



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

METODOLOGIA PARA ESTUDIOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO PARA
LA CONSTRUCCION DE UN TÚNEL

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ING. CIVIL

Presenta:

Pedro Abdel Rodríguez Amaro

Asesor:

Dr. Carlos Chávez Negrete

Morelia Michoacán Agosto del
2018





1 AGRADECIMIENTOS

Dios te bendiga Abuelita. Mis Padres Pedro Rodríguez Gómez y Rosalina Amaro Conejo por aguantarme durante estos años, antes y después de mi licenciatura, que bien el mayor deseo de un padre a sus hijos es tener culminado su carrera como profesionista.

Cabe destacar que mis hermanos Arnon Rodríguez Amaro y Ariadna Rodríguez Amaro fueron un gran apoyo para terminar mi tesis.

A mis amigos de licenciatura y laboratorio de mecánica de suelos y rocas por brindar apoyo y comprensión durante el desarrollo de este tema. Así como los materiales necesarios y equipo prestado durante el mismo, que bien yo sé que se empeñaron en ayudarme y apoyarme siempre, gracias.

Estoy agradecido con él al Dr. Eleazar Arreygue Rocha por su apoyo y salidas al campo que fueron de gran ayuda para comprender mejor este tema.

Me gustaría reconocer también al Dr. Carlos Chavez Negrete por su gran comprensión y colaboración en brindar el material necesario para el desarrollo de la tesis.

Agradecer a M.C. Edgar Sánchez Garibay y M.C. José Alfredo Zamora por su tiempo y ayuda ya que brindaron apoyo durante la elaboración.





Contenido

1	AGRADECIMIENTOS.....	2
2	Introducción	11
3	Diseño y planificación de las investigaciones in situ	14
3.1	Objetivos e importancia.....	14
3.1.1	Objetivo general.....	15
4	Estudios previos	16
4.1	Fotointerpretación y teledetección	21
4.1.1	Fotointerpretación.....	22
4.1.2	Patrones de Interpretación.	27
4.1.3	Preparación de las fotografías para su fotointerpretación	28
4.1.4	Manejo del Estereoscopio de bolsillo:.....	29
4.2	Reconocimientos geológicos y geotécnicos de campo	32
4.2.1	Datos geológicos	32
4.2.1	Inestabilidades del terreno natural.....	34
4.3	Estudio geotécnico.....	36
4.3.1	Descripción Geotécnica de Suelos.....	36
4.3.2	Descripción geotécnica de macizos rocosos	63
4.3.3	Propiedades mecánicas	79
4.3.4	Datos hidrogeológicos e hidrológicos	91
5	Métodos de Exploración de Suelo y Roca (Sondeos geotécnicos y calicatas).....	94
5.1	Geofísicos	94
5.1.1	Geofísica de superficie	95





5.1.2	Geofísica en el interior de sondeos	101
5.2	Sondeos en suelo y roca.....	104
5.3	Las propiedades geológicas.....	106
5.4	Número y profundidad de sondeos	106
5.4.1	Sondeos de penetración estándar en suelos (SPT)	107
5.4.2	Perforación en roca o sondeos a rotación	116
5.5	Registro y clasificación de la perforación de roca	120
5.5.1	Descripción de la roca	120
5.6	Monitoreo del nivel de agua	127
5.6.1	Cinta de tiza.....	128
5.6.2	Cinta con un flotador.....	128
5.6.3	Registradores de datos.....	129
6	Conclusiones	130
7	Recomendaciones	132
8	Bibliografía.....	133





INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Columna litológica (Pola y otros 2006).....	16
Figura 2 Sitio web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía	17
Figura 3 Mapa geológico del Cerro de la Escolta (Alonso F. 2010)	19
Figura 4 Par estereoscópico (google.com.mx)	25
Figura 5 ejemplo de una fotografía aérea (N·PRY·CAR·1·01·004-07).....	27
Figura 6 Estereoscopio de bolsillo (google.com.mx)	29
Figura 7. Fotointerpretación (colocación de imágenes a interpretar)	30
Figura 8 ubicación de puntos a interpretar	30
Figura 9 observación de la imagen	30
Figura 10 Par estereoscópico del rio Grijalva (Hinojosa A. 2007)	31
Figura 11 Carta de plasticidad.....	45
Figura 12 Suelo saturado 24hrs.	48
Figura 13 Copa de Casagrande con suelo homogenizado	49
Figura 14 Limite Plástico y Contracción Lineal.....	50
Figura 15 Material sobrante del límite líquido.....	50
Figura 16 PCA o Muestra a cielo abierto.....	52
Figura 17 Esquema de consolidación en terreno (ELE Internacional Ltda., 1993)	56
Figura 18 Tipos de Edometro (Bowles J. 1982)	57
Figura 19 Ejemplo de consolidación para diferentes cargas a lo largo del tiempo	58
Figura 20 Consolidación.....	59
Figura 21 ejemplo de curva de deformación contra logaritmo de tiempo.	60
Figura 22 Cámara Triaxial (Bowles J. 1982)	61
Figura 23 Cámara Triaxial con muestra (UU).....	62
Figura 24 FieldMove Clino es una brújula digital-clinómetro para la captura de datos	65





Figura 25 Medición de la orientación de las discontinuidades (González de Vallejo, et al., 2002)	65
Figura 26 Perfil para estimar el coeficiente de rugosidad de la roca (González de Vallejo, et al., 2002).....	67
Figura 27 Roca ligeramente decolorada, con cambios en el color original de la matriz rocosa	69
Figura 28 Ejemplo de Fragmento de roca para determinar RQD (González de Vallejo, et al., 2002)	74
Figura 29 Procedimiento de medida del RQD y se describe la calidad de la roca en función de este índice (González de Vallejo, et al., 2002).....	74
Figura 30 Fragmentos de roca humedecidos durante 24 horas	80
Figura 31 Requisitos de los fragmentos de roca para ensayo diametral	81
Figura 32 Carga puntual.....	81
Figura 33 Requisitos de las muestras irregulares para el ensayo	82
Figura 34 Ensayos diametrales validos.....	82
Figura 35 Ensayos diametrales nulos	83
Figura 36 Ejemplo de esfuerzos pico y residual de diferentes ensayos	84
Figura 37 Célula de Hoek, ensayo de corte directo (González de Vallejo, et al., 2002)	85
Figura 38 Diagrama de esfuerzos	87
Figura 39 Círculos de Mohr en rocas (ASTM-D-2664)	91
Figura 40 Resistivímetro.....	95
Figura 41 Resistividad del terreno mediante métodos eléctricos (González de Vallejo, et al., 2002)	97
Figura 42 Ejemplo dipolo-dipolo González de Vallejo, et al., 2002.....	98
Figura 43 Fundamento de la prospección mediante sísmica de refracción (Ingeniería Geologica)	99
Figura 44 Sismógrafo Abem Terraloc Mark.....	100
Figura 45 Equipo SCXT3000 Cross-Hole sonic logging system.....	102





Figura 46 Generación de ondas P y S; SHH y Sv en plano horizontal y vertical (Clayton, Matthews & Simons 1995) y González de Vallejo, et al., 2002	103
Figura 47 Equipo de penetración Estándar (Longyear)	109
Figura 48 Penetrómetro Estándar	110
Figura 49 Penetrómetro estándar utilizado en México	111
Figura 50 Porta testigos o muestras	111
Figura 51 Drenado de agua	111
Figura 52 Válvula Check	111
Figura 53 Muestra de arcilla SPT	112
Figura 54 Estratigrafía con relación a N y porcentaje de humedad	115
Figura 55 Máquina del tipo Acker	117
Figura 56 Broca de tungsteno	117
Figura 57 Estratigrafía y porcentaje de recuperación RQD	125
Figura 58 Sondeo Eléctrico	129





INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de escalas	26
Tabla 2 Clasificación de los fragmentos de roca	39
Tabla 3 Características de los fragmentos de roca	40
Tabla 4 Tamaño de fragmentos de roca	40
Tabla 5 Clasificación de suelos con base en el SUCS	43
Tabla 6 Clasificación aproximada de suelos en el campo	46
Tabla 7 número y tamaño de las muestras	54
Tabla 8 Descripción del grado de meteorización (González de Vallejo, et al., 2002)	69
Tabla 9 Clasificación en base a la resistencia de la roca (González de Vallejo, et al., 2002)	70
Tabla 10 Clasificación Geológica	72
Tabla 11 Clasificación de un macizo rocoso (Bieniawski)	78
Tabla 12 Correcciones dependiendo de la orientación de las discontinuidades ...	78
Tabla 13 Valoración de la roca dependiendo del resultado de su la RMR	79
Tabla 14 Velocidad de Onda P González de Vallejo, et al., 2002	102
Tabla 15 Suelos Gruesos (SPT).....	108
Tabla 16 Suelos Finos (SPT)	108
Tabla 17 Ejemplo de Reporte de campo	113
Tabla 18 Ejemplo de reporte de campo	114
Tabla 19 Ejempló de reporte de campo en roca.....	118
Tabla 20 Descripción General de la roca	121
Tabla 21 Términos para describir tamaño de grano típicamente para las rocas sedimentarias (González de Vallejo, et al., 2002)	126
Tabla 22 Términos para describir la forma de grano (para rocas sedimentarias) González de Vallejo, et al., 2002.....	126
Tabla 23 Términos para describir espesor del estrato (González de Vallejo, et al., 2002)	127





RESUMEN

Este tema de investigación está dirigido a realizar de una manera sencilla y rápida a tener bases para una investigación geológica-geotécnica para la construcción de un túnel, a realizar un análisis en el lugar a construir, llevar a cabo una serie de pasos que se deben hacer al suelo y roca, obtener resultados para evaluar los riesgos y proponer soluciones para las mismas.

El desarrollo y movilidad de la infraestructura de un país, es determinado no solo por el crecimiento de su economía, es primordial enfocar también los beneficios a sus habitantes, y a mejorar el acceso a los servicios de comunicación, salud alimentación, educación, comercio, e ir generando por causa y consecuencia el crecimiento económico y social del país. En el caso específico de este estudio, la infraestructura y construcción de túneles, debe garantizar no solo el crecimiento financiero y social del país, debe ofrecer a los usuarios, seguridad y confort, reducir de manera considerable el tiempo de recorrido, y conservar flora y fauna del lugar donde serán construidos los túneles; así como restaurar el impacto ambiental producido.

- Fotointerpretación
- Descripción geotécnica de macizos rocosos
- Clasificación de los fragmentos de roca
- Propiedades mecánicas
- Sondeos de penetración estándar en suelos





Abstract

This research topic is aimed at making a simple and quick basis for a geological-geotechnical investigation for the construction of a tunnel, an analysis in the place to build, carry out a series of steps that must be made to the soil and rock, obtain results to evaluate the risks and propose solutions for them.

The development and mobility of a country's infrastructure is determined not only by the growth of its economy, it also focuses on the benefits of communication, health, education, trade, and generating economic growth and social of the country. In the specific case of this study, the infrastructure and the construction of tunnels, it must be guaranteed that not only the financial and social growth of the country must be offered to the users, safety and comfort, considerable travel time, flora and wildlife conservation of the place where the tunnels will be built; as well as restore the environmental impact produced.

- Photointerpretation
- Geotechnical description of rock massifs
- Classification of rock fragments
- Mechanical properties
- Standard penetration probes in floors





2 Introducción

La construcción subterránea en nuestro país ha pasado a ser una opción constructiva a una necesidad para satisfacer las diferentes necesidades de movilidad. En los últimos años, se ha tenido que tratar con dificultad distintos problemas constructivos en túneles debido a la falta de control en su construcción y ejecución. Esto es resultado no sólo de falta de control sino también a la falta de una guía constructiva y de metodologías que estén ligadas a nuevas tecnologías que no se han tomado en cuenta.

La historia de los túneles surge de la minería y la necesidad de establecer diferentes formas para la obtención de minerales en la tierra. Originalmente los mineros realizaban excavaciones para lograr este objetivo; estas operaciones subterráneas no eran más que una prolongación de las manifestaciones de la superficie. Al hacerse más complejos los métodos de exploración, se tuvo como resultado el descubrimiento de grandes depósitos de minerales a profundidades considerables, por tanto se desarrollaron técnicas mineras para explotar estos depósitos.

El propósito principal de un estudio geotécnico, para la construcción de túneles, es el establecer criterios, y mecanismos de prevención y control que ayuden a elevar el factor seguridad. Así mismo, aplicar el factor tiempo-costo para poder disminuir, en medida considerablemente, los niveles de amenaza, riesgo y pérdida.

En el libro “EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS EN ROCA” de E. HOEK y otros autores, se indica lo siguiente: Al aumentarse el tamaño de las operaciones mineras durante las últimas décadas, se introdujo un concepto que hubiera sido incomprensible para los mineros de antaño: el concepto de excavaciones subterráneas permanentes.

Grandes sistemas de tiros con sus complejos malacates, ductos para el mineral, cámaras de bombeo y estaciones de quebradoras, los que deberán prestar servicio durante varias decenas de años, son, desde el punto de vista minero, excavaciones permanentes. Además de ser de gran tamaño, algunas de estas excavaciones





darán cabida a equipos costosos y personal permanente; por lo tanto, deberán estar seguros a prueba de caídas de roca y otras formas de inestabilidad. Los ingenieros civiles pocas veces se ocupan de excavaciones subterráneas provisionales, ya que los túneles, las casas de máquinas subterráneas, las cavernas para el almacenamiento de petróleo o gas, túneles viales, etc. tienen que mantenerse estables por más de veinte años; y debido a que no se puede admitir ningún tipo de inestabilidad, los recursos que se destinan al diseño y a la instalación de sistemas de refuerzo son normalmente suficientes y a veces incluso excesivos. (Hoek & Brown, 1985).

Luego de esta nota, es importante reconocer la importancia de la estabilidad de las obras subterráneas para los ingenieros civiles.

La mecánica de rocas se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico (González, Luis 2004).

El desarrollo de la mecánica de rocas se inició como consecuencia de la utilización del medio geológico para obras superficiales y subterráneas y explotación de recursos mineros.

Las masas rocosas aparecen en la mayoría de los casos afectados por discontinuidades o superficies de debilidad que separan bloques de matriz rocosa o 'roca intacta' constituyendo en conjunto los macizos rocosos. Ambos ámbitos son objeto de estudio de la mecánica de rocas, pero son principalmente los planos de discontinuidad los que determinan el carácter diferencial de esta disciplina con respecto al estudio de los suelos, y los que hacen que la mecánica del medio rocoso presente un carácter discontinuo y anisótropo.

La finalidad de la mecánica de rocas es conocer y predecir el comportamiento de los materiales rocosos ante la actuación de las fuerzas internas y externas que se





ejercen sobre ellos. Cuando se excava un macizo rocoso o se construyen estructuras sobre las rocas se modifican las condiciones iniciales del medio rocoso el cual responde a estos cambios deformándose y rompiéndose.

El conocimiento de los esfuerzos y las deformaciones que puede llegar a soportar el material rocoso ante unas determinadas condiciones permite evaluar su comportamiento mecánico y abordar el diseño de estructuras y obras de ingeniería.

Las propiedades físicas controlan las características resistentes y deformaciones de la matriz rocosa (composición mineralógica, densidad, estructura y fábrica, porosidad, permeabilidad, Alterabilidad, dureza, etc.), y son el resultado de la génesis, condiciones y procesos geológicos y tectónicos sufridos por las rocas a lo largo de su historia.

El estudio de la estructura geológica y las discontinuidades es un aspecto fundamental en mecánica de rocas: los planos de debilidad preexistentes controlan los procesos de deformación y rotura en los macizos a cotas superficiales, donde se realizan la gran mayoría de las obras de ingeniería.

La mayor o menor influencia de los bloques de matriz rocosa en el comportamiento global del macizo dependerá de las propiedades relativas de ambos componentes, del número, naturaleza y características de las discontinuidades.





3 Diseño y planificación de las investigaciones in situ

Antes de iniciar los trabajos de campo se debe proceder a revisar cuanta información significativa esté disponible en relación al proyecto y la zona donde se emplazara la obra. Esta tarea consiste en la revisión de bibliografía, publicaciones e informes, tanto sobre el proyecto como del emplazamiento, de mapas geológicos y de otro tipo y de fotografías aéreas. Es igualmente relevante la consulta de documentos e informes sobre otros proyectos realizados en la zona, como carreteras, obras hidráulicas, etc.

Las obras de ingeniería modifican el estado de esfuerzos a que están sometidos los macizos rocosos en un tiempo muy corto en relación a los procesos geológicos, y pueden tener lugar interacciones mutuas entre la liberación o redistribución de los esfuerzos naturales y las estructuras. Por ello, es importante conocer el estado de tensiones previo y evaluar su influencia sobre las obras.

3.1 Objetivos e importancia

Al hablar de ingeniería de túneles, ancestralmente se tiene la experiencia de la actividad minera, sus métodos de excavación y sostenimiento y los registros de accidentes famosos. Después de las minas, fue necesaria la excavación de túneles para ferrocarriles; con el aumento del área necesaria de túnel para ferrocarriles, se aumentó muy notablemente el riesgo de derrumbes y se estableció una nueva técnica de construcción de túneles. Para carreteras se hizo necesaria un área mucho mayor que la de ferrocarriles, implementándose la especialidad de la construcción de túneles carreteros.

En los proyectos de ingeniería civil resulta imprescindible la investigación geológica del trazado de una nueva carretera. La elección del trazado de una carretera o túnel tienen un peso decisivo las características geológicas del terreno. Es importante detectar los principales problemas geológicos que se pudieran presentar y en





consecuencia definir soluciones en el ámbito de la ingeniería civil, adaptando el proyecto a las características geológicas singulares de cada caso.

3.1.1 Objetivo general

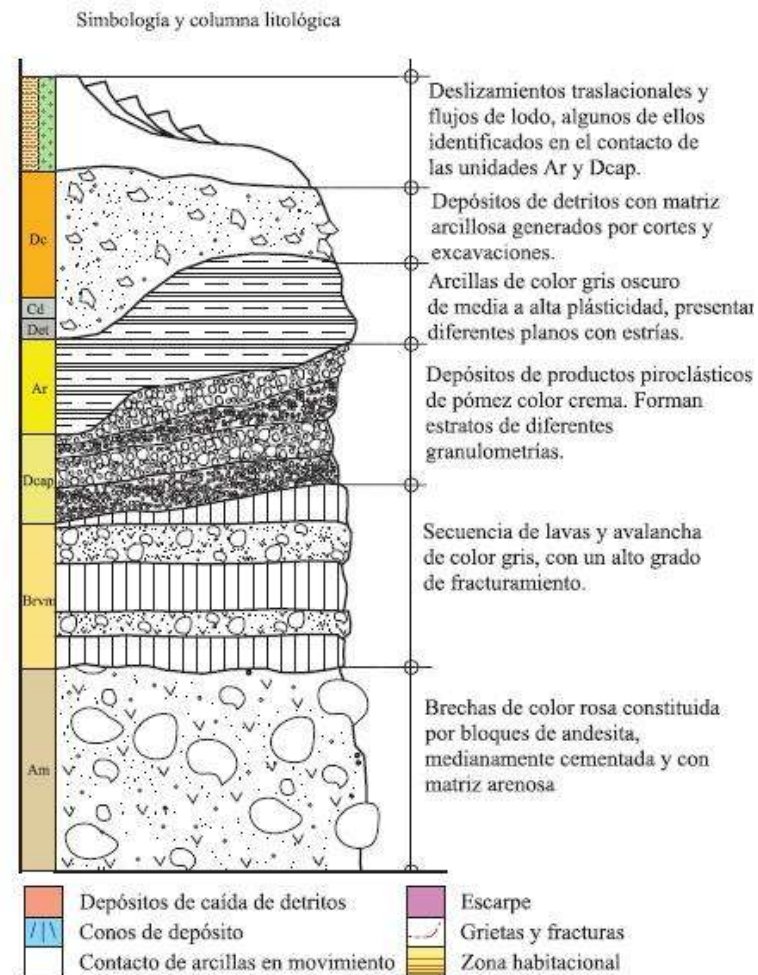
Los estudios previos tienen como objetivo el conocimiento geológico - geotécnico general de la zona donde se situara el proyecto. A partir de los estudios previos se planifican las investigaciones in situ y se valoran los factores geológicos, incluyendo los riesgos, que puedan condicionar la viabilidad del proyecto.

Las obras de ingeniería modifican el estado de esfuerzos a que están sometidos los macizos rocosos en un tiempo muy corto en relación a los procesos geológicos, y pueden tener lugar interacciones mutuas entre la liberación o redistribución de los esfuerzos naturales y las estructuras. Por ello, es importante conocer el estado de esfuerzos y la estructura de roca y suelos previamente y evaluar su influencia sobre las futuras obras.



4 Estudios previos

El estudio geotécnico de campo se emprende con la finalidad de conocer con el mayor detalle el material que se encontrará al hacer la excavación del túnel, así como cualquier característica del sitio que pudiera afectar la excavación, como flujos de agua, cuevas, depósitos de material suelto, etc. Ver *Figura 1*.



NOTA: La columna geológica representada en esta figura, no se elaboró a ninguna escala gráfica.

Figura 1 Columna litológica (Pola y otros 2006)



Los estudios previos tienen como objetivo el conocimiento geológico-geotécnico general de la zona donde se va a situar el proyecto.

El estudio geotécnico determina el perfil de suelo y eje del trazo, proporcionando toda la información necesaria. La geología de superficie es la encargada de aplicar el conocimiento con el mayor detalle posible de la capa superficial de la corteza terrestre.

En México se puede consultar las cartas de INEGI, así como información disponible del sitio web de todos los estudios geológicos (página web: INEGI ver Figura 2).

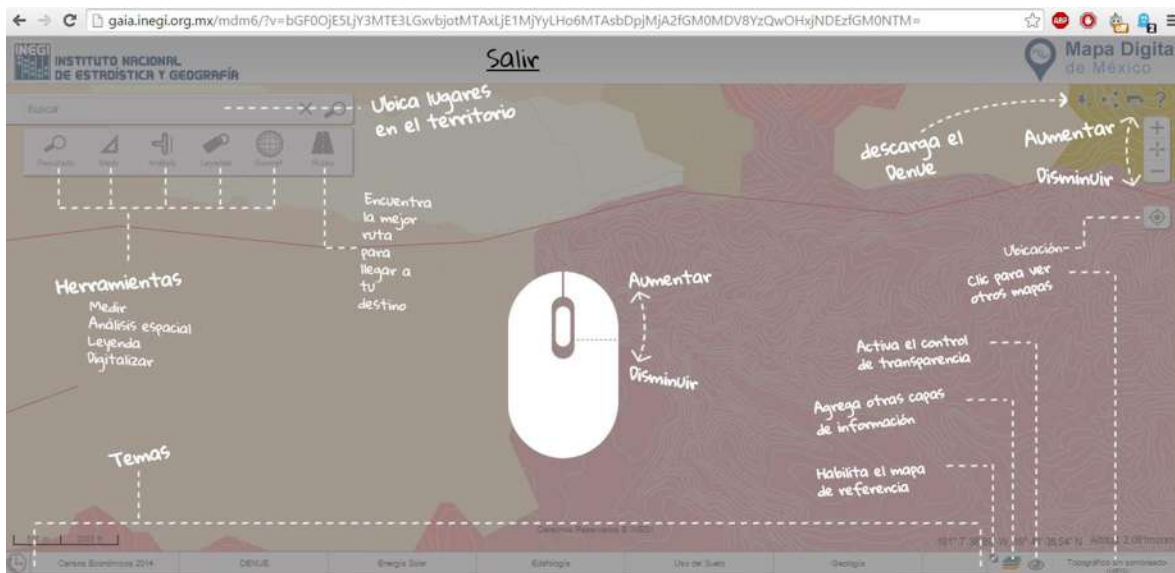


Figura 2 Sitio web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía

Mapa Digital de México en línea es un sistema que permite consultar Información geográfica generada en el INEGI. Dentro del sistema pueden observar los cambios en el uso del suelo y vegetación en el lapso 1985-2011. Su propósito como herramienta es en la toma de decisiones, apoyado en un Sistema de Información Geográfica permitiendo realizar: consultas de información, sobreponer diferentes capas de información, manejar niveles de transparencia, consultar y descargar marcas Geodésicas, crear áreas de influencia, digitalizar áreas, líneas y puntos,





medir de distancias, realizar búsqueda de calles, ejecutar diferentes niveles de acercamiento, realizar cambios de escala.

La topografía juega un papel importante en el diseño de un túnel y debe armonizar con las formas en las que la naturaleza presenta la superficie de la corteza terrestre. El conocimiento de la superficie de la corteza terrestre sobre la que se va a colocar la carretera, se obtiene mediante la topografía. Gracias al conocimiento detallado de la topografía se sabrá la magnitud de las excavaciones necesarias, la magnitud de los puentes y obras de drenaje; podrán medirse y cuantificarse los volúmenes de tierra o roca que se necesita excavar, transportar y compactar; y podrán diseñarse las estructuras necesarias como puentes, viaductos y túneles.

Toda la topografía se ha obtenido por medio de las fotografías aéreas. Aprovechando esta tecnología, se ha tenido un grado de avance significativo, ya que se tiene ya el diseño del trazo definitivo, estudiado y respaldado por los estudios complementarios al trazo geométrico, como son los geotécnicos, hidrológicos y de ingeniería de tránsito.

Los mapas geológicos aportan una importante información sobre las características del terreno y sirven de base para la realización de una cartografía geotécnica de detalle un ejemplo más sencillo y fácil de entender es como el que se muestra en la Figura 3.



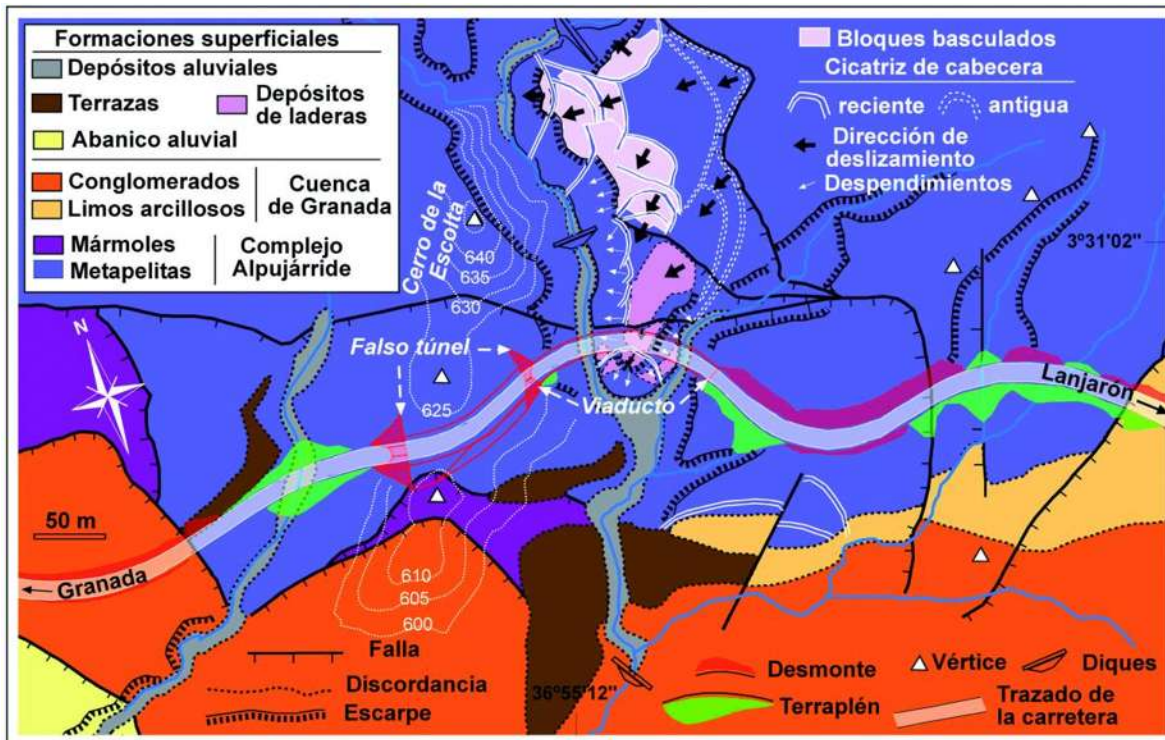


Figura 3 Mapa geológico del Cerro de la Escolta (Alonso F. 2010)

El estudio previo geológico deberá ser desde un punto general de la zona; hasta el particular alrededor del túnel (el terreno alrededor del túnel que afecta directamente al diseño del túnel), es el circundante en una distancia, en esta distancia se deberá llegar al cabo el conocimiento más detallado posible sobre estructura, litologías, grados de meteorización, accidentes tectónicos, etc.

Habitualmente se presenta esta información en planos de planta y perfil longitudinal a escala 1:1.000, o similar.

Sin embargo, en ocasiones para tener un mejor grado de información y precisión de esta correspondería a una escala bastante menor (1:5.000). Esto suele ser debido a dificultades como: falta de afloramientos del suelo, dificultades de accesos para realizar sondeos concretos, costo y tiempo requerido, falta de apoyo topográfico, etc.



Estas dificultades para realizar en el proyecto un estudio geológico adecuado, deberán ser siempre resueltas, o cuando menos en parte, ser consciente del grado real de conocimiento, indicarlo en el proyecto, y procurar ampliar el estudio antes de iniciar la construcción o durante la misma. Debemos admitir que un buen conocimiento del terreno alrededor del túnel, no llegaremos a tenerlo hasta la construcción en que normalmente iremos viendo el frente de la excavación

La excavación de un túnel debe avanzar metro a metro, por lo que debe enfrentarse la problemática de posibles derrumbes, inundaciones y sobre todo la necesidad de sostenimiento que significa la colocación de soportes de acero que retengan la presión del terreno que tiende a cerrar el hueco que se ha excavado en el terreno, y proteger por lo pronto a los trabajadores que realizan la excavación. En consecuencia debería conocerse de antemano mediante los estudios de campo, el tipo de terreno, su resistencia y su deformabilidad en cada metro del terreno por el que se excavará el túnel.

De acuerdo con la N-PRY-CAR-1-03-001-00 de ejecución de estudios geológicos de la SCT, se debe definir los aspectos geológicos que puedan influir en el diseño de la obra, establecer los posibles procedimientos constructivos, y evaluar el costo de su construcción, el estudio deberá comprender los portales donde se realizara la excavación a cielo abierto y el cuerpo del túnel donde se excavara el túnel, mientras que en la zona de los portales se ven superficialmente los materiales.

Además, se debe observar la zonificación estratigráfica de los diferentes materiales que constituyen los portales y cuerpo del túnel identificando los materiales por excavar, tener en cuenta las alteraciones de la roca que determinan el contacto con el suelo y que afectan la ubicación de los portales tanto como la estabilidad y atacabilidad del túnel a estudiar; se deberá observar estructuras mayores como fallas, plegamientos, estratificaciones y otros factores menores como foliación y exfoliación o fracturas que influyan la estabilidad de los portales y cuerpo del túnel.





Un estudio geológico se clasifica dependiendo del nivel de investigación que se requiera como (Norma SCT N-PRY-CAR-1-03-001-00):

a) Reconocimiento geológico.

Es el levantamiento geológico somero de zonas que puedan ser pequeñas o hasta kilómetros cuadrados, que se realizan con base en los planos topográficos, fotografías aéreas a escala adecuada o imágenes de satélite, mediante recorridos a pie, vehículos terrestres o aéreos que ayudan a identificar materiales que se encuentren en el área de estudio, determinar su relación suelo-roca, probables bancos de material, y si se requiere mayor detalle recomendar el tipo y características a evaluar en zonas inestables o calidad de los bancos de materiales

b) Reconocimiento geológico a detalle

Son levantamientos geológicos de sitios específicos con base ya a un levantamiento geológico apoyados de igual forma de fotografías aéreas o imágenes satelitales, con la excepción de lo anterior aquí es necesario definir el modelo geológico del área estudiada y en su caso, proponer trabajos complementarios de mayor detalle, como la exploración directa y/o indirecta del subsuelo u otros estudios geológicos para detectar sitios alternos de bancos de materiales.

4.1 Fotointerpretación y teledetección

Los mapas geotécnicos constituyen un método en la ingeniería geológica para representar cartográficamente información geológica - geotécnica con fines de planificación y usos del territorio y para el proyecto, construcción y mantenimiento de obras de ingeniería. Aportan datos sobre las características y propiedades del suelo y del subsuelo de una determinada zona para evaluar su comportamiento y prever los problemas geológicos y geotécnicos.

Los datos incluidos en los mapas geológicos (topografía, relieve, litología, estructura, etc.) permiten deducir información valiosa sobre las propiedades de los materiales,





pero las descripciones geológicas no son suficientes para su aplicación en la ingeniería geológica.

En la realización de este tipo de mapas se debe trabajar en base a la escala y extensión, técnicas de representación, información disponible, datos, importancia de los factores geológicos, así como también los geotécnicos y sus relaciones.

4.1.1 Fotointerpretación

En ingeniería geotécnica la fotointerpretación constituye igualmente un método de gran utilidad, sobre todo en la fase de estudios previos. La fotointerpretación es una técnica necesaria que permite reconocer superficies muy extensas, pudiendo analizar fácilmente no solo las características de la zona del proyecto, posibilita apreciar factores regionales de posible interés en el proyecto. La fotointerpretación es la técnica más rápida y económica.

Los siguientes principios en que se base la fotointerpretación son utilizados con alguna extensión en casi todas las disciplinas:

a) Detección (detectar).

Es descubrir que algo está ahí. Esta fase tiene una relación directa con la visibilidad de los objetos a ser interpretados, por lo tanto, está relacionada con aspectos tales como, clase de objeto, disciplina, escala y calidad de las fotografías. Por otro lado, está relacionada con los conocimientos del intérprete quien trata de detectar. Detectar no es sólo ver los objetos, es extractar en forma selectiva los objetos o elementos de importancia para el caso particular de interpretación que se realiza. La detección está directamente relacionada con el reconocimiento, mediante el cual los objetos no solamente son vistos, sino que se reconocen su naturaleza.

b) Reconocimiento e identificación.

El reconocimiento e identificación en conjunto son algunas veces llamados “foto lectura”. La foto identificación es el proceso mediante el cual se identifica como conocido un objeto, elemento o forma directamente visible, por medio de un





conocimiento local o específico y a los cuales se les asigna un nombre específico. El reconocimiento y la identificación están tan estrechamente relacionados que pueden ser considerados como una sola fase, difieren solamente respecto al conocimiento del intérprete a la información disponible.

c) Análisis.

Es el proceso de separación de grupos de objetos o fenómenos ya reconocidos en sus componentes o elementos y el establecimiento de las relaciones entre estas partes. Se clasifican los elementos de acuerdo a su uso, tamaño, forma, ubicación, etc., El análisis se inicia con la foto lectura, seguido por una selección de los rasgos por analizar.

d) Deducción.

Este principio de la fotointerpretación está relacionado con la combinación de las observaciones hechas sobre las imágenes y los conocimientos obtenidos en otras fuentes, para adquirir información que no puede ser obtenida sólo con las imágenes. Si la deducción es usada para establecer diferencias o semejanzas de la naturaleza de los objetos, principalmente invisibles, debe tenerse cuidado para evitar conclusiones erróneas. En estos casos, es posible que aún expertos bien clasificados puedan cometer errores.

e) Clasificación.

La clasificación corrientemente es la etapa final de la fotointerpretación. Igualmente, la mayoría de las conclusiones o hipótesis son hechas en esta etapa. El uso de la palabra clasificación se acerca mucho a expresar el proceso mental típico involucrado. La clasificación establece la identidad de las superficies u objetos delineados por análisis, en el caso de objetos directamente retos (casas, carreteras, canales, ríos, árboles, detalles geomorfológicos). En el caso de objetos invisibles (suelo, varios fenómenos geológicos, algunos aspectos humanos), la clasificación se hace en términos de los sistemas o elementos visibles. Para clasificar la





naturaleza misma de los objetos, es necesario tener suficiente información de campo, principalmente observaciones de clasificación.

Un estudio aéreo-fotogramétrico es el conjunto de actividades aéreas y de campo y gabinete necesarias para la toma de fotografías aéreas. Esta información fotográfica y topográfica sirven para elaborar un anteproyecto, una fotografía aérea debe tener una escala de uno a diez mil (1:10000), con el propósito de proveer al proyectista de la información fotográfica y topográfica que le permita determinar los ejes definitivos del camino, intersecciones y otras obras especiales.

Conforme a lo establecido en la Norma N·PRY·CAR·1·03·002-00 de la SCT: para poder realizar un trabajo de fotogeología se requieren de un estereoscopio de espejos estos darán un adecuado aumento para observar detalladamente las fotografías aéreas y un equipo de cómputo en caso de que se requieran imágenes de satélite.

Las fotografías deberán ser en blanco y negro o a color según se requiera como lo indica la Norma N·PRY·CAR·1·03·001, Ejecución de Estudios Geológicos.

La fotointerpretación consiste en analizar estereoscópicamente los rasgos de la superficie terrestre de las fotografías aéreas con el propósito de definir la geología del sitio, principalmente el tipo de roca, a través de la observación se tiene mejor definición de la litología, los contactos de las diferentes rocas ya sean por cambios litológicos, las estructuras geológicas (como fallas, rumbos, flujos de lava, deslizamientos entre otras.), zonas de vegetación o cualquier otro rasgo de alteración natural que sirva para auxiliar el estudio geológico y rasgos físicos como caminos, brechas, poblados como cualquier otra construcción hecha por el hombre, en la Figura 4 se presenta un par estereográfico.



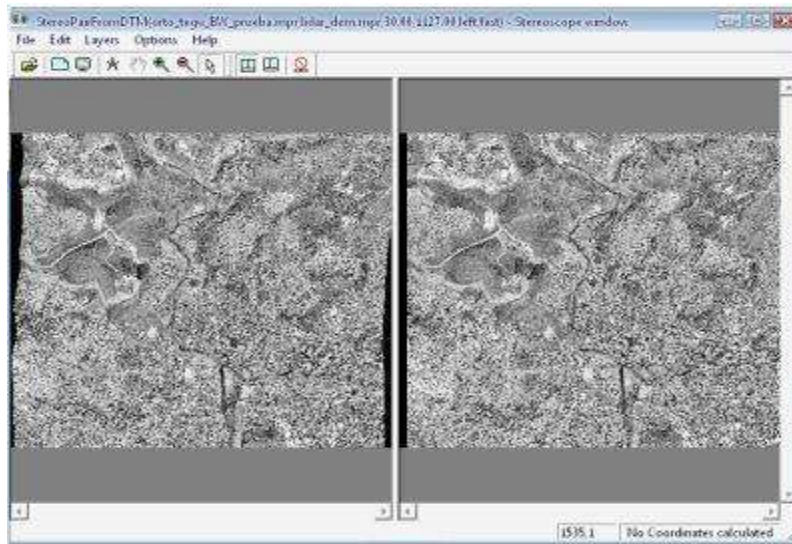


Figura 4 Par estereoscópico (google.com.mx)

Conforme a la Norma N·PRY·CAR·1·01·004-07 los requisitos de una fotografía aérea, serán en blanco y negro o en color, tendrán un área efectiva de imagen de 23 x 23 centímetros, estas tendrán la fechas y toma, escala, distancia focal en milímetros del lente de la cámara y su distorsión máxima en micrómetros, el nombre del proyecto y su número ver Figura 5; las fotografías tendrán una escala de uno a veinticinco mil (1:25.000) para el estudio Aero fotogramétrico para proyecto preliminar de la carretera, uno a diez mil (1:10.000) para el estudio Aero fotogramétrico para proyecto definitivo de la carretera y uno a cinco mil (1:5.000) para el estudio Aero fotogramétrico de obra especial. Parámetros útiles para la toma de fotografías aéreas ver Tabla 1.





Tabla 1 Tabla de escalas

Escala	Altura de vuelo sobre el terreno	Separación entre líneas ^[2]	Unidades en m (ft)
			Número de fotos en 100 km ² ^[1]
1:25 000	3 800 {12 500}	4 310	10
1:20 000	3 040 {10 000}	3 450	16
1:15 000	2 280 { 7 500}	2 587	28
1:10 000	1 520 { 5 000}	1 725	63
1: 5 000	760 { 2 500}	862	252
1: 3 000	456 { 1 500}	518	700

[1] Para una superposición longitudinal entre imágenes consecutivas de 60%.

[2] Para una superposición transversal entre líneas de vuelo adyacentes de 25%.





Figura 5 ejemplo de una fotografía aérea (N·PRY·CAR·1·01·004·07)

4.1.2 Patrones de Interpretación.

Un patrón de fotointerpretación está constituido por fotografías individuales o pares estereoscópicos en los cuales se muestran claramente ciertas características de un objeto que se desea identificar y que permiten al observador organizar la información, conduciéndolo a la correcta identificación de objetos desconocidos.

Por ejemplo, una especie de árboles de un determinado bosque puede aparecer en fotografías de cierta escala con una textura o forma muy característica.





4.1.3 Preparación de las fotografías para su fotointerpretación

Las principales etapas para la preparación de fotografías para su interpretación son:

- Marcar puntos principales y líneas de vuelo
- Marcar el área útil para fotointerpretación

Estas áreas limitan la zona de la fotografía dentro de la cual se va a realizar la fotointerpretación:

- a) Si el terreno es plano podrá hacerse la interpretación en fotografías alternas, por ejemplo, en fotos pares o impares. En este caso las áreas estarán constituidas por las perpendiculares a las líneas de vuelo levantadas por los puntos principales transferidos.
- b) Si se trata de terreno montañoso, será necesario emplear todas las fotografías utilizando las mediatrices de las líneas de vuelo como líneas límites. Hacia la parte superior e inferior de las fotos deben trazarse rectas en la parte media del recubrimiento común con las fotografías de fajas adyacentes.
- c) Se orientan las fotografías para ser observadas en estereoscopios de espejo, tratando que las sombras que aparecen en la imagen caigan hacia el observador.
- d) Se procede a interpretar las fotografías.

Los Instrumentos diseñados para observar estereoscópicamente un modelo son:

- Lentes anaglíficas.
- Estereoscopio de lentes (ver Figura 6).
- Estereoscopio de espejo.





Figura 6 Estereoscopio de bolsillo (google.com.mx)

4.1.4 Manejo del Estereoscopio de bolsillo:

El Procedimiento para orientar el estereoscopio de bolsillo es el siguiente:

1. Se colocan las fotografías correctamente orientadas, se aproximan las fotografías hasta que las imágenes de un mismo objeto estén separadas unos 6 cm. En el caso de pares estereoscópicos preparados en libros, las fotos ya están correctamente distanciadas. Se colocan sobre ambas fotografías el estereoscopio de bolsillo, de manera que la parte media del estereoscopio se halle sobre el borde izquierdo de la foto derecha, y que un punto en común en ambas fotos, se hallen en el medio del campo de vista de cada ocular ver Figura 7.



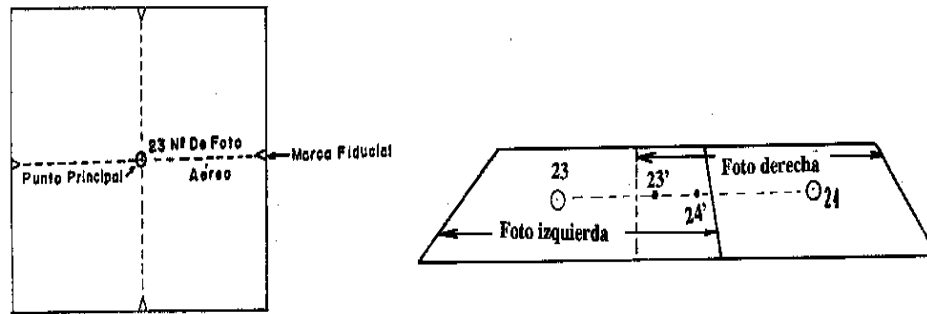


Figura 7. Fotointerpretación (colocación de imágenes a interpretar)

2. Para poder observar la parte de la foto derecha que se halla sobrepuesta por la foto izquierda, doblar hacia arriba el borde derecho de la foto izquierda; cuidando de no dañarla y recorrer el estereoscopio hacia la izquierda de manera que el borde derecho de la foto izquierda, se halle siempre coincidiendo con la parte media del estereoscopio. Luego, desplazar el estereoscopio hacia arriba, abajo, derecha o izquierda según la zona que se desee observar ver Figura 8 y Figura 9.

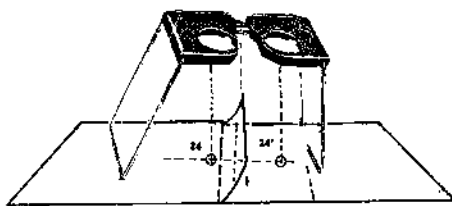


Figura 8 ubicación de puntos a interpretar

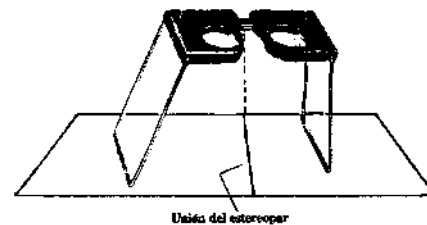


Figura 9 observación de la imagen

3. Se mira a través de ambas lentes a la vez, los ojos enfocados al infinito, tal como se mira un objeto lejano. Normalmente las personas que usan el estereoscopio por primera vez ven al principio dos imágenes distintas que gradualmente se van fusionando hasta crear la impresión de una única tercera imagen entre las dos fotografías vistas en la primera impresión. La tercera imagen es normalmente



estereoscópica. Con un poco de práctica, las dos imágenes se fusionarán en una sola imagen estereoscópica sin ningún esfuerzo. La zona que se observa tridimensionalmente corresponde a una faja de ancho que varía entre 5.50 y 6.50 cm. dependiendo del tipo de relieve.

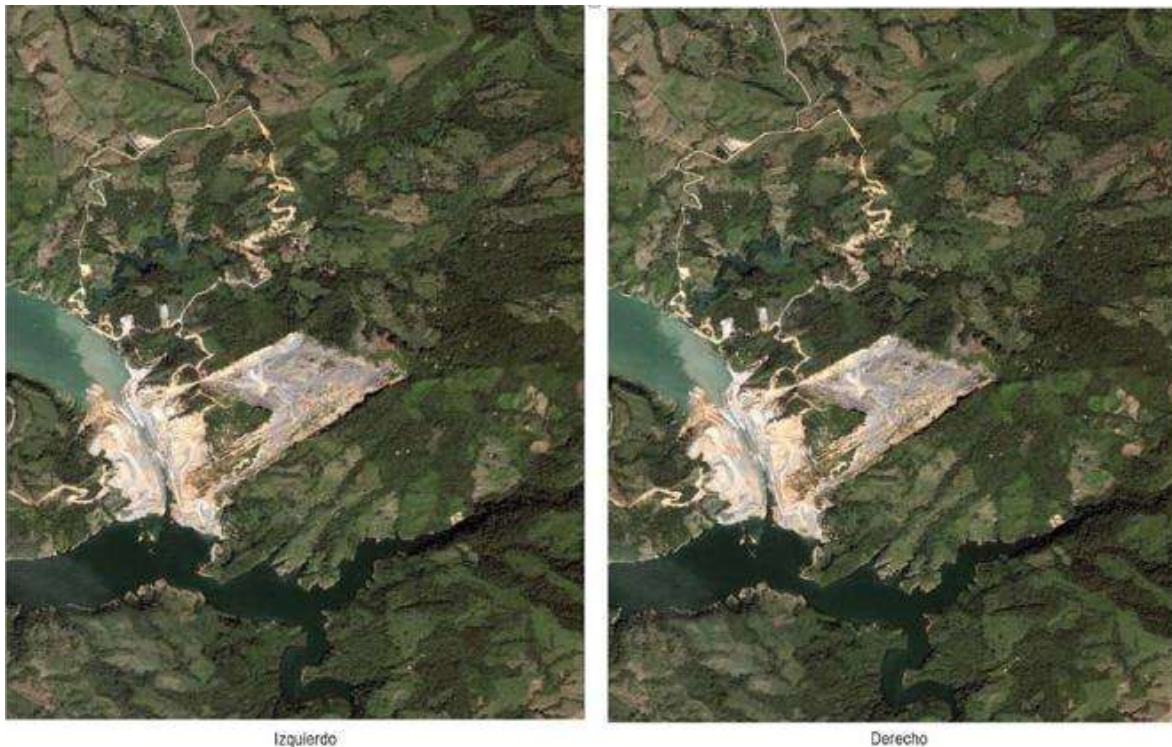


Figura 10 Par estereoscópico del rio Grijalva (Hinojosa A. 2007)

Cualquier persona que observa una fotografía, está haciendo fotointerpretación. Fundamentalmente esto no es un atributo particular a una ciencia, ni de la fotografía aérea o del uso del estereoscopio. Si se observa una simple fotografía de nuestra familia, de nuestros compañeros de universidad o del colegio, o si observan, las fotografías tomadas durante las vacaciones, se está haciendo fotointerpretación.

Se dice que en fotointerpretación solamente se van descubriendo aquellos objetos que realmente se observan en una forma objetiva y con una orientación específica. Por ejemplo, en una misma imagen un geólogo encontrará primero estructuras





geológicas y diferentes clases de roca, en tanto que el ingeniero encontraría formas diferentes.

4.2 Reconocimientos geológicos y geotécnicos de campo

El reconocimiento de campo de la zona de estudio es una de las tareas más importantes en la fase de estudios previos. Debe efectuarse después de la revisión de información y la fotointerpretación, de las que se obtendrá una síntesis geológica y una topografía básica.

Se realizarán los reconocimientos y estudios geológicos y geotécnicos adecuados para obtener un conocimiento exhaustivo del terreno que será afectado directa o indirectamente por la construcción y explotación de la obra subterránea y de sus zonas de acceso y emboquille.

Este reconocimiento en la superficie que sea accesible, se completará con zanjas, calicatas, sondeos cortos, o estaciones geomecánicas, que se extenderán a uno y otro lado de la traza en planta del túnel, hasta una distancia tal que los datos obtenidos puedan servir, en su extrapolación hacia el interior del terreno, a un conocimiento del mismo a la cota por donde ira la traza del túnel.

Si el terreno involucrado es un medio rocoso, se prestará especial atención a la eventual presencia de fallas o discontinuidades importantes, de ámbito regional o local, que pudieran ser cortadas por la perforación del túnel.

4.2.1 Datos geológicos

La palabra geología deriva del griego “geo” que significa tierra, y “logos” tratado o conocimiento, por lo tanto se define como la ciencia de la tierra y tiene por objeto entender la evolución del planeta.

Los estudios geológicos deben proporcionar en cada una de las fases del proyecto, información suficiente sobre las características geológicas del terreno, estos





estudios tienen una gran importancia en la fase de proyecto, las características geológicas se estudian y evalúan junto a las características geotécnicas.

En los estudios previos se debe aportar la información geológica de la zona (morfología, estratigrafía y litología, tectónica, hidrología y drenaje) en fotoplanos, en los que se delimitan las zonas y se adjunta la información geológica sobre fotografías aéreas; cortes geológicos que den una idea general; y mapas litológicos, en los que se hayan delimitado las zonas con problemas. Además toda esta información se recogerá en una memoria que incluye tanto la descripción geológica general y de los grupos litológicos presentes en la zona, como la localización y características de estos.

La información geológica debe tener el suficiente detalle para permitir la completa definición del mismo, centrando los estudios anteriores en el trazado elegido, La información debe recogerse en una memoria y en planos, mapas y cortes de detalle. La memoria debe incluir el reconocimiento geológico detallado, basado en los estudios anteriores y en los trabajos complementarios de campo y laboratorio necesarios, así como un estudio hidrológico de detalle. En esta fase las escalas deben tener un buen grado de detalle, por lo que se usan escalas de 1/1.000 a 1/2.000.

El reconocimiento geológico se debe hacer tras el estudio de toda la información previa disponible y de una visita general de la zona que permita identificar el estado y el comportamiento de obras lineales existentes y examinar los cortes que existan en el terreno como zanjas, trincheras, excavaciones, pozos, etc.

El estudio estereoscópico de las fotografías aéreas permite la localización de las distintas formaciones geológicas y, muchas veces, identificar los tipos de suelos presentes (ver capítulo 3.1). Esta interpretación geológica de las fotografías aéreas (fotogeología) es muy útil en los estudios previos, ya que se consigue una visión general de la zona.





4.2.1 Inestabilidades del terreno natural

Las condiciones geológicas del terreno, estas características son de tipo antecedente y se refieren a las condiciones del macizo de roca o suelo, dividiéndose en:

- Litológicas: Consiste en la presencia de formaciones suaves o de baja resistencia, material alterado, cizallado o fracturado.
- Estratigráficas: Consta de la presencia de capas masivas descansando sobre capas poco competentes, presencia de capas permeables y contraste entre la rigidez de los materiales.
- Estructurales: Incluye echados de discontinuidades muy inclinados, roca fuertemente fracturada o cizallada debido a fallamiento, plegamiento, enfriamiento y esfuerzos por deformación interna causada por erosión rápida.
- Topográficas: Involucra acantilados o fuertes pendientes causados por erosión y/o fallamiento.

También están los procesos de tipo geomorfológico estos procesos pueden ser de tipo antecedente y también detonadores. Son los procesos que actúan en el modelado de la corteza terrestre y a través del tiempo producen cambios en el estado de equilibrio de las laderas.

Conociendo los factores geomorfológicos y climáticos, es posible prever la geometría y propiedades físicas de interés en los estudios previos, algunos factores son:

- Depósitos aluviales, consiste en materiales transportados y depositados por el agua.
- Depósitos lacustres, son sedimentos de grano fino predominando limos y arcillas, sobre todo en zonas pantanosas.





- Depósitos litorales, es material por acción mixta de ambientes continentales y marinos, en este caso el oleaje y las mareas, predomina las arenas finas y los limos.
- Depósitos de climas áridos y desérticos, este tiene una serie de implicaciones medioambientales, como la acumulación de sales y alta movilidad de sedimentos con el viento, muy bajo contenido de humedad y materia orgánica y expansividad de arcillas.
- Depósitos de clima tropical, si las condiciones de drenaje son deficientes pueden formarse los denominados suelos negros, si el drenaje es alto se forman las arcillas rojas. En los suelos tropicales tienden a formar agregaciones de partículas de arcilla de tamaño limo y arena, dando resultados en los análisis granulométricos y de plasticidad que no corresponden a su naturaleza arcillosa.
- Depósitos de origen volcánico, son resultante de las emisiones volcánicas dando acumulaciones de piroclásticos y son minerales altamente inestables frente a la meteorización transformándose en productos arcillosos.

Las principales características que se deben tomar en un estudio son:

- Indicios o señales de deslizamientos o desprendimientos.
- Áreas de erosión intensa.
- Zonas afectadas por subsidencias, hundimientos y cavidades.

Los derrumbes, deslizamientos, flujos y movimientos complejos ocurren día con día, el impacto que este tipo de peligros provoca, es de mayor magnitud en países de escasos recursos, debido a su alto grado de vulnerabilidad.

El fenómeno de deslizamientos ha ocasionado en diversas regiones del mundo grandes desastres, por lo que la detección previa de las áreas susceptibles a este





tipo de eventos permite tomar las medidas necesarias para evitar daños a la infraestructura de las poblaciones, así como la pérdida de vidas humanas.

La investigación geológica y geotécnica de esta área resulta básica ya que sirve de apoyo para estudios específicos como los de mecánica de suelos, mecánica de rocas y los hidrológicos.

4.3 Estudio geotécnico

Un estudio geotécnico es el conjunto de actividades que permiten obtener la información geológica y geotécnica del terreno, necesaria para la redacción de un proyecto de construcción.

Los estudios geotécnicos tienen entre otros los siguientes objetivos:

- Determinar las limitaciones o problemas geotécnicos del sitio o proyecto.
- Determinar la magnitud de las amenazas y riesgos geotécnicos.
- Determinar los parámetros geotécnicos para el diseño del proyecto.
- Diseñar las obras de control geotécnico para el manejo de las limitaciones amenazas y riesgos. Es similar a la medicina pero en este caso el paciente es el suelo.

4.3.1 Descripción Geotécnica de Suelos

La geotecnia es la rama de la geología que trata de la aplicación de los principios geológicos en la investigación de los materiales naturales como las rocas, que constituyen la corteza terrestre implicados en el diseño, la construcción y la explotación de proyectos de ingeniería civil, como autopistas, vías férreas, puentes, presas, oleoductos, acueductos, unidades habitacionales, sitios de confinamiento y edificios en general.

El término 'suelo' ha sido definido de diferentes maneras, ya sea una definición de proveniente de un geólogo, del agrónomo o del ingeniero civil.





El geólogo define al suelo como el material resultante de la descomposición y desintegración de la roca por el ataque de agentes atmosféricos (N.J. Chiossi, 1975).

Algunos ingenieros civiles (Rico y Del Castillo, 2005) definen al suelo como el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes.

Jumikis 2004, lo define como sedimentos no consolidados y depósitos de partículas sólidas derivadas de la desintegración de las rocas.

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos y su erosión se divide en 3 facetas:

- -Físicas, debida a cambios térmicos.
- -Química, originada por fenómenos de hidratación.
- -Biológica, producida por actividad bacteriana.

De los agentes químicos podemos mencionar como principales la oxidación, la carbonatación y la hidratación.

La oxidación es la reacción química que puede ocurrir en las rocas al recibir el agua de lluvia, ya que el oxígeno del aire, en presencia de humedad, reacciona químicamente produciéndose el fenómeno de oxidación, principalmente si las rocas contienen hierro, ¿cómo se puede observar?, por el color pardo rojizo.

La carbonatación es el ataque que el ácido carbónico (anhídrido carbónico y el agua efectúa sobre las rocas que contienen fierro, calcio, magnesio, sodio o potasio. Como por ejemplo de este ataque se puede mencionar la carbonatación de la ortoclasa (perteneciente a las rocas ígneas extrusivas y generalmente de color rosado). Las calizas son muy atacables por el ácido carbónico.

La hidratación es la acción y efecto de combinar un cuerpo con agua para formar compuestos químicos que contienen agua en combinación.





Los agentes de intemperismo antes mencionados se conocen más en el medio ingenieril como meteorización y alteración que dan origen a los suelos inorgánicos, la meteorización, se refiere únicamente a los cambios superficiales que sufren las rocas, debido a la acción de los agentes atmosféricos, y la alteración designa los cambios internos de las rocas que se presentan en forma de hidratación y motivan que se formen nuevos minerales dentro de la masa pétreo, conservando su individualidad y su identificación geológica.

4.3.1.1 Clasificación de suelos y roca

De acuerdo con las norma M-MMP-1-02/03. El procedimiento para clasificar los materiales que pueden ser fragmentos de roca o suelos, mediante pruebas índice, que permiten estimar algunas de las propiedades físicas y mecánicas del material y, con base a estas, determinar su tipo de acuerdo con un sistema de clasificación de fragmentos de roca y suelos previamente definido.

Los fragmentos de roca son todos aquellos cuyo tamaño está comprendido entre 7,5 cm (3") y 200 cm. Según su tamaño se clasifican como se señala en la

Tabla 2

Los fragmentos de roca se identifican por su tamaño, forma, textura superficial y grado de alteración, utilizando para ello las características que se indican en la Tabla 3.



*Tabla 2 Clasificación de los fragmentos de roca*

Tipo	Subtipos	Identificación	Símbolo de grupo
Fragmentos de roca	Grandes (mayores de 75 cm y menores de 2 m)	Fragmentos grandes, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo.	Fg
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos medianos, predominando los grandes, con menos del 10% de fragmentos chicos o de suelo.	Fgm
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos chicos, predominando los grandes, con menos del 10% de fragmentos medianos o de suelo.	Fgc
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos medianos y chicos, predominando los grandes sobre los medianos y éstos sobre los chicos, con menos del 10% de suelo.	Fgmc
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos chicos y medianos, predominando los grandes sobre los chicos y éstos sobre los medianos, con menos del 10% de suelo.	Fgcm
	Medianos (mayores de 20 cm y menores de 75 cm)	Fragmentos medianos, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo.	Fm
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos grandes, predominando los medianos sobre los grandes, con menos del 10% de fragmentos chicos o de suelo.	Fmg
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos chicos, predominando los medianos sobre los chicos, con menos del 10% de fragmentos grandes o de suelo.	Fmc
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos grandes y chicos, predominando los medianos sobre los grandes y éstos sobre los chicos, con menos del 10% de suelo.	Fmgc
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos chicos y grandes, predominando los medianos sobre los chicos y éstos sobre los grandes, con menos del 10% de suelo.	Fmcg
	Chicos (mayores de 7,5 cm y menores de 20 cm)	Fragmentos chicos, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo.	Fc
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos grandes, predominando los chicos, con menos del 10% de fragmentos medianos o de suelo.	Fcg
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos medianos, predominando los chicos, con menos del 10% de fragmentos grandes o de suelo.	Fcm
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos grandes y medianos, predominando los chicos sobre los grandes y éstos sobre los medianos, con menos del 10% de suelo.	Fcgm
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos medianos y grandes, predominando los chicos sobre los medianos y éstos sobre los grandes, con menos del 10% de suelo.	Fcmg

La clasificación de los fragmentos de roca y de los suelos en campo se realiza en forma visual, por lo que se requiere experiencia para clasificar los diferentes materiales. La experiencia se obtiene mediante la enseñanza de quien ya la tiene y comparando las clasificaciones hechas en campo con las obtenidas en el laboratorio. Para la clasificación de campo se utiliza el formato que se muestra en la Tabla 4.





Tabla 3 Características de los fragmentos de roca

Forma	Redondeada Subredondeada Angulosa Lajeada Acicular [1]
Textura [2]	Lisa Rugosa Muy rugosa
Grado de alteración	Sanos Alterados Muy alterados

[1] En forma de aguja.

[2] Cuando los fragmentos sean francamente porosos se hará notar también esta característica.

Tabla 4 Tamaño de fragmentos de roca

DESIGNACION	GRUPO DE TAMAÑOS (MAYOR DIMENSION DE LA PARTICULA) <u>CM</u>
CHICO	DE 7.5 A 20
MEDIANO	DE 20 A 75
GRANDE	DE 75 A 200

Los suelos son materiales con partículas de tamaño menor de 7,5 cm (3"). Se clasifican como se indica en la Tabla 5 y se explica a continuación, con base en su composición granulométrica determinada, y en sus características de plasticidad, representada por los límites de consistencia determinados.





Los suelos se clasifican como suelos gruesos cuando más del 50% de sus partículas son de tamaño mayor que 0,075.mm (malla N°200) y como suelos finos cuando el 50% de sus partículas o más, son de tamaño menor.

a) Grava o arena bien graduada (GW o SW)

Si el material contiene hasta 5% de finos, cuando se trate de una grava cuyo coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor de 4 y su coeficiente de curvatura (C_c) esté entre 1 y 3, se clasifica como grava bien graduada y se identifica con el símbolo GW. Cuando se trate de una arena cuyo coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor de 6 y su coeficiente de curvatura (C_c) esté entre 1 y 3, se clasifica como arena bien graduada y se identifica con el símbolo SW.

b) Grava o arena mal graduada (GP o SP)

Si el material contiene hasta 5% de finos y sus coeficientes de uniformidad y curvatura (C_u y C_c , respectivamente), no cumplen con lo indicado en el Punto anterior, se clasifica como grava mal graduada o arena mal graduada, según corresponda y se identifica con los símbolos GP o SP, respectivamente.

c) Grava o arena limosa (GM o SM)

Si el material contiene más de 12% de finos y estos son limo de acuerdo con lo indicado, se clasifica como grava limosa o arena limosa, según corresponda y se identifica con los símbolos GM o SM, respectivamente.

d) Grava o arena arcillosa (GC o SC)

Si el material contiene más de 12% de finos y estos son arcilla de acuerdo con lo indicado, se clasifica como grava arcillosa o arena arcillosa, según corresponda y se identifica con los símbolos GC o SC, respectivamente.

e) Grava o arena bien graduada limosa (GW-GM o SW-SM)





Si el material contiene entre 5 y 12% de finos y estos son limo de acuerdo con lo indicado, cuando se trate de una grava bien graduada, se clasifica como grava bien graduada limosa y se identifica con el símbolo GW-GM. Cuando se trate de una arena bien graduada, se clasifica como arena bien graduada limosa y se identifica con el símbolo SW-SM.

f) Grava o arena mal graduada limosa (GP-GM o SP-SM)

Si la grava o la arena son mal graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y estos son limo de acuerdo con lo indicado, se clasifican como grava mal graduada limosa o arena mal graduada limosa, según corresponda y se identifican con los símbolos GP-GM o SP-SM, respectivamente.

g) Grava o arena bien graduada arcillosa (GW-GC o SW-SC)

Si la grava o la arena son bien graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y estos son arcilla de acuerdo con lo indicado, se clasifican como grava bien graduada arcillosa o arena bien graduada arcillosa, según corresponda y se identifican con los símbolos GW-GC o SW-SC, respectivamente.

h) Grava o arena mal graduada arcillosa (GP-GC o SP-SC)

Si la grava o la arena son mal graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y estos son arcilla de acuerdo con lo indicado, se clasifican como grava mal graduada arcillosa o arena mal graduada arcillosa, según corresponda y se identifican con los símbolos GP-GC o SP-SC, respectivamente.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Donde D10, D30 Y D60 son los tamaño de las partículas para el cual el 10, 30 y 60% en masa del material es menor que esos tamaños, respectivamente, determinados gráficamente de la curva granulométrica.





Tabla 5 Clasificación de suelos con base en el SUCS

Tipo	Sub-Tipos		Identificación			Símbolo de Grupo	
Suelos (partículas menores de 7,5 cm)	SUELOS GRUESOS Más de la mitad del material se retiene en la malla N°200 (0,075 mm)	GRAVA Más de la mitad de la fracción gruesa se retiene en la malla N°4	GRAVA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	Grava bien graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (C_u) mayor de 4 y un coeficiente de curvatura	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GW	
				Grava mal graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para GW.	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GP	
			GRAVA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Grava limosa; mezcla de grava, arena y limo.	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH (véanse abajo los grupo ML y MH)	GM	
				Grava arcillosa; mezclas de grava, arena y arcilla	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH (véanse abajo los grupo CL y CH)	GC	
		ARENA N°4 Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla N°4	ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	Arena bien graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (C_u) mayor de 6 y un coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 y 3 ^[1]	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SW	
				Arena mal graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para SW.	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SP	
			ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Arena limosa; mezcla de arena, grava y limo.	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH (véanse abajo los grupo ML y MH)	SM	
				Arena arcillosa; mezclas de arena, grava y arcilla	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH (véanse abajo los grupo CL y CH)	SC	
	SUELOS FINOS malla N°200 (0.075 mm)	LIMO Y ARCILLA	Menor de 50%	Limo de baja compresibilidad; mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava; polvo de roca. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.			ML
				Arcilla de baja compresibilidad; mezcla de arcilla de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona II de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.			CL
				Limo orgánico de baja compresibilidad; mezcla de limo orgánico de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.			OL
			Mayor de 50%	Limo de alta compresibilidad; mezcla de limo de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.			MH
				Arcilla de alta compresibilidad; mezcla de arcilla de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona IV de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.			CH
				Limo orgánico de alta compresibilidad; mezcla de limo orgánico de alta compresibilidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la Carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.			OH
	ALTAMENTE ORGÁNICOS		Turba, fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.			Pt	





[1] Los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c), que se utilizan para determinar la graduación de los suelos GW , GP , SW y SP están dados por las siguientes expresiones:

Los suelos finos se clasifican según sus características de plasticidad en:

Limo (M), El suelo fino se clasifica como limo cuando su límite líquido (WL) y su índice plástico (I_p), se definen un punto ubicado en las zonas I o III de la Carta de plasticidad que se muestra en la Figura 11 y se identifica con el símbolo M. Si dicho punto se aloja en la zona I, el material se clasifica como limo de baja compresibilidad y se identifica con el símbolo ML; si se ubica en la zona III, se clasifica como limo de alta compresibilidad y se identifica con el símbolo MH.

Si el material contiene una cantidad apreciable de materia orgánica y el punto definido por el límite líquido y su índice plástico se ubica cercano y por debajo de la línea A de la Carta de plasticidad, se clasifica como OL u OH dependiendo de su límite líquido.

Arcilla ©, El suelo fino se clasifica como arcilla cuando su límite líquido (WL) y su índice plástico (I_p), cuando el punto ubicado en las zonas II o IV de la Carta de plasticidad que se muestra en la Figura se identifica con el símbolo C si dicho punto se alojan en la zona II, el material se clasifica como arcilla de baja compresibilidad y se identifica con el símbolo CL, si se ubica en la zona IV, se clasifica como arcilla de alta compresibilidad y se identifica con el símbolo CH.



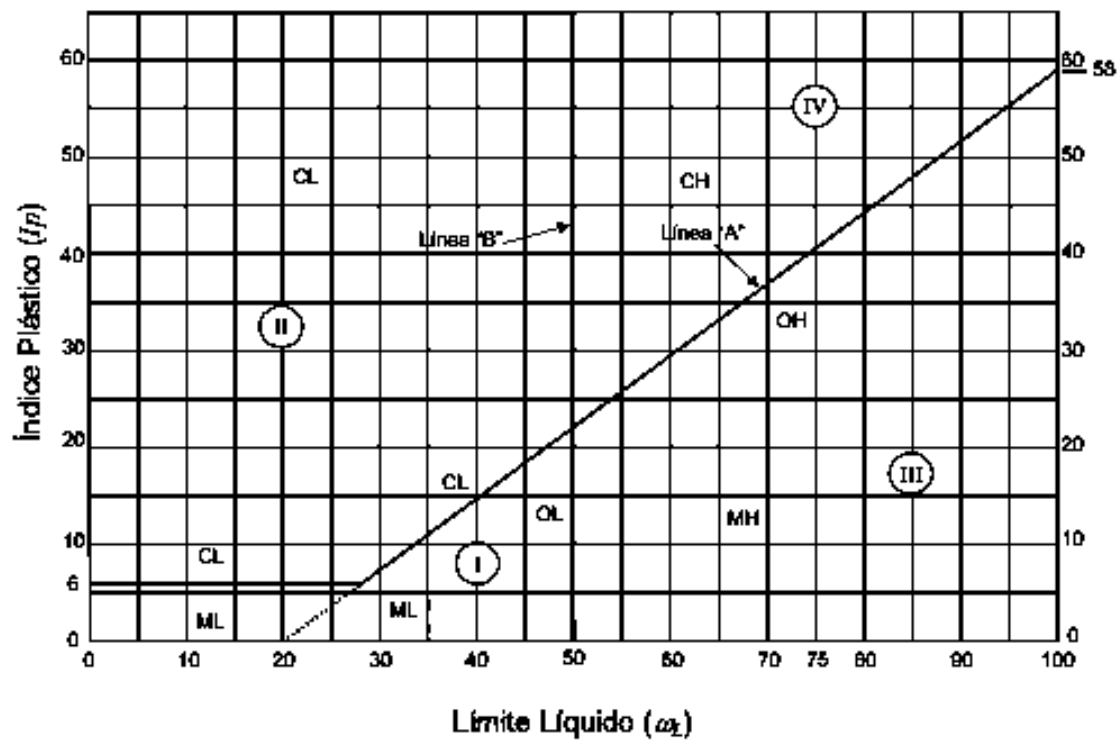


Figura 11 Carta de plasticidad





Tabla 6 Clasificación aproximada de suelos en el campo

Tipo de suelo				Símbolo de grupo [1]	Denominación común
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS [2] Más de la mitad del material es de tamaño mayor que el mínimo que se puede observar a simple vista	G R A V A Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor de 5 mm (malla N°4) [3]	Menos del 5% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Amplio rango en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.	GW	Grava bien graduada, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos.
			Predominio de un tamaño o un rango de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios.	GP	Grava mal graduada, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos.
		Más del 12% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Fracción fina no plástica (para identificación véase grupo ML, abajo)	GM	Grava limosa, mezclas de grava, arena y limo, mal graduadas.
			Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL, abajo)	GC	Grava arcillosa, mezclas de grava, arena y arcilla, mal graduadas.
	A R E N A Más de la mitad de la fracción gruesa es	Menos del 5% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Amplio rango de los tamaños de partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.	SW	Arena bien graduada, arena con grava y poco o nada de finos.
			Predominio de un tamaño o un rango de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios.	SP	Arena mal graduada, arena con grava y poco o nada de finos.
		Más del 12% respecto al total son partículas del tamaño mínimo que se puede observar a simple vista	Fracción fina no plástica (para identificación véase grupo ML, abajo)	SM	Arena limosa, mezclas de arena, grava y limo.
			Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL, abajo)	SC	Arena arcillosa, mezclas de arena, grava y arcilla.
SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material son partículas menores que el tamaño	Identificación de la fracción que pasa la malla N°40 (0.425 mm)				
	L I M O Y A R C I L L A	Dilatancia	Tenacidad	Resistencia en estado seco	
		Rápida	Nula	Nula	ML
		Lenta	Media	Nula	MH
		Lenta a nula	Media	Media	CL
		Nula	Alta	Alta	CH
		Rápida	Media	Media	OL
		Rápida a lenta	Media	Media	OH
Suelos altamente orgánicos	Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.			Pt	Turba.





[1] Tratándose de suelos con partículas gruesas, en que el por ciento en masa que pasa la malla N°200 queda comprendido entre 5 y 12%, son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles, como por ejemplo GW-GC que corresponde a una mezcla de grava y arena bien graduada con arcillosa, o SW-SM que corresponde a una arena bien graduada limosa.

[2] Las cantidades y porcentajes que se manejan son en volumen

[3] Puede considerarse 5 mm como equivalente a la abertura de la malla N°4

[4] Se estima que las partículas más pequeñas apreciables a simple vista corresponden al tamaño de 0,075 mm (malla N°200).

4.3.1.1.1 Plasticidad

Se utilizan las propiedades plásticas para clasificar los suelos finos (Limos y arcillas). Atterberg define tres límites: el de retracción o consistencia que separa el estado de solido seco y el semisólido, el limite plástico, (W_p), que separa el estado semisólido del plástico y el limite líquido, (W_L), que separan el estado plástico del semilíquido; estos límites son los más usados en práctica y son los que pasan por la malla n° 40 A.S.T.M (0,1 mm).

De acuerdo con la norma M-MMP-1-07/07. El límite plástico o el contenido de agua para el cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm; éste se considera como la frontera entre los estados plástico y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

4.3.1.1.1.1 Límite líquido

La plasticidad cuyos resultados se utilizan para identificar y clasificar el suelo, el límite líquido, es decir, el contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 2,45 kPa (25 gr/cm²); éste se considera como la frontera entre los estados semilíquido y plástico.



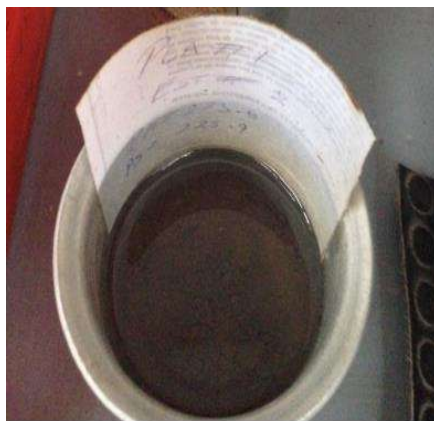


Figura 12 Suelo saturado 24hrs.

Se emplean 250 gr de material previamente cribados por la malla Núm. 0.425 (Nº40). Como se muestra en la Figura 12 y se satura de agua durante 24 horas. Se toma una muestra de 150gr, aproximadamente del material ya saturado una vez que pasaron las 24 horas, en una cápsula de porcelana y se procede a homogenizarla con la espátula. Hecho lo anterior se coloca en la copa de Casagrande, previamente calibrada y de tal forma que quede como se muestra en la Figura 13. Se coloca material suficiente y se extiende con la espátula, dejando un espesor de 8 a 10mm en la parte central, después mediante una pasada firme con el ranurador se hace una abertura en la parte central del material ver Figura 13, inmediatamente se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa a razón de golpes por segundo, se registra el número de golpes una vez que los bordes inferiores de la ranura entren en contacto.





Figura 13 Copa de Casagrande con suelo homogenizado

Se obtiene el valor del límite líquido (WL), determinando en la curva de fluidez el contenido de agua correspondiente a 25 golpes.

$$LL = W_N \left(N / 25 \right)^{0.12}$$

Donde:

LL= Es el límite líquido del suelo, expresado como contenido de agua, en porciento.

WN= Es el contenido de agua de la muestra respectiva, a la cual le fue aplicado un número N de golpes en la prueba, en porciento.

N= Es el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 milímetros.

4.3.1.1.2 Límite Plástico

Se toma una muestra de material preparado de acuerdo con la prueba de LL, a la cual se le da la forma de una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, que deberá moldearse con los dedos para que pierda la humedad y se forme un cilindro ver Figura 14. Se hace girar el cilindro con los dedos sobre la placa de vidrio para reducir su tamaño hasta los 3mm en toda su longitud, si al alcanzar los 3mm el cilindro no se rompe en secciones, significa que su contenido de agua es superior al límite plástico (wp) y se procede a repetir todo el procedimiento.



Figura 14 Limite Plástico y Contracción Lineal

4.3.1.1.3 Contracción lineal

Para esta determinación se utilizará una muestra preparada como la utilizada para determinar el límite líquido, o bien se aprovechará el material húmedo que haya sobrado de la determinación del límite líquido.



Figura 15 Material sobrante del límite líquido

$$CL = \frac{Li - Lf}{Li} 100$$

Donde:

CL= Es la contracción lineal aproximada al décimo más cercano, en %.

Li= Es la longitud inicial de la barra de suelo húmedo, que corresponde a la longitud interior del molde, en cm.

Lf= Es la longitud media de la barra de suelo seco, en cm.



4.3.1.1.2 Contracción volumétrica

Es la frontera entre los estados semi-sólido y sólido, quedando definido como el contenido de agua mínimo para el cual el suelo no retrae su volumen aun cuando pierda o se evapore agua.

La humedad del suelo en el momento en que fue moldeado de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando al 0.1 %.

$$W = \frac{W_h - W_s}{W_s} * 100$$

Donde:

W = humedad del suelo en el momento que fue moldeado, %.

W_h = Peso del suelo húmedo, gr.

W_s = Peso del suelo seco, gr.

Límite de contracción, del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando al 1 %.

$$W_c = W - \left(\frac{(V_h - V_s)Y_w}{W_s} \right) 100$$

Donde:

W_c = límite de contracción, %.

W = Humedad del suelo en el momento que fue moldeado, %.

V_h = Volumen de la pastilla de suelo húmedo, cm³ (ml).

V_s = Volumen de la pastilla de suelo seco, cm³ (ml)

Y_w = Densidad del agua, gr/cm³ (gr/ml)

W_s = Peso del suelo seco, gr.

4.3.1.2 Obtención de muestras de suelos

De acuerdo con la norma M-MMP-1-01-/03, para determinar las propiedades de un suelo en laboratorio es preciso contar con muestras representativas de dicho suelo.





Un muestreo adecuado y representativo es de primordial importancia. Las muestras pueden ser de dos tipos: alteradas o inalteradas

4.3.1.2.1 Muestras inalteradas

Son aquellas en las que se conserva la estructura y el contenido de agua natural del suelo en el lugar donde se toma la muestra, por lo que su obtención, envase y transporte, requieren cuidados especiales a fin de no alterarlas. Son generalmente cúbicas, de aproximadamente 40 cm por lado, se obtienen de suelos finos o arenosos que puedan labrarse sin que se disgreguen ver Figura 16.



Figura 16 PCA o Muestra a cielo abierto

4.3.1.2.2 Muestras alteradas

Son aquellas que están constituidas por el material disgregado o fragmentado, en las que no se toman precauciones especiales para conservar las características de estructura y humedad; no obstante, en algunas ocasiones conviene conocer el contenido de agua original del suelo, para lo cual las muestras se envasan y transportan en forma adecuada.

El equipo y los materiales que se requieren para obtener muestras inalteradas consta de:





- Herramientas tales como picos, palas, barretas, cuchillos, espátulas, cucharas de albañil.
- Parafina y brea.
- Manta de cielo.
- Estufa o lámpara de gas.
- Recipiente metálico para calentar y mezclar la parafina con la brea (una parte de brea y cuatro de parafina).
- Brocha.
- Cajones de madera para empacar las muestras.
- Aserrín, viruta o paja.
- Cinta métrica de 20 m de longitud.
- Flexómetro de 5 m de longitud.

Según su propósito, el tipo, tamaño y número de las muestras, serán los establecidos en la Tabla 7.





Tabla 7 número y tamaño de las muestras

Propósito del muestreo	Tipo y numero	Tamaño de las muestras Kg
Determinar la estratigrafía y propiedades del subsuelo a lo largo del trazo de una obra o seleccionar los préstamos y bancos para terracería	Una muestra representativa de cada estrato en cada pozo a cielo abierto o frente abierto de material	4
	Una muestra integral por cada pozo a cielo abierto y por cada 150m ³ de material aprovechable	50
	Dos muestras integrales de cada frente abierto de material	20
	Una muestra cubica inalterada por cada estrato de suelo fino típico, para determinar sus propiedades mecánicas. El numero será definido por el responsable de estudio	[3]
Estudio de almacenamiento	Una muestra integral por cada 1000m ³ de material homogéneo [2]	20
Control de calidad	Una muestra integral por cada 300m ³ de material que se utilice para terraplén o subyacente y por cada 200m ³ para subrasante	10
	Una muestra integral por cada 1000m ³ de material para terraplén, por cada 800m ³ para subyacente y 500m ³ para subrasante	50





[2] El material se considera homogéneo cuando visiblemente sus características de color y tamaño no presenten variaciones significativas.

[3] De acuerdo con lo indicado en la norma M-MMP-1-01-/03.

4.3.1.3 Principales propiedades mecánicas.

a) Consolidación

Cuando se somete un suelo a un incremento de esfuerzo o carga, ocurre un reajuste de la estructura de suelo que podría considerarse primeramente como una deformación plástica correspondiente a una reducción en la relación de vacíos.

Para ello se ejecuta el ensayo de consolidación. Su finalidad es determinar la velocidad y grado de asentamiento que experimenta una muestra de suelo arcilloso saturado al someterla a una serie de incrementos de presión o carga.

El fenómeno de consolidación, se origina debido a que si un suelo parcial o totalmente saturado se carga, en un comienzo el agua existente en los poros absorberá parte de dicha carga puesto que esta es incompresible. Pero con el transcurso del tiempo, escurrirá y el suelo ira absorbiendo esa carga paulatinamente. Este proceso de transferencia de carga, origina cambios de volumen en la masa de suelo, iguales al volumen de agua drenada (Figura 17).



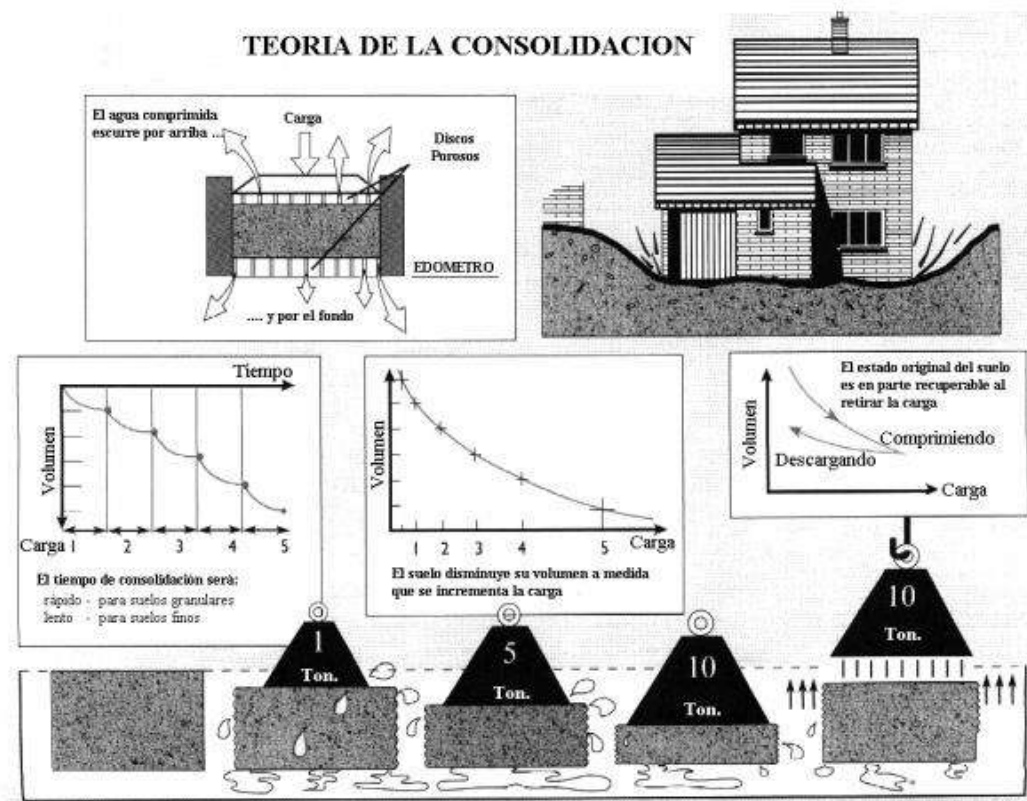


Figura 17 Esquema de consolidación en terreno (ELE Internacional Ltda., 1993)

En suelos granulares, la reducción del volumen de vacíos se produce casi instantáneamente cuando se aplica la carga, pero en suelos arcillosos se lleva más tiempo, dependiendo de factores como el grado de saturación, el coeficiente de permeabilidad, la longitud de la trayectoria que recorrerá el fluido expulsado, las condiciones de drenaje y la magnitud de la sobrecarga.

El método de ensayo de acuerdo a la norma española UNE-103-405-94, nos habla de un edómetro provisto de un lector de carga y un micrómetro de precisión como lector de deformación de 0,01mm ver Figura 18.

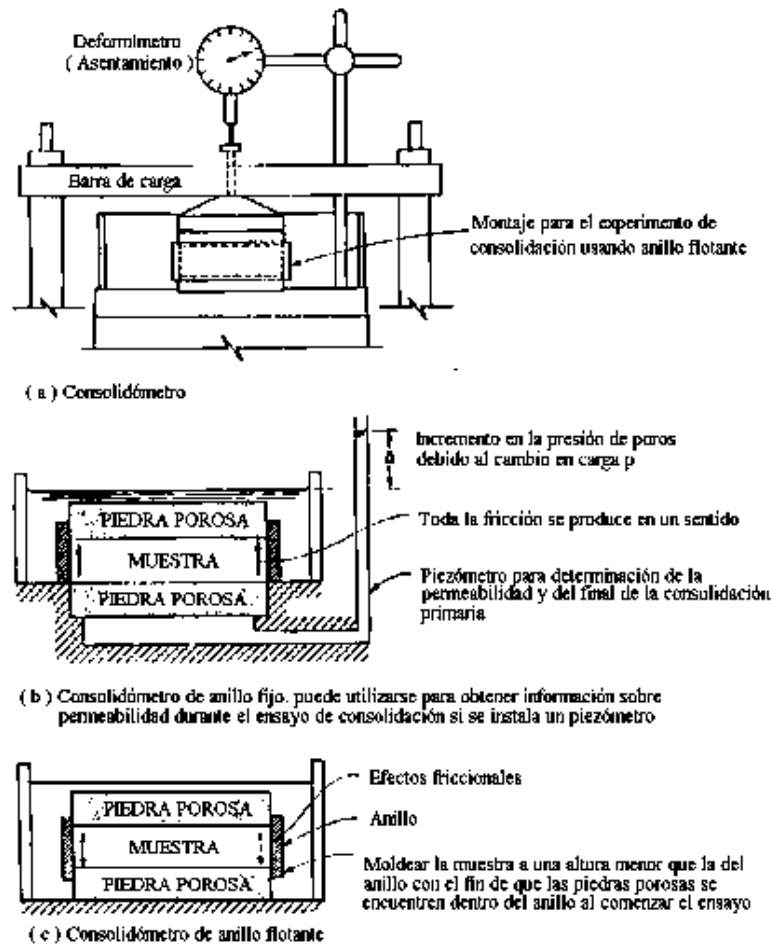


Figura 18 Tipos de Edometro (Bowles J. 1982)

El proceso de carga se inicia mediante la aplicación a la probeta diferentes presiones con una secuencia escalonada, una vez determinado el peso del anillo se ajusta el consolidómetro al aparato de carga y se aplica una carga de inicio de 0.05 kgs/cm^2 para suelos blandos y de 0.10 kgs/cm^2 para suelos firmes. Sin retirar la carga se lleva a cero el dial de deformación.

La compresión de la muestra consiste en aplicar un incremento escalonado de cargas en kgs/cm^2 : 0.50-1.00-2.00-4.00-8.00. En cada una de ellas se registra la lectura del dial de deformación, en los siguientes tiempos: 0, 6, 15, 30 segundos; 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos y 1, 2, 4, 8, 16, 24 horas (Figura 19).

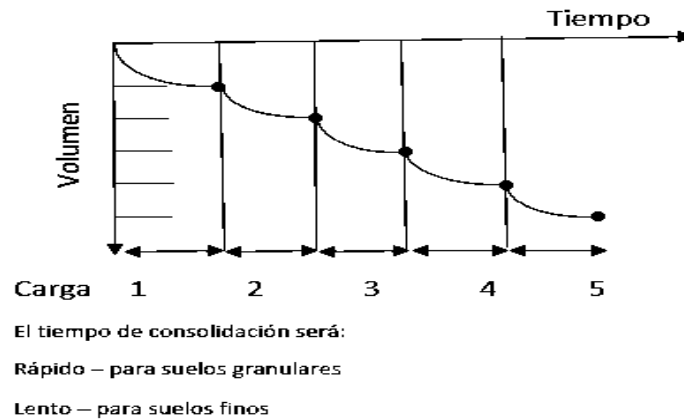


Figura 19 Ejemplo de consolidación para diferentes cargas a lo largo del tiempo

Finalmente, se descarga la muestra ensayada, se retira el consolidometro y del anillo de bronce, se extrae el total de la muestra, se pesa (w_2) y se coloca a horno durante 24 horas para determinar el peso seco (w_3).

Estas lecturas de tiempo-asentamiento solo son requeridas para muestras saturadas. Las lecturas continuaran hasta que se haga patente la pendiente de la compresión lineal secundaria característica del asentamiento, contra el logaritmo del tiempo. Para suelos con baja consolidación primaria, las cargas deberán mantenerse por lo menos durante 24 horas, cuando se requiera evaluarse características de consolidación secundaria, deberá aplicarse durante un periodo más largo.

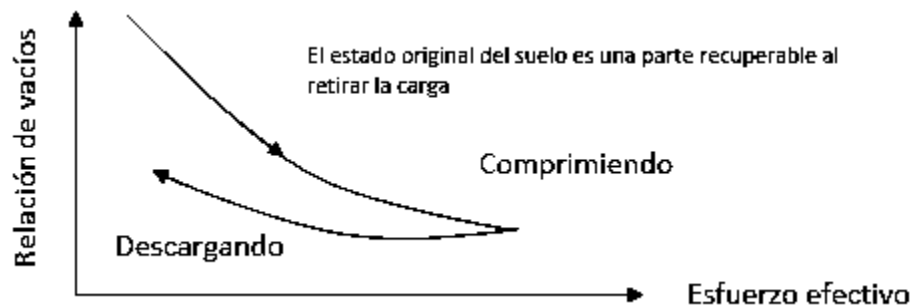


Figura 20 Consolidación

Cuando no se requiera datos de tiempo contra asentamiento, deberá mantenerse la carga sobre la muestra durante el mismo tiempo. Cuando se requieran, se hacen lecturas cerca del final del periodo del incremento de carga para permitir cualquier extrapolación de la curva de tiempo vs asentamiento.

Cuando se deseen conocer las características del rebote o de la descarga, se deberá hacer reducciones de la carga en orden inverso y se registran los datos de la misma forma de intervalo de tiempo como se mencionó anteriormente.

Como alternativa, podrá emplearse un programa de carga, descarga y recarga, que reproduzca los cambios de esfuerzos o que obtengan una mejor definición de alguna parte de la curva de carga-asentamiento para ayudar a una mejor interpretación del suelo en el terreno. En la siguiente gráfica de esfuerzo-tiempo con la ayuda de un programa automatizado se aplicó una carga de 0.9 kgs/cm^2 con lecturas en intervalos de 300 segundos, las cuales se registraban automáticamente durante 24 horas, dando como resultado la siguiente Figura 21.

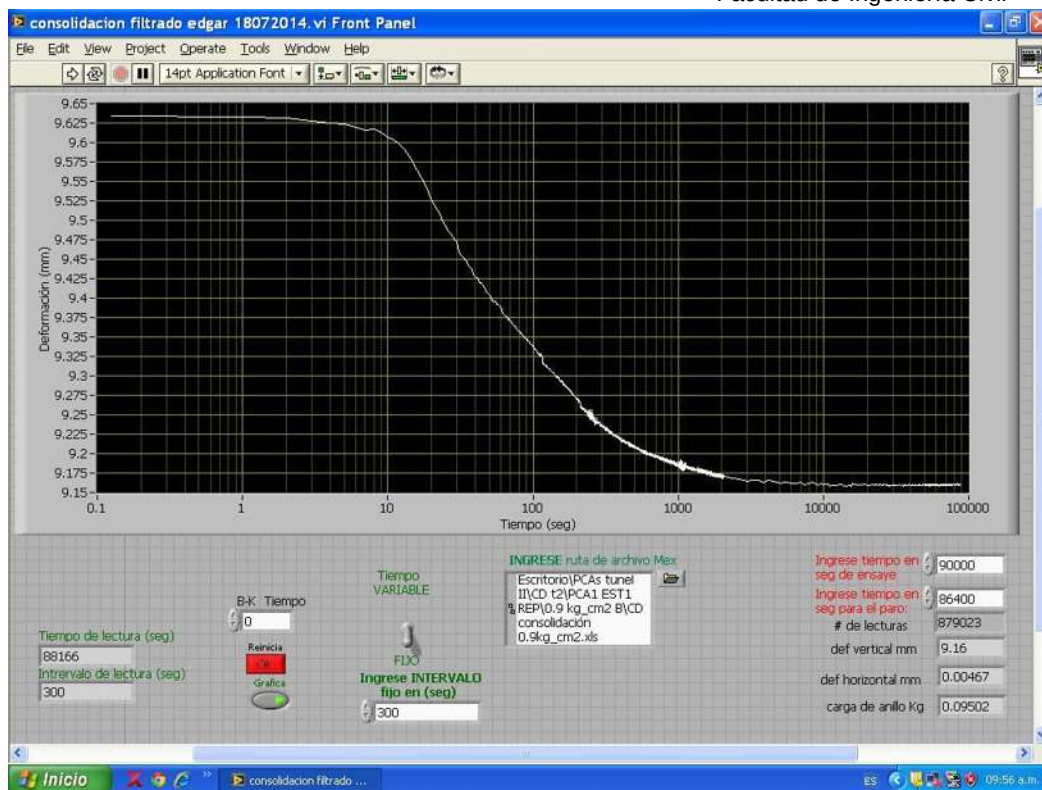


Figura 21 ejemplo de curva de deformación contra logaritmo de tiempo.



b) Triaxiales

Su principal finalidad es obtener parámetros de resistencia del suelo y la relación esfuerzo-deformación a través de la determinación del esfuerzo cortante. El ensayo es complejo, pero entrega la información más representativa del esfuerzo cortante que sufre una masa de suelo al ser cargada.

Consiste en colocar una muestra cilíndrica de suelo dentro de una membrana de caucho o goma, se introduce en una cámara especial y se le aplica una presión igual en todo sentido y dirección (Figura 23). Alcanzando ese estado de equilibrio, se aumenta la presión normal o axial.

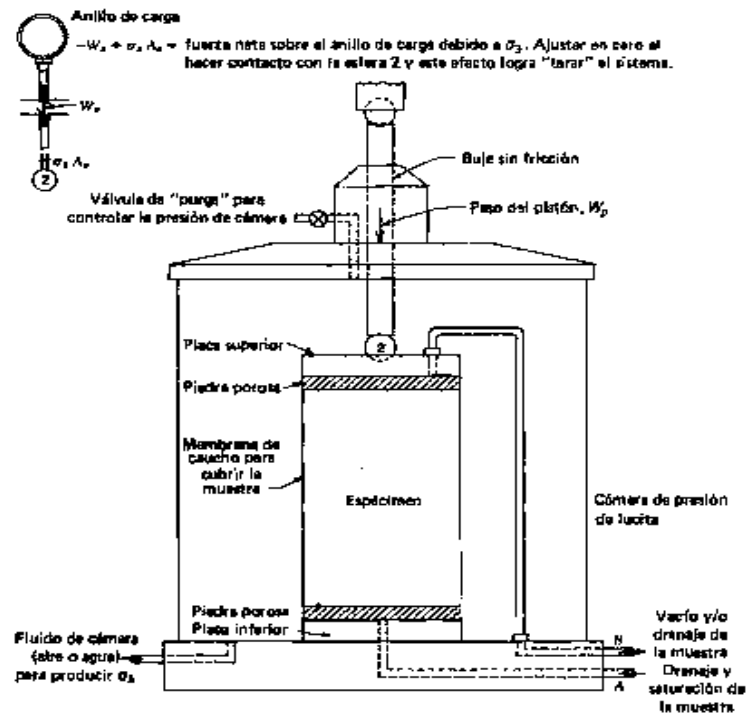


Figura 22 Cámara Triaxial (Bowles J. 1982)



Figura 23 Cámara Triaxial con muestra (UU)

Normalmente el ensayo de acuerdo a la norma española UNE-103402:1998 se realiza sobre tres muestras cilíndricas de un mismo suelo, saturadas, sometidas cada una de ellas a presiones laterales diferentes. Cada una de ellas se dibuja los círculos de Mohr que representan los esfuerzos de falla de cada muestra y trazando una tangente a estos, se determinan los parámetros ϕ y c del suelo. Dependiendo del suelo y las condiciones en que se trabajaran, el ensayo deberá ser consolidado no drenado (CU), no consolidado no drenado (UU) o consolidado drenado (CD).

Variaciones en el procedimiento según alternativa de ensayo:

- En un ensayo UU, la válvula de drenaje se mantiene cerrada en todo el ensayo y antes de que la muestra se consolide. El ensayo comienza inmediatamente aplicada la presión de confinamiento. Este procedimiento no podrá realizarse para un suelo cohesivo 100% saturado.
- En un ensayo CU, se mantiene la válvula de drenaje abierta al aplicar la presión de confinamiento. Al terminar la consolidación, se cierra la válvula y se aplica la presión axial.



- En un ensayo CD, se mantiene la válvula de drenaje abierta durante todas las fases del ensayo. La presión axial deberá ser aplicada a una velocidad más baja que las anteriores, de modo de evitar que los resultados se vean afectados por la presión de poros.

4.3.2 Descripción geotécnica de macizos rocosos

Las descripciones de los macizos rocosos con fines geotécnicos precisan de observaciones y medidas adicionales a las geológicas; de ahí la necesidad de establecer un sistema que armonice criterios y facilite la comunicación entre todos los profesionales. Se deberán realizar observaciones con una terminología estandarizada, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Se examinarán todos los factores sistemáticamente y con secuencia lógica.
- No omitir ninguna información básica.
- Se describirá de tal forma que emita una imagen precisa y revele la información más relevante.
- Los datos deberán ser estadísticamente representativos

En general, el procedimiento a seguir parte de aspectos y características observables a simple vista, posteriormente se describen y caracterizan con detalle las diferentes zonas del macizo rocoso y finalmente con los datos obtenidos se clasifica geomecánicamente el macizo rocoso.

La descripción de los afloramientos de macizos rocosos se puede resumir en las siguientes etapas:

- A) La descripción general del afloramiento, debe incluir la identificación condiciones y características generales del afloramiento y de cada componente: rocas, suelos, zonas con agua, discontinuidades singulares, etc.
- B) La división en zonas, se realiza a partir de criterios fundamentalmente litológicos y estructurales. El número de zonas que se establezca y la





extensión de las mismas dependerá del grado de los materiales y estructuras que formen el macizo rocoso, de la extensión del afloramiento y grado de detalle de la misma.

- C) La descripción de cada zona, se llevará por separado y detalladamente, deberá ser lo más objetivo y claro posible, utilizando terminología estandarizada, de manera que distintos observadores lleguen a la misma descripción, evitando que puedan aparecer diferencias en la interpretación. La descripción se efectuará de forma cualitativa, y siempre que sea posible cuantitativa.
- D) La descripción de los parámetros del macizo rocoso, se realizará a partir de los datos recogidos en cada estación, se establecerán los parámetros referentes al número de familias de discontinuidades, orientación y características representativas de cada una de ellas, determinando su tamaño, y forma de los bloques que conformen el macizo, grado de fracturación, así como otros factores que influyen, como el grado de meteorización y las propiedades hidrológicas. Estos parámetros son:
- Orientación, es una discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección de buzamiento (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte) y por su buzamiento (inclinación respecto a la horizontal de dicha línea). La orientación medida de cada familia se establece a partir de valores estadísticos y su representación gráfica de las discontinuidades permite una visión general de la geometría de los macizos rocosos. Los diagramas de bloques representan tridimensionalmente la distribución de los planos permitiendo visualizar la orientación de la fracturación ver figura. Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro o mediante una app para Smartphone (ver Figura 24). Esta aplicación geológica le permite usar el teléfono como brújula tradicional, así como una brújula





digital-clinómetro para medir y capturar la orientación de las características planas y lineales en el campo.

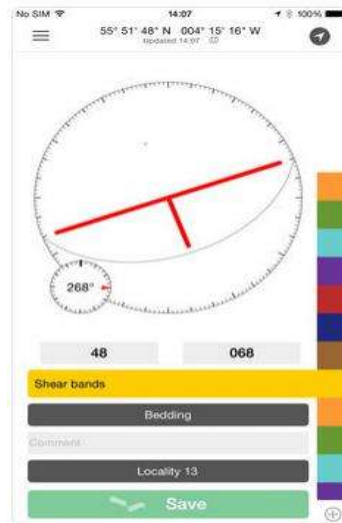


Figura 24 FieldMove Clino es una brújula digital-clinómetro para la captura de datos

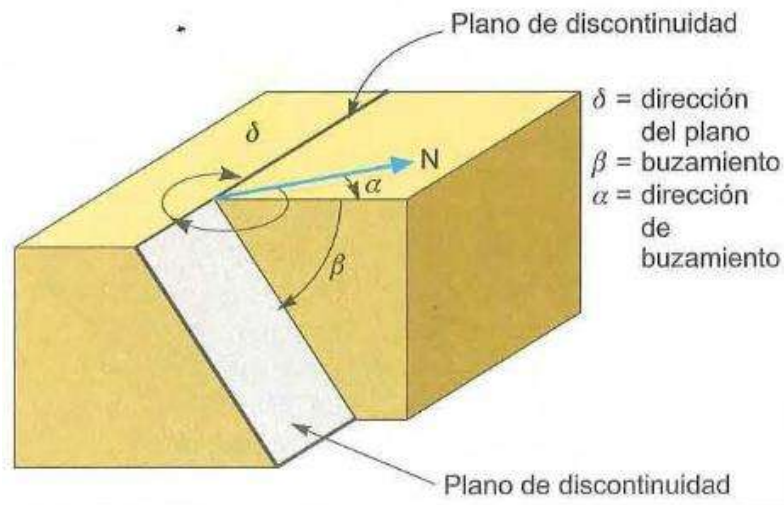


Figura 25 Medición de la orientación de las discontinuidades (González de Vallejo, et al., 2002)





- Espaciamiento, es la distancia media perpendicular entre los planos de discontinuidad de una misma familia; influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques de matriz rocosa que forman las diferentes familias.
- Continuidad, es la extensión del plano de discontinuidad; define en gran medida si la matriz rocosa va estar involucrada o no en los procesos de rotura del macizo rocoso, y en qué grado condiciona los parámetros globales del macizo rocoso.
- Rugosidad a escala milimétrica se puede medir mediante el uso del peine de Barton, con un detalle de 1 mm y con distancia de 10 a 15 cm.

Se refiere a la ondulación de la discontinuidad y a la rugosidad de la superficie. La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos. La rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor de relleno.

La rugosidad influencia directamente el ángulo de fricción entre las paredes de las discontinuidades. La resistencia al corte será mayor cuando las aberturas de la discontinuidad sean menores.

Esta clasificación los parámetros cuantitativos nos revelan la rugosidad que presentan las paredes, y viene denominada JRC (Coeficiente de rugosidad de las Grietas ver Figura 26).



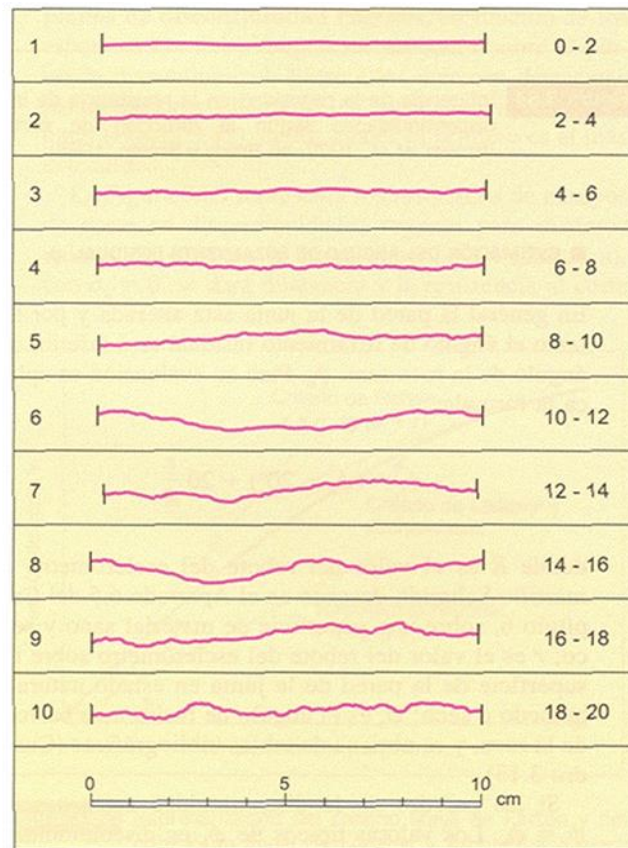


Figura 26 Perfil para estimar el coeficiente de rugosidad de la roca (González de Vallejo, et al., 2002).

- Relleno, el relleno dentro de las discontinuidades influye en el comportamiento, puede ser de materiales blandos arcillosos, material producto de la meteorización de la roca o con material rocoso de naturaleza distinta a la de las paredes. Las propiedades físicas y mecánicas de relleno, tales como: resistencia al corte, deformabilidad y permeabilidad, pueden ser muy variables y controlan el comportamiento de la discontinuidad. Es importante tomar en cuenta que existe o no relleno, las discontinuidades son el camino perfecto para las filtraciones de agua en el macizo rocoso y posteriormente, hacia la excavación del túnel.



- E) La caracterización global del macizo rocoso, constituye la fase final del proceso descriptivo, y debe proporcionar las condiciones geológicas y geométricas del macizo. A partir de estos resultados se aplicaran las clasificaciones geomecánicas, que proporcionan información sobre la calidad y resistencia del macizo, así como datos cuantitativos para su aplicación a diferentes fines constructivos (túneles, taludes, etc.).

Se debe tener en cuenta los siguientes aspectos que describan la matriz rocosa:

1. Identificación, se basa a partir de su composición y de textura, las observaciones más prácticas son:
 - a) Composición mineralógica, permite clasificar litológicamente la roca.
 - b) Tamaño del grano, hace referencia a las dimensiones medias de los minerales o fragmentos de roca que componen la matriz rocosa.
 - c) Color, depende de los minerales que lo componen. Algunos minerales tiene un color distintivo, pero frecuentemente tienen impurezas que lo modifican, el color se puede describir dando un color principal, seguido de uno secundario, indicando por último la intensidad que presenta.
 - d) Dureza, es una propiedad relacionada con la resistencia, depende de la composición mineralógica y del grado de alteración que afecta la roca.
2. Meteorización, es una observación que proporciona sus propiedades mecánicas, entre más avanza el proceso de meteorización aumenta la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso y disminuye su resistencia. Su identificación se puede realizar de forma sistemática como se observa en la Tabla 8.





Tabla 8 Descripción del grado de meteorización (González de Vallejo, et al., 2002)

Término	Descripción
Fresca	No se observa signos de meteorización en la matriz rocosa.
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales se deben mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fibra original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos.

Las condiciones climáticas son el principal agente en la meteorización, y el aspecto que ofrecen las rocas meteorizadas varían para las distintas regiones climáticas. Se presentan algunos ejemplos de grado de meteorización.

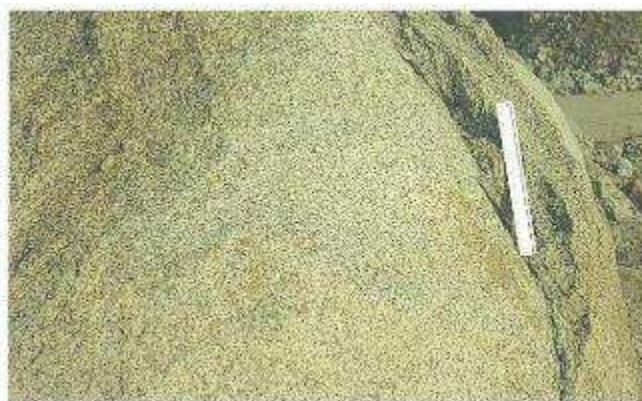


Figura 27 Roca ligeramente decolorada, con cambios en el color original de la matriz rocosa





3. Resistencia, la resistencia matriz rocosa puede ser estimada a partir de ensayos de campo, como el ensayo de carga puntual PLT o el martillo de Schmidt. Mediante el martillo Schmidt o esclerómetro se mide la resistencia al rebote de una superficie rocosa y con los valores obtenidos con estos métodos se puede clasificar la matriz rocosa en base a los criterios de la Tabla 9.

Tabla 9 Clasificación en base a la resistencia de la roca (González de Vallejo, et al., 2002)

Resistencia a compresión simple (MPa)	Descripción
1-5	Muy blanda
5-25	Blanda
25-50	Moderadamente dura
50-100	Dura
100-250	Muy dura
>250	Extremadamente dura

Los macizos rocosos necesitan una descripción de:

- 1) Su material base o roca matriz, entendiendo como tal el conjunto de material que, a simple vista parece continuo y sano; o sea el núcleo del macizo.
- 2) La presencia de familias de discontinuidades: orientación, buzamiento, separación o frecuencia, abertura, rugosidad de la discontinuidad, presencia de posibles rellenos en ellas debido a alteraciones de la roca próxima o arrastres, circulación de agua etc.
- 3) Respuesta del material base frente a los cambios tensionales o hidromecánicos.
- 4) Respuesta de las discontinuidades frente a los mismos cambios.





Como puede apreciarse en esta enumeración, los dos primeros apartados suponen realmente una toma de datos sobre todo descriptiva, a realizar con ayuda de las metodologías geológicas habituales:

Observación del tipo de material y su origen, definición de cada familia de discontinuidades o “juntas” (rumbo, buzamiento, espaciamiento), su estado (rugosidad, presencia de agua), etc., técnicas observacionales aplicadas a la superficie de macizos o columnas de sondeos, ayudadas por las técnicas geofísicas, muy apropiadas para diferenciar contactos entre distintos materiales rocosos.

El apartado tercero necesita, principalmente, de ensayos de laboratorio, mientras que en el cuarto han de combinarse los datos de laboratorio del material base (resistencia, deformación etc.) y con nuevos datos de sondeos mecánicos “in situ” de pequeña, mediana y gran dimensión, que afecten no solo al material base sino a las discontinuidades.

Los medios rocosos están constituidos por materiales que distingue habitualmente la Geología, encargándose la mecánica de rocas de añadir calificativos que complementan el nombre geológico, como blando, duro, alterado, fracturado, etc.

Al hablar de roca, nos viene a la mente a todos y entendemos por un material sólido y duro, pero fines de estudio la roca se define como, agregados naturales compuestos de partículas de uno o más minerales, con fuertes uniones cohesivas permanentes, que constituyen masas geológicamente independientes.

Se distinguen 3 grandes grupos de materiales típicos como se muestra en la siguiente Tabla 10.





Tabla 10 Clasificación Geológica

CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA GENERAL	
Rocas sedimentarias	Detríticas: arenisca, lutita, limolita, conglomerado.
	Químicas: evaporitas, caliza y dolomía.
	Orgánica: caliza, carbón, coralíferas.
Rocas Ígneas	Plutónicas: granito, gabro y diorita.
	Volcánicas: basalto, andesita y riolita.
Rocas Metamórficas	Masivas: cuarcita y mármol.
	Foliadas: pizarra, filita, esquisto, gneis.

Discontinuidades. Son cualquiera de los planos de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa de un macizo rocoso. Generalmente la resistencia a la tracción de los planos de discontinuidad es muy baja o nula.

Falla. Son fracturas de la corteza terrestre a lo largo de las cuales ha habido un desplazamiento paralelo a la superficie de la fractura. Lo que se observa es que una pared de la fractura se ha movido en relación con la otra.

4.3.2.1 Clasificaciones geomecánicas

Para definir las condiciones del macizo rocoso existen criterios de clasificación geomecánica ampliamente difundidos en todo el mundo:

- a) RQD
- b) Clasificación de Bieniawski. (RMR)
- c) Clasificación de Barton. (Q)

En la actualidad, las clasificaciones geomecánicas se emplean de forma generalizada en ingeniería para hacer una primera predicción del comportamiento de los macizos rocosos frente a excavaciones, principalmente subterráneas, aunque también a cielo abierto. Una clasificación geomecánica, necesita una





descripción, características y propiedades de la matriz rocosa, de las discontinuidades y de parámetros del macizo rocoso, que proporcione los datos necesarios para la evaluación geomecánica global del macizo. Una clasificación geomecánica permite estimar la calidad y los parámetros resistentes aproximados del macizo.

Las dos clasificaciones geomecánicas más utilizadas son: la clasificación Geomecánica o RMR de Bieniawski (1973), y el sistema Q de Barton (1974). Estas clasificaciones fueron creadas originalmente para excavaciones subterráneas, particularmente túneles, aunque el RMR se ha extendido después a otras aplicaciones, como minería subterránea metálica y de carbón (Laubscher 1977 y 1984; Cummings et al. 1982; Kendorski et al. 1983 y Unal 1983 y 1986), estabilidad de taludes (Romana 1985) y arranque de rocas (Weaver 1975, Smith 1987 y Singh et al. 1986).

4.3.2.1.1 RQD

El Rock Quality Designation (RQD), fue introducido hace 30 años cuando la información de la calidad de la roca estaba usualmente disponible solo a partir de las descripciones geológicas y del porcentaje de recuperación (Deere 1988), la ISRM recomienda recuperar los núcleos con una perforación de diamante de doble barril con un diámetro no menor al (54.7mm). La siguiente relación entre el índice del RQD y la calidad de la roca fue propuesta por Deere en 1968. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{RQD (\%)} = 100 * (\text{Recuperación real} / \text{Longitud del barreno})$$



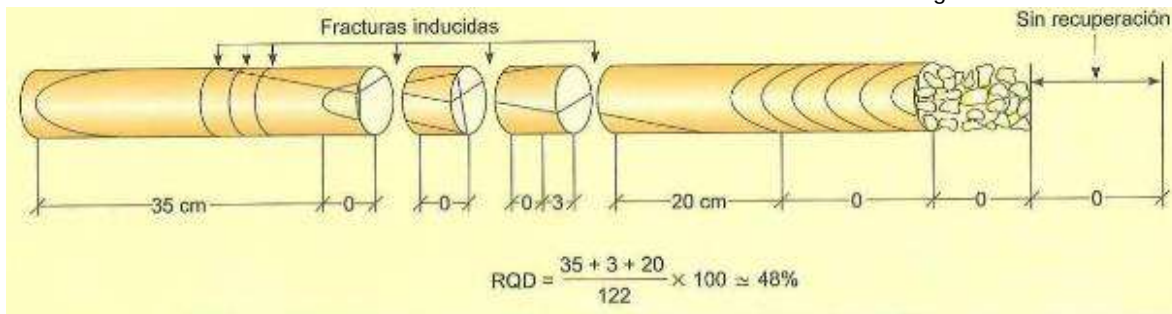


Figura 28 Ejemplo de Fragmento de roca para determinar RQD (González de Vallejo, et al., 2002)

Para el cálculo se debe indicar que los porcentajes del RQD incluyen solo las piezas sanas de los núcleos con longitudes mayores o iguales a 100mm, los que son sumados y divididos para su longitud total del muestreo que se realiza Figura 28.

En tal virtud, las piezas de los núcleos que no son duras y sanas no deben ser tomadas en cuenta aunque éstas cumplan con el requisito de la longitud. De esta manera, rocas altamente meteorizadas tendrán un valor del RQD igual a cero.

RQD %	Calidad
< 25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Muy buena

Figura 29 Procedimiento de medida del RQD y se describe la calidad de la roca en función de este índice (González de Vallejo, et al., 2002)

4.3.2.2 Índice Q de Barton

El índice Q de clasificación de macizos rocosos fue desarrollado en Noruega en 1974 por Barton, Lén y Lunde, todos ellos del Instituto Geotécnico de Noruega. En la clasificación se catalogan los macizos rocosos según el denominado Índice de Calidad Q, basado en seis parámetros:

1. RQD Índice de Calidad de la Roca.
2. Jn Número de familias de discontinuidades



3. Jr Rugosidad de las discontinuidades
4. Ja Meteorización de las discontinuidades
5. Jw Coeficiente reductor que considera la presencia del agua
6. SRF Factor de reducción dependiente de las tensiones.

La fórmula que nos define la calidad de la roca según Barton es la siguiente:

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

Donde:

RQD = porcentaje de la recuperación modificada del sondeo

Jn = Índice que indica el grado de fracturación del macizo rocoso

Jr = Índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas

Ja = Índice de alteración de las discontinuidades

Jw = Coeficiente reductor por la presencia de agua

SRF = Coeficiente que toma en consideración la influencia del estado tensional del macizo rocoso

El índice Q para túneles puede considerarse como una función de sólo tres parámetros que son medidas aproximadas por:

1. El tamaño de los bloques (RQD / Jn)
2. La resistencia al esfuerzo cortante entre bloques (Jr / Ja)
3. Los esfuerzos activos (Jw / SRF)





4.3.2.3 Clasificación de Bieniawski

El sistema de valoración del macizo rocoso (RMR), más conocido como clasificación Geomecánica RMR, fue desarrollado por Bieniawski durante 1972 y 1973.

En los pasados 25 años, el RMR ha tenido éxitos, pasando la prueba del tiempo y beneficio de extensiones y aplicaciones por muchos autores en todas partes del mundo. Esta variedad de aplicaciones, en una cantidad de 351 casos históricos, señala la aceptación del sistema y su inherente facilidad de uso y versatilidad en la práctica ingenieril, tales como túneles, minas, taludes y cimentaciones, etc.

Es importante que el RMR sea usado para el propósito al cual fue desarrollado, y no sea una respuesta para todos los diseños de ingeniería.

La clasificación ha sido utilizada muchas veces y modificada por el mismo autor, el cual propone la clasificación Geomecánica RMR.

Esta se basa sobre un punteo que se le da a la roca, recabado del análisis de los siguientes parámetros:

1. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca;
2. Índice de calidad de la roca (RQD);
3. Espaciado entre discontinuidades;
4. Condición de infiltraciones de agua;

Estos factores se cuantifican mediante una serie de parámetros definiéndose unos valores para dichos parámetros, cuya suma, en caso nos da el índice de calidad del RMR que varían entre 0-100.

Se clasifican las rocas en 5 categorías. En cada categoría se estiman los valores de la cohesión y el ángulo de fricción interna del macizo rocoso. A continuación se presentan la clasificación de los parámetros y sus valores.

Resistencia compresiva de la roca, se puede determinar por tres procedimientos:





- Estimación de la resistencia compresiva mediante el martillo Schmidt de dureza.
- Determinación de la resistencia compresiva mediante el ensayo de carga puntual "Franklin".
- Determinación de la resistencia compresiva mediante el ensayo de compresión simple y/o uniaxial.

RQD, índice de calidad de la roca según Deere y Miller (1966).

Espaciamiento de las discontinuidades, se refiere a los planos de estratificación y otros planos de debilidad del macizo rocoso, como lo son la apertura, tamaño, rugosidad, dureza y relleno.

Presencia de agua subterránea, se intenta medir la influencia del flujo de agua subterránea sobre la estabilidad de las excavaciones en función del caudal que penetra en la excavación, y de la relación entre la presión del agua en las discontinuidades y el esfuerzo principal.

A continuación en la Tabla 11 se muestra los parámetros que considera el autor para valorar el macizo rocoso, en rojo son coeficientes que se tienen que tomar en consideración y al final se deberán sumar.





Tabla 11 Clasificación de un macizo rocoso (Bieniawski)

PARAMETROS		RANGO DE VALORES						
Resistencia de la Roca inalterada	Resistencia Point Load (MPa)	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Para estos valores bajos es preferible la prueba de compresión uniaxial		
	Resistencia a compresión uniaxial (MPa)	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5 - 25 Mpa	1 - 5 Mpa	< 1 Mpa
Coeficiente		15	12	7	4	2	1	0
Índice de Calidad de la Roca RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
Coeficiente		20	17	13	8	3		
Espaciamiento de las discontinuidades		> 3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	0.05 - 0.3	< 0.05		
Coeficiente		20	15	10	8	5		
Condiciones de las discontinuidades		Superficies muy rugosas sin continuidad, sin separación. Paredes de roca sin alteración.	Superficies rugosas, con separación < 1 mm. Paredes ligeramente meteorizadas	Superficies ligeramente rugosas, con separación < 1 mm. Paredes altamente meteorizadas	Superficies lisas o relleno < 5 mm espesor o separación 1-5mm fisuras continuas	Relleno blando > 5 mm de espesor separación > 5 mm fisuras continuas		
		30	25	20	10	0		
		Flujo por cada 10 en longitud del talud (l/min.)	Ninguna	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		Presión del agua en las fisuras	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
Agua en la Roca		Condición general	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Chorreado	
		Coeficiente	15	10	7	4	0	

Tabla 12 Correcciones dependiendo de la orientación de las discontinuidades

Corrección por la orientación de las discontinuidades	Taludes	Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy Desfavorables
Coeficiente		15	10	7	4	0

Dependiendo de la valoración numérica obtenida en la sumatoria de los coeficientes se le da un valor al macizo rocoso (entre I al V), donde se puede analizar los parámetros geomecánicos recomendados (cohesión y ángulo de fricción).





Tabla 13 Valoración de la roca dependiendo del resultado de su la RMR

VALORACIÓN RMR		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	Menor 20
CLASIFICACIÓN		I	II	III	IV	V
Descripción		Roca muy buena	Roca buena	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala
Parámetros geomecánicos	Cohesión	30 ton/m ²	20 a 30 ton/m ²	15 a 20 ton/m ²	10 a 15 ton/m ²	Menor a 10 ton/m ²
	Ángulo de fricción	Mayor a 45°	40° a 45°	35° a 40°	30° a 35°	Menor a 30°

Dependiendo del valor de RQD podremos darnos una idea de la calidad de la roca de acuerdo a lo propuesto en la Figura 29 . Este valor no considera la presencia del agua, tampoco algún tipo de relleno ni las características de las discontinuidades; y cuando no es posible obtener corazones se obtiene el RQD con un procedimiento alternativo.

4.3.3 Propiedades mecánicas

Denominada también como Point Load Test (PLT) o ensayo Franklin. Se utiliza para determinar la resistencia a compresión simple de muestras irregulares o de testigos cilíndricos, a partir de un Índice de Carga Puntual (Is). Este índice de prueba caracteriza y clasifica la roca en base a su propiedad mecánica. Es un ensayo de campo o de laboratorio, que se aplica a especímenes de roca dura.

4.3.3.1 Resistencia a la carga puntual (Norma española UNE 22950-5)

Nos habla de la resistencia a carga puntual varía con el contenido de agua de los fragmentos. Las variaciones son especialmente pronunciadas con contenidos de





agua inferiores al 25%. Los fragmentos secados en horno, por ejemplo, suelen ser mucho más resistentes que los que están húmedos. Por lo que se recomienda hacer el ensayo en muestras previamente húmedas en agua durante 24 horas (ver Figura 30), a menos que se exija de forma específica que los ensayos se lleven a cabo con rocas secas.



Figura 30 Fragmentos de roca humedecidos durante 24 horas

Todos los fragmentos de una muestra se ensayarán con un contenido de agua similar y bien definido, contenido que resulte apropiado al proyecto para el que se precisen los datos del ensayo, deberán proporcionarse valores numéricos tanto para el contenido de agua como para el grado de saturación presentes en el momento del ensayo.

Ensayo diametral: Para este ensayo se utilizarán preferentemente fragmentos de testigo con una relación longitud/diámetro superior a 1, 0. Figura 31



El fragmento se introduce en la máquina de ensayos y los punzones se cierran para establecer contacto a lo largo de un diámetro del testigo, ver Figura 32. La distancia L existente entre los puntos de contacto y el extremo libre más cercano debe ser al menos $0,5 D$. La distancia D se medirá con una precisión $\pm 2\%$.



Figura 32 Carga puntual

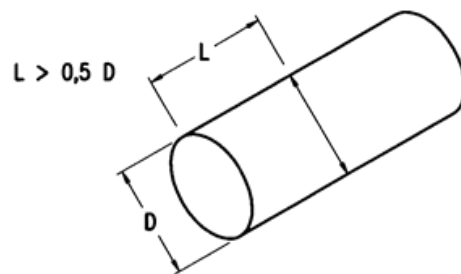


Figura 31 Requisitos de los fragmentos de roca para ensayo diametral

Ensayo de fragmentos irregulares: Los bloques de roca o los fragmentos irregulares de $50 \text{ mm} \pm 35 \text{ mm}$, son los recomendados para el ensayo de bloque y de trozos irregulares. La relación D/W estará comprendida entre $0,3$ y $1,0$, aproximándose preferiblemente a $1,0$.

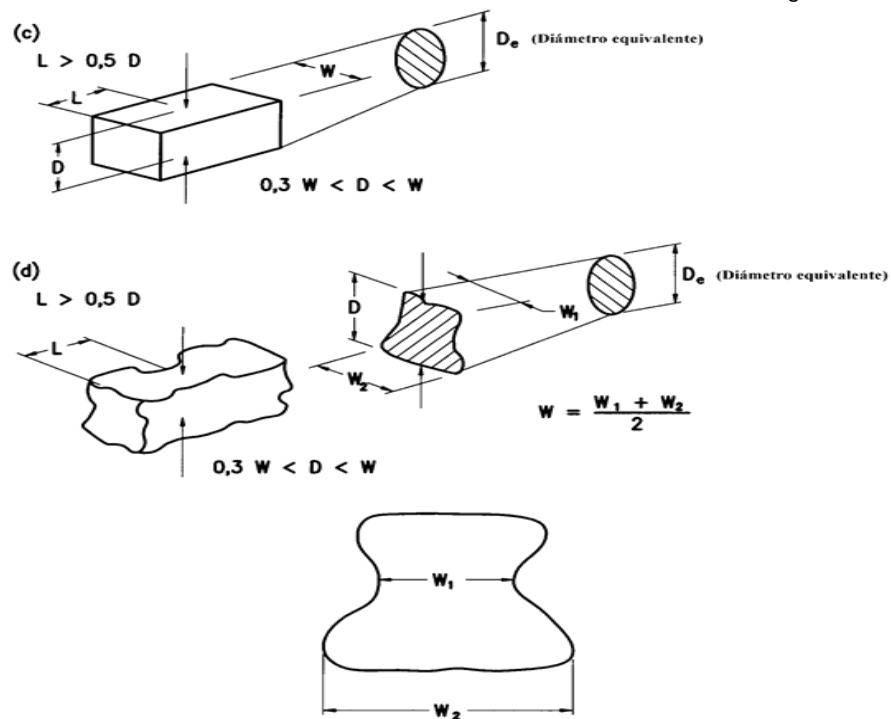


Figura 33 Requisitos de las muestras irregulares para el ensayo

La distancia L será como mínimo 0,5 D. Pueden seleccionarse fragmentos de este tamaño y forma si se dispone de ellos, o pueden prepararse utilizando piezas más grandes cortadas con sierra o cincel.



Figura 34 Ensayos diametrales validos



Figura 35 Ensayos diametrales nulos

La resistencia a carga puntual no corregida, I_s , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_s = P/D_e^2$$

Donde:

D_e = diámetro equivalente viene dado por:

$$D_e^2 = D^2 \text{ para los ensayos diametrales (o } D_e^2 = D \cdot D')$$

$$D_e^2 = 4A/\pi \text{ para los ensayos axial, de bloque y fragmentos irregulares}$$

$A = WD$ área mínima de la sección transversal que contiene los dos puntos de aplicación de la carga (o $A = W \cdot D'$).

I_s varía en función de D en el ensayo diametral, y de ' D_e ' en los ensayos axial, de bloque y de fragmentos irregulares, por lo que ha de aplicarse una corrección por tamaño a fin de obtener un valor único de la resistencia a carga puntual para la muestra de roca, que pueda ser utilizado a efectos de clasificación de las rocas, según su resistencia.



4.3.3.2 Ensayos de corte directo en discontinuidades

El ensayo determina la resistencia al corte pico y residual en discontinuidades, en función de los esfuerzos normales aplicados sobre el plano, consiste en aplicar esfuerzos tangenciales a una discontinuidad de roca hasta provocar el desplazamiento relativo entre las dos paredes. A partir de los datos de esfuerzo y desplazamiento producidos (ver Figura 36) se obtienen los parámetros resistentes, tanto los valores de pico como residuales.

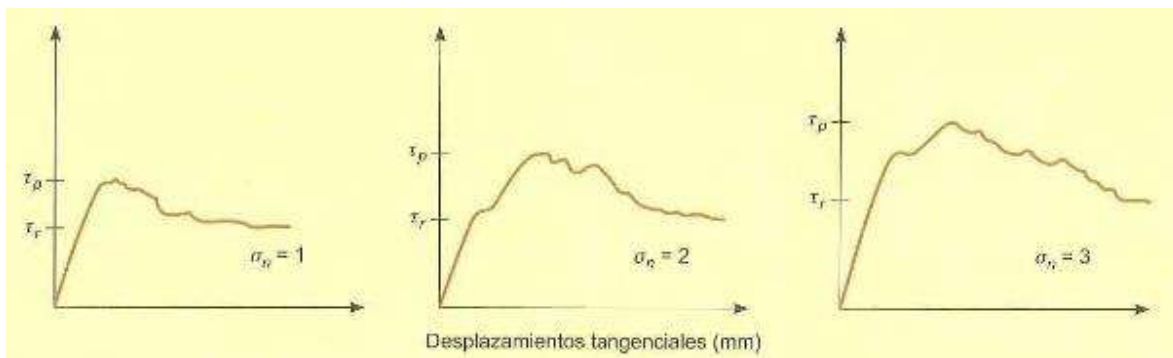


Figura 36 Ejemplo de esfuerzos pico y residual de diferentes ensayos

Máquina de ensayo, se necesitara de un equipo para aplicar y registrar fuerza normal y fuerza constante sobre el testigo. Este equipo consiste de una caja partida diagonalmente. La mitad superior equipada con un pistón vertical para aplicar la fuerza normal y la mitad inferior equipada con un pistón horizontal para la aplicación de una fuerza cortante ver Figura 37.

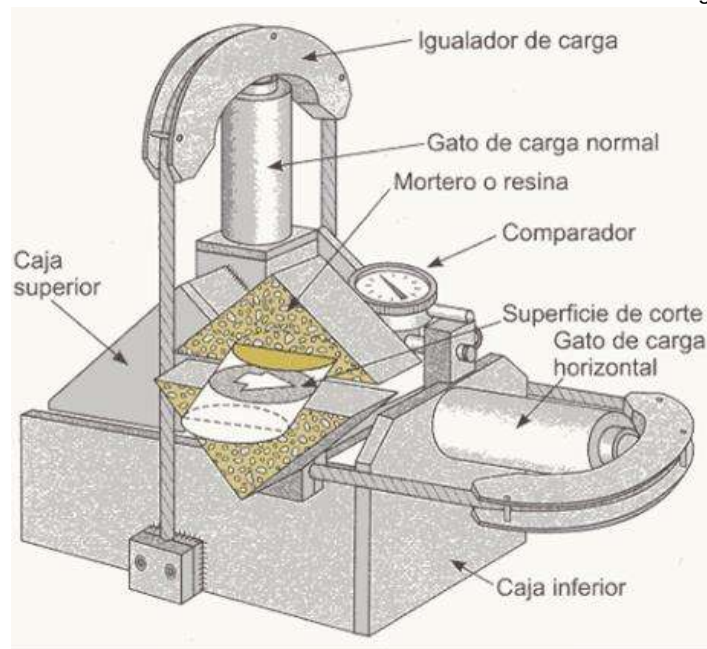


Figura 37 Célula de Hoek, ensayo de corte directo (González de Vallejo, et al., 2002)

Procedimiento:

- Se registra el diámetro o las dimensiones de la zona escogida para calcular el área de deslizamiento.
- Se hacen las conexiones hidráulicas necesarias.
- Se coloca el testigo (encapsulado en la muestra) en la parte inferior de la caja y se coloca la parte superior de la caja. Se hacen coincidir las partes cortadas en forma manual. Se inicia el ensayo aplicando una carga normal pequeña.
- Se fija el medidor de desplazamiento en la parte superior para lograr registrar los movimientos horizontales.
- Se aplica la carga normal requerida con la bomba manual, se registra y se mantiene constante, luego se aplica la carga cortante gradualmente. Se registran los desplazamientos horizontales y las cargas cortantes respectivas. Al llegar al máximo valor de fuerza cortante se registra este valor y su desplazamiento. Se sigue aplicando carga constante hasta que esta se



mantiene constante, entonces habremos hallado el valor de esfuerzo cortante residual.

- f) Se repite este proceso incrementando la carga normal con una razón constante. Volvemos a colocar el testigo en su posición inicial, teniendo cuidado que el detrito producido por el corte no se pierda del plano de ensayo. Obtenemos en cada ensayo los valores al esfuerzo cortante máximo y residual.
- g) Se calcula el área de ensayo del testigo. Usando las medidas de las áreas y las cargas, se calculan los valores de esfuerzo:

- Esfuerzo normal $\sigma = N/A$ (donde N es la fuerza normal)
- Esfuerzo cortante residual $\tau = F/A$ (donde F es la fuerza cortante y A el área transversal donde se aplica el corte)

Se hace un diagrama σ - τ , los valores de esfuerzos normales y sus correspondientes esfuerzos cortantes residuales. Estos puntos generan una línea recta. La pendiente de esta recta es el coeficiente de fricción residual y su ángulo es el ángulo de fricción (ϕ).



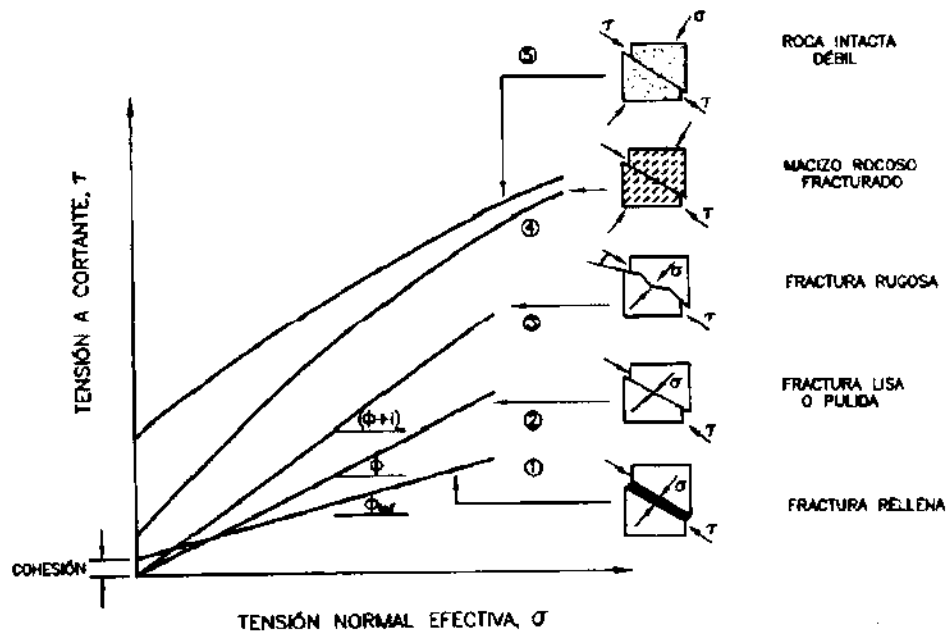


Figura 38 Diagrama de esfuerzos

Cuando se presente una discontinuidad rugosa se aplica el criterio de Barton y Choubey 1977. Es un criterio empírico, deducido a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades rugosas y se expresa de la siguiente forma:

$$\tau = \sigma'_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_N} \right) + \phi_R \right]$$

En donde:

- τ y σ'_n son los esfuerzos tangenciales y normal efectivo sobre el plano de discontinuidad.
- ϕ_R es el ángulo de rozamiento residual.
- JRC depende del coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (join roughness coefficient).



- JCS es la resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (joint Wall compression strength).

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \frac{r}{R}$$

- R es el valor del rebote del esclerómetro o martillo Schmidt
- r es el valor del rebote del esclerómetro en superficie en estado natural
- ϕ_b es el ángulo de resistencia básico de la roca, si las paredes están sanas $\phi_r = \phi_b$.

Si la pared esta alterada, como ocurre habitualmente, el valor de JCS puede obtenerse a partir de los resultados del esclerómetro mediante la expresión:

$$\log_{10} JCS = 0.00088 \gamma_{roca} r + 1.01$$

- γ_{roca} peso específico de la roca
- JCS en MN/m² ; γ_{roca} en KN/M³

4.3.3.3 Ensayos triaxiales

La resistencia a la compresión triaxial en roca de acuerdo con ASTM D 2664-95a. Este método de ensayo se utiliza comúnmente para simular las condiciones de esfuerzos bajo las cuales la mayor parte de masas de roca reacciona y proporciona datos útiles en la determinación de las propiedades de resistencia y elásticas de la roca:

- Resistencia al corte por varias presiones laterales
- Angulo de fricción interna
- Cohesión interna
- El módulo de Young

Este método no prevé medidas de la presión de poro. Así, los valores de resistencia son determinados en términos de esfuerzos totales. Es decir, no considera





corrección para presiones de poros. Se sabe que la roca se comporta en función de su presión de confinamiento.

Equipo:

Las muestras de ensayos deberán ser cilíndricas, la muestra tendrá una relación de longitud a diámetro (L/D) de 2 a 2.5 y un diámetro no menos de 1 7/8 pulg. (47 mm).

Los lados de la muestra deberán ser generalmente suave y libres de irregularidades bruscas, con todos los elementos rectos aproximadamente a 0.020 pulg. (0.50 mm).

Se utilizara una membrana flexible, que deberá ser lo suficientemente larga como para extenderse también a los platos o bien placas, y al estirarse debe ser del mismo diámetro de la muestra.

Se utilizara un equipo adecuado para la aplicación y medición de la carga axial de la muestra, una bomba hidráulica, un intensificador de presión, u otro sistema de capacidad suficiente para mantener constante la presión lateral deseada.

Las lecturas serán en 0.0001-in. (0.0025mm) de unidades, con una precisión de 0.0001 pulg. (0.0025 mm) y un rango de 0.0010-in. (0.0025 mm) a 0.0002 pulg. (0.005 mm) en cualquier lectura.

Procedimiento:

- Se coloca la placa inferior de la base
- Se limpian las caras de las placas superior e inferior y del espécimen de prueba y colocar la muestra de ensayo en la placa inferior.
- Colocar el plato superior sobre la muestra y alinear correctamente. Ajustar la membrana flexible sobre la muestra y la platina e instalar la goma de neopreno en las juntas para sellar el espécimen del contacto con el fluido.
- Colocar el cilindro sobre la muestra asegurando el sello adecuado con la base, y conecte la presión lineal hidráulica.





- Colocar el dispositivo de medición de la deformación y llenar la cámara triaxial con el fluido hidráulico. Aplique una ligera axial, aproximadamente 25 lbf (100 N), a la cámara de compresión triaxial por medio del dispositivo de carga con el fin de asentar correctamente las partes de apoyo de los aparatos.
- Tomar una lectura inicial en el dispositivo de deformación.
- Se levantara la presión lateral del fluido al nivel de prueba predeterminando, y al mismo tiempo aplicar la carga axial suficiente para evitar que la medición de deformación del dispositivo se desvíe de la lectura inicial.
- Se tomara lectura de la carga axial, cuando alcance el nivel de prueba predeterminado.
- Se considerara esta carga como cero o de partida para la prueba.
- Aplicar la carga axial de forma continua y producir una velocidad de deformación tan constante como sea posible, durante toda la prueba.

Se construirá los círculos de Mohr en una escala aritmética con esfuerzos de corte como ordenadas y esfuerzos normales como abscisas. Y hacer al menos tres pruebas cada una con diferente presión de confinamiento, en el mismo material para definir los círculos de Mohr. Determinar su envolvente de rotura que nos proporcionara el ángulo de rozamiento y cohesión de la roca.



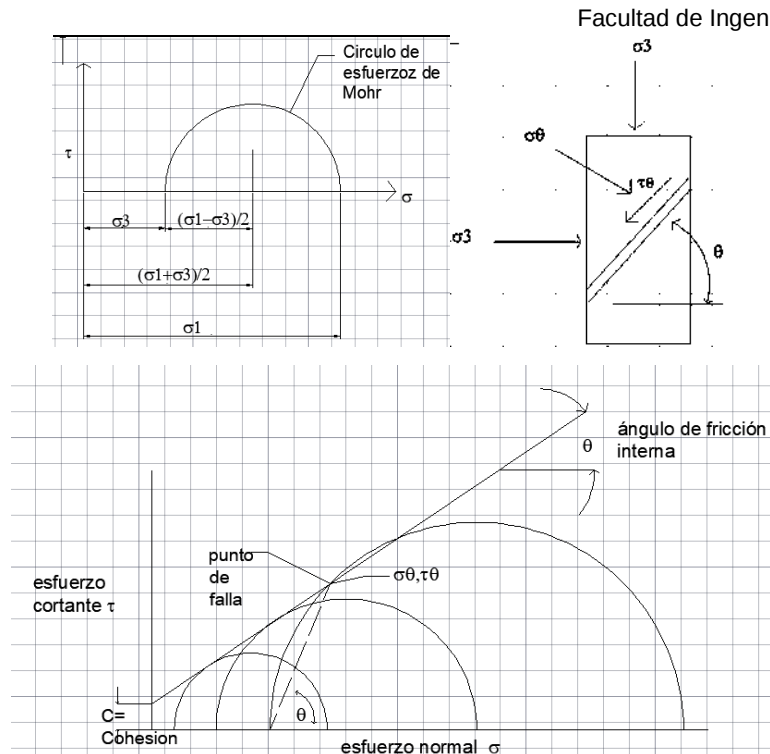


Figura 39 Círculos de Mohr en rocas (ASTM-D-2664)

4.3.4 Datos hidrogeológicos e hidrológicos

La presencia de agua en los materiales geológicos afecta a sus propiedades y comportamiento mecánico y, por tanto, este aspecto debe ser considerado en la cartografía geotécnica. Los aspectos hidrogeológicos son de especial importancia en aquellos mapas geotécnicos enfocados a la planificación y uso del territorio, explotación de recursos hídricos o selección de emplazamientos para obras.

Además de los cambios en las condiciones de los materiales y la variación en sus propiedades geotécnicas, las aguas superficiales y subterráneas dan lugar a procesos de meteorización física y química y provocan cambios en el relieve y movimientos del terreno, como deslizamientos, hundimientos o subsidencias. A su vez, los flujos de agua naturales pueden ser afectados por las obras de ingeniería, como la construcción de túneles.



Siempre hay que tener en cuenta las Condiciones hidrogeológicas en la construcción de un túnel debido a que este produce un gran efecto que se llama dren. Esto quiere decir que el agua fluye de los acuíferos interceptados y esto tiende a dar efectos negativos en la obra los cuales podrían ser como:

- Poca resistencia del macizo
- Aumento de las presiones sobre el sostenimiento y el revestimiento
- Más volumen y reblandecimientos en materiales arcillosos
- formación de cavidades en materiales salinos
- Problemas en el avance de la excavación

Es difícil evaluar los caudales y las presiones de agua en un túnel, pues dada su heterogeneidad asignar valores representativos a la permeabilidad es un tanto difícil además de prever su comportamiento hidrodinámico.

Los estudios hidrogeológicos para túneles deben incluir los siguientes aspectos:

- 5) Balance hídrico de la zona de influencia incluyendo un inventario de fuentes, manantiales y pozos.
- 6) Niveles piezométricos en el área túnel y su variación estacional.
- 7) Delimitación de acuíferos, zonas de recarga y descarga.
- 8) Identificación de zonas de fractura y fallas y rocas muy permeables.
- 9) Determinación de los parámetros hidráulicos de los acuíferos.
- 10) Modelos de flujo
- 11) Estimación de los caudales previsibles y su presión.
- 12) Identificación de las zonas de mayor riesgo de filtraciones.
- 13) Composición química y calidad del agua, temperatura y agresividad.
- 14) Influencia de las filtraciones en el túnel sobre un entorno (rebajamiento del nivel freático y riesgo de inducir asentamientos en los edificios).
- 15) Factores que influyan en la elección del drenaje o impermeabilización del túnel.





16) Posibilidad de que el túnel suponga una barrera total o parcial en la red de flujo y en las variaciones de niveles freáticos, fuentes, manantiales, etc.

Además otro aspecto son los datos hidrogeológicos en los mapas geotécnicos deben permitir prever los cambios hidrogeológicos asociadas a las actuaciones sobre el terreno y aportar la información necesaria para evitar, minimizar o controlar dichos cambios, Los datos a incluir son:

- Distribución del agua y contenido en agua de los materiales.
- Formaciones acuíferas
- Lagos, ríos, manantiales.
- Niveles piezómetros, profundidad y fluctuaciones estacionales o de otro tipo.
- Acuíferos confinados.
- Flujos, dirección y velocidad.
- Zonas y condiciones de infiltración.
- Parámetros hidrológicos: permeabilidad.
- Propiedades hidroquímicas y calidad del agua.

Los resultados de las investigaciones hidrogeológicas proporcionaran la información necesaria para adoptar medidas de control del agua durante la excavación.





5 Métodos de Exploración de Suelo y Roca (Sondeos geotécnicos y calicatas)

Los sondeos se caracterizan por su pequeño diámetro y por la ligereza, versatilidad y fácil desplazamiento de la maquinaria para el trabajo, estas pruebas alcanzan profundidades de 150 metros un cuyo caso la maquinaria es más grande. Permiten atravesar cualquier tipo de suelo o roca, así como extraer testigos y realizar ensayos en su interior. Los procedimientos para la perforación dependen del terreno y del tipo de muestreo y testificación que se vaya a realizar, los sondeos a rotación, los helicoidales y a percusión, son los más usuales.

5.1 Geofísicos

Uno de los problemas que afecta a la ingeniería civil y otras disciplinas es conocer una o varias características y propiedades del subsuelo. Para ello se emplea la ciencia de la geofísica. La geofísica es una ciencia aplicada que estudia los fenómenos naturales de nuestro planeta desde el punto de vista físico y matemático.

Originalmente fue desarrollada como un método efectivo para la prospección del petróleo y otros depósitos minerales, pero actualmente tiene aplicaciones específicas en el campo de la ingeniería civil.

Son técnicas no destructivas y de investigación extensiva o con gran cobertura, complementarias de los ensayos in situ y técnicas de investigación directa, como los sondeos mecánicos. Se emplean habitualmente para determinar espesores de rellenos o recubrimientos, escalabilidad de materiales, posición del nivel freático, localización de cavidades, estructura del subsuelo, propiedades geomecánicas de materiales, localización de fallas o superficies de deslizamiento, espesor de roca alterada, índices de fisuración, localización de conducciones subterráneas. Existe una gran variedad de técnicas en el empleo de la geofísica en la ingeniería civil, y el uso de una o varias técnicas dependerán de la aplicación a cada caso específico.

Los diferentes métodos geofísicos para el reconocimiento del subsuelo se dividen según el parámetro físico investigado: gravimetría (densidad), magnético (susceptibilidad magnética), eléctricos (resistividad), electromagnéticos



(conductividad eléctrica y permeabilidad magnética), sísmicos (velocidad de propagación de ondas sísmicas), radiactivos (niveles de radiación natural o inducida).

5.1.1 Geofísica de superficie

Son técnicas no destructivas y de investigación extensiva o con gran cobertura, complementarias de los ensayos in situ y técnicas de investigación directa. Los diferentes métodos geofísicos para el reconocimiento del subsuelo se dividen según el parámetro físico investigado: gravimetría (densidad), magnético (susceptibilidad magnética), eléctricos (resistividad), electromagnéticos (conductividad eléctrica y permeabilidad magnética), sísmicos (velocidad de propagación de ondas sísmicas).

5.1.1.1 Métodos eléctricos

Son aquellos que estudian la respuesta del terreno cuando se propagan a través de corrientes eléctricas continuas (DC). Su aplicación es muy frecuente en ingeniería geológica.



Figura 40 Resistivímetro

Los métodos eléctricos en corriente continua se fundamentan en el estudio de la propagación de la señal eléctrica en el medio, la Geoeléctrica ha desarrollado multitud de dispositivos (Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo etc.). Su fin es el conocimiento de las resistividades eléctricas presentes en el subsuelo



mediante las medidas de diferencias de potencial (electrodos M y N) generados por la inyección de una corriente eléctrica en el subsuelo (electrodos A y B).

Las dos técnicas geoelectricas más empleadas, principalmente en obra civil, geotecnia, hidrogeología y medio ambiente, son las tomografías eléctricas y los sondeos eléctricos verticales SEVs.

Es frecuente utilizar la siguiente formula con valores promedio:

$$\rho = (\varphi S)^{-2} \rho \omega r^2$$

La medida de las resistividades del subsuelo se lleva a cabo en los siguientes pasos:

1. -Introducción en el terreno de una corriente continúa de intensidad I, mediante dos electrodos, denominados A y B, conectados a una fuente de energía.
2. -Medida de la diferencia de potencial ΔV , generada por el paso de la corriente, entre dos electrodos denominados M y N. (ver Figura 41)
3. -Cálculo de la resistividad del espesor de terreno afectado por el paso de la corriente.

La resistividad que se obtiene no corresponde a una unidad litológica concreta, sino que define al conjunto de materiales afectados por el paso de corriente, y se denomina resistividad aparente:

$$\rho_a = K(\Delta V/I)$$

Donde K constante de configuración geométrica del dispositivo en cada medida, que depende de las distancias entre electrodos AM, MB, AN y NB. Lo más frecuente es utilizar configuraciones normalizadas, siendo las más comunes las denominadas Schlumberger y Wenner.



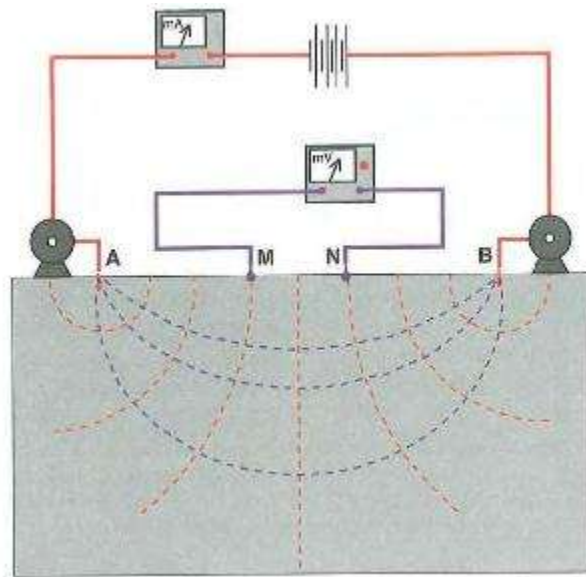


Figura 41 Resistividad del terreno mediante métodos eléctricos (González de Vallejo, et al., 2002)

Los equipos a emplear consisten en una caja de baterías, electrodos de corriente y potencial, cables y resistivímetros.

Los sondeos eléctricos verticales SEV permiten obtener la distribución de resistividades reales con la profundidad en un punto mediante la inversión de curvas resistividad aparente distancia AB. Con los SEV podemos alcanzar varios kilómetros de profundidad siempre y cuando se cumplan ciertos condicionantes, Esta técnica consiste en separar sucesivamente los electrodos de corriente A y B del punto central, siguiendo una línea recta, y medir la resistividad en cada disposición. Las profundidades más habituales es de investigación están entre 0 y 200m.

Dipolo- dipolo, Se sitúa el dipolo MN lateralmente al AB (Ver Figura 41) y alineado con él. Posteriormente, y manteniendo fijo el dipolo AB, se desplaza sucesivamente el MN: a continuación, se mueve un paso AB y se repite el proceso. El esquema de la operación y la distribución de las resistividades aparentes ρ_a , obtenidas se presentan en la Figura 42

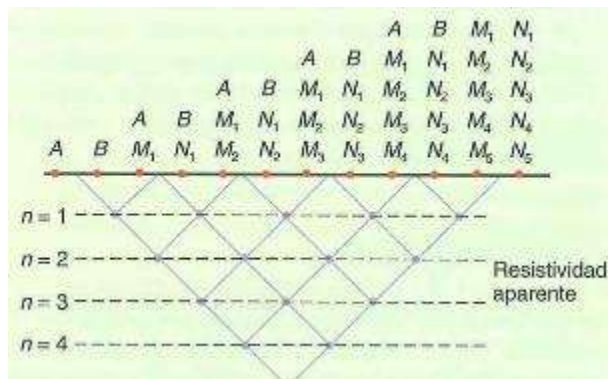


Figura 42 Ejemplo dipolo-dipolo González de Vallejo, et al., 2002

5.1.1.2 Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos de prospección geofísica se fundamentan en el estudio de la propagación de las ondas elásticas en el medio. La señal sísmica, que puede ser generada artificialmente (martillo, caída de pesos) o ser natural (sísmica pasiva), es registrada mediante unos sensores (geófonos) distribuidos de forma adecuada en el terreno.

Los contactos entre los cuerpos geológicos con diferente velocidad de transmisión de las ondas sísmicas, definen superficies de separación en las que las ondas sufren refracción, reflexión o difracción (ley de Snell).

En ingeniería geológica se emplea básicamente la sísmica de refracción, que estudia la energía que vuelve a la superficie tras sufrir refracción total en superficie límite del subsuelo ver Figura 43. Los principales métodos sísmicos son:

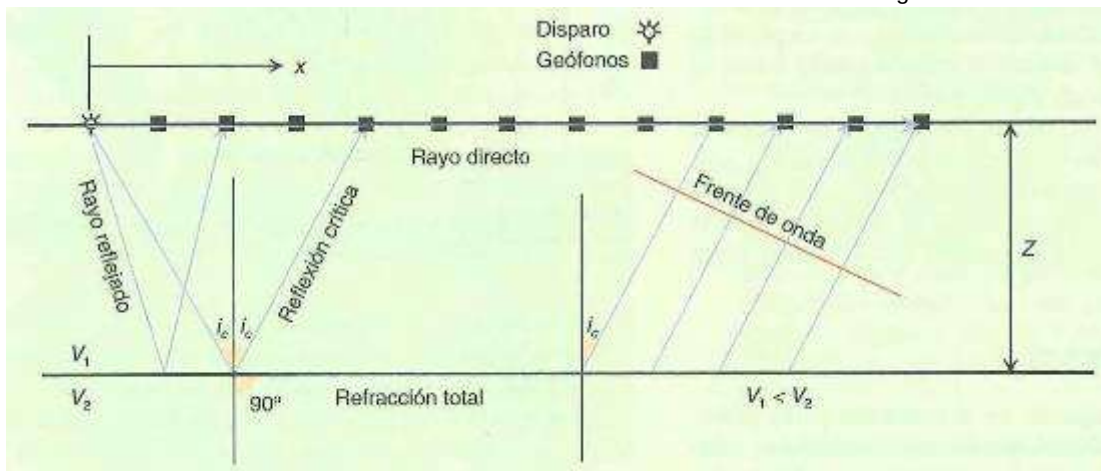


Figura 43 Fundamento de la prospección mediante sísmica de refracción (Ingeniería Geológica)

- A) La sísmica de refracción. Basada en el estudio de las ondas directas y refractadas críticamente, define las distintas capas presentes en el medio con sus velocidades sísmicas así como zonas de alteración, fallas, fracturas, rellenos, deslizamientos, técnica geofísica de aplicación muy extendida en obra civil y geotecnia ya que, además de lo mencionado, permite definir los grados de escalabilidad.

Consiste en la realización de perfiles longitudinales instrumentados con sensores (geófonos), espaciados entre si una distancia conocida y generalmente regular. La energía que libera el disparo, habitualmente mediante golpeo con un martillo de 8 kg, llega a los sensores provocando un movimiento que se registra en un sismógrafo ver Figura 44.



Figura 44 Sismógrafo Abem Terraloc Mark

La longitud de los perfiles suele situarse habitualmente entre 25 y 100m, con separación entre geófonos que no suele exceder los 5 m, con objeto de garantizar el detalle de la investigación. Los puntos de golpeo suelen ser, como mínimo, tres en cada perfil, situados al inicio, mitad y final de cada perfil. Si los perfiles exceden longitudes de 60 m, el número de puntas de golpeo es habitualmente de cinco.

- B) La sísmica de reflexión. Este método de investigación se ha empleado poco en ingeniería geológica, si bien cada vez es más utilizado para la definición de estructuras geológicas profundas (en proyectos de túneles, para investigación de deslizamientos profundos, etc.). El método consiste en medir los tiempos de llegada de las ondas sísmicas, generadas mediante una fuente de energía apropiada (martillo, pistola, caída de peso, dinamita, etc.), a los sensores (geófonos) dispuestos alineados según un perfil l, tras ser reflectadas en las superficies de contacto de las distintas unidades litológicas, fallas, superficies de discontinuidad, etc.



C) La tomografía sísmica de superficie, cuyo desarrollo en campo es similar a la sísmica de refracción, pero con una mayor densidad de puntos de disparo, permite obtener, mediante un proceso iterativo, modelos de inversión de velocidad sísmica partiendo de un modelo inicial.

D) La sísmica pasiva REMI se basa en el análisis espectral de las ondas superficiales para definir la distribución de velocidad de onda S (V_s) con la profundidad. Técnica de aplicación muy extendida en medios con fuerte ruido sísmico (medio urbano, zonas con tráfico u obras, etc.) y también empleada como complemento a técnicas que definen velocidad sísmica de onda P (V_p).

E) Los ensayos down-hole y cross-hole son técnicas geofísicas en sondeo que se basan en el estudio de las ondas directas y refractas para obtener la distribución de velocidades sísmicas de ondas P y S. Estos valores, junto con la densidad de los materiales, permiten definir los módulos elásticos de los mismos fundamentales para distintos cálculos geotécnicos.

F) La tomografía sísmica en sondeos nos permite definir con gran precisión la distribución de velocidades sísmicas V_p entre dos sondeos mediante una alta densidad de pares punto de disparo – receptor.

G) La sísmica paralela es un ensayo sísmico en sondeo que permite definir la profundidad de elementos constructivos enterrados (muros, pantallas, pilotes) gracias al cambio brusco de velocidad sísmica que se produce en su límite.

5.1.2 Geofísica en el interior de sondeos

Es una herramienta de gran utilidad para la medida de determinadas propiedades físicas de las formaciones geológicas atravesadas por las perforaciones, complementando la información obtenida en la testificación de los sondeos y los resultados de la geofísica de superficie.

Existen métodos de exploración sísmica los cuales pueden ser realizados bajo la superficie, los más comúnmente utilizados son: Cross-Hole, Up-Hole y Dow-Hole.



5.1.2.1 Sísmica en sondeos

Se realiza mediante la introducción, en un sondeo previamente revestido, de una sonda triaxial que registra los tiempos de llegada de las ondas P y S, a partir de los cuales se calculan las velocidades de transmisión y los módulos de deformación dinámicos del terreno.



Figura 45 Equipo SCXT3000 Cross-Hole sonic logging system

Con el ensayo “Cross-Hole” se obtienen las velocidades de las ondas primarias, P, y secundarias, S (SV, vibración de las partículas del terreno en la dirección vertical) a lo largo de trayectorias directas entre dos puntos situados, cada uno en el interior de un sondeo, a la misma profundidad. En uno de los sondeos se sitúa la fuente de energía (sondeo emisor) y en el otro el geófono de pozo (sondeo receptor).

Tabla 14 Velocidad de Onda P González de Vallejo, et al., 2002

Suelo	v – m/seg
Arenas y Limos	200 – 1.000
Arcillas Duras	1.000 – 2.500
Arenisca	1.500- 5.000
Granito	4.000 – 6.000

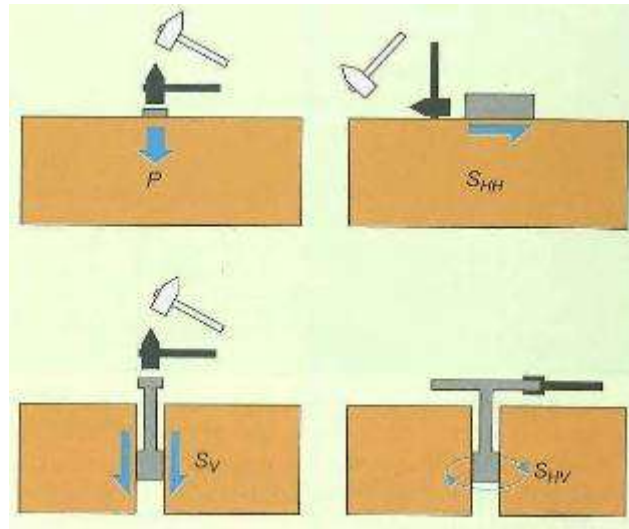


Figura 46 Generación de ondas P y S; SHH y Sv en plano horizontal y vertical (Clayton, Matthews & Simons 1995) y González de Vallejo, et al., 2002

Al igual que en el Down-Hole, registradas las velocidades V_p y V_s , se pueden calcular los correspondientes módulos elásticos dinámicos. Este método también sirve para detectar la existencia de zonas con “anomalías de velocidad” entre sondeos.

Estos ensayos han de realizarse según la norma D4428 ASTM, con unas distancias entre el “sondeo emisor” y el “sondeo receptor” de 3 a 10 m (un sondeo o varios) y con la fuente de energía (emisor) y el geófono triaxial (receptor) a la misma cota. Los sondeos (tanto emisor como receptor) deben estar entubados con tubería de PVC y éste unido sólidamente al terreno mediante una inyección de lechada, que se ha realizar de abajo hacia arriba para evitar la presencia de oquedades. Frente al ensayo de Down-Hole presenta el inconveniente de necesitar dos sondeos mecánicos.

La tomografía sísmica reconstruye una imagen, de la estructura interna del subsuelo, a partir de los tiempos de trayecto de las ondas sísmicas que se propagan, en dicho medio, en el interior de una sección de terreno comprendida entre dos sondeos. La



fuelle de energía, que puede ser un explosivo, un martillo, etc., se introduce en el sondeo de emisión, mientras que en el sondeo de recepción y en la superficie se registran las ondas sísmicas generadas; éste registro se puede hacer mediante hidrófonos y/o geófonos (en general los denominaremos “captore”). Tanto la fuente de energía como los “captore” se han de espaciar de una forma regular, siendo la situación más favorable que el espaciamiento de ambos sea igual.

5.2 Sondeos en suelo y roca.

En este capítulo se hablara del estudio de un túnel, un caso más específico abarcara desde sus estudios de suelo y roca en laboratorio así como procedimientos y equipo utilizado para realizar dicho estudio, y todo esto para un mejor entendimiento del trabajo realizado.

Antes de la ejecución del estudio geotécnico debe hacerse definido el trazado, y el estudio geotécnico preliminar de la vía, y estar aprobado.

Este estudio geotécnico incluirá un estudio geológico completo de la región considerada.

Se incluirá un reconocimiento geológico de superficie a lo largo de la alineación del túnel. El área donde se efectúe debe ser lo suficientemente grande como para permitir determinar en la superficie:

- a) La posición y estratificación de las rocas.
- b) Las formaciones geológicas atravesadas
- c) La posición de los arroyos, ríos y manantiales Se deberá determinar:
 - a) El origen y las condiciones actuales de las rocas
 - b) Los datos geológicos
 - c) La influencia de dichos datos geológicos en la construcción

Se deberá delinear la posición y propiedad de los diferentes estratos de suelo y/o roca.





Se determinara las propiedades, índices y mecánica de las rocas; debe estimar la magnitud de las presiones de rocas que puedan afectar la estructura del túnel.

En este estudio geotécnico incluirá un estudio geológico de superficie detallado de las zonas en donde vayan a ubicarse los frentes del túnel. Dicho estudio geológico debe incluir información sobre:

- a) La disposición, naturaleza y grado de meteorización de los materiales
- b) Los defectos que afecten la roca, tales como fallas y diaclasas.
- c) La posición, separación, rumbo, buzamiento y demás factores geológicos de las rocas.
- d) El efecto que la extracción del material excavado tenga sobre la estabilidad de los frentes.

El trabajo de campo correspondiente a este estudio geológico se deberá incluir:

- a) Reconocimiento geológico de superficie
- b) Levantamiento geológico del sitio

El reconocimiento deberá determinar:

- a) Las propiedades características del techo del túnel
- b) La calidad y cualidad de las rocas
- c) El drenaje superficial

El levantamiento geológico del sitio deberá:

- a) Definir la naturaleza de los materiales que vayan a atravesarse.
- b) Determinar la formación, calidad y cualidades de las rocas.
- c) Determinar la presencia de agua y gases.





5.3 Las propiedades geológicas

El espesor de la cubierta y la longitud del túnel deben determinar el número, tipo y profundidad de dichas exploraciones geológicas. Las exploraciones geológicas deben ser más frecuentes en los sitios donde se ubiquen los frentes del túnel y en aquellos lugares a lo largo del alineamiento en los que encuentran depresiones.

Cuando se determine la existencia de fallas, se deberán ejecutar sondeos a máquina que permitan determinar las propiedades características de las fallas y los materiales que las llenan, así como las circundantes.

En la actualidad hay muchos equipos y maquinaria con lo que resulta fácil elaborar un sondeo ya sea de penetración estándar, rotatorio o mixto. En este caso se hablara de algunos equipos para la exploración geotécnica.

Se sabe que la variedad actual de máquinas y herramientas para la perforación influye en las técnicas y la elección está condicionada por algunos factores:

- 1.- Calidad de la muestra que se pretende rescatar, ya sean alteradas o inalteradas.
- 2.- El diámetro de la muestra que se requiera.
- 3.- La profundidad a la que se necesite llegar el sondeo.
- 4.- El lugar al que se necesite acceder, ya que no toda la maquinaria se presta para hacer movimientos en zonas de muy alto o difícil acceso.

5.4 Número y profundidad de sondeos

La decisión del número de sondeos a realizar, la profundidad de los mismos es una cuestión que se planifica a la hora de la investigación in situ, y depende de varios factores.

Es importante ubicar correctamente el punto o puntos de medición elegidos, si lo que queremos es determinar cómo afecta el movimiento interno de un talud a una edificación, entonces deberán situarse fuera del terreno influenciado por la edificación. Si por lo contrario queremos monitorear como afecta una cimentación a





dicho suelo, al contrario del caso anterior deberán ubicarse dentro del radio de afectación.

Para un mejor perfil y desarrollo del mismo, los sondeos deberán alcanzar un nivel del sustrato lo más profundo y que este pudiera verse afectado por cualquier cambio en el suelo, ya sea una excavación (túnel), o que pudiese ver afectado por una falla geológica; su número de sondeos dependerá siempre del objetivo que se necesite y el alcance de la investigación, así como la representatividad de la zona investigada por cada sondeo, si hay que seguir un consejo respecto a la profundidad este sería "nunca quedarse cortos".

5.4.1 Sondeos de penetración estándar en suelos (SPT)

Los sondeos geotécnicos están encaminados al reconocimiento de la naturaleza y localización de las diferentes capas del terreno.

La extracción de muestras puede ser alteradas en toda la columna o inalteradas.

Generalmente son de pequeño diámetro, ya que no hay que olvidar que tienen por objeto reconocer la naturaleza y localización de las diferentes capas del terreno (y consecuentemente, establecer la columna litológica del terreno en el punto de investigación), así como extraer muestras del mismo a partir de los testigos de perforación y realizar ensayos "in situ" para determinar ciertas características mecánicas asociadas a cada litología. Por ello, en geotecnia las técnicas de prospección mediante las que no se obtiene muestra o se obtiene totalmente alterada deben ser utilizadas con suma prudencia.

Ensayo de penetración estándar (SPT) permite determinar la resistencia a la penetración que se registra como N (ver Tabla 15 y Tabla 16), durante la perforación permite obtener un valor N de resistencia a la penetración que puede ser correlacionado con parámetros geotécnicos como la densidad relativa, el ángulo de rozamiento, la carga admisible y los asentos en los suelos granulares.





Tabla 15 Suelos Gruesos (SPT)

Numero N	Densidad Relativa %	Estado del Suelo
0 a 3	0 a 15	Muy suelto
3 a 8	15 a 32	Suelto
8 a 25	35 a 65	Medio
25 a 42	65 a 85	Denso
42 a 58	85 a 100	Muy denso

Tabla 16 Suelos Finos (SPT)

Numero N	Consistencia	Resistencia a compresión kPa
0 a 2	Muy blanda	0 a 25
2 a 5	Blanda	25 a 50
5 a 10	Medio firme	50 a 100
10 a 20	Firme	100 a 200
20 a 30	Muy firme	200 a 400
>30	Dura	>400

De acuerdo con la American Society for Testing and Materials o mejor conocido por sus siglas en ingles ASTM, con la designación D 1586, esta norma habla de algunos puntos importantes a considerar en el SPT.

El ensayo consiste en hincar en el terreno un tubo partido para que penetre 60cm en el terreno golpeándolo con un martinete de 63.5 $\pm$ 1 kg. El cual se deja caer a una altura de 76.20cm, se cuenta el número de golpes necesarios para hincar en tres etapas (15cm, 30cm, 15cm). El ensayo se detiene al llegar a los 60 cm o cuando el número de golpes supera los 50 en una de las etapas.



5.4.1.1 Maquina tipo Longyear

El equipo es utilizado para el ensayo de penetración estándar, este reporta la resistencia que tiene un suelo al ser penetrado por un penetrometro (Figura 48), este tiene una longitud de un metro con su zapata, tubo partido y cople (Figura 49 y Figura 51). Se coloca el tubo partido en la tubería (Figura 50 y Figura 53). La tubería tiene un acoplamiento macho-hembra donde se ensambla (Figura 52) y se procede a penetrar. El equipo tiene un peso aproximado de dos toneladas una de sus características es que se puede realizar penetración estándar y sondeos a rotación, por lo tanto se puede realizar un sondeo mixto, el sondeo mixto, es cuando el equipo puede hacer penetración estándar y al momento que llega a los 50 golpes no puede avanzar se mete una broca triconica o un tubo de diamante (ver Figura 56) para seguir avanzando.



Figura 47 Equipo de penetración Estándar (Longyear)

Características:

- .Largo del equipo: 2.90
- .Ancho: 1.20
- .Altura máxima con torre levantada: 7.20m
- .Altura máxima con torre en descenso: 2.35m
- .Separación de Perforación de colindancia a centro de perforación: 0.60m
- .Profundidad de máxima de perforación: 100m
- .Diámetro máximo de perforación: 6''
- .Diámetro menor de perforación: 2 15/16''

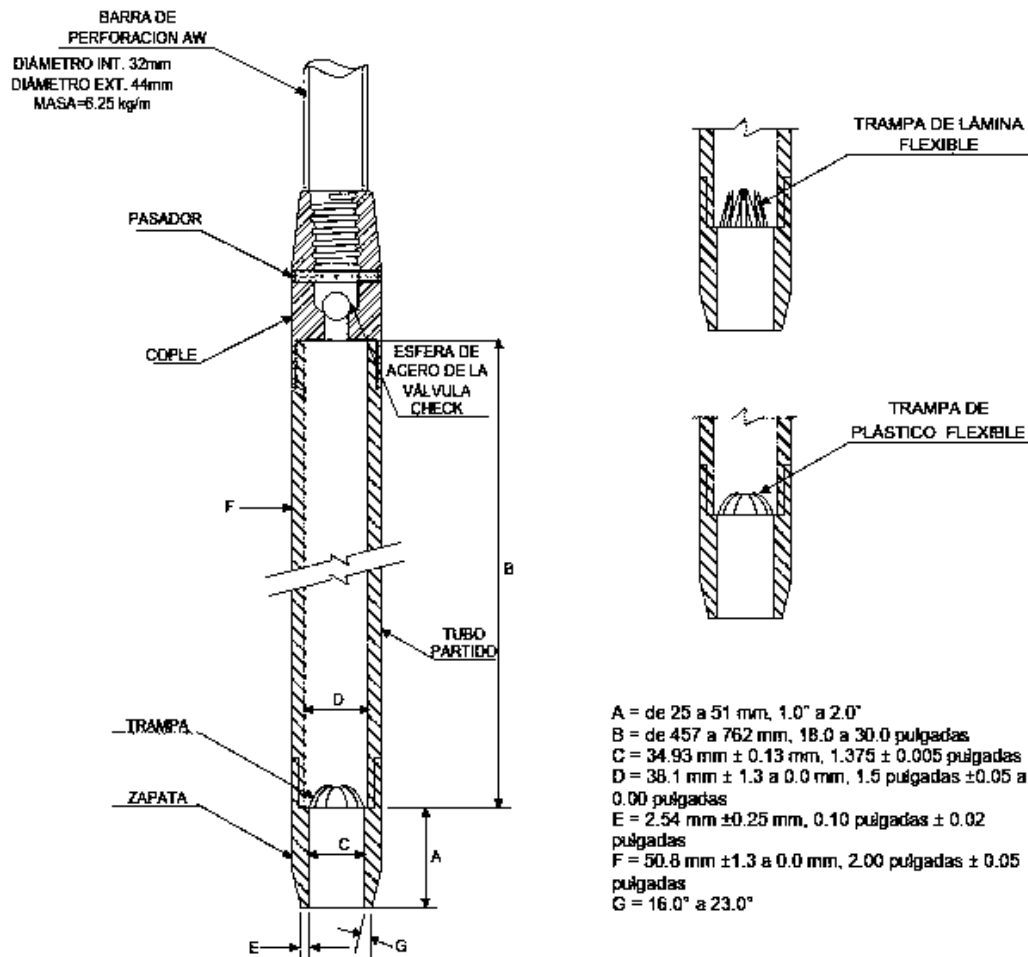


Figura 48 Penetrómetro Estándar



Figura 49 Penetrómetro estándar utilizado en México



Figura 50 Porta testigos o muestras



Figura 51 Drenado de agua



Figura 52 Válvula Check



Figura 53 Muestra de arcilla SPT

El SPT puede ejecutarse prácticamente en todo tipo de suelos, incluso en roca muy alteradas. Este método es utilizado extensamente en una gran variedad de proyectos geotécnicos de exploración, existen extensamente publicaciones que relacionan el valor N con el comportamiento ingenieril de estructuras de tierra y cimentaciones.

5.4.1.2 Presentación de los datos de perforación

Los resultados de se presentaran junto con los datos de la testificación geotécnica realizada en los testigos en campo ver Tabla 17. Está tiene: el número de muestra, la profundidad de la muestra, la longitud que se avanzó, el porcentaje que se obtuvo, el número de golpes, herramienta utilizada y una descripción al momento de obtener la muestra que posteriormente se compara en laboratorio. En los ejemplos de las Tabla 17 y Tabla 18, se observa que el material pasó de ser suelo, a roca por tanto el método de sondeo fue mixto.



Tabla 17 Ejemplo de Reporte de campo

MUESTRA	PROUNDIDAD		AVANCE	RECUPERACIÓN	% DE RECUPERACIÓN	H.C.	NUMERO DE GOLPES			CLASIFICACION DE CAMPO	COMPACTAD	CONSISTENCIA
	DESDE	HASTA					15	30	15			
No.	m	m	cm	cm	%							
1	0.00	0.60	60.00	0.30	50	T.P.	3	7	12	ARCILLA CAFÉ OSCURO		
2	0.60	1.20	60.00	0.28	46.67	T.P.	5	9	7	ARCILLA CAFÉ OSCURO		
3	1.20	1.80	60.00	0.25	41.67	T.P.	6	12	10	ARCILLA CAFÉ OSCURO		
4	1.80	2.40	60.00	0.23	38.33	T.P.	8	10	6	ARCILLA CAFÉ OSCURO		
5	2.40	3.00	60.00	0.16	26.67	T.P.	13	17	11	ARCILLA CAFÉ OSCURO		
6	3.00	3.60	60.00	0.10	16.67	T.P.	16	21	15	ARCILLA CAFÉ OSCURO		
7	3.60	4.20	60.00	0.12	20	T.P.	5	21	12	GRAVA CON POCA ARCILLA		
8	4.20	4.80	60.00	0.15	25	T.P.	9	25	16	GRAVA CON LIMO		
9	4.80	5.40	60.00	0.04	6.67	T.P.	50/7			LIMO POCO ARCILLOSO CON GRAVA		
10	5.40	6.00	60.00	0.09	15	T.P.	10	23	18	GRAVA CON POCO LIMO		
11	6.00	6.60	60.00	0.07	11.67	T.P.	50/15			GRAVA CON ARCILLA		
12	6.60	7.20	60.00	0.04	6.67	T.P.	50/12			GRAVA EMPACADA EN ARCILLA		
13	7.20	7.80	60.00	0.11	18.33	T.P.	50/25			GRAVA CON POCA ARCILLA		
14	7.80	8.40	60.00	0.07	11.67	T.P.	50/5			GRAVA EMPACADA CON ARCILLA		
15	8.40	9.00	60.00	0.05	8.33	T.P.	50/3			GRAVA EMPACADA CON ARCILLA		
16	9.00	9.60	60.00	0.06	10	T.P.	50/14			GRAVAS EMPACADAS		
17	9.60	10.20	60.00	0.08	13.33	T.P.	50/11		1	GRAVA EMPACADA		

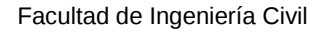




Tabla 18 Ejemplo de reporte de campo

MUESTRA	PROUNDIDAD		AVANCE	RECUPERACIÓN	% DE RECUPERACIÓN	H.C.	NUMERO DE GOLPES			CLASIFICACION DE CAMPO	COMPACTAD	CONSISTENCIA
	DESDE	HASTA					15	30	15			
No.	m	m	cm	cm	%							
18	10.20	10.80	60.00	0.07	11.67	T.P.	50/13			GRAVA EMPACADA		
19	10.80	11.40	60.00	0.08	13.33	T.P.	50/13			ARCILLA POCA GRAVA		
20	11.40	12.00	60.00	0.33	5.5	T.P.	12	50/2		ARCILLA CON GRAVA		
21	12.00	12.60	60.00	0.05	8.33	T.P.	20	50/5		ARCILLA CON GRAVA		
22	12.60	13.20	60.00	0.07	11.67	T.P.	50/10			ARCILLA CON GRAVA ESCASA ARENA		
23	13.20	13.80	60.00	0.60	38	BNQ	RO	TA	CION	GRAVAS EMPACADAS		
24	13.80	14.40	60.00	0.05	8.33	T.P.	50/9			GRAVA CON ARCILLA		
25	14.40	15.00	60.00	0.49	24.5	BNQ	RO	TA	CION	ARCILLA CON GRAVAS		
26	15.00	15.60	60.00	0.37	18.5	BNQ	RO	TA	CION	ARCILLA CON GRAVAS		
27	15.60	16.20	60.00	0.45	22.5	BNQ	RO	TA	CION	ARCILLA CON GRAVAS		
28	16.20	16.80	60.00	0.65	21.67	BNQ	RO	TA	CION	BRECHA		
29	16.80	17.40	60.00	0.33	16.50	BNQ	RO	TA	CION	BRECHA		
30	17.40	18.00	60.00	0.30	10	BNQ	RO	TA	CION	BRECHA		
31	18.00	18.60	60.00	0.32	21.33	BNQ	RO	TA	CION	ROCA		
32	18.60	19.20	60.00	1.13	37.67	BNQ	RO	TA	CION	ROCA		
33	19.20	19.80	60.00	0.80	26.67	BNQ	RO	TA	CION	ROCA		
34	19.80	20.40	60.00	1.02	34	BNQ	RO	TA	CION	ROCA		
35	20.40	21	60.00	1.05	70	BNQ	RO	TA	CION	ROCA		





En la siguiente Figura 54 se muestra una estratigrafía con relación al número de golpes y porcentaje de humedad que se obtuvo durante la prueba. Como se puede observar se sobrepasó el número de golpes N (50) en algunos casos, esto quiere decir que el suelo presenta una resistencia importante o existen fragmentos roca. En este caso el ensayo se detiene y se hace un avance con broca tricónica o un avance con una broca para roca. Es decir el ensayo de penetración estándar se vuelve mixto.

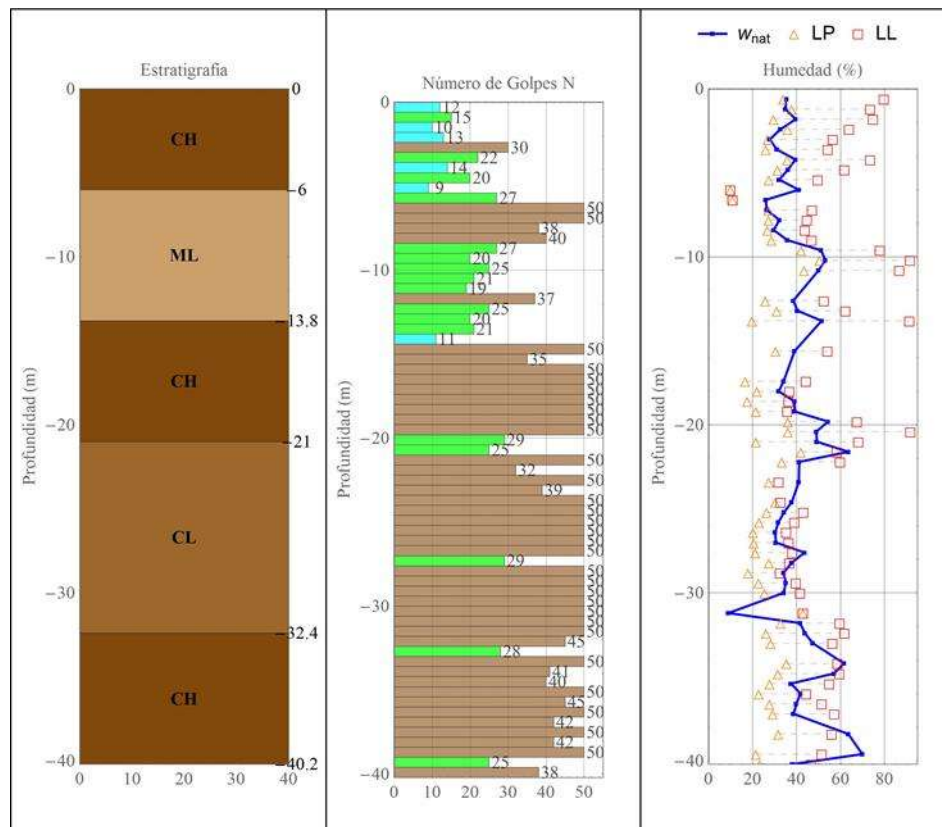


Figura 54 Estratigrafía con relación a N y porcentaje de humedad





5.4.2 Perforación en roca o sondeos a rotación

Cuando un sondeo alcanza una capa de roca más o menos firme o cuando en el curso de la perforación las herramientas hasta aquí descritas tropiezan con un bloque grande de naturaleza rocosa, no es posible lograr penetración con los métodos estudiados y ha de recurrirse a un procedimiento diferente. Al empleo de máquinas perforadoras a rotación, con broca de diamantes, al ir avanzando en el terreno, va cortando un cilindro de roca llamado testigo que va quedando alojado en un tubo roscado a la corona, llamado porta testigo. Si se encontraran formaciones blandas o muy fracturadas, es imprescindible tomar las precauciones necesarias para mantener el testigo tan inalterado como sea posible y conseguir su total recuperación.

5.4.2.1 Máquina del tipo Acker.-

Su peso aproximado es de dos toneladas, cuenta con una broca de tungsteno para la perforación en roca (Figura 56). Las muestras que se obtiene mediante este equipo van desde los 5cm hasta los 8cm, cuenta con una bomba para bombear lodo ventonítico a 120 metros de profundidad, cuenta con un barril de doble núcleo para la obtención de muestras completamente intactas. Esta ventaja ayuda a identificar de manera perfecta las discontinuidades naturales de la roca, alcanza perforaciones hasta 1800 metros, se obtienen muestras de mejor calidad en comparación con la máquina Longyear.





Figura 55 Máquina del tipo Acker



Figura 56 Broca de tungsteno





5.4.2.2 Presentación de los datos de perforación

Tabla 19 Ejempló de reporte de campo en roca

PROF.E N M		MUESTR A #	DE	A	# DE GOLPES	LONG. RECUPERADA CM	% REC	%RQD
0	Roca riolítica de muy fracturada a sana entre mala calidad	1	0.00	1.50	ROTACION	42	28	0
		2	1.50	3.00	ROTACION	118	78.67	8
		3	3.00	4.50	ROTACION	110	73.33	9.33
		4	4.50	6.00	ROTACION	131	87.33	23.33
		5	6.00	7.50	ROTACION	150	100	31.33
7.5	riolítica fracturada entre muy mala y regular calidad	6	7.50	9.00	ROTACION	113	80.67	37.33
		7	9.00	10.50	ROTACION	121	75.33	15.13
		8	10.50	12.00	ROTACION	122	81.33	18.67
		9	12.00	13.50	ROTACION	100	66.67	14.67
		10	13.50	15.00	ROTACION	108	72	52.67
		11	15.00	16.50	ROTACION	110	73.33	22.67
		12	16.50	18.00	ROTACION	110	73.33	17.33
		13	18.00	19.50	ROTACION	120	80	59.33
19.5	riolítica fracturada y sana, entre mala y regular calidad	14	19.50	21.00	ROTACION	135	90	60
		15	21.00	22.50	ROTACION	142	94.67	56.67
		16	22.50	24.00	ROTACION	140	93.33	45
		17	24.00	25.50	ROTACION	140	93.33	56.67
		18	25.50	27.00	ROTACION	150	100	66





Facultad de Ingeniería Civil

		19	27.00	28.50	ROTACION	145	96.67	48.67
		20	28.50	30.00	ROTACION	130	86.67	64
		21	30.00	31.50	ROTACION	110	73.33	49.33
		22	31.50	33.00	ROTACION	122	81.33	40.67
33	roca riolitica entre muy fracturada y poco fracturada entre muy mala y calidad regular	23	33.00	34.50	ROTACION	95	63.33	14
		24	34.50	36.00	ROTACION	89	59.33	10.67
		25	36.00	37.50	ROTACION	78	52	24
		26	37.50	39.00	ROTACION	106	70.67	46
		27	39.00	40.50	ROTACION	72	48	14
		28	40.50	42.00	ROTACION	132	88	64
	roca riolitica entre muy fracturada y de mala calidad y regulara calidad	29	42.00	43.50	ROTACION	107	71.33	13.33
		30	43.50	45.00	ROTACION	92	61.33	6.67
		31	45.00	46.50	ROTACION	91	60.6	16.67
		32	46.50	48.00	ROTACION	100	66.67	66.67
		33	48.00	49.50	ROTACION	53	35.33	0
		34	49.50	51.00	ROTACION	64	42.67	12.67
		35	51.00	52.50	ROTACION	73	48.67	22.67
		36	52.50	54.00	ROTACION	92	61.33	10.67
		37	54.00	55.50	ROTACION	94	62.67	37.33
		38	55.50	57.00	ROTACION	93	62	16
		39	57.00	58.50	ROTACION	106	70.67	13.33
		40	58.50	60.00	ROTACION	102	68	0





5.5 Registro y clasificación de la perforación de roca

Perforación de roca o de núcleo deben ser tan completos como sea posible en condiciones de campo debe ser concisa y precisa. El detalle debe ser clave para el propósito de la exploración, así como para el usuario previsto de los registros preparados. Aunque se debe presentar la misma información básica en todos los registros de perforación de roca, el nivel de detalle debe ser determinado por el ingeniero geotécnico basado en las necesidades del proyecto. Las perforaciones para una base de puente pueden requerir más detalles sobre el grado de intemperie. Para una excavación de túnel propuesta. Las descripciones extremadamente detalladas de la mineralogía de la roca pueden enmascarar características significativas para un ingeniero.

5.5.1 Descripción de la roca

Las descripciones de rocas deben utilizar términos geológicos técnicamente correctos, aunque los términos locales de uso común pueden ser aceptables si ayudan a describir características distintivas. Los núcleos de roca se deben registrar cuando están húmedos para la consistencia de la descripción del color y una mayor visibilidad de las características de la roca.

Descripción litológica de la roca debe incluir como mínimo los siguientes elementos:

- Tipo de roca
- Color
- Tamaño y forma del grano
- Textura (estratificación / foliación)
- Composición mineral
- Intemperización y alteración
- Fuerza
- Otras notas relevantes





Los diversos elementos de la descripción de la roca se deben indicar en el orden enumerado arriba: “Piedra caliza, gris claro, de grano fino, de capa fina, sin templar, fuerte”

La descripción de la roca debe incluir la identificación de discontinuidades y fracturas. La descripción debe incluir un dibujo de las fracturas naturales y roturas mecánicas.

En la siguiente Tabla 20 se presenta un ejemplo y una estratigrafía Figura 57.

Tabla 20 Descripción General de la roca

Muestras	Profundidad (m)	Descripción	Fotografía
1,2,3	0-4.70	Brecha volcánica andesítica color violácea, con abundante presencia de azufre y presencia de arcilla en algunas discontinuidades.	
4,5,6,7	4.70-9.65	Continuación de brecha volcánica andesítica color violácea (0.00-6.00m) y andesita color gris claro con presencia de azufre en discontinuidades.	
7,8,9,10	9.65-14.10	Andesita color gris claro, con presencia de azufre y arcilla en discontinuidades.	





10,11,12,13	14.10-18.40	Andesita color gris claro, con presencia de azufre y arcilla en algunas discontinuidades.	
13,14,15,16	18.40-22.80	Andesita color gris claro, con presencia de azufre y oxido en algunas discontinuidades.	
16,17,18	22.80-27.00	Continuación de andesita color gris claro (6.00-24.00m) y brecha andesítica color violácea, con abundante presencia de azufre y oxido.	
19,20,21	27.00-31.50	Continuación de brecha andesítica color violácea (24.00-28.50m) y andesita color gris claro, con presencia de azufre y oxido.	





22,23,24	31.50-35.85	Continuación de andesita color gris claro (28.50-33.00m) y brecha andesítica color violácea, con abundante presencia de azufre y óxido.	
24,25,26,27	35.85-40.50	Brecha andesítica color violácea, con abundante presencia de azufre y óxido.	
28,29,30,32	40.50-45.70	Continuación de brecha andesítica color violácea (33.00-42.00m) y andesita color gris claro con presencia de azufre y óxido.	
32,33,34,35	45.70-50.05	Andesita color gris claro con presencia de azufre y óxido (42.00-49.50m) y brecha andesítica color violácea con abundante óxido y azufre.	





35,36,37,38	50.05-54.40	Continuación de brecha andesítica color violácea (49.50-52.50m) y andesita color gris claro con presencia de azufre y oxido.	
38,39,40,41	54.40-58.85	Continuación de andesita color gris claro (52.50-58.50m), y brecha andesítica color violácea con abundante presencia de azufre y oxido.	
41	58.85-60.00	Continuación de brecha andesítica color violácea con gran cantidad de oquedades y abundante presencia de azufre y oxido (58.50-60.00m).	

En la siguiente Figura 57 se muestra una estatigrafia de la roca y porcentaje que se recupero en valor al RQD. Se puede observar que la mayor parte de la litologia es andesita.



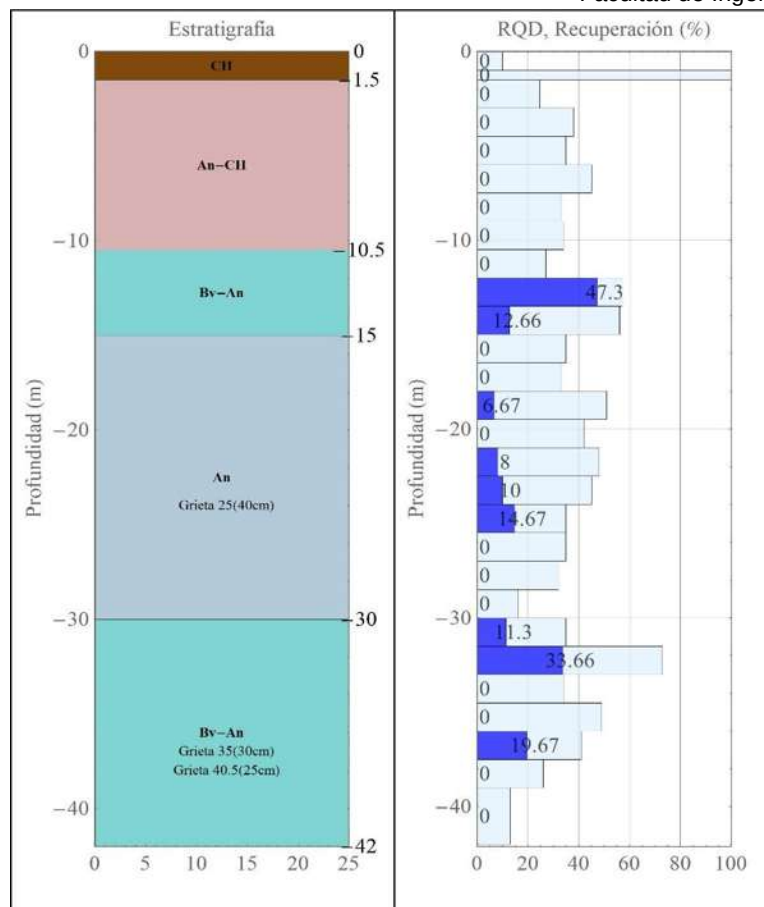


Figura 57 Estratigrafía y porcentaje de recuperación RQD

5.5.1.1 Tipo de roca

Las rocas se clasifican según el origen en tres divisiones principales: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estos tres grupos se subdividen en tipos según la composición mineral y química, la textura y la estructura interna. Para algunos proyectos se debe mantener una biblioteca de muestras manuales y fotografías representativas de tipos de rocas litológicas presentes en el área del proyecto.

5.5.1.2 Color

Los colores deben ser consistentes y registrados para condiciones tanto húmedas como secas según sea apropiado.





5.5.1.3 Tamaño y Forma del Grano

La descripción del tamaño del grano debe clasificarse usando los términos presentados en la Tabla 21. La

Tabla 22 se utiliza para clasificar aún más la forma de los granos.

5.5.1.4 Estratificación / Foliación

Se deben describir características estructurales no racionales significativas. El grosor debe ser descrito usando los términos de la Tabla 23. La orientación del Lecho / foliación debe medirse desde la horizontal con un transportador.

Tabla 21 Términos para describir tamaño de grano típicamente para las rocas sedimentarias (González de Vallejo, et al., 2002)

Descripción	Díámetro (mm)	Característica
Grano muy grueso	> 4.75	Los granos son mayores que los granos de palomitas
De grano grueso	2.00 - 4.75	Los granos individuales pueden distinguirse fácilmente por los ojos
De grano medio	0.425 - 2.00	los granos individuales se pueden distinguir por el ojo
De grano fino	0.075 - 0.425	Los granos de tamaño individual pueden distinguirse con dificultad
Grano muy fino	< 0.075	Los granos individuales no se pueden distinguir por el ojo sin ayuda

Tabla 22 Términos para describir la forma de grano (para rocas sedimentarias) González de Vallejo, et al., 2002

Descripción	Característica
Angular	Mostrando muy poca evidencia de desgaste. Los bordes y las esquinas de los granos son afilados. Las esquinas secundarias son numerosas y agudas.
Subangular	Mostrando efectos definitivos del desgaste. Los bordes y las esquinas de los granos están ligeramente redondeados. Las esquinas secundarias son ligeramente menos numerosas y ligeramente menos agudas que en los granos angulares.
Subredondeada	Mostrando desgaste considerable. Los bordes y esquinas de los granos están redondeados para suavizar las curvas. Las esquinas secundarias se reducen mucho en número y son muy redondeadas.
Redondeado	Mostrando desgaste extremo. Los bordes y las esquinas de los granos se suavizan con curvas anchas. Las esquinas secundarias son pocas y redondeadas.
Bien redondeado	Completamente desgastado. Los bordes de grano o las esquinas no están presentes. No hay aristas o esquinas secundarias.





Tabla 23 Términos para describir espesor del estrato (González de Vallejo, et al., 2002)

TÉRMINO DESCRIPTIVO	ESPESOR DEL ESTRATO
ESTRATO MUY GRUESO	> 1 m
ESTRATO DE ESPESOR GRUESO	0.5 to 1.0 m
ESTRATO ESPESOR DELGADO	50 mm to 500 mm
ESPESOR MUY DELGADO	10 mm to 50 mm
LAMINADO	2.5 mm to 10 mm
LAMINADO DELGADO	< 2.5 mm

5.5.1.5 Composición mineral

La composición mineral debe ser identificada por un geólogo basado en la experiencia y el uso de referencias apropiadas. El mineral más abundante debe ser listado en primer lugar, seguido de minerales en orden decreciente de abundancia. Para algunos tipos de roca comunes, no es necesario especificar la composición mineral (por ejemplo, dolomita, piedra caliza).

5.5.1.6 Envejecimiento y alteración

El envejecimiento, tal como se define aquí, se debe a la desintegración física de los minerales en la roca por procesos atmosféricos, mientras que la alteración se define aquí como debido a procesos geotérmicos. Los términos y abreviaturas utilizados para describir la intemperie o alteración.

5.6 Monitoreo del nivel de agua

Como parte de un estudio también se tiene la presencia del agua y existen varios dispositivos para detectar o medir el nivel de agua en los pozos de observación. En





breve una presentación de los tres métodos comunes que se utilizan para medir la profundidad de las aguas subterráneas.

5.6.1 Cinta de tiza

En este método se tiza una sección corta en el extremo inferior de una cinta metálica. La cinta con un peso unido a su extremo se baja entonces hasta que la sección de tiza ha pasado ligeramente por debajo de la superficie del agua. La profundidad del agua se determina restando la profundidad de penetración. El peso en el extremo de la cinta debe ser pequeño en volumen por lo que no desplazar suficiente agua para crear un error.

5.6.2 Cinta con un flotador

En este método, una cinta con un flotador unido a su extremo se baja hasta que el flotador golpea la superficie del agua y la cinta se afloja. La cinta se levanta entonces hasta que se sienta que el flotador toca la superficie del agua y está apenas tenso; Entonces se mide la profundidad. Con la práctica este método puede dar mediciones aproximadas, pero su precisión es pobre.

-Indicador eléctrico de nivel de agua

Este indicador de funcionamiento con pilas consiste en una sonda eléctrica ponderada unida al extremo inferior de una longitud de cable eléctrico que está marcada a intervalos para indicar la profundidad. Cuando la sonda llega al agua, se completa un circuito y éste se registra mediante un medidor montado en el carrete del cable. Varios fabricantes producen el instrumento, utilizando como dispositivo de señalización una lámpara de neón, un cuerno, o un amperímetro. El indicador eléctrico tiene la ventaja de que puede ser utilizado en agujeros extremadamente pequeños.





Figura 58 Sondeo Eléctrico

5.6.3 Registradores de datos

Cuando se requieren mediciones cronometradas y frecuentes del nivel de agua, como para una prueba de bomba o una prueba de balas, los registradores de datos son útiles. Los registradores de datos están en la forma de un transductor eléctrico cerca del fondo del pozo que detecta cambios en el nivel del agua como cambios en la presión. Se utiliza un sistema de adquisición de datos para adquirir lecturas y un registrador de datos puede eliminar la necesidad de técnicos en los turnos nocturnos durante una prueba de permeabilidad de campo extendida. Otro ahorro significativo se encuentra en el tiempo del técnico en la oficina. Los modelos preferidos del registrador de datos no sólo registran las lecturas del nivel de agua, sino que permiten que los datos se descarguen en un ordenador personal y, con el software apropiado, se reduzcan y representen rápidamente.



6 Conclusiones

¿Por qué estudiar el suelo?

La importancia de la exploración en el estudio de un suelo, radica en realizar apropiadamente cada método y así obtener muestras representativas mediante las cuales se pueda conocer las propiedades físicas del mismo.

Es importante recalcar que primeramente se deberán realizar los estudios de factibilidad del proyecto, analizando los resultados obtenidos de los estudios preliminares buscando la mejor alternativa, con los estudios de cartografía geológica y geotécnica.

O tal como se señaló, la importancia de establecer un buen perfil geológico geotécnico será fundamental al momento de proyectar un túnel sobre un área determinada. Por tanto, los sondeos para los estudios deberán ser tales que sean representativos de las zonas, y así también deberá realizarse los estudios en situ y los estudios en laboratorio. Sin dejar a un lado los estudios visuales y fotográficos (Fotogeología o fotointerpretación) en sectores importantes del proyecto, en este manual se ha dado vital importancia a los estudios geológicos geotécnicos, tal como fue uno de los objetivos al iniciar la elaboración de éste.

Es necesario señalar que la construcción de túneles en ningún lugar del planeta será la misma. Siempre se tendrá que confrontar diferentes tipos de problemas, por lo que el criterio del diseñador, constructor y demás personas involucradas deberá ir ligada a las recomendaciones expuestas de acuerdo con los resultados geológicos-geotécnicos.

Se recomienda en un 100% realizar los estudios geológicos y geotécnicos en un proyecto de túneles. No se debe dudar, por más lógico y conocido que parezca el lugar, siempre se deberá realizar estudios comprobatorios que muestren la realidad del macizo rocoso o suelo. Los ensayos tanto de laboratorio como in situ, suelen





tener un alto costo sobre el presupuesto del proyecto. Sin embargo, desde el punto de vista de la seguridad y del ahorro posterior en el caso de encontrar problemas durante trabajos de excavación y construcción, son totalmente justificados.





7 Recomendaciones

Durante el desarrollo de este tema de tesis se da la siguiente recomendación:

- A) Que la SCT cree una base de datos y que la ponga a disposición de los contratistas interesados en túneles, con la finalidad de generar modelos que permitan construir túneles seguros y con menor costo. Y que la base de datos contemple todos los túneles del país.
- B) Que la construcción de túneles sea una Materia que se imparta desde la Licenciatura ya que la mayor parte de México es un territorio montañoso y gran parte de sierras y que un futuro el desarrollo de este será necesario para la comunicación de ciudades.
- C) Se recomienda realizar un control de calidad de la construcción, partiendo desde los ensayos de suelos hasta los ensayos del hormigón colado en la obra, de tal manera de estar seguros del macizo a excavar y de los materiales a usarse ya sea en el sostenimiento o en el revestimiento del túnel.
- D) Y que la información obtenida debe servir de base para redactar los siguientes tipos de informe:
 - Informes geológico - geotécnicos para estudios previos.
 - Posibles problemas y condicionantes geológicos - geotécnicos de la zona de estudio.
 - Propuesta de investigaciones in situ.





8 Bibliografía

Alonso F., García E y Gavilán S. G. (2010). Estudio geológico para el nuevo trazado de la carretera de acceso a Lanjarón (Granada): análisis de estabilidad de taludes, XLVIII Sesión Científica Sociedad Geológica de España Sevilla.

Acker drill Company AD-II RUGGER, Mechanical Rotatory Drill Until www.ackerdill.com

ASTM D 6032 – 02. Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core

ASTM D 7400. Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing.

ASTM D 5313 – 04. Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions.

ASTM D 1586 – 99. Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils.

ASTM B193-87. Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials.

ASTM D 2113 – 99. Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Investigation.

ASTM D 4644 – 04. Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks.

Bowles J. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, Bogotá. McGraw-Hill Latinoamericana, 1980.

Crespo V. C. "Mecánica de Suelos y Cimentaciones". Mexico. Limusa, 2004.

Gonzales de Vallejo, Luis I., Ferrer M., L. & Oteo C. (2002). "Ingeniería Geológica".

Hoek & Brown, "Excavaciones subterráneas en roca", 1985.





Hinojosa A., Rodriguez V. y Munguia O. (2007) El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 63, núm. 1, 2011, p. 15-38.

Juan Herrera Herbert Jorge Castilla Gómez. "Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos, Departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas". Madrid, 2012.

Norma española. UNE 103401 "Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo". Julio 1998.

Norma española. UNE 103402, "Determinación de los parámetros resistentes de una muestra de suelo en el equipo triaxial". Julio 1998.

Norma Española. UNE 103-405-94, "Ensayo de Consolidación Unidimensional de un Suelo en Edómetro". Julio 1994.

Norma española. UNE 22950-5. "Propiedades mecánicas de las rocas Ensayos para la determinación de la resistencia". Noviembre 1996.

Norma SCT PRY-CAR-1-01-004-07 "Fotografías Aéreas para Estudios Aerofotogramétricos".

Norma SCT N-PRY-CAR-1-03-001-00 "Ejecución de Estudios Geológicas"

Norma SCT N-PRY-CAR-1-03-002-00 "Fotogeología y Levantamiento Geológico"

Manual de Mecánica de Suelos. Instrumentación y Monitoreo del Comportamiento de Obras Hidráulicas, CONAGUA. México 2012. Pearson Education, Madrid.

Pola A., Garduño V. H., Díaz C. y Hernández V. M. (2006). Estudio Geotécnico asociado a procesos de masa de parque Francisco Zarco (Ocolusen), Morelia Michoacán. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 58, Núm. 2, 2006, p. 183-193





Facultad de Ingeniería Civil

Perforadora de cadenas MD5090, Manual de CAT,

https://www.cat.com/es_MX.html

Subsurface Investigations. Paul W. Mayne, Ph.D., P.E., Barry R. Christopher, Ph.D., P.E. and Jason DeJong, Ph.D. Publication No. FHWA NHI-01-031, May 2002.

UNAM, 2012, “Estudio Geológico-Geotécnico del Ramal Camelinas del Libramiento Sur de Morelia”. Secretaría de Comunicaciones y Transportes Dirección General de Carreteras.

