φ	σ _c ¹
23.55	47.98	122.64



Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- P1= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.

RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA ROCA INTACTA

FICHA DE RESISTENCIA PARA LA ROCA MATRIZ

TÚNELES CARRETERA DURANGO-MAZATLÁN

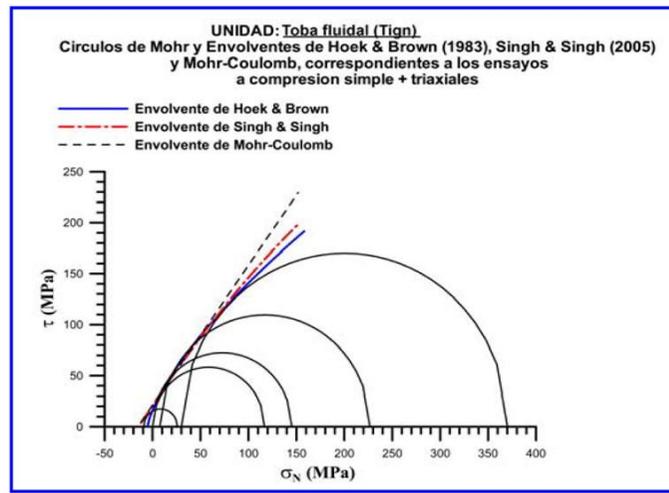
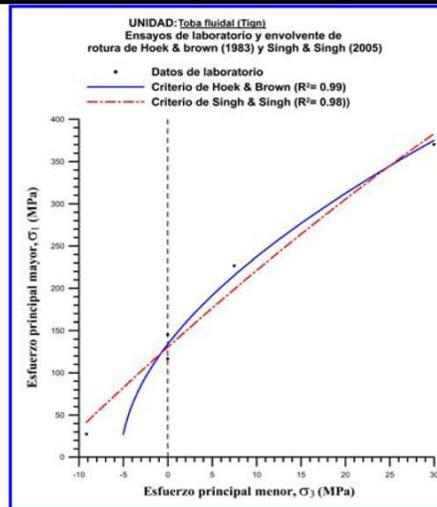
Unidad Litológica	Descripción				
Toba fluidal (Tign)	toba fluidal de color gris ligeramente rosáceo, fragmentos de toba de color rosáceos de variadas dimensiones menores de 1 cm, ángulos a subangulosos, se encuentran sumergidos en una matriz grisácea de textura vitrea devitrificada a ligeramente arenosa y microbrechoide.				
					
Probeta (Muestra, probeta, sondeco)	Diámetro probeta (mm)	Factor de reducción FR=1/(50/d)^0.18	Esfuerzo confinante σ ₃	σ ₁	σ ₁ *FR
Mcs1-S3-TPII	35.2	0.939	0	124.35	116.74
Mcs2-S3-TPII	35.2	0.939	0	154.74	145.27
Mtx1,1-S3-TPII	35.2	0.939	7.5	241.5	226.71
Mtx1,3-S3-TPII	35.2	0.939	30	394.4	370.25
Mbr1-S3-TPII	---	1.000	-9.16	27.48	27.48

Hoek & Brown	Singh & Singh	Mohr-Coulomb
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c' \sqrt{\frac{m\sigma_3}{\sigma_c'} + 1}$	$\sigma_1 = \sigma_c + A\sigma_3 - \frac{A\sigma_3^2}{2\sigma_c} + \sigma_3$	$\sigma_1 = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$

CRITERIO DE HOEK Y BROWN			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
m	σ _c '	σ _c	R ²
25.20	133.76	5.30	0.99

CRITERIO DE SINGH & SINGH			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
A	σ _c '	σ _c	R ²
8.39	130.23	-13.27	0.98

CRITERIO DE MOHR-COULOMB		
Cohesión	Angulo de fricción	RCS
c	φ	σ _c '
21.25	53.85	130.23

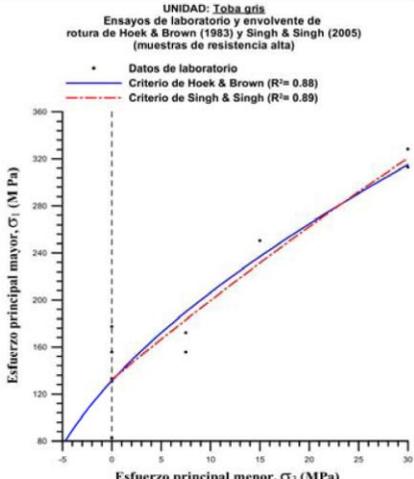


Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.

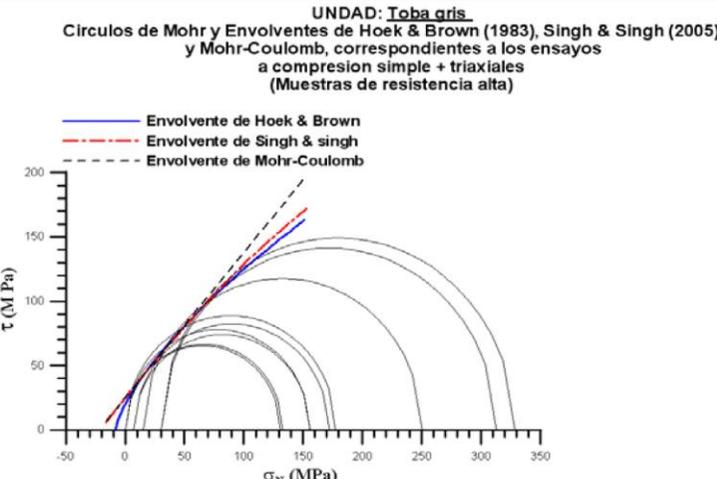
RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA ROCA INTACTA		FICHA DE RESISTENCIA PARA LA ROCA MATRIZ				TÚNELES CARRETERA DURANGO-MAZATLÁN																																													
Unidad Litológica	Descripción	Hoek & Brown		Singh & Singh		Mohr-Coulomb																																													
Toba Gris (resistencia alta)	Toba lítica de grano muy fino de colores gris, violeta y rojizos con textura afanítica homogénea y escasos líticos tamaño arena. La matriz puede estar ligeramente cloritzada y algunos líticos hematizados. Roca en general sana y compacta.			$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{\frac{m \sigma_3}{\sigma_c} + 1}$	$\sigma_1 = \sigma_c + A \sigma_3 - \frac{A \sigma_3^2}{2 \sigma_c} + \sigma_3$	$\sigma_1 = \frac{2 C \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$																																													
				<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CRITERIO DE HOEK Y BROWN</th> </tr> <tr> <th>Parámetro</th> <th>RCS</th> <th>Res. Tensión</th> <th>Coef. De correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>m</td> <td>σ_c^i</td> <td>σ_c</td> <td>R²</td> </tr> <tr> <td>16.26</td> <td>131.17</td> <td>8.04</td> <td>0.88</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CRITERIO DE SINGH & SINGH</th> </tr> <tr> <th>Parámetro</th> <th>RCS</th> <th>Res. Tensión</th> <th>Coef. De correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>σ_c^i</td> <td>σ_c</td> <td>R²</td> </tr> <tr> <td>5.95</td> <td>132.23</td> <td>17.98</td> <td>0.89</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CRITERIO DE MOHR-COULOMB</th> </tr> <tr> <th>Cohesión</th> <th>Angulo de fricción</th> <th>RCS</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>c</td> <td>ϕ</td> <td>σ_c^i</td> <td></td> </tr> <tr> <td>25.08</td> <td>48.45</td> <td>132.23</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				CRITERIO DE HOEK Y BROWN				Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación	m	σ_c^i	σ_c	R ²	16.26	131.17	8.04	0.88	CRITERIO DE SINGH & SINGH				Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación	A	σ_c^i	σ_c	R ²	5.95	132.23	17.98	0.89	CRITERIO DE MOHR-COULOMB				Cohesión	Angulo de fricción	RCS		c	ϕ	σ_c^i	
CRITERIO DE HOEK Y BROWN																																																			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación																																																
m	σ_c^i	σ_c	R ²																																																
16.26	131.17	8.04	0.88																																																
CRITERIO DE SINGH & SINGH																																																			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación																																																
A	σ_c^i	σ_c	R ²																																																
5.95	132.23	17.98	0.89																																																
CRITERIO DE MOHR-COULOMB																																																			
Cohesión	Angulo de fricción	RCS																																																	
c	ϕ	σ_c^i																																																	
25.08	48.45	132.23																																																	
Probeta	Diámetro probeta	Factor de reducción	Esfuerzo confinante σ_3	σ_1	σ_1^i FR																																														
(Muestra,probeta,sondeo)	(mm)	FR=1/(50/d)^0.18																																																	
Mcs3-S1-TPII	34.7	0.936	0	139.62	130.74																																														
Mcs4-S1-TPII	34.7	0.936	0	142.14	133.09																																														
Mcs1-S1-TPI	34.7	0.936	0	166.27	155.69																																														
Mcs3-S3-TV	35	0.938	0	189.31	177.54																																														
Mtx1.1-S3-TV	35	0.938	7.5	166	155.68																																														
Mtx1.2-S3-TV	36	0.943	15	265.6	250.35																																														
Mtx1.3-S3-TV	36	0.943	30	331.9	312.84																																														
Mtx3.1-S3-TV	36	0.943	7.5	182.6	172.12																																														
Mtx3.3-S3-TV	36	0.943	30	348.5	328.49																																														
Mcs2-S2-TV	35	0.938	0	88.17	82.69																																														

UNIDAD: Toba gris
Ensayos de laboratorio y envolvente de rotura de Hoek & Brown (1983) y Singh & Singh (2005) (muestras de resistencia alta)



Datos de laboratorio
 - Criterio de Hoek & Brown (R²= 0.88)
 - Criterio de Singh & Singh (R²= 0.89)

UNIDAD: Toba gris
Círculos de Mohr y Envolventes de Hoek & Brown (1983), Singh & Singh (2005) y Mohr-Coulomb, correspondientes a los ensayos a compresión simple + triaxiales (Muestras de resistencia alta)

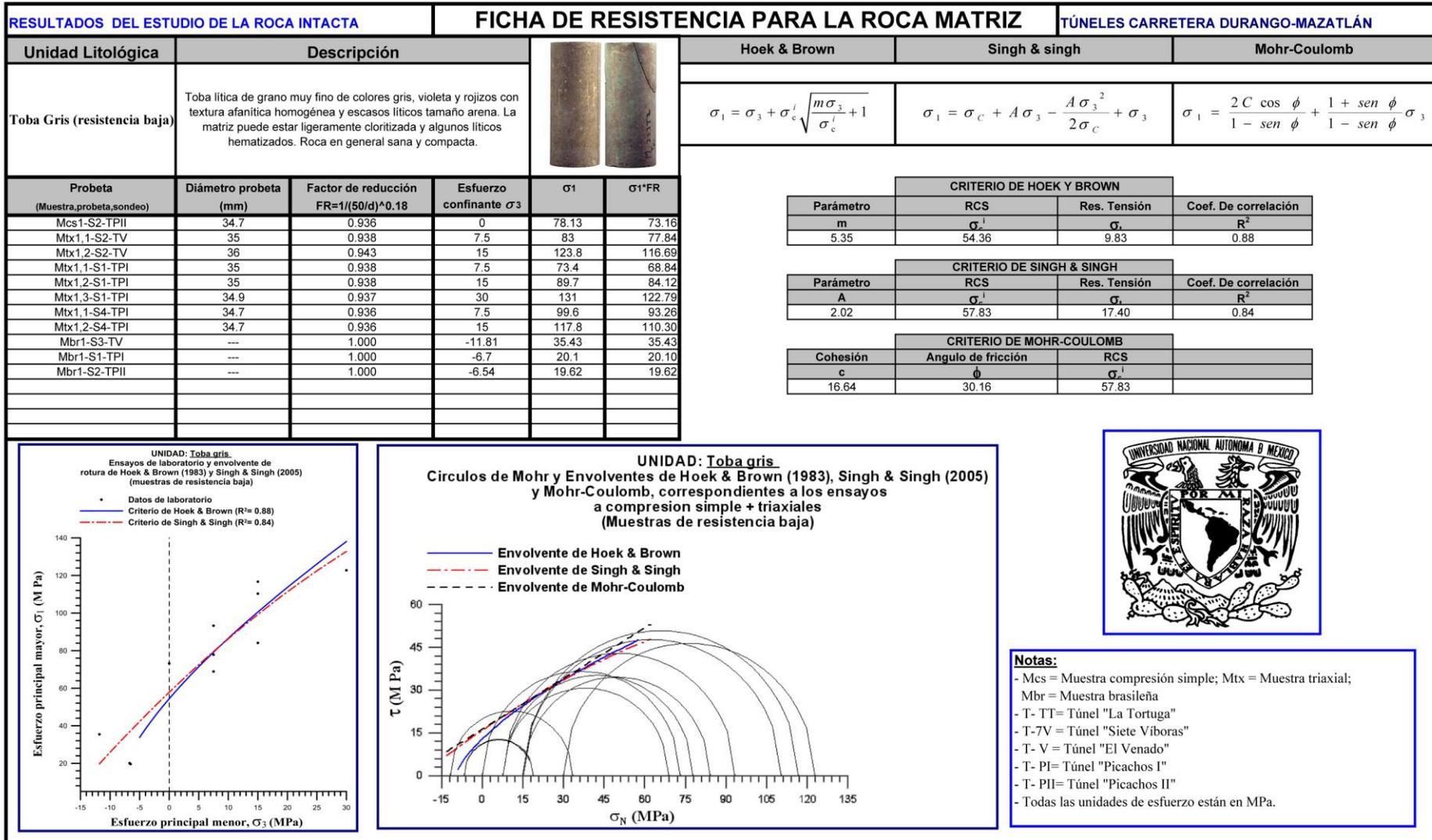


— Envolvente de Hoek & Brown
 - - - Envolvente de Singh & Singh
 - - - Envolvente de Mohr-Coulomb



Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA ROCA INTACTA **FICHA DE RESISTENCIA PARA LA ROCA MATRIZ** **TÚNELES CARRETERA DURANGO-MAZATLÁN**

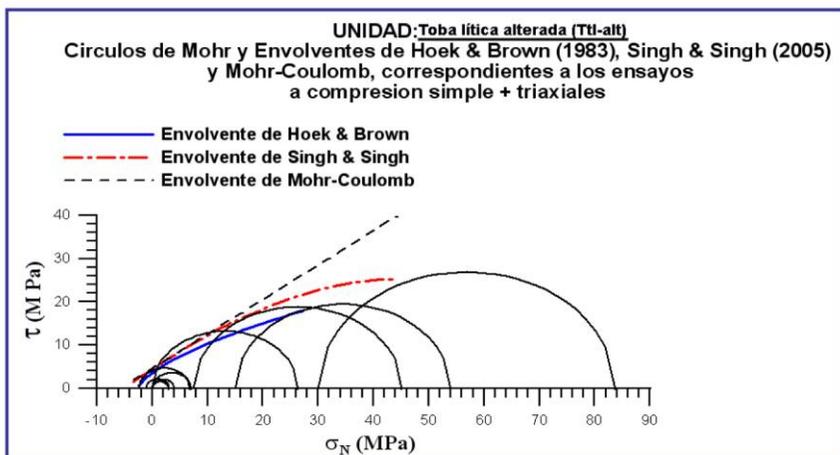
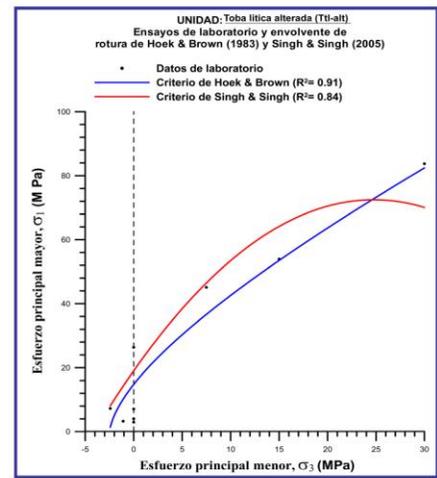
Unidad Litológica	Descripción				
Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica alterada de color verde claro a blanquecino, con una incipiente a moderada alteración (clorización). La toba presenta un grano fino (tamaño arena) y una matriz con textura afanítica. Algunos clastos están limonizados. Algunas de las muestras tienen moderada porosidad (baja densidad) y pequeñas microfisuras abiertas y oxidadas.				
					
Probeta (Muestra, probeta, sondeo)	Diámetro probeta (mm)	Factor de reducción FR=1/(50/d)^0.18	Esfuerzo confinante σ3	σ1	σ1*FR
Mcs3-S1-TV	35	0.938	0	3.15	2.95
Mcs1-S3-TPI	35	0.938	0	28.14	26.39
Mcs2-S3-TPI	35	0.938	0	7.55	7.08
Mcs3-S3-TPI	35	0.938	0	4.29	4.02
Mtx1,1-S3-TPI	35	0.938	7.5	48.1	45.11
Mtx1,2-S3-TPI	35	0.938	15	57.5	53.92
Mtx1,3-S3-TPI	35	0.938	30	89.3	83.75
Mbr1-S3-TPI	---	1.000	-1.09	3.27	3.27
Mbr2-S3-TPI	---	1.000	-2.42	7.26	7.26

Hoek & Brown	Singh & Singh	Mohr-Coulomb
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{\frac{m\sigma_3}{\sigma_c} + 1}$	$\sigma_1 = \sigma_c + A\sigma_3 - \frac{A\sigma_3^2}{2\sigma_c} + \sigma_3$	$\sigma_1 = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$

CRITERIO DE HOEK Y BROWN			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
m	σ_c^{-1}	σ_c	R ²
5.70	14.78	2.52	0.91

CRITERIO DE SINGH & SINGH			
Parámetro	RCS	Res. Tensión	Coef. De correlación
A	σ_c^{-1}	σ_c	R ²
3.31	19.03	4.08	0.84

CRITERIO DE MOHR-COULOMB			
Cohesión	Angulo de fricción	RCS	
c	ϕ	σ_c^{-1}	
4.58	38.56	19.03	



Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



**“MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE
ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO
EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS”**



ANEXO 3.2

“DESCRIPCION DE LAS MUESTRAS DE LABORATORIO”

UNIDAD Ttl (Toba lítica con clastos de riolitas e ignimbritas, sanas y algunas silicificadas) de resistencia baja					
PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	σ_3	σ_1
Mcs1-S2-T7V	33	Ttl	Toba lítica de tonalidad rosácea, sana y resistente, con pocos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas y mayoritariamente clastos de riolitas con textura de fluidez y otros clastos de pómez. Probeta no porosa, sin microfisuras. Rotura: <i>Semi frágil en varios planos semi-verticales coincidiendo con bandas de fluidez.</i>	0	63.07
Mcs2-S2-T7V	40	Ttl	Toba lítica de tonalidad rosácea, sana y resistente con matriz de grano fino y algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas de color gris, grande clastos de riolitas con textura de fluidez e ignimbrítica. Probeta con un mayor grado de porosidad que las muestras anteriores, presenta microfisuras sin llegar a presentar fracturas considerables. Rotura: <i>Mobr-Coulomb en la zona superior, falla por plano de fluidez.</i>	0	27.25
M _{TX} 1,1-S2-T7V	33	Ttl	Toba lítica de tonalidad rosácea, sana y resistente con matriz de grano fino y algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas de color gris, grande clastos de riolitas con textura de fluidez e ignimbrítica y otros clastos de pómez. Probeta no porosa, sin microfisuras. Contiene un clasto grande, posiblemente de pómez a la mitad de la probeta. Rotura: <i>Mobr-Coulomb que cruza el clasto de pómez.</i>	7.5	74.3
M _{TX} 1,2-S2-T7V	33	Ttl	Toba lítica de tonalidad rosácea, sana y resistente, con algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas, riolitas con textura de fluidez y otros clastos de pómez. Probeta no porosa, sin microfisuras. Rotura: <i>Mobr-Coulomb, más hacia la vertical (fragilidad). Se desconoce la verdadera causa de su baja resistencia.</i>	15	140.3
M _{TX} 1,3-S2-T7V	33	Ttl	Toba lítica de tonalidad rosácea, sana y resistente, con algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas, riolitas con textura de fluidez y otros clastos de pómez. Probeta no porosa, sin microfisuras. Rotura: <i>Mobr-Coulomb. Se desconoce la verdadera causa de su baja resistencia.</i>	30	214.5
M _{TX} 2,1-S1-TV	42	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, de Tono blanquecino y rosa, conteniendo diferentes tipos de clastos tamaño granular. Los clastos contienen bandas de fluidez y no presenta porosidad ni microfisuras. Rotura: <i>Rotura tipo Mobr-Coulomb por la matriz. Se desconoce la verdadera causa de su baja resistencia.</i>	7.5	100.2
M _{TX} 2,2-S1-TV	42	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, de Tono blanquecino y rosa, conteniendo diferentes tipos de clastos tamaño granular. Los clastos contienen bandas de fluidez y no presenta porosidad ni microfisuras. Rotura: <i>Rotura vertical por la matriz. Se desconoce la verdadera causa de su baja resistencia.</i>	15	149.4
M _{TX} 2,3-S1-TV	42	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, de Tono blanquecino y rosa, conteniendo diferentes tipos de clastos tamaño granular. Los clastos contienen bandas de fluidez y no presenta porosidad ni microfisuras. Rotura: <i>Rotura tipo Mobr-Coulomb por la matriz. Se desconoce la verdadera causa de su baja resistencia.</i>	30	232.4
M _{TX} 1,3-S1-TV	36	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, sana y silicificada, de violeta a gris y tonos pálidos, grano fino y sus líticos varían en tamaño siendo brechoide, granular, relicta y tobácea con clastos de ignimbritas. La muestra es heterogénea sin presentar porosidad ni microfisuras. En general se le considera una buena muestra. Rotura: <i>Rotura horizontal por desplazamiento en una zona claramente más alterada.</i>	30	241.9
M _{TX} 1,1-S4-TT	40	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, se apreciaron pequeños fragmentos de líticos y fenocristales de ortoclasas de 4 mm. La probeta está algo porosa pero muy bien soldada. Existe gran cantidad de feldespatos, cuarzo y plagioclasas. Destacan algunas fracturas visibles; arriba se ve una fractura ligeramente discontinua, muy poco abierta, algo oxidada y con inclinación respecto a la base de 80°. Abajo se aprecia otra fractura, con las mismas características que la anterior, pero ramificada en fracturas verticales discontinuas. Varios clastos son de gran tamaño y corresponden a rocas ignimbríticas. Rotura: <i>Rompe a través de fisuras preexistentes en zona claramente más alterada</i>	7.5	128.76
M _{TX} 1,2-S4-TT	40	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, pequeños fragmentos de líticos de 1 cm. de longitud y fenocristales de feldespatos de 4 mm., ligeramente porosa, muy bien soldada. Rotura: <i>Rompe en plano vertical, la superficie de rotura se aprecia alterada.</i>	15	143.92
M _{TX} 1,3-S4-TT	40	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, pequeños fragmentos de líticos de color negro y de 2 cm. de longitud. Presenta fenocristales de feldespatos de 2 a 3 mm., y se aprecia ligeramente porosa pero muy bien soldada. Existen algunos fenocristales de feldespatos, cuarzo y plagioclasas. Se observa una fractura ligeramente discontinua, milimétricamente abierta, con superficie moderadamente oxidada e inclinada respecto a la base 80°. Rotura: <i>Rompe en plano inclinado, la superficie de rotura se aprecia alterada.</i>	30	240.63
M _{TX} 2,1-S4-TT	34	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, pequeños fragmentos de líticos y fenocristales de ortoclasas de 4 mm., poca porosa y excelente soldamiento. Presenta feldespatos, cuarzo y plagioclasas. Se aprecian fracturas ligeramente discontinuas, milimétricamente abierta con superficie algo oxidada. Rotura: <i>Rotura a través de microfisuras preexistentes y alteradas.</i>	7.5	118.99
M _{TX} 2,2-S4-TT	34	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, pequeños fragmentos de líticos de 1 cm. de longitud y fenocristales de feldespatos de 3 mm., ligeramente porosa pero muy bien soldada. Se aprecian fenocristales de feldespatos, cuarzo y plagioclasas. Los feldespatos se aprecian oxidados. Algunos fragmentos son de rocas ignimbríticas. Rotura: <i>Rotura a través de microfisuras preexistentes y alteradas.</i>	15	174.77
Mbr1-S1-TV	36	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, sana y silicificada, de violeta a gris y tonos pálidos, grano fino y sus líticos varían en tamaño siendo brechoide, granular, relicta y tobácea con clastos de ignimbritas. La muestra es heterogénea sin presentar porosidad ni microfisuras. En general se le considera una buena muestra	-2.86	8.58

UNIDAD Ttl (Toba lítica con clastos de riolitas e ignimbritas, sanas y algunas silicificadas) de resistencia alta					
PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	σ_3	σ_1
M _{TX} 2,1-S2-T7V	40	Ttl	Toba lítica de tonalidad rosácea, sana y resistente con matriz de pasta fina, blanquecina, vítrea y rosácea y algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas, riolitas con textura de fluidez. Probeta no porosa, sin microfisuras. Rotura: Mohr-Coulomb	7.5	206.3
M _{TX} 2,2-S2-T7V	40	Ttl	Toba lítica de tonalidad rosácea, sana y resistente con matriz de grano fino y algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas y un gran clasto riolítico con textura de fluidez. Probeta no porosa, sin microfisuras. Rotura: Mohr-Coulomb	15	181.5
M _{TX} 2,3-S2-T7V	40	Ttl	Toba lítica de tonalidad rosácea, sana y resistente con matriz de grano fino y algunos clastos tamaño grava de andesitas afaníticas y porfídicas, riolitas con textura de fluidez. Probeta algo más porosa que las anteriores, sin microfisuras. Rotura: Mohr-Coulomb	30	288.80
Mcs1-S1-TV	36	Ttl	Toba lítica de composición riolítica con clastos asimilados y textura fina, con tonos grises pálidos y rosas. Es una muestra sana, poco porosa con algunos rasgos de fluidez y microfisuras cerradas y selladas. La matriz que la contiene es heterogénea, con un firme soleamiento entre líticos y matriz. Rotura: <i>Por la matriz tipo Mohr-Coulomb en dos planos verticales.</i>	7.5	177.4
Mcs2-S1-TV	42	Ttl	Toba lítica de composición riolítica con clastos asimilados y textura granular fina, con tonos grises pálidos y rosas. Es una muestra sana, poco porosa con algunos rasgos de fluidez y microfisuras cerradas y selladas con cuarzo. La matriz vítrea que la contiene es heterogénea y ligeramente alterada, con un firme soldamiento entre líticos y matriz. Rotura: <i>Por la matriz tipo Mohr-Coulomb en dos planos verticales.</i>	15	217.7
M _{TX} 1,1-S1-TV	36	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, sana y silicificada, de violeta a gris y tonos pálidos, grano fino y sus líticos varían en tamaño siendo brechoide, granular, relict y tobácea con clastos de ignimbritas. La muestra es heterogénea sin presentar porosidad ni microfisuras. En general se le considera una buena muestra. Rotura: <i>Rotura tipo Mohr-Coulomb por la matriz, alguna micro rotura vertical.</i>	0	80.6
M _{TX} 1,2-S1-TV	36	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, sana y silicificada, de violeta a gris y tonos pálidos, grano fino y sus líticos varían en tamaño siendo brechoide, granular, relict y tobácea con clastos de ignimbritas. La muestra es heterogénea sin presentar porosidad ni microfisuras. En general se le considera una buena muestra. Rotura: <i>Rotura tipo Mohr-Coulomb por la matriz, alguna micro rotura vertical.</i>	0	70.43
Mcs1-S4-TT	43	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, tonalidad rojiza, textura ignimbrítica, con fiamas de 2 a 3 cm., pequeños fragmentos de líticos y fenocristales de feldespatos de 2 a 3 mm., la muestra se observa ligeramente porosa pero bien soldada. Se aprecian feldespatos, cuarzo y plagioclasas. Los feldespatos están ligeramente argilitizados. Rotura: <i>Rotura frágil en plano vertical</i>	0	80.96
Mcs2-S4-TT	34	Ttl	Toba lítica de composición riolítica, tonalidad rojiza, con presencia de fiamas que le dan la vuelta a la probeta, se aprecian pequeños fragmentos de líticos de 0.5 a 1 cm. y fenocristales de feldespatos (2 a 3 mm.); la muestra se observa ligeramente porosa y bien soldada. Se aprecian fenocristales de feldespatos, cuarzo y plagioclasas. Rotura: <i>Rotura semi-frágil.</i>	0	116.55
Mtx2,1-S2-TV	55	Ttl	Toba lítica de tono gris, matriz granular de grano grueso, con clastos tamaño arena gruesa. Roca dura por estar silicificada Presenta poca porosidad y una fisura en la cara superior de la probeta. Rotura: <i>Tipo frágil siguiendo claramente microfisuras mineralizadas.</i>	7.5	107.9
Mtx2,3-S2-TV	55	Ttl	Toba lítica de tonos grises de grano grueso y textura afanítica, con clastos argilitizados y clorificados. Presenta rasgos de fluidez y poca porosidad, presenta mayor grado de microfisuras que sus predecesoras. Rotura: <i>Tipo Mohr-Coulomb, por zona de alteración y microfisuras.</i>	30	241.9

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD Ttlc (Toba lítica cloritizada, alteración en matriz y más del 50% de los clastos están alterados) muestras de resistencia Baja.

PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	σ_3	σ_1
Mcs2-S1-T7V	24	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de composición riolítica, muy heterogénea en los clastos que la constituyen. Contiene abundantes clastos grandes y alterados de color verde, los cuales están intensamente cloritizados y argilitizados y clastos milimétricos de riolita con bandas de fluidez, bandeados gris de tono rosáceo. La matriz vítrea que los pega es dura y resistente. La proporción de matriz con relación a los clastos es menor o igual al 20%. La muestra contiene cierto grado de porosidad con microfisuras sin llegar a presentar fracturas considerables. La muestra presenta una muesca en el borde superior. Rotura: Rompió en una superficie totalmente cloritizada y epidotizada y la parte superior se pulverizó.	0	5.23
M _{TX} 2,1-S1-T7V	27	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de composición riolítica, muy heterogénea. Contiene abundantes clastos grandes y alterados de color verdoso, los cuales están fuertemente unidos; clastos de riolita esferulítica con bandas de fluidez, bandeados gris de tono rosáceo. La matriz que los contiene es vítrea y porosa. La proporción de matriz con relación a los clastos es menor o igual al 20%. La muestra es algo porosa, prácticamente no tiene microfisuras. No presenta alteración. En términos generales se le considera una muestra sana. Rotura: Semi Mohr, dentada, en una zona con caolín verdoso	7.5	51.5
M _{TX} 2,2-S1-T7V	27	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de composición riolítica, muy heterogénea. Contiene abundantes clastos grandes de riolita verdes cloritizados y argilitizados y clastos milimétricos de riolita con bandas de fluidez, bandeados gris de tono rosáceo. La matriz vítrea que los une es dura y resistente. La proporción de matriz con relación a los clastos es menor o igual al 20%. La muestra es algo porosa, prácticamente no tiene microfisuras. Tiene dos clastos considerablemente grandes, uno ubicado en el borde superior y otro en la parte media. No presenta alteración. En términos generales se le considera una muestra sana. Rotura: Mohr-Coulomb en plano de debilidad predefinido, en una zona con caolín verdoso	15	86.3
M _{TX} 2,3-S1-T7V	27	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de composición riolítica, muy heterogénea. Contiene abundantes clastos grandes de riolita verdes cloritizados y argilitizados y clastos milimétricos de riolita con bandas de fluidez, bandeados gris de tono rosáceo. La matriz que los contiene es dura y resistente. La proporción de matriz con relación a los clastos es menor o igual al 20%. La muestra es algo más porosa que las anteriores. Prácticamente no tiene microfisuras. No presenta alteración. En términos generales se le considera una muestra sana. Rotura: Irregular, con varios planos, algunos verticales (signos de fragilidad en su matriz), la rotura principal se presenta en una zona con caolín verdoso	30	118.2
M _{TX} 3,1-S1-TV	48	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de tonos rosa pálido y anaranjado. La matriz es vítrea y granular muy heterogénea (argilitizada y cloritizada), algunos clastos se rayan fácilmente con la navaja geológica (1mm de prof.) Por estar propilitizados (clorita y epidota). Contiene fluidez y posibles clastos de pómez, presenta ligera porosidad así como ligera microfisuración. Rotura: Semi Mohr-Coulomb sin pasar por la vertical (más del 75% de la superficie de fractura se desarrollo en material propilitizado).	7.5	37.6
M _{TX} 3,1-S2-TV	57	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de tono verde oscuro, con clastos grises afaníticos y otros de pórfidos de tono negruzco, porosa y con microfisuras definidas, presenta cierto grado de bandeamiento por fluidez. Contiene clastos cloritizados y algunos tienen rasgos de fluidez. La matriz que la contiene es heterogénea de color negro (vidrio volcánico). Rotura: frágil, muy irregular, por planos a través de los clastos alterados por clorita y epidota (clastos de color verde pistache) siguiendo el bandeamiento de los planos de fluidez.	7.5	58.1

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial; Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD Ttlc (Toba lítica cloritizada, alteración en matriz y más del 50% de los clástos están alterados) muestras de resistencia alta.

PROBETA	PROF. (m)	LITOLÓGÍA	DESCRIPCIÓN	σ_3	σ_1
M _{TX} 3,2-S1-TV	48	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de tono blanquecino la matriz es heterogénea, argilitizada, piritizada y cloritizada, contiene cierta fluidez y clastos de pómez, presenta ligera porosidad así como ligera microfisuración, presenta rotura en uno de los extremos, contiene clastos mas grandes tipo granzón con texturas afaníticas y faneríticas y algunos silicificados. Rotura: Tipo Mohr-Coulomb condicionada por los clastos grandes y abundantes. De manera que la rotura se llevo a cabo en la zona de clastos tamaño arena-granzón, además de estar moderadamente cloritizados.	15	124.5
M _{TX} 3,3-S1-TV	48	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de tono blanquecino la matriz es heterogénea y de grano grueso, argilitizada y cloritizada, contiene fluidez y posibles clastos de pómez, presenta ligera porosidad así como ligera microfisuración, la relación de la matriz con los clastos es del 90%. Rotura: En el extremo izquierdo superior de la fotografía se aprecia una falla tipo Mohr-Coulomb, condicionada por una zona mas alterada...	30	149.4
M _{TX} 1,3-S2-TV	48	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de tonos gris verdoso y cafeces, con líticos rojizos de tamaño granzón y presencia de microfisuras. Incluida en una matriz de de tono verdoso grano fino y bandas de fluidez presenta una fisura considerable, presenta boleos y fragmentos líticos de variada composición, roca distinta a sus predecesoras. Rotura: Mohr-Coulomb influenciada por la composición de los clastos alterados a clorita y epidota, abarcando el 50% de la superficie de rotura.	30	182.6
M _{TX} 3,2-S2-TV	57	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de tono gris, con clastos grises y pórfidos de tono negruzco, ligeramente porosa y con microfisuras inducidas y rugosas selladas con calcita, presenta cierto grado de facturación. Contiene menos del 10% de clastos cloritizados y algunos tienen rasgos de fluidez. La matriz que la contiene es heterogénea, presenta ciertos clastos riolíticos fracturados, y zonas con fragmentos de cristales y clastos tamaño arena blanquecina en una matriz negra. Rotura: Frágil muy irregular, condicionada por la posición de los clastos.	15	116.2
M _{TX} 3,3-S2-TV	57	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de tono gris, con clastos grises y pórfidos de tono negruzco, porosa y con microfisuras definidas, presenta cierto grado de facturación. Contiene clastos cloritizados y algunos tienen rasgos de fluidez. La matriz que la contiene es heterogénea, presenta fracturas considerables. Rotura: Frágil, por la matriz.	30	199.2
Mbr1,2-S1-TV	48	Toba Lítica cloritizada (Ttlc)	Toba lítica de tono blanquecino y verde claro la matriz esta argilitizada y cloritizada, contiene fluidez y posibles clastos de pómez, presenta moderada a alta porosidad así como moderada microfisuración.	-0.59	1.77

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T- 7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD Tr (Riolita fluidal de color rosa anaranjado, sana con clastos asimilados de color rojizo por estar hematizados. La textura puede cambiar de fluidal a granular de grano fino).					
PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	σ_3	σ_1
Mcs1-S1-T7V	27	Riolita Fluidal (Tr)	Riolita fluidal con clastos asimilados y localmente textura tobácea granular, con hematización generalizada de sus clastos. Muestra muy sana... Muestra rasgos de fluidez. Muy poco porosa, grano fino y microfisuras cerradas y selladas. Rotura: Frágil en planos verticales	0	156.89
Mcs3-S1-T7V	39	Riolita Fluidal (Tr)	Riolita fluidal rosa-anaranjada, dura y resistente con texturas locales de ignimbritas fluidales y brechoides, estos tramos brechoides tienen una matriz lítica muy dura y resistente. Sin porosidad. No contiene microfisuras. Muestra inalterada, muy sana. Rotura: Frágil en planos verticales	0	169.02
M _{TX} 1,2-S1-T1	20	Riolita Fluidal (Tr)	Riolita con clastos asimilados, textura tobácea granular y localmente fluidal, con hematización generalizada de sus clastos. Muy poco porosa, grano fino y microfisuras cerradas y selladas. No muestra planos de discontinuidad bien definidos. Rotura: Mohr-Coulomb	15	295.5
M _{TX} 1,3-S1-T7V	20	Riolita Fluidal (Tr)	Riolita con clastos asimilados y textura tobácea granular, con hematización generalizada de sus clastos. Contiene claros rasgos de fluidez. Muestra muy sana. Muy poco porosa, grano fino y microfisuras cerradas y selladas. No muestra planos de discontinuidad bien definidos.	30	335.8
M _{TX} 3,2-S1-T7V	39	Riolita Fluidal (Tr)	Riolita fluidal rosa-anaranjada, dura y resistente con texturas locales de ignimbritas fluidales y brechoides, estos tramos brechoides tienen una matriz lítica muy dura y resistente. Porosidad mínima. No contiene microfisuras. Muestra inalterada, muy sana. Altura de la probeta = 6.5 cm. Rotura: Mohr-Coulomb, más hacia la vertical (fragilidad)	15	200.3
M _{TX} 3,3-S1-T7V	39	Riolita Fluidal (Tr)	Riolita fluidal rosa-anaranjada, dura y resistente con texturas locales de ignimbritas fluidales y brechoides, estos tramos brechoides tienen una matriz lítica muy dura y resistente. Poco más porosa que las anteriores. No contiene microfisuras. Muestra inalterada, muy sana. Altura de la probeta = 6.3 cm. Rotura: Mohr-Coulomb, más hacia la vertical (fragilidad)	30	283.8
Mbr1-S2-T7V	33	Riolita Fluidal (Tr)	Riolita Fluidal de tonalidad rosácea, sana y resistente, con algunos clastos tamaño grava de andesitas afáníticas y porfídicas, riolitas con textura de fluidez y otros clastos de pómez. Probeta no porosa, sin microfisuras.	-6.75	20.25
Mbr1-S1-T7V	25	Riolita Fluidal (Tr)	Riolita con clastos asimilados y textura tobácea granular, con hematización generalizada de sus clastos. Muestra muy sana... Muestra rasgos de fluidez. Muy poco porosa, grano fino y microfisuras cerradas y selladas.	-12.61	37.83

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



NIDAD Tign (Toba fluidal, de color gris-rosáceo, textura brechoide, fracturada y hematizada. Dura y resistente (compacta). Microfracturas selladas con cuarzo).					
PROBETA	PROF. (m)	LITOLÓGÍA	DESCRIPCIÓN	confinante σ_3	σ_1
Mcs1-S3-TPII	43	Tign	Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura localmente brechoide, fracturada y hematizada, película entre fracturas de 1mm de cuarzo, las microfisuras están cerradas y selladas con cuarzo. En algunas zonas la roca esta hematizada. Rotura: <i>frágil por la parte de arriba de la probeta.</i>	0	124.35
Mcs2-S3-TPII	43	Tigo	Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura localmente brechoide, fracturada y hematizada, película entre fracturas de 1mm de cuarzo, las microfisuras están cerradas y selladas con cuarzo. En algunas zonas la roca esta hematizada. Rotura: <i>frágil.</i>	0	154.74
M _{TX} 1,1-S3-TPII	43	Tigo	Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura localmente brechoide, fracturada y hematizada, película entre fracturas de 1mm de cuarzo, las microfisuras están cerradas y selladas con cuarzo. En algunas zonas la roca esta hematizada. Rotura: <i>frágil por la parte superior de la probeta.</i>	7.5	241.5
M _{TX} 1,3-S3-TPII	43	Tign	Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura localmente brechoide, fracturada y hematizada, película entre fracturas de 1mm de cuarzo, las microfisuras están cerradas y selladas con cuarzo. En algunas zonas la roca esta hematizada. Rotura: <i>Semifrágil en varios planos incluso horizontales.</i>	30	394.4
Mbr1-S3-TPII	43	Tign	Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura localmente brechoide, fracturada y hematizada, película entre fracturas de 1mm de cuarzo, las microfisuras están cerradas y selladas con cuarzo. En algunas zonas la roca esta hematizada.	-9.16	27.48

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD T-bah (Brecha Andesítica hematizada de color rojo)					
PROBETA	PROF. (m)	LITOLÓGÍA	DESCRIPCIÓN		
Mcs1-S2-TPI	43	Brecha Andesítica hematizada	Brecha Andesítica roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea, con bandas abiertas a través de las cuales se llevo a cabo la oxidación, contiene fisuras selladas con calcita, se le considera una roca de buena calidad que no presenta porosidad, aunque presenta leve facturación. Rotura: Vertical por roca matriz, la facturación por hematita de la roca pudo haber guiado la rotura...	0	111.9
M _{TX} 1,1-S2-TPI	43	Brecha Andesítica	Brecha Andesítica roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea, de color gris claro, dura y resistente, con algunas vetillas de hematización y ligero fracturamiento, la muestra presenta porosidad ligera y microfisuración cerrada.	7.5	169.4

		hematizada	Rotura: Rotura tipo Mohr-Coulomb por la matriz, alguna microrotura vertical.		
M _{TX} 1,2-S2-TPI	43	Brecha Andesítica hematizada	Brecha Andesítica roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea, con bandas abiertas a través de las cuales se llevo a cabo la oxidación, contiene fisuras selladas con calcita, se le considera una roca de buena calidad que no presenta porosidad, aunque presenta leve facturación. Rotura: Rotura Mohr-coulomb por la matriz.	15	209.7
M _{TX} 1,3-S2-TPI	43	Brecha Andesítica hematizada	Brecha Andesítica roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea, con bandas abiertas a través de las cuales se llevo a cabo la oxidación, la muestra presenta porosidad ligera y es mucho mas hematizada y microfisurada que las anteriores dos, contiene al mismo tiempo cierta textura fluidal y mayor contenido de clastos de calcita y algunas fracturas de consideración. Rotura: Semi Mohr-Coulomb por la parte superior de la probeta posiblemente siguiendo alguna recristalización...	30	258.1
Mbr1-S2-TPI	43	Brecha Andesítica hematizada	Brecha Andesítica roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea, con bandas abiertas a través de las cuales se llevo a cabo la oxidación, con bandas abiertas a través de las cuales se llevo a cabo la oxidación, contiene fisuras selladas con calcita, se le considera una roca de buena calidad que no presenta porosidad, aunque presenta leve facturación.	-6.83	20.49
Mbr2-S2-TPI	41	Brecha Andesítica hematizada	Brecha Andesítica roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea, con bandas abiertas a través de las cuales se llevo a cabo la oxidación, las bandas de hematina tienen de 2mm a 2 cm. de ancho y están asociadas a fracturas abiertas a través de las cuales se llevo a cabo la oxidación. Roca de buena dureza y buena resistencia, aunque presenta cierta facturación y fisuramiento no es porosa.	-12.81	38.43

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD Ttg (Toba gris de grano muy fino de colore gris, violeta y rojizos con textura afanítica y escasos líticos tamaño arena. La matriz puede estar ligeramente cloritizada y algunos líticos hematizados. Roca en general sana y compacta) de resistencia baja

PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	confinante σ_3	σ_1
Mcs1-S2-TPII	38	Toba gris (Ttg)	Toba de color gris y tonos rojizos, la muestra es homogénea de grano fino con pequeños líticos, algunos de ellos ligeramente argilitizados y hematizados, no presenta porosidad ni fracturas de consideración. En general se le considera una buena muestra. Rotura: <i>frágil por un costado de la probeta.</i>	0	78.13
Mtx1,1-S2-TV	48	Toba gris (Ttg)	Toba lítica de tonos grises y cayeses, con líticos rojizos de tamaño granzón y presencia de microfisuras. Incluida en una matriz de de tono verdoso grano fino y bandas de fluidez. Rotura: <i>Rotura vertical por el centro de la probeta y Mohr-Coulomb en el extremo de esta, por la posible influencia de alguna microfisura.</i>	7.5	83
Mtx1,2-S2-TV	48	Toba gris (Ttg)	Toba lítica de tonos grises y cafeses, con líticos rojizos de tamaño granzón y presencia de microfisuras. Incluida en una matriz de de tono verdoso grano fino y bandas de fluidez presenta una fisura considerable. Rotura: <i>frágil en sentido vertical y en la parte superior una aproximación a una tipo Mohr-Coulomb influenciada por una fisura.</i>	15	123.8
Mtx1,1-S1-TPI	52	Toba gris (Ttg)	Toba lítica homogénea de grano fino de color gris y tonos verdosos, la matriz se encuentra ligeramente cloritizada y argilitizada. La probeta es porosa y con bastantes microfisuras rellenas con calcita a 45° y algunos clastos de calcita. Rotura: <i>En lajas verticales por la matriz, siguiendo el camino de las microfisuras, de los bordes hacia adentro de la matriz.</i>	7.5	73.4
Mtx1,2-S1-TPI	52	Toba gris (Ttg)	Toba lítica homogénea de grano fino de color gris y tonos verdosos, la matriz se encuentra ligeramente cloritizada y argilitizada. La probeta es porosa y con bastantes microfisuras rellenas con calcita a 45° y algunos clastos de calcita. Esta muestra es algo más porosa y más fracturada que la anterior. Rotura: <i>Rotura tipo Mohr-Coulomb por la parte superior de la probeta abarcando un 40% de esta.</i>	15	89.7
Mtx1,3-S1-TPI	52	Toba gris (Ttg)	Toba lítica homogénea de grano fino de color gris y tonos verdosos, la matriz se encuentra ligeramente cloritizada y argilitizada. La probeta es porosa y con bastantes microfisuras rellenas con calcita a 45° y algunos clastos de calcita. Rotura: <i>Rotura tipo Mohr-Coulomb por la parte superior de la probeta en un 40% de la misma, cierto contenido de arcilla en el plano de falla debido a una posible falla.</i>	30	131
Mtx1,1-S4-TPI	20	Toba gris (Ttg)	Toba de color gris oscuro con textura afanítica, la matriz que la contiene es dura y resistente, la muestra es homogénea, porosidad moderada y microfracturas cerradas y selladas por hematita. Se le considera una buena muestra. Rotura: <i>Rotura Mohr-Coulomb en el extremo de esta, por la posible influencia de alguna microfisura con sellos de calcita.</i>	7.5	99.6
Mtx1,2-S4-TPI	20	Toba gris (Ttg)	Toba de color gris oscuro con textura afanítica, la matriz que la contiene es dura y resistente, la muestra es homogénea y microfracturas cerradas y selladas por hematita. Se le considera una buena muestra. Rotura: <i>Tipo Mohr-Coulomb por la matriz, orientada por alguna microfisura.</i>	15	117.8
Mbr1-S3-TV	58	Toba gris (Ttg)	Toba lítica grisácea (hematizada) con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas con calcita. La matriz es afanítica y homogénea, en general se le considera buena roca. Es un clasto de toba lítica, presenta fracturas selladas y otras oxidadas en sus respaldos	-11.81	35.43
Mbr1-S1-TPI	46.50	Toba gris (Ttg)	Toba lítica de grano muy fino de color gris verdoso, textura arenosa sana y resistente, microfisuras selladas con calcita, la matriz esta ligeramente argilitizada y algunos clastos están cloritizados.	-6.7	20.1
Mbr1-S2-TPII	38	Toba gris (Ttg)	Toba de color gris y tonos rojizos, la muestra es homogénea de grano fino con pequeños líticos, algunos de ellos ligeramente argilitizados y hematizados, no presenta porosidad ni fracturas de consideración. En general se le considera una buena muestra.	-6.54	19.62

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD Ttg (Toba gris de grano muy fino de colore gris, violeta y rojizos con textura afanítica y escasos líticos tamaño arena. La matriz puede estar ligeramente cloritizada y algunos líticos hematizados. Roca en general sana y compacta) de resistencia alta

PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	confinante σ_3	σ_1
Mcs2-S2-TV	55	Toba gris (Ttg)	Toba lítica gris con fragmentos líticos de color negro y variada composición tamaño y textura (afanítica, porfídica e ignimbrítica). La muestra presenta clastos de buen tamaño de cuarzo bandeados de fluidez y un poco argilitizados, la matriz es homogénea y resistente, la muestra presenta porosidad regular y sus fisuras son un poco más perceptibles que la de su predecesora. Rotura: <i>Vertical por la matriz y por sus clastos.</i>	0	88.17
Mcs3-S1-TPII	35	Toba gris (Ttg)	Toba de color gris y tonos rojizos, los líticos son pequeños y la matriz que los contiene es sana, dura y resistente, una muestra homogénea y las microfisuras son pocas y cerradas y no presenta porosidad. Rotura: <i>frágil en lajas verticales por un lado y sobre la parte superior de la probeta.</i>	0	139.62
Mcs4-S1-TPII	35	Toba gris (Ttg)	Toba de color gris y tonos rojizos, los líticos son pequeños y la matriz que los contiene es sana, dura y resistente, una muestra homogénea y las microfisuras son pocas y cerradas y no presenta porosidad. Rotura: <i>frágil por la parte superior de la probeta.</i>	0	142.14
Mcs1-S1-TPI	46.50	Toba gris (Ttg)	Toba lítica de grano fino de color gris, textura afanítica sana y resistente, microfisuras selladas con calcita, la matriz esta ligeramente argilitizada Rotura: <i>Falla frágil en la parte superior de la probeta desintegrándose y en segmentos verticales en la parte inferior de la probeta.</i>	0	166.27
Mcs3-S3-TV	66	Toba gris (Ttg)	Toba de color gris oscuro en matriz vítrea y cristalina de grano fino, no presenta porosidad ni fracturas considerables. Presenta microfisuras sin importancia. Rotura: <i>Rotura Mohr-Coulomb por la matriz.</i>	0	189.31
Mtx1,1-S3-TV	58	Toba gris (Ttg)	Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas. La matriz es homogénea, en general se le considera buena roca. Rotura: <i>Mohr-Coulomb, por la matriz.</i>	7.5	166
Mtx1,2-S3-TV	58	Toba gris (Ttg)	Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas. La matriz es homogénea, en general se le considera buena roca. Rotura: <i>Mohr-Coulomb, por la matriz.</i>	15	265.6
Mtx1,3-S3-TV	58	Toba gris (Ttg)	Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas. La matriz es homogénea, en general se le considera buena roca. Rotura: <i>Mohr-Coulomb, por la matriz.</i>	30	331.9
Mtx3,1-S3-TV	66	Toba gris (Ttg)	Toba lítica gris, ignimbrita riolítica de color gris, clastos limonitizados, textura relictiva brechoide, no es porosa y no cuenta con fisuras definidas. Rotura: <i>Mohr-Coulomb sin cubrir toda la probeta (de manera local).</i>	7.5	182.6
Mtx3,3-S3-TV	66	Toba gris (Ttg)	Toba lítica gris, ignimbrita riolítica de color gris, clastos limonitizados, textura relictiva brechoide, no es porosa y no cuenta con fisuras definidas. Sus microfisuras son cerradas y selladas, en una de las caras de la muestra se aprecia una rotura que puede influir en la resistencia. Rotura: <i>Frágil por la matriz.</i>	30	348.5

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T- 7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD Ttbr (Toba brechoide de grano grueso de color violeta sano y compacto, con textura heterogénea aglomerática (clastos tamaño arena gruesa subredondeados y redondeados de color rojizo). Los clastos de tonos rosados, rojizos, grises y violetas son tamaño granzón. No presenta fisuras ni fracturas. Contiene algunos clastos de pómezes.

PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	σ_3	σ_1
Mcs1-S1-TPII	32	Toba brechoide Ttbr	Toba brechoide de grano grueso color violeta, heterogénea y de textura aglomerática con clastos de tonos rosados, rojizos, grises y violetas tamaño granzón, no presenta fisuras ni fracturas, contiene algunos clastos de calcita y pómez. Se considera una muestra sana sin porosidad. Rotura: <i>Frágil por la matriz.</i>	0	29.07
Mcs2-S1-TPII	32	Toba brechoide Ttbr	Toba brechoide de grano grueso color violeta, heterogénea y de textura aglomerática con clastos de tonos rosados, rojizos, grises y violetas tamaño granzón, no presenta fisuras ni fracturas, contiene algunos clastos de calcita y pómez. Se considera una muestra sana sin porosidad. Rotura: <i>Frágil, en un 50 % la muestra se desintegra, debido a la textura y composición de los clastos.</i>	0	51.41
Mtx1,1-S1-TPII	29	Toba brechoide Ttbr	Toba brechoide de grano mediano color violeta, heterogénea y de textura aglomerática con clastos de tonos rosados, rojizos, grises y violetas tamaño granzón, su microfisuración es moderada, así como una porosidad baja, es una muestra sana y resistente. Rotura: <i>Semifrágil por la parte superior de la probeta.</i>	7.5	54.8
Mtx1,2-S1-TPII	29	Toba brechoide Ttbr	Toba brechoide de grano mediano color violeta, heterogénea y de textura aglomerática con clastos de tonos rosados, rojizos, grises y violetas tamaño granzón, su microfisuración es moderada, así como una porosidad baja, es una muestra sana y resistente. Rotura: <i>Semifrágil.</i>	15	95.2
Mtx1,3-S1-TPII	29	Toba brechoide Ttbr	Toba brechoide de grano mediano color violeta, heterogénea y de textura brechoide con clastos tamaño arena de tonos rosados, rojizos, grises y violetas tamaño granzón, su microfisuración es moderada, es mas porosa que las anteriores dos y presenta argilitización y hematización de sus clastos. Rotura: <i>Semi Mohr-Coulomb por la parte superior siguiendo una microfisura vertical.</i>	30	137.1
Mbr1-S1-TPII	29	Toba brechoide Ttbr	Toba brechoide de grano mediano a fino color violeta, heterogéneo y de textura brechoide con clastos de tonos rosados, rojizos, grises y violetas tamaño granzón, su microfisuración es moderada, así como una porosidad baja, es una muestra sana y resistente.	-4.19	12.57
Mbr2-S2-TPII	39	Toba brechoide Ttbr	Toba brechoide de color rojizo y tonos rosáceos, su textura es porfídica, presenta poca porosidad, sus microfisuras están cerradas y no presenta fracturas notorias.	-3.98	11.94

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T-7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD Ttl-alt (Toba lítica alterada de color verde claro a blanquecino, con una incipiente a moderada alteración por cloritización. La toba presenta un grano fino tamaño arena y una matriz con textura afanítica. Algunos clastos están limonitizados, algunas de las muestras tienen moderada porosidad, baja densidad y pequeñas microfisuras abiertas y oxidadas)

PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	confinante σ_3	σ_1
Mcs3-S1-TV	48	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica con un alto grado de alteración de tono café claro con diferentes tipos de clastos, donde se aprecian 2 clastos de buen tamaño cloritizados y con rasgos de fluidez. La matriz esta cloritizada. La muestra presenta visible porosidad, con microfisuras verticales \leq a 1mm de ancho que cruzan la probeta verticalmente. Rotura: Sub-vertical por roca matriz, matriz fina con presencia de clastos mayores, siguiendo superficies cloritizadas y oxidadas.	0	3.15
Mcs1-S3-TPI	25	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica con un incipiente grado de alteración de grano fino y matriz con textura afanítica. Posiblemente el grado de alteración se debe a fluidos hidrotermales, presenta moderada porosidad, baja densidad y pequeñas microfisuras abiertas, la matriz se encuentra moderadamente argilitizada y algunos minerales están limonitizados. En general se le considera una muestra de mala calidad. Rotura: Rotura vertical por la matriz en lascas a causa de recristalizaciones que rellenaban las microfisuras de la matriz, en el plano de falla que describe la probeta se encuentra cierto contenido de arcilla. A través de la matriz moderadamente cloritizada (argilitizada).	0	28.14
Mcs2-S3-TPI	32	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica con un avanzado grado de alteración de grano fino y textura afanítica. Posiblemente el grado de alteración se debe a fluidos hidrotermales, presenta moderada porosidad y pequeñas microfisuras abiertas, la matriz se encuentra argilitizada y algunos clastos totalmente limonitizados, contiene vesículas de 1cm de longitud máximo. En general se le considera una muestra de mala calidad. Rotura: Tipo subfrágil en segmentos subverticales por la parte superior de la matriz sin abarcar la totalidad de la probeta	0	7.55
Mcs3-S3-TPI	30	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica con un avanzado grado de alteración de grano fino y textura afanítica. Posiblemente el grado de alteración se debe a fluidos hidrotermales, presenta moderada porosidad y pequeñas microfisuras abiertas, la matriz se encuentra argilitizada y algunos clastos limonitizados. Esta muestra presenta un fracturamiento y porosidad mayor que las anteriores dos muestras. Rotura: rotura tipo Mohr-Coulomb por la matriz por la parte superior de la probeta abarcando un 40% de la muestra. Superficie verdosa clara por presencia de minerales de clorita y epidota.	0	4.29
M _{TX} 1,1-S3-TPI	25	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica de grano fino y moderado grado de alteración, matriz afanítica. Posiblemente el grado de alteración se debe a fluidos hidrotermales, presenta poca porosidad y pequeñas microfisuras abiertas, la matriz se encuentra ligeramente argilitizada y algunos clastos limonitizados. En general se le considera una muestra de mala calidad. Presenta fracturas de consideración en el cuerpo de la probeta. Rotura: Mohr-Coulomb por la matriz en un 60% de la muestra a partir de entonces hubo un desplazamiento horizontal de la rotura originado posiblemente por una fractura, en el plano de falla se encuentra un cierto grado de alteración lo que provoco la formación de arcilla dentro de la matriz.	7.5	48.1
M _{TX} 1,2-S3-T3	25	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica de grano fino y moderado grado de alteración, matriz afanítica. Posiblemente el grado de alteración se debe a fluidos hidrotermales, presenta poca porosidad y pequeñas microfisuras abiertas, la matriz se encuentra ligeramente argilitizada y algunos clastos limonitizados. En general se le considera una muestra de mala calidad. Presenta fracturas de consideración en el cuerpo de la probeta. Rotura: Tipo Mohr-Coulomb en parte superior abarcando un 20% de la probeta...	15	57.5
M _{TX} 1,3-S3-TPI	25	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica de grano fino y moderado grado de alteración, matriz afanítica. Posiblemente el grado de alteración se debe a fluidos hidrotermales, presenta poca porosidad y pequeñas microfisuras abiertas, la matriz se encuentra ligeramente argilitizada y algunos clastos limonitizados. En general se le considera una muestra de mala calidad. Presenta fracturas de consideración en el cuerpo de la probeta. Rotura: Rotura semivertical influenciada por microfisuras de la probeta.	30	89.3
Mbr1-S3-TPI	25	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica con un avanzado grado de alteración de grano fino y textura afanítica. Posiblemente el grado de alteración se debe a fluidos hidrotermales, presenta porosidad y pequeñas microfisuras abiertas, la matriz se encuentra ligeramente argilitizada y algunos clastos cloritizados y epidotizados y pocos limonitizados. En general se le considera una muestra de mala calidad.	-1.09	3.27
Mbr2-S3-TPI	30	Toba lítica alterada (Ttl-alt)	Toba lítica con un incipiente grado de alteración de grano fino y textura afanítica. Posiblemente el grado de alteración se debe a fluidos hidrotermales, presenta porosidad y pequeñas microfisuras abiertas, la matriz se encuentra parcialmente argilitizada y algunos clastos se encuentran cloritizados.	-2.42	7.26

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T- 7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.



UNIDAD Tb-c (Toba lítica de color negro con clastos tamaño grava y bloques de pórfidos verdosos, la matriz es heterogénea y sana. Presenta cristales de plagioclasas y feldespatos, poca mica y diminutos cristales de ferromagnesianos; y pocos cristales de cuarzo blanquecinos; además destacan líticos diminutos, afaníticos y de color negro tamaño arena.)

PROBETA	PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	confinante σ_3	σ_1
Mcs2-S3-TV	60	Toba Lítica Cristalina (Tb-c)	Toba lítica de color negruzco con clastos tamaño grava y bloques de pórfidos verdosos, la matriz es heterogénea y sana. Presenta cristales de plagioclasa y feldespatos, poca mica y diminutos ferromagnesianos y pocos cristales de cuarzo blanquecinos. Además en ella destacan líticos diminutos; afaníticos y de color negro, tamaño arena gruesa. De los clastos mayores algunos de ellos están moderadamente argilitizados y cloritizados. Rotura: Rotura vertical, mineralización en esa dirección que pudo haber condicionado la rotura.	0	211.62
Mtx2,1-S3-TV	60	Toba Lítica Cristalina (Tb-c)	Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas. La matriz es heterogénea dura y resistente, tiene fisuras cerradas y selladas. Contiene distintos tipos de líticos con texturas-afaníticos, porfídicos e ignimbritas. Rotura: Rotura frágil influenciada por los clastos (rompe un gran clasto) de textura afanítica y moderadamente cloritizado.	7.5	247.5
Mtx2,2-S3-TV	60	Toba Lítica Cristalina (Tb-c)	Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas. La matriz es heterogénea dura y resistente, tiene fisuras cerradas y selladas. Contiene distintos tipos de líticos con texturas-afaníticos, porfídicos e ignimbritas. Rotura: Frágil influenciada por los clastos de menor tamaño.	15	321.8
Mtx2,3-S3-TV	60	Toba Lítica Cristalina (Tb-c)	Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas. La matriz es heterogénea dura y resistente, tiene fisuras cerradas y selladas. Contiene distintos tipos de líticos con texturas-afaníticos, porfídicos e ignimbritas. Rotura: Frágil influenciada por los clastos de menor tamaño.	30	437.3

Notas:

- Mcs = Muestra compresión simple; Mtx = Muestra triaxial;
- Mbr = Muestra brasileña
- T- TT= Túnel "La Tortuga"
- T- 7V = Túnel "Siete Víboras"
- T- V = Túnel "El Venado"
- T- PI= Túnel "Picachos I"
- T- PII= Túnel "Picachos II"
- Todas las unidades de esfuerzo están en MPa.





“MÉTODOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS PARA DEFINIR PARÁMETROS DE DISEÑO GEOTÉCNICO EN EXCAVACIONES A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEAS”



ANEXO 3.3

“FOTOGRAFÍAS DE LAS MUESTRAS”

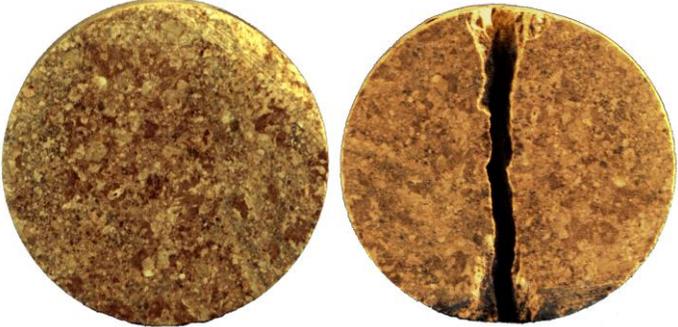
UNIDAD Ttl (Toba lítica) muestras de laboratorio resistencia baja

		
<p>Mcs1-S2-T7V Toba lítica de tonalidad rosácea</p>	<p>Mcs2-S2-T7V Toba lítica de tonalidad rosácea</p>	<p>M_{TX}1,1-S2-T7V Toba lítica de tonalidad rosácea</p>
		
<p>M_{TX}1,2-S2-T7V Toba lítica de tonalidad rosácea</p>	<p>M_{TX}1,3-S2-T7V Toba lítica de tonalidad rosácea</p>	<p>M_{TX}2,1-S1-T7V Toba lítica de composición riolítica</p>

UNIDAD Ttl (Toba lítica) muestras de laboratorio resistencia baja

		
<p>M_{TX}2,2-S1-T7V Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>M_{TX}2,3-S1-T7V Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>M_{TX}1,3-S1-T7V Toba lítica de composición riolítica</p>
		
<p>M_{TX}1,1-S4-TT Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>M_{TX}1,2-S4-TT Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>M_{TX}1,3-S4-TT Toba lítica de composición riolítica</p>

UNIDAD Ttl (Toba lítica) muestras de laboratorio resistencia baja

		
<p>M_{TX2,1-S4-TT} Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>M_{TX2,2-S4-TT} Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>Mbr1-S1-TV Toba lítica de composición riolítica, sana y silicificada, de violeta a gris y tonos pálidos,</p>

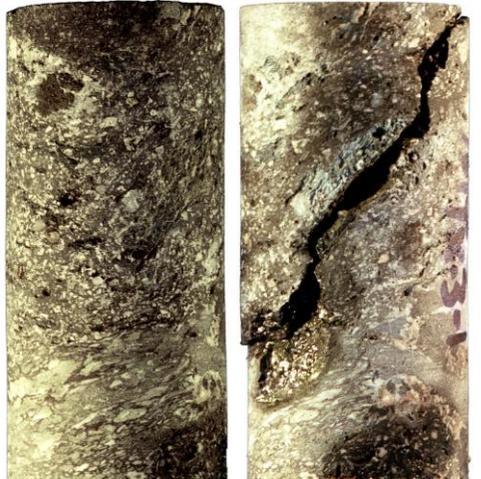
UNIDAD Ttl (Toba lítica) muestras de laboratorio resistencia alta

		
<p>M_{TX}2,1-S2-T7V Toba lítica de tonalidad rosácea</p>	<p>M_{TX}2,2-S2-T7V Toba lítica de tonalidad rosácea</p>	<p>M_{TX}2,3-S2-T7V Toba lítica de tonalidad rosácea</p>
		
<p>Mcs1-S1-TV Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>Mcs2-S1-TV Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>M_{TX}1,1-S1-TV Toba lítica de composición riolítica</p>

UNIDAD Ttl (Toba lítica) muestras de laboratorio resistencia alta

		
<p>M_{TX}1,2-S1-TV Toba lítica de composición riolítica</p>	<p>Mcs1-S4-TT Toba lítica de composición riolítica.</p>	<p>Mcs2-S4-TT Toba lítica de composición riolítica.</p>
		
<p>Mtx2,1-S2-TV Toba lítica de tonos grises de grano grueso y textura afanítica,</p>	<p>Mtx2,3-S2-TV Toba lítica de tonos grises de grano grueso y textura afanítica,</p>	

UNIDAD Ttlc (Toba lítica cloritizada) muestras de laboratorio resistencia baja

		
<p>Mcs2-S1-T7V Toba lítica cloritizada</p>	<p>M_{TX}2,1-S1-T7V Toba lítica cloritizada</p>	<p>M_{TX}2,2-S1-T7V Toba lítica cloritizada</p>
		
<p>M_{TX}2,3-S1-T7V Toba lítica cloritizada</p>	<p>M_{TX}3,1-S1-TV Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente</p>	<p>M_{TX}3,1-S2-TV Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente</p>

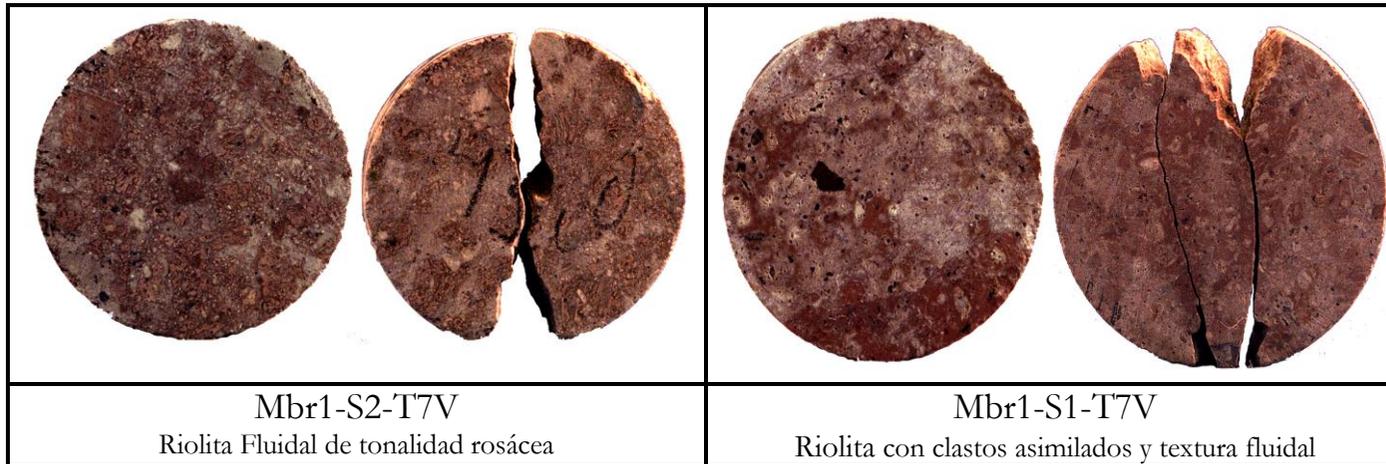
UNIDAD Ttlc (Toba lítica cloritizada) muestras de laboratorio resistencia alta

		
<p>M_{TX}3,2-S1-TV Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente</p>	<p>M_{TX}3,3-S1-TV Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente</p>	<p>M_{TX}1,3-S2-TV Toba lítica de composición riolítica, clastos incluida en una matriz de tono verdoso cloritizada</p>
		
<p>M_{TX}3,2-S2-TV Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente</p>	<p>M_{TX}3,3-S2-TV Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente</p>	<p>M_{BR}1,2-S1-TV Toba lítica de tono blanquecino la matriz es heterogénea, argilitizada y cloritizada</p>

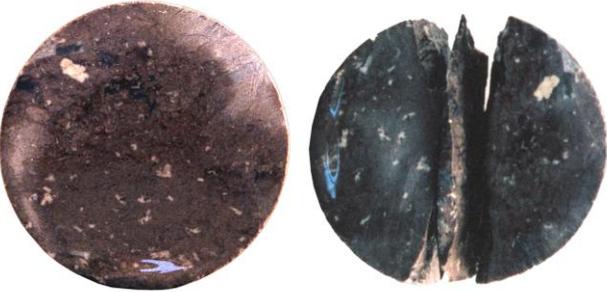
UNIDAD Tr (Riolita fluidal) muestras de laboratorio

		
<p>Mcs1-S1-T7V Riolita con clastos asimilados y textura fluidal</p>	<p>Mcs3-S1-T7V Riolita fluidal rosa-anaranjada</p>	<p>M_{TX}1,2-S1-T7V Riolita con clastos asimilados y textura fluidal</p>
		
<p>M_{TX}1,3-S1-T7V Riolita con clastos asimilados y textura fluidal</p>	<p>M_{TX}3,2-S1-T7V Riolita fluidal rosa-anaranjada</p>	<p>M_{TX}3,3-S1-T7V Riolita fluidal rosa-anaranjada</p>

UNIDAD Tr (Riolita fluidal) muestras de laboratorio



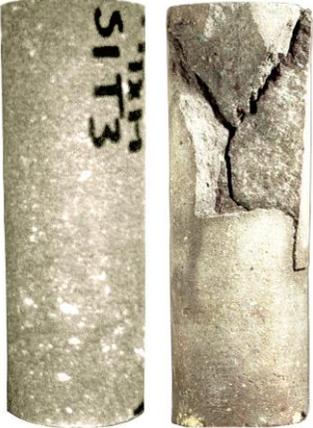
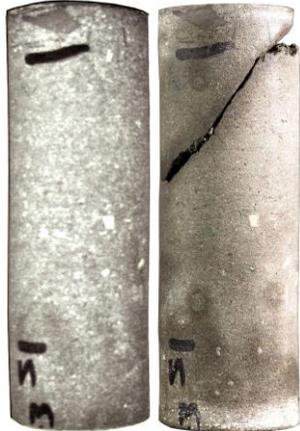
UNIDAD Tign (Toba fluidal) muestras de laboratorio

		
<p>Mcs1-S3-TPII Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura fluidal y localmente brechoide,</p>	<p>Mcs2-S3-TPII Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura fluidal y localmente brechoide,</p>	<p>MTX1,1-S3-TPII Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura fluidal y localmente brechoide,</p>
		
<p>MTX1,3-S3-TPII Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura fluidal y localmente brechoide,</p>	<p>Mbr1-S3-TPII Toba fluidal de color gris oscuro y tonalidades rosas. Silicificada de textura fluidal y localmente brechoide,</p>	

UNIDAD T-bah (Brecha Andesítica Hematizada) muestras de laboratorio

		
<p>Mcs1-S2-T3 Brecha Andesítica roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea</p>	<p>MTX1,1-S2-T3 Brecha Andesítica roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea</p>	<p>MTX1,2-S2-T3 Brecha Andesitita roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea</p>
		
<p>MTX1,3-S2-T3 Brecha Andesitita roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea</p>	<p>Mbr1-S2-T3 Brecha Andesitita roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea</p>	<p>Mbr2-S2-T3 Brecha Andesitita roja hematizada fracturada localmente con textura tobácea</p>

UNIDAD Ttg (Toba gris) muestras de laboratorio de resistencia baja

		
<p>Mcs1-S2-TPII Toba lítica de color gris y tonos rojizos</p>	<p>Mtx1,1-S2-TV Toba lítica de tonos grises y cayeses, con líticos rojizos de tamaño granzón</p>	<p>Mtx1,2-S2-TV Toba lítica de tonos grises y cayeses, con líticos rojizos de tamaño granzón</p>
		
<p>Mtx1,1-S1-TPI Toba lítica homogénea de grano fino de color gris y tonos verdosos</p>	<p>Mtx1,2-S1-TPI Toba lítica homogénea de grano fino de color gris y tonos verdosos</p>	<p>Mtx1,3-S1-TPI Toba lítica homogénea de grano fino de color gris y tonos verdosos</p>

UNIDAD Ttg (Toba gris) muestras de laboratorio de resistencia baja

		
<p>Mtx1,1-S4-TPI Toba lítica de color gris oscuro con textura afanítica</p>	<p>Mtx1,2-S4-TPI Toba lítica de color gris oscuro con textura afanítica</p>	<p>Mbr1-S3-TV Toba lítica grisácea (hematizada) con clastos cloritizados localmente</p>
		
<p>Mbr1-S1-TV Toba lítica de grano fino de color gris , textura afanítica</p>	<p>Mbr1-S2-TPII Toba lítica de color gris y tonos rojizos</p>	

UNIDAD Ttg (Toba gris) muestras de laboratorio de resistencia alta

		
<p>Mcs2-S2-TV Toba lítica con fragmentos líticos de color negro y variada composición</p>	<p>Mcs3-S1-TPII Toba lítica de color gris y tonos rojizos,</p>	<p>Mcs4-S1-TPII Toba lítica de color gris y tonos rojizos,</p>
		
<p>Mcs1-S1-TPI Toba lítica de grano fino de color gris , textura afanítica</p>	<p>Mcs3-S3-TV Toba lítica de color gris oscuro en matriz vítrea y cristalina de grano fino</p>	<p>Mtx1,1-S3-TV Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente</p>

UNIDAD Ttg (Toba gris) muestras de laboratorio de resistencia alta

		
<p>Mtx1,2-S3-TV Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente</p>	<p>Mtx1,3-S3-TV Toba lítica de tono gris (hematizada) con clastos cloritizados localmente</p>	<p>Mtx3,1-S3-TV Toba lítica, ignimbrita riolítica de color gris, clastos limonitizados</p>
		
<p>Mtx3,3-S3-TV Toba lítica, ignimbrita riolítica de color gris, clastos limonitizados</p>		

UNIDAD Ttbr (Toba brechoide) muestras de laboratorio

		
<p>Mcs1-S1-TPII Toba brechoide de grano grueso color violeta, heterogénea y de textura brechoide</p>	<p>Mcs2-S1-TPII Toba brechoide de grano grueso color violeta, heterogénea y de textura brechoide</p>	<p>Mtx1,1-S1-TPII Toba brechoide de grano grueso color violeta, heterogénea y de textura brechoide</p>
		
<p>Mtx1,2-S1-TPII Toba brechoide de grano grueso color violeta, heterogénea y de textura brechoide</p>	<p>Mtx1,3-S1-TPII Toba brechoide de grano mediano color violeta, heterogénea y de textura brechoide</p>	<p>Mbr1-S1-TPII Toba brechoide de grano mediano a fino color violeta, heterogénea y de textura brechoide</p>

UNIDAD Ttbr (Toba brechoide) muestras de laboratorio



UNIDAD Ttl-alt (toba lítica alterada) muestras de laboratorio

		
<p style="text-align: center;">Mcs3-S1-TV</p> <p>Toba lítica con un alto grado de alteración de tono café claro con diferentes tipos de clastos</p>	<p style="text-align: center;">Mcs1-S3-TPI</p> <p>Toba lítica con un incipiente grado de alteración de grano fino y matriz con textura afanítica.</p>	<p style="text-align: center;">Mcs2-S3-TPI</p> <p>Toba lítica con un avanzado grado de alteración de grano fino y textura afanítica.</p>
		
<p style="text-align: center;">Mcs3-S3-TPI</p> <p>Toba lítica con un avanzado grado de alteración de grano fino y textura afanítica.</p>	<p style="text-align: center;">MTX1,1-S3-TPI</p> <p>Toba lítica de grano fino y moderado grado de alteración, matriz afanítica.</p>	<p style="text-align: center;">MTX1,2-S3-TPI</p> <p>Toba lítica de grano fino y moderado grado de alteración, matriz afanítica.</p>

UNIDAD Ttl-alt (toba lítica alterada) muestras de laboratorio



MTX1,3-S3-TPI

Toba lítica de grano fino y moderado grado de alteración, matriz afanítica.



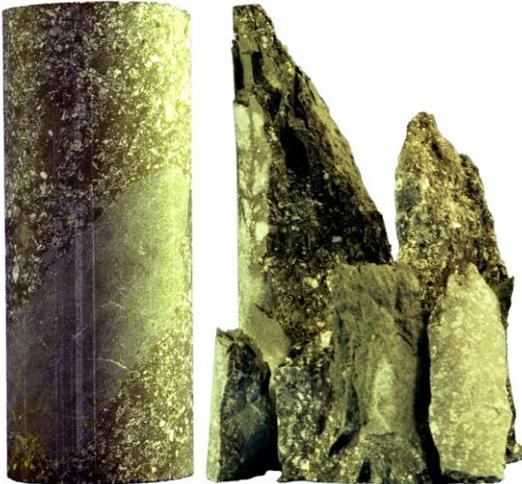
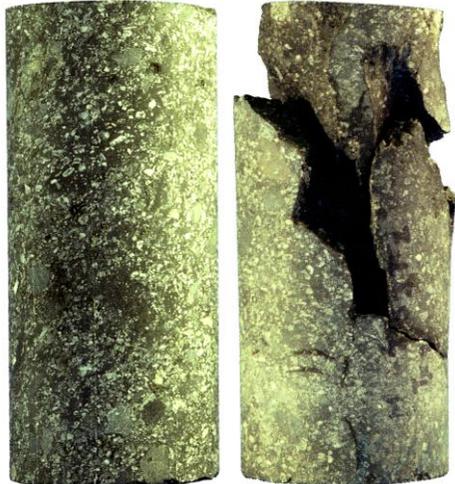
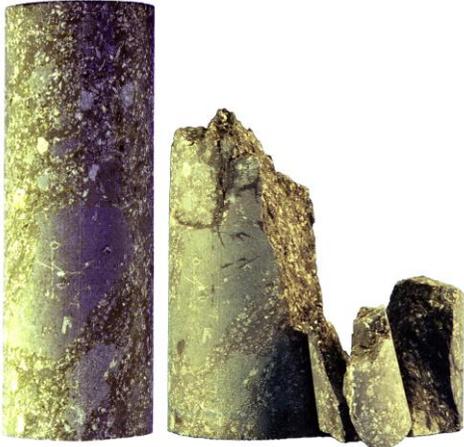
Mbr1-S3-TPI

Toba lítica con un avanzado grado de alteración de grano fino y textura afanítica.



Mbr2-S3-TPI

Toba lítica con un incipiente grado de alteración de grano fino y textura afanítica.

		
<p style="text-align: center;">Mcs2-S3-TV</p> <p>Toba lítica de color negruzco con clastos tamaño grava y bloques de pórfidos verdosos, la matriz es heterogénea y sana.</p>	<p style="text-align: center;">M_{TX}2,1-S3-TV</p> <p>Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas.</p>	<p style="text-align: center;">M_{TX}2,2-S3-TV</p> <p>Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas.</p>
		
<p style="text-align: center;">M_{TX}2,3-S3-TV</p> <p>Toba lítica de tonos grises y negruzcos con clastos cloritizados localmente, baja porosidad y microfisuras cerradas y selladas.</p>		

UNIDAD Tb-c (Toba lítica cristalina) muestras de laboratorio