

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área del proyecto “TRASVASE DE AGUA DE 3000 L/S DESDE EL EMBALSE DE TAIGUAIGUAY HASTA EL VALLE DEL RÍO TUCUTUNEMO” se encuentra en terrenos que pertenecen, desde el margen este del Embalse de Taguaiguay y Fila El Jacal (donde se encuentra la estación de bombeo), a las haciendas El Tamborón, El Jabillal y El Tamarindo, luego atraviesa terrenos parcelarios de tipo agrícola en dirección suroeste hasta encontrarse con la Carretera Nacional Cagua-Villa de Cura y entrar en terrenos propiedad de la hacienda Casupito y de la Agrícola de Las Guasduas, atravesando la Fila El Ancón, lugar de construcción del túnel trasvase de 828,4 m de longitud, PN-PS en anexo 1, descendiendo por la quebrada Peláez en dirección sureste, finalizando en el río Tucutunemo.

Sin embargo, la zona de estudio para este trabajo, comprende específicamente un área de 203Ha sobre la fila El Ancón y el túnel trasvase, desde la progresiva 0+000 hasta 0+200.

Para acceder al área de estudio a partir de la autopista Regional del Centro se toma el desvío La Encrucijada, para abordar la carretera nacional Cagua-La Villa, llegando así al campamento del Traspase Taguaiguay-Valles de Tucutunemo (Figura 1.2).

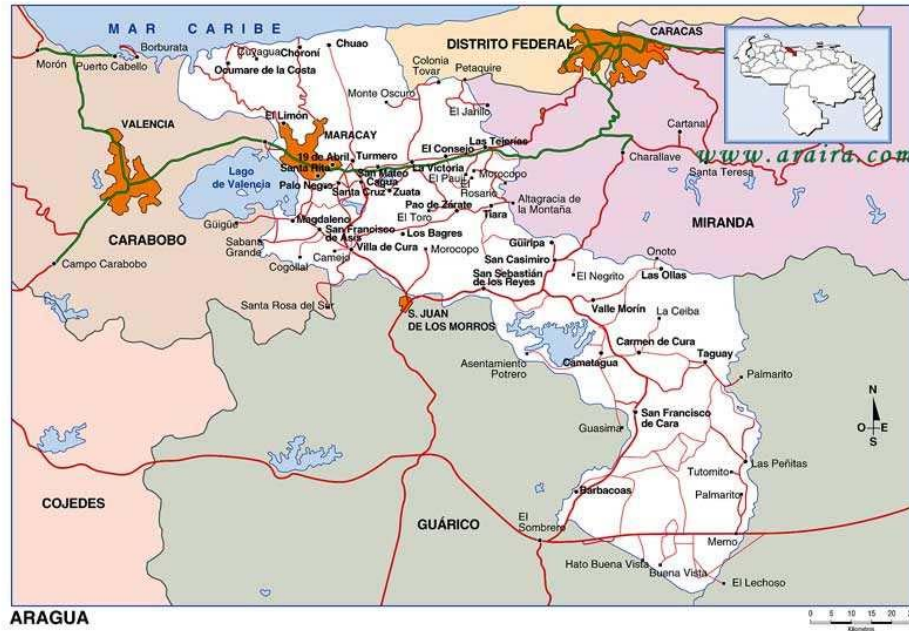


Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio, señalada en el recuadro rojo.

Fuente: www.geocities.com



Figura 1.2. Vías de acceso al área de estudio resaltada en el recuadro rojo.

Fuente: www.venezuela-online.net

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En toda obra de excavación subterránea es de suma importancia el estudio de los parámetros geológicos y geomecánicos de los macizos rocosos, ya que permite elaborar un correcto diseño y garantizar la estabilidad de las estructuras a construir.

El propósito de este trabajo es estudiar los parámetros geológicos y geomecánicos con el fin de evaluar el diseño del túnel de la Obra Trasvase Taguaiguay-Valles de Tucutunemo, debido a que la zona presenta una geología muy compleja, que puede producir cambios en cuanto a los diseños ya predeterminados.

JUSTIFICACION DEL PROYECTO

La obra forma parte del programa de “Saneamiento y Control del Nivel de Lago de Valencia”, enmarcado en una de las siete líneas de acción a ser ejecutadas por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, con el fin de controlar y mantener el equilibrio de los niveles de la cuenca y de la calidad de sus aguas. La obra en sí, está enfocada en el tratamiento de aguas servidas de las poblaciones de Maracay, Turmero, Cagua y Tapa-Tapa en la planta de tratamiento de Taguaiguay, y ser aprovechadas para el riego de las zonas aledañas a la laguna, y hacia el sur de la misma, específicamente en los valles del Río Tucutunemo, a través de una tubería de 1220 mm de diámetro que permitirá el transporte del agua en el subsuelo y así la recuperación del nivel freático en el mismo.

OBJETIVO GENERAL

Evaluación de los parámetros geológicos y geomecánicos para el análisis de problemas de estabilidad en la excavación del túnel de la obra Traslase Taguaguay-Valles de Tucutunemo, estado Aragua.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluación de los parámetros geológicos y geomecánicos del macizo rocoso presente en la excavación del túnel de la obra Traslase Taguaguay-Valles de Tucutunemo, estado Aragua, específicamente desde la progresiva 0+000 hasta 0+200.
- Determinación de la calidad de la roca excavada, a través de las clasificaciones del macizo rocoso según los siguientes autores: Hoek (2001), Bieniaswki (2000), Barton (1974) e ISRM (1981).
- Comparación de los parámetros geológicos y geomecánicos obtenidos en el campo con los parámetros tomados en cuenta para el diseño del túnel.

ANTECEDENTES:

De forma cronológica se presenta una visión general de los estudios regionales más importantes que se ha realizado acerca de la geología de la zona de estudio:

SHAGAM (1960), estudió la configuración geológica de la región de Aragua Central, enfatizando en la secuencia de rocas meta-volcánicas de Villa se Cura, dividiendo esta en cuatro formaciones: El Caño, El Chino, El Carmen y Santa Isabel; ordenadas de más antigua a más joven.

SEIDERS (1965), redefine la configuración del Grupo Villa de Cura en base a observaciones de campo, secciones finas y análisis modal. Llegando a la conclusión que el orden de las formaciones definidas antes por SHAGAM (1960) era totalmente inverso colocando a la Formación El Caño como la más joven y la Formación Santa Isabel como la más antigua, siendo esta última la que presentase condiciones de metamorfismo más altas pertenecientes a las facies de los esquistos verdes. Para explicar la existencia de la Formación Santa Isabel por encima de las demás, siendo esta la más antigua, establece que el grupo Villa de Cura está conformado por un anticlinal volcado.

MENÉNDEZ (1965), realiza un estudio geológico detallado del área de El Tinaco, centro-norte de Cojedes; en este trabaja cada una de las formaciones que conforman el área, agrupándolas en provincias geológicas o complejos: Provincia Meridional con las formaciones Opure, Guárico, Tiramuto, Mucaria, Paracotos, Querecual, Pilancones y Cojedes; Provincia Septentrional con las formaciones Las Placitas y Tucutunemo, Complejo de basamento de El Tinaco que lo conforman los esquistos de Tinapú y el Gneis de La Aguadita.

NAVARRO (1983), propone un modelo evolutivo por etapas, basándose en el modelo propuesto por TALUDAR y LOUREIRO (1982), ampliando el modelo original, luego de un estudio petrológico y petrogenético de las rocas de la Faja de Villa de Cura, en la Cordillera de la Costa.

El modelo se encuentra dividido en cinco etapas: 1) Protocontinente sur americano al sur con un océano al norte. 2) El protocontinente sufre una ruptura paralela a la costa en la sección norte del proto-continente, comenzando un proceso de subducción con polaridad norte, generando un foco de expansión en el borde del continente, creando un micro continente. 3) Casi la totalidad de la corteza oceánica entre el micro continente y el arco de isla recién creado, se ha consumido bajo éste. 4) Colisión arco-protocontinente y evolución de otro proceso de subducción en la cuenca marginal formada entre el micro continente y

el protocontinente con polaridad sur. 5) Colisión del nuevo arco volcánico con la masa conformada por el primer arco de isla y el micro continente.

URBANI, CHIRINOS & MARQUINA (1990), realizan un estudio detallado en la Faja de Villa de Cura, en la región de Guatopo, describiendo detalladamente la litología del Grupo Villa de Cura, la Formación Las Hermanas y el Complejo de Apa. Además establecen el grado de metamorfismo que alcanzan cada una de estas unidades, estableciendo para Villa de Cura unas facies del esquisto verdes; para la Formación Las Hermanas se encuentra una asociación de facies de prehnita-pumpellita, pumpellita-actinolita y esquistos verdes; y para el Complejo de Apa una serie de rocas ígneas ultramáficas pero que no evidencian metamorfismo, aunque algunas muestras de gabro presentan metamorfismo de bajo grado.

GRANDE (1995), realiza la caracterización geoquímica de la metalava del Miembro Los Naranjos, de la Formación Tucutunemo, llegando a la conclusión que se trata de basaltos alcalinos y toleíticos intraplaca con algunos de afinidad de arco volcánico, estableciendo una edad Paleozoico Tardío en base de una escasa evidencia fósil en cuerpos de mármol dentro de la unidad.

AUDEMARD (2000), realizó un estudio de las fallas cuaternarias en Venezuela

CAPÍTULO II

GEOGRAFÍA FÍSICA

RELIEVE

Debido a la homogeneidad en las características de la hoja “Villa de Cura” (6746-III-SO) se puede concluir que se presenta una sola unidad de montañas, la cual se divide en varias sub-unidades, descritas a continuación:

Sub-Unidad I

Representada por filas paralelas con valles intermontanos amplios, ocupa aproximadamente el 50 % de la hoja estudiada, con un desnivel topográfico de 600 metros.

Se encuentra ubicada en la zona central de la misma, delimitada por el Río Tucutunemo y hacia el extremo Sureste por la fila Naranjillos.

Las Filas principales que conforman esta unidad son: fila Montero, fila Los Aguacates, fila Macaya y fila Los Morritos, cuyas envolventes tienen una orientación preferencial N70°E y una geometría ligeramente sinuosa con un marcado quiebre en el extremo este de la hoja, específicamente en la fila Los Morritos, con una orientación N15°E.

Los valles entre estas montañas son amplios y asimétricos, siendo las laderas de las mismas asimétricas, presentado mayor pendiente las que fluyen hacia la quebrada Montero y las de menor pendiente las que fluyen hacia el río Tucutunemo.

Sub-Unidad II

Representada por un valle amplio donde se puede observar el poblado de Villa de Cura y cerros dispuestos sin un patrón definido con orientaciones variables N-S y N 50° E. Ocupa el 30% del total de la hoja y se encuentra ubicada en el extremo oeste de la misma, delimitada al este por el río Tucutunemo.

La topografía de los cerros es ondulada con pendiente no mayor a 34°, las crestas de los cerros son redondeadas, las laderas son asimétricas con pendientes convexas y con pequeños valles fluviales poco encajados. Entre las filas se encuentran la fila Embarcadero, fila El Toquito y la fila El Ancón, siendo en esta última donde se llevo acabo el proyecto del túnel.



Figura 2.1. Vista del relieve de la sub-unidad II

Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

Sub-Unidad III

Conformadas por filas pseudo paralelas con valles intermontanos angostos que ocupan el 20 % de la hoja, con niveles topográficos entre 800 y 600 metros de cota. Ubicada en el borde SE de la hoja.

Esta sub-unidad se encuentra representada por las filas Naranjillos e Higuero, cuyas envolventes tienen una orientación preferencial N10E y una geometría sinuosa.

Los valles en esta sub-unidad se encuentran más apretados, angostos y encajados que en la sub-unidad I, adaptándose a la topografía.

HIDROGRAFÍA

Se puede observar una única cuenca, cuyo drenaje principal es el río Tucutunemo, cuyas aguas fluyen de norte a sur, siguiendo una trayectoria curva hacia el oeste y con una geometría del drenaje irregular.



Figura 2.2. Canal natural del Río Tucutunemo

Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

El patrón de drenaje predominante en la hoja, puede clasificarse como dendrítico de alta densidad, lo cual indica que la litología de la zona es bastante homogénea.

De los tributarios que drenan a la cuenca principal se resalta La Quebrada Peláez, que se encuentra en la fila el Ancón atravesando la dirección del eje del túnel.

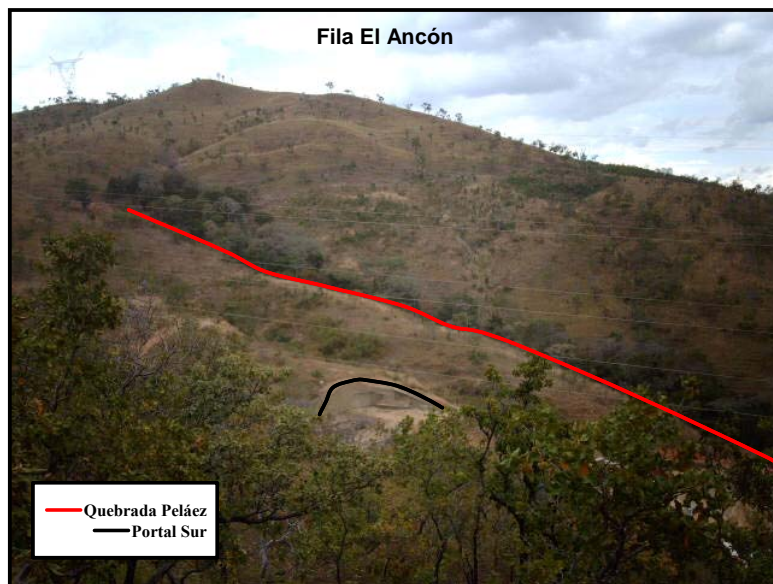


Figura 2.3. Quebrada Peláez, vista del Portal Sur

Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

El flujo de aguas superficiales a través de las laderas de la fila El Ancón se considera importante, dadas las características geomorfológicas y el complejo arreglo estructural del área. La gran cantidad de fallas representan zonas de fractura con materiales cizallados que permiten el paso de agua a través de los planos de debilidad de una manera más eficiente.

VEGETACIÓN

El área de estudio tiene una vegetación dominante de sabana, predomina la vegetación gramínea, herbácea, chaparrales y praderas secas, con pequeños arbustos, así como proliferaciones de bosque montano en las hondonadas del drenaje natural.



Figura 2.4. Vegetación característica de la zona de estudio, graminosa, herbácea con pequeños arbustos. Tomada por: Yanelvy Romero (2007)



Figura 2.5. Vegetación característica de la zona de estudio, bosque montano, vista del Portal Norte. Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

CLIMA

Según el Servicio de Meteorología del Ministerio de la Defensa en el Territorio Nacional se distinguen dos (02) períodos bien definidos, Verano o estación seca cuya duración es de Noviembre hasta Abril e Invierno o estación lluviosa de Mayo a Octubre.

La temperatura media anual varía entre 25 grados y 27 grados centígrados, con una precipitación promedio de 1000mm, en las zonas montañosas la temperatura tiene un promedio de 19 grados centígrados. Se caracteriza por presentar un clima tropical de sabana.

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA REGIONAL

SISTEMA DE FALLAS PRINCIPALES

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de las napas de la serranía del interior, específicamente la Napa Caucagua-El Tinaco, al sur del Sistema de Fallas de La Victoria (VE-08a, b, c, d, e en Figura 3.1) y al norte del Sistema de Fallas de Río Guárico (VE-09a, b en Figura 3.1). Ambos sistemas de fallas poseen movimiento dextral generalizado y la inclinación de la mayoría de las fallas que los conforman es sub-vertical. Es por lo tanto, una zona intensamente deformada. Las características y descripciones de estos sistemas se especifican a continuación, citando la información del trabajo de AUDEMARD (2000):

Falla de río Guárico: Esta falla cruza la Cordillera de La Costa en dirección oblicua hacia el sureste, cortando rocas metamórficas mesozoicas, extendiéndose desde la cuenca del lago de Valencia hasta el cinturón de corrimiento ubicado al frente de la napa de la cordillera de la Costa en Altigracia de Orituco, estado Guárico. La falla está compuesta de dos secciones transcurrentes (mostradas en la Figura 3.1 como VE-09a, b) conectadas por una falla de corrimiento, actuando como una rampa lateral. La falla posee una longitud de 120 km con un rumbo promedio $N71^{\circ} W \pm 19^{\circ}$.

La sección más cercana al área de estudio es la norte (VE-09a) que se extiende desde el lago de Valencia hasta San Juan de los Morros con una longitud de 33 km aproximadamente y un rumbo promedio de $N59^{\circ} W \pm 2^{\circ}$. El sentido del movimiento es dextral, con una componente normal releasing stepover cerca del pueblo de Villa de Cura, estado Aragua. Despliega numerosos rasgos geomorfológicos característicos de fallas transcurrentes tales como sillas de falla, trincheras, valles y drenajes lineales, etc. En Villa de Cura la falla forma una

pequeña cuenca *pull-apart* de 2 km de ancho en una zona de relevo. La tasa de movimiento es de 0.3 mm por año.

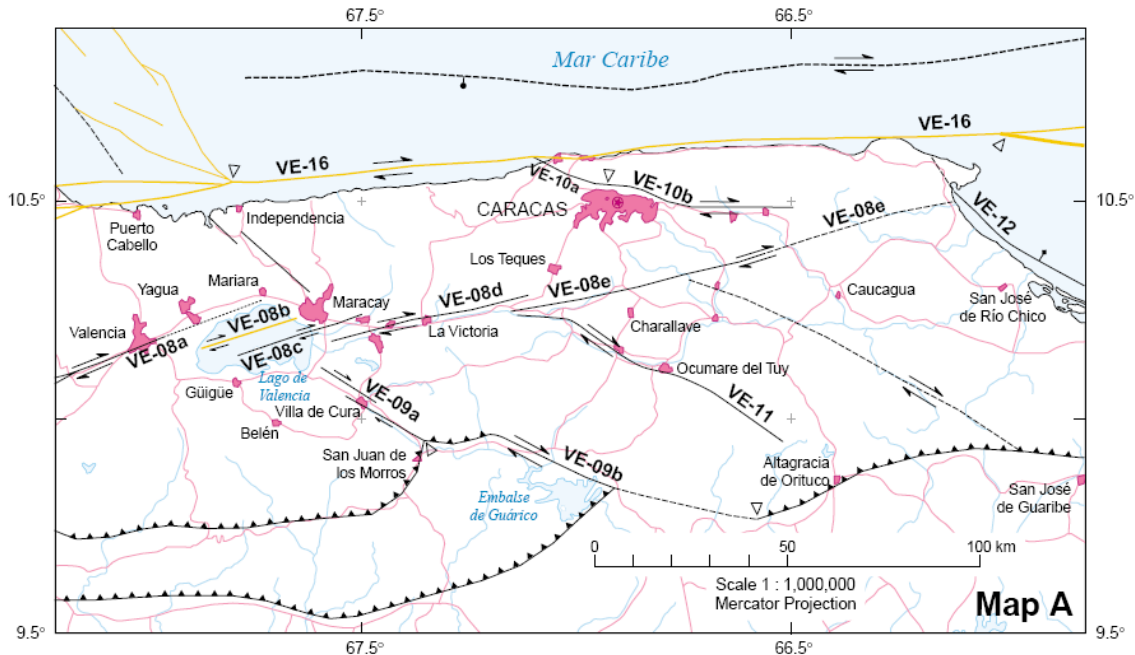


Figura 3.1. Mapa estructural con representación de fallas cuaternarias en la zona nor-central de Venezuela. Las fallas de La Victoria (VE-08d) y de Río Guárico (VE-09a) se encuentran al norte y sur, respectivamente, de la zona de estudio.

Fuente: Audemard (2000)

Sistema de Falla de la Victoria (VE-08): Se extiende con sentido este por 350km desde el sur de Barquisimeto hasta cabo codera. Esta cruza la cordillera de la Costa al norte de Venezuela, cortando principalmente rocas metamórficas mesozoicas (napas) emplazadas durante la colisión oblicua entre el arco de Grenada y el margen pasivo de Suramérica. El sistema de fallas bordea la cuenca del río Tuy y pasa a través de la cuenca del lago de valencia. Con un rumbo promedio $N78E \pm 17^\circ$ en 5 secciones (VE-08a, b, c, d, e. ver figura 3.1).

La sección VE-08d se extiende entre los pueblos de Maracay (en el oeste) y las Tejerías (en el Este), su longitud es de 52km y rumbo promedio $N77E \pm 3^\circ$. Inclinación promedio: sub-vertical y sentido de movimiento: lateral dextral.

Expresión Geomorfológica: Rasgos geomorfológicos en rocas metamórficas mesozoicas al este de Maracay: Esto incluye desplazamiento lateral destal de drenajes de ríos, trincheras (grabens), pop-ups, valles y drenajes lineales (tal como el valle de Aragua).

La tasa de movimiento es de 0.55mm por año. Esto es basado en desplazamiento destal de 1.2km en drenajes.

ROCAS METAMÓRFICAS

Las descripciones de las unidades metamórficas en el área se han tomado de CIEN (2007), la ubicación y extensión de las mismas ha sido delimitada a través de la cartografía geológica presentada por URBANI & RODRÍGUEZ (2004) y HACKLEY *et al.* (2005).

FILITA DE TUCUTUNEMO (PALEOZOICO TARDÍO)

Extensión Geográfica: Se extiende de este a oeste, desde la región de Los Teques-Cúa en el estado Miranda, hasta la región de Tinaquillo en el estado Cojedes, atravesando parte de los estados Aragua y Guárico. La figura 3.2 muestra la extensión de la unidad en las cercanías del área de estudio, en los cerros al sur y este de la laguna.

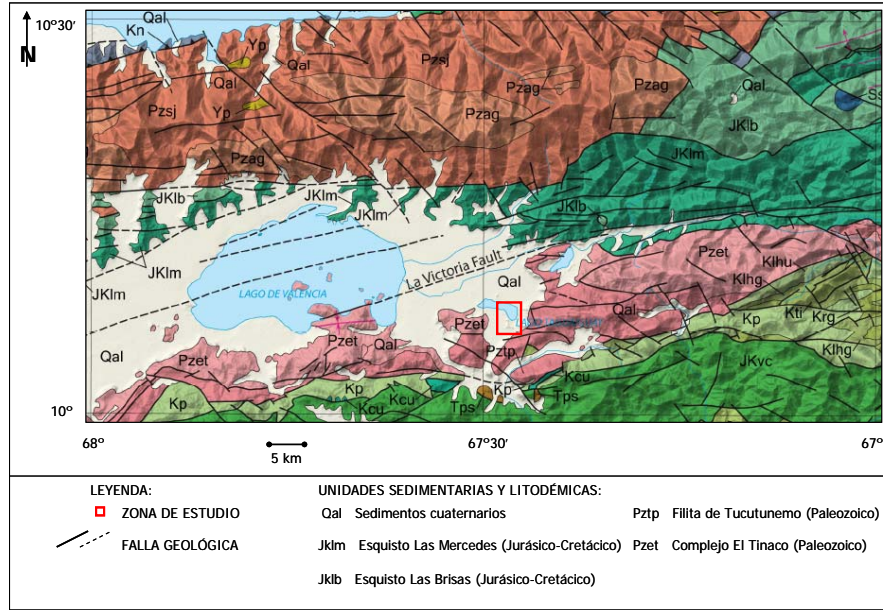


Figura 3.2. Mapa geológico de las zonas aledañas al área de estudio (recuadro rojo). Nótese la distribución de los sedimentos, en color gris claro en las cercanías del Lago de Valencia, debido a la escala del mapa se observa que se ha generalizado la extensión de los sedimentos incluyendo a los cerros ubicados al sur y oeste de la laguna. Fuente: HACKLEY *et al.* (2005)

Descripción Litológica: Esta unidad consiste principalmente en filitas gráficas arenosas que varían a meta areniscas y limolitas cuarzo feldespáticas, encontrándose también cantidades menores de areniscas de grano grueso (asperones) y conglomerados cuarzo-carbonáticos. Una zona discontinua pero prominente de mármol negro, de grano fino, asociada a un metaconglomerado carbonático, se ubica cerca de la parte superior de la secuencia y cerca de la base de la misma, aparecen algunas capas delgadas de metalava y metatoba básicas afáníticas de color verde.

Localidad Tipo: La localidad tipo de esta unidad se encuentra ubicada en el río Tucutunemo y colinas adyacentes al este de Villa de Cura, estado Aragua. (Hoja 6745, esc. 1:100.000, Cartografía Nacional).

Espesor: Shagam (1965) estima un espesor de 350m, pero debido al replegamiento y naturaleza de los contactos, esta cifra, al igual que la dada a otras

unidades metamórficas de la cordillera de la Costa, debe tomarse solamente de carácter referencial y aparente.

Contactos: De acuerdo con Shagam (1960), el contacto superior con la Formación Paracotos es de falla, al igual que su contacto inferior con otras formaciones. Según el mapa geológico de Beck (1985, 1986) los contactos son de fallas (tanto de ángulo alto como de corrimiento) con las unidades constituyentes de su Napa de Loma de Hierro, mientras que pueden ser tanto estratigráficos como tectónicos, con otras unidades de la Napa de Caucagua - El Tinaco.

Edad: Cretáceo medio a Cretáceo tardío (?). Generalmente fue considerada de edad Cretácico, e inclusive Beck (1985, p. 203, 1986) aporta una edad K-Ar de 73,5 Ma que interpreta como una edad metamórfica posterior. De acuerdo con Benjamini *et al.*, las calizas de la unidad se asignan al Paleozoico tardío (Pérmico).

Navarro *et al.* (1987, 1988) al discutir sobre esta edad paleozoica, dicen que "la presencia de estos mármoles en la secuencia de la Formación Tucutunemo no indica necesariamente una edad paleozoica para esta unidad ya que estos cuerpos pueden representar olistolitos o bien bloques emplazados tectónicamente durante la orogénesis caribeana". Posteriormente, uno de los coautores del trabajo anterior (Ostos, 1990, p. 22), acepta la edad paleozoica, corroborada por Grande (1995)

Hasta que haya disponible mayor información, se recomienda utilizar una edad tentativa Paleozoico Tardío.

Correlación: La parte inferior (Miembro Los Naranjos) se correlaciona con las metavolcánicas de Las Placitas, Aragüita, Rocas de Conoropa y Pilancones (Menéndez, 1966). El resto de la unidad, se considera parcialmente equivalente a las formaciones Urape y Muruguata. Navarro *et al.* (*op. cit.*), son de la opinión que la Formación Tucutunemo es equivalente a la Formación Paracotos, al norte del Arco Magmático de Tiara y a las formaciones Garrapata y Escorzonera, al sur del mismo. Por otra parte Benjamini *et al.* (1986-a, b) quienes

proponen una edad paleozoica, la correlacionan con la Formación Palmarito de la Cordillera de Mérida.

Ambiente Tectónico y Petrogénesis: De acuerdo con Shagam (*op. cit.*), la presencia de calizas de origen bioquímico y una proporción notable de rocas de grano grueso, son factores que parecen indicar una sedimentación de agua llana, del tipo de plataforma, agregando que el ambiente y el origen depositacional durante el tiempo, Tucutunemo parece haber sido una continuación de los producidos durante la sedimentación de la Formación Las Mercedes, incluyendo la repetición de capas conglomeráticas finas del tipo Charallave. El mismo autor, apunta que las rocas fueron afectadas por un metamorfismo regional de bajo grado, pero lo suficientemente intenso como para causar la destrucción de los restos orgánicos, fragmentos de los cuales, se han observado frecuentemente en los mármoles de la unidad.

Navarro *et al.* (1983), consideran que la Formación Tucutunemo corresponde a la sedimentación profunda (anóxica) en zonas, de un talud incipiente que bordeaba el arco magmático de Tiara (sur), donde facies pelágicas-hemipelágicas, representadas por filitas oscuras, esquistos grafitosos y mármoles oscuros, se intercalan con el producto de sedimentación rápida, como lo son los conglomerados polimícticos que representan rellenos de canal y flujos gravitacionales de detritos, provenientes de una plataforma muy incipiente, desarrollada alrededor del arco magmático mencionado con anterioridad. Por otra parte, Benajmini *et al.* (1987), al asumir una edad Paleozoico para esta unidad, concluyen en que la misma representa el basamento autóctono expuesto en una ventana tectónica, o que constituye un alóctono (junto con el Complejo El Tinaco) dentro de un modelo de terreno exótico.

Los mayores cuerpos de mármol ubicados en la zona de Cagua - Villa de Cura, Aragua y los del oeste de Charallave, Miranda, presentan una topografía kárstica bien desarrollada.

CAPÍTULO IV

MECÁNICA DE ROCAS

CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS

Esta es una tarea de observación, mediciones y ensayos para obtener parámetros cuantitativos (geomecánicos) útiles al diseño ingenieril. Este proceso además se desarrolla a lo largo de todas las etapas del avance del proyecto, desde el diseño hasta su construcción y operación. La caracterización apropiada de los macizos rocosos, además de ser la base para el diseño de las obras, contribuye a la optimización del método constructivo, da vía al mejoramiento del macizo y permite la programación de observaciones durante el funcionamiento de las obras.

Los sistemas de clasificación de los macizos rocosos que a continuación se presentan, están basados principalmente en las propiedades geomecánicas del medio, las cuales permiten obtener los parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo, y así poder estimar los sostenimientos necesarios en un túnel.

El Índice de Resistencia Geológica (GSI): Creado por Hoek en 1994 es un índice de calidad geomecánica para los macizos rocosos cuyo rango numérico, comprendido entre 0 y 100, se basa en la identificación y clasificación en campo de dos de las características físico-mecánicas de un macizo rocoso:

- La macroestructura, y
- La condición de las superficies de las discontinuidades.

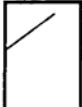





Tal como lo indica Hoek (2004), el GSI ha sufrido diversas modificaciones desde su versión original; siendo una de éstas la publicada en 1998 por Hoek, Marinos y Benissi, donde se amplía el rango del GSI en 5 unidades hacia abajo y 5 unidades hacia arriba, para poder incluir macizos rocosos de calidad extremadamente mala, como los encontrados en algunos túneles en Venezuela.

Hoek (2000) sugiere hacer referencia a un rango y no a un valor único del GSI, también sugiere, que para macizos rocosos caracterizados con un $GSI > 25$ es más conveniente estimar este valor a partir del RMR de Bieniawski, sin incluir el factor de corrección por orientación de las diaclasas y considerando el frente seco (RMR 89). En macizos rocosos de baja calidad con $GSI < 25$, se estima el GSI en base a observaciones de la apariencia física del macizo rocoso, ya que en estas circunstancias es difícil obtener núcleos intactos de rocas mayores a 10 cm para poder determinar el valor del RQD. La correlación entre estos dos sistemas de clasificación es la siguiente:

$$GSI = RMR_{(89)} - 5$$

Los datos de entrada para la estimación de las propiedades del macizo rocoso constan de medidas de la resistencia compresiva uniaxial (σ_c) y de una constante del material (m_i), esta última relacionada con las propiedades de fricción de la roca. Idealmente, estas propiedades básicas deberían calcularse en el laboratorio, descrito por Hoek y Brown (1997), sin embargo en muchos casos, la información es requerida antes de que las pruebas del laboratorio hayan sido completadas. Por lo que la estimación de estos parámetros se puede obtener de la siguientes tabla 4.1, de la versión de Truzman, 1999,

Tabla 4.1. Estimación del GSI.

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) PARA LAS ROCAS METAMORFICAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA DE VENEZUELA		CONDICION SUPERFICIE DE DIACLASAS				
		MUY BUENA Muy rugosa, superficies cerradas sin meteorización	BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura < 1mm, rellenos duros	MEDIA Ligeramente rugosa, moderadamente meteorizada, abertura 1-5 mm, rellenos duros y blandos	MALA Lisa, superficies muy meteorizadas con abertura > 5mm, predominan los rellenos blandos	MUY MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas y abiertas con rellenos blandos
ESTRUCTURA		DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE				
	INTACTA O MASIVA – macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación <i>Ej: Gneis, cuarcita o mármol con un sistema de diaclasas poco frecuente</i>	90	80	N/A	N/A	N/A
	POCO FOLIADA – macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas <i>Ej: Cuarcita fracturada intercalada ocasionalmente con esquistos y/o filitas</i>		70			
	MODERADAMENTE FOLIADA – macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes <i>Ej: Intercalaciones de esquistos y/o filitas con mármoles fracturados en proporción similar</i>		60			
	FOLIADA – macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas intercaladas ocasionalmente con mármoles lenticulares</i>		50			
	MUY FOLIADA – macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas sin la presencia de mármoles, gneises o cuarcitas</i>		40			
	BRECHADA/CIZALLADA – macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide. <i>Ej: Brecha de falla</i>	N/A	N/A			
					30	
					20	
					10	
					5	

Adaptado por M. Truzman (1.999) de Hoek y Brown (1.997) para las Rocas Metamórficas de la Cordillera de La Costa de Venezuela

Fuente: Pietro De Marco (1995)

Índice de la Designación de la Calidad de la Roca (RQD): Representa la relación entre la suma de las longitudes de los fragmentos de testigo mayores de 10 cm y la longitud total del tramo considerado:

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de los trozos de testigo} > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total}} \times 100 \%$$

Para la estimación del RQD se consideran sólo los fragmentos o trozos de testigos de material fresco, excluyéndose los que presentan un grado de alteración importante. La medida del RQD se debe realizar en cada cambio litológico, siendo recomendable que la longitud de maniobra no exceda de 1.5 m. El diámetro mínimo de los testigos debe ser de 48 mm. En la tabla 4.2 se describe la calidad de la roca en función del índice de RQD

Tabla 4.2. Índice RQD

RQD %	CALIDAD
<25	Muy Mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Media
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy Buena

Fuente: González de Vallejo (2002)

Índice de Calidad RMR (rock mass rating): Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1898, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permiten a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y sostenimiento en túneles. Dicha clasificación toma en cuenta los parámetros geomecánicos siguientes:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.

- Grado de facturación en términos del RQD.

- Espaciado de las discontinuidades.

- Condiciones hidrogeológicas.

- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Para aplicar la clasificación RMR se divide el macizo rocoso en zonas o tramos que presentan características geológicas más o menos uniformes, en las que se lleva a cabo la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades. Para calcular el índice RMR correspondiente a cada una de las zonas se sigue el procedimiento señalado en la tabla 4.3.

Una vez sumadas las puntuaciones que resultan de aplicar los cinco parámetros antes mencionados, se efectúa la corrección por orientación de discontinuidades, expuesta en la tabla 4.4, y se obtiene un valor numérico que varía entre 0 y 100, siendo de mejor calidad el macizo rocoso que se aproxime a la numeración 100, con el que se clasifica finalmente el macizo rocoso, referido en cinco clases, presentadas en la tabla 4.5.

Tabla 4.3. Clasificación de macizo rocoso (Bieniawski, 1989) RMR

RESISTENCIA DE LA ROCA SANA	Ensayo de Carga Puntual Kg/cm ²	>100	40-80	20-40	10-20	Compresión Simple Kg/cm ²		
	C. Simple Kg/cm ²	>2500	1000-2500	500-1000	250-500	50-250	10-50	10
PUNTAJACIÓN		15	12	7	4	2	1	0
RQD		90% 100%	75% 90%	50% 75%	25% 50%	<25%		
PUNTAJACIÓN		20	17	13	8	3		
ESPACIADO		>2	0,6-2m	0,2-0,6m	0,06-0,2m	<0,06m		
PUNTAJACIÓN		20	15	10	8	5		
ESTADO DIACLASAS	CONTINUIDAD DE DIACLASA	<1m	1-3m	3-10m	>10m			
	PUNTAJACIÓN	6	4	2	0			
	ABERTURA DIACLASAS	cerrada	<0,1mm	0,1-1mm	1-5mm	>5mm		
	PUNTAJACIÓN	6	5	4	1	0		
	RUGOSIDAD DIACLASA	Muy Rugosa	Rugosa	Lig. Rugosa	Lisa	Espejo de Falla		
	PUNTAJACIÓN	6	5	3	1	0		
	RELLENO DIACLASAS	Sin Relleno	Duro<5mm	Duro>5mm	Blando<5mm	Blando>5mm		
	PUNTAJACIÓN	6	4	2	2	0		
	METEORIZACIÓN DIACLASAS	Sana	Leve Meteoriz.	Mod. Meteoriz.	Muy Meteoriz.	Compl. Meteoriz.		
	PUNTAJACIÓN	6	5	3	1	0		
HIDROGEOLOGÍA		Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua Fluyendo		
PUNTAJACIÓN		15	10	7	4	0		

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 4.4. Corrección por la orientación de las discontinuidades

CORRECCIÓN POR DISCONTINUIDADES						Buzamiento 0-20° cualquier dirección
DIRECCIÓN PERPENDICULAR EJE TUNEL				DIRECCIÓN PARALELA EJE TUNEL		
Excavación CON buzamiento		Excavación CONTRA buzamiento		TUNEL		
Buz 45-90°	Buz 20-45°	Buz 45-90°	Buz 20-45°	Buz 45-90°	Buz 20-45°	
Muy favorable	Favorable	Muy desfavorable	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Media
0	-2	-15	-10	-12	-5	-5

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 4.5. Calidad del macizo rocoso.

CLASIFICACIÓN					
CLASE	I	II	III	IV	V
CALIDAD	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
VALOR RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 4.6. Características geotécnicas

CARACTERÍSTICAS					
CLASE	I	II	III	IV	V
TIEMPO MANTENIMIENTO Y LUZ	20 años 15m luz	1año 10m luz	1semana 5m luz	10 horas 2,5m luz	30 min 1m luz
COHESIÓN	<4 Kg/cm ²	3 a 4 Kg/cm ²	2 a 3 Kg/cm ²	1 a 2 Kg/cm ²	<1 Kg/cm ²
ANGULO DE FRICCIÓN	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	15°

Fuente: González de Vallejo (2002)

ÍndiceQ: Desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite estimar parámetros geotécnicos del macizo y diseñar sostenimiento para túneles y cavernas subterráneas. El índice Q está basado en una evaluación numérica de seis parámetros dados por la expresión:

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

Donde:

RQD = índice de fracturación.

J_n = índice de diaclasado que indica el grado de fracturación del macizo rocoso.

J_r = índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas.

J_a = índice que indica la alteración de las discontinuidades.

J_w = coeficiente reductor por la presencia de agua.

SRF (stress reduction factor) = coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Los tres factores de la expresión representan:

(RQD)
-----: el tamaño de los bloques
(J_n)

(J_r)
----- : la resistencia al corte entre los bloques
(J_a)

(J_w)
----- : la influencia del estado tensional
(SRF)

A continuación se presentan cada una de las tablas que contienen los seis parámetros que clasifican al índice Q:

Tabla 4.7. Valoración del índice de la designación de la calidad de la roca (RQD)

Calidad del Testigo RQD		RQD (%)
A	Calidad Muy Mala	0 - 25
B	Calidad Mala	25 - 50
C	Calidad Media	50 - 75
D	Calidad Buena	75 - 90
E	Calidad Excelente	90 - 100
Notas: Cuando se obtienen valores del RQD inferiores a 10 (incluyendo el cero), se toma un valor nominal de 10 para calcular el índice Q. Los intervalos de 5 unidades para RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.		

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 4.8. Valoración del índice de diaclasado (Jn)

Índice de Diaclasado		Jn
A	Roca masiva, sin diaclarar o con fisuración escasa	0,5 - 1,0
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15
J	Roca triturada, terrosa	20
Notas: En intersecciones de túneles, se utiliza la expresión (3Jn). En las bocas de los túneles, se utiliza la expresión (2Jn)		

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 4.9. Valoración del índice de rugosidad de las discontinuidades (Jr)

Índice de Rugosidad de las Discontinuidades		Jr
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad.		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm.		
A	Diaclasas discontinuas.	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares.	3
C	Diaclasas onduladas lisas.	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas.	1,5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares.	1,5
F	Diaclasas planas, lisas.	1,0
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas.	0,5
Nota: Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y escala intermedia, por este orden.		

c) No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad.	1,0
J	Zona arenosa, de grava o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad.	1,0
Nota: Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 metros se debe aumentar el índice Jr, en una unidad.		
En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor Jr=0,5.		

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 4.10. Valoración del índice de alteración de las discontinuidades (Ja)

Índice de Alterción de las Discontinuidades		Φr aprox.	Ja
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios).			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable cuarzo.		0,75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas.	25°-35°	1,0
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	2,0
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla(no blanda).	20°-25°	3,0
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc. Y pequeñas cantidades de arcillas expansivas.	8°-16°	4,0
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10 cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc	25°-30°	4,0
H	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5mm)	16°-24°	6,0
C	Sobreconsolidación media o baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm)	12°-16°	8,0

J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir montmorillonita (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm). El valor de J_a depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de arcillas ex.	6°-12°	8-12
c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (reellenos de mineral de gran espesor)			
K L M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver clases G,H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	6,8 ó 8-12
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles	-	5,0
O P R	Zonas o bandas continuas de arcilla de espesor grueso (ver clases G,H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	10,13 ó 13-20
Nota: Los valores expresados para los parámetros J_v y J_a se aplican a las familias de diaclasas o discontinuidades que son menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al corte (esta resistencia puede evaluarse mediante la expresión: $T = \sigma \tan^{-1}(J_r/J_a)$)			

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 4.11. Valoración del factor de reducción por la presencia de agua (J_w)

Factor de Reducción por la Presencia de Agua	Presión de Agua (Kg/cm ²)	J_w
Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 L/min, de forma localizada.	<1	1,0
Afluencia o presión medias, con lavado ocasional de los reellenos de las discontinuidades.	1-2,5	0,66
Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno.	2,5-10	0,5
Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los reellenos de las diaclasas.	2,5-10	0,33
Afluencia, excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo.	>10	0,2-0,1
Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable.	>10	0,1-0,05

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 4.12. Valoración de las condiciones tensionales de la roca (SRF)

Condiciones Tensionales de la Roca (Stress Reduction Factor)				SRF
a) Las zonas débiles interceptan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando.				
A	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta(a cualquier profundidad).			10
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación ≤ 50 m).			5
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50 m).			2,5
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad).			7,5
E	Zonas de fracturas aisladas en roca competente (libres de arcillas) (profundidad de la excavación ≤ 50 m)			5,0
F	Zonas de fracturas aisladas en roca competente (libres de arcillas) (profundidad de la excavación > 50 m).			2,5
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad).			5,0
Nota: Se reducen los valores expresados del SRF entre un 25-50% si las zonas de fracturas sólo ejercen cierta influencia pero no intersectan a la excavación.				
b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas.		$\sigma\theta/\sigma_1$	$\sigma\theta/\sigma_2$	SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas.	>200	$<0,01$	2,5
I	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables.	200-10	0,01-0,3	1
J	Tensiones elevadas, estructura muy compactada. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales.	10-5	0,3-0,4	0,5-2
K	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas.	5-3	0,5-0,65	5-50
L	Lajamiento y estillado de la roca después de algunos minutos en rocas masivas.	3-2	0,65-1	50-200
M	Estillados violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas.	<2	>1	200-400

Notas: Si se comprueba la existencia de campos tensionales fuertemente anisotrópicos; cuando $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, se disminuye el parámetro σ_c hasta $0,75\sigma_c$. Si $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, se tomará en vez de σ_c el valor $0,5\sigma_c$ donde σ_c es la resistencia a compresión simple, σ_1 y σ_3 son las tensiones principales mayor y menor, respectivamente, y σ_θ es la tensión tangencial máxima (estimada a partir de la teoría de la elasticidad).

En aquellos casos en los que la profundidad de la clave del túnel es menor que la anchura de la excavación. Se sugiere aumentar el valor del factor SRF entre 2,5 y 5 unidades (véase clase H).

c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas.		σ_θ/σ_x	SRF
N	Presión de deformación baja.	1-5	5-10
O	Presión de deformación alta.	>5	10-20
Nota: Los fenómenos de deformación o fluencia de rocas suelen ocurrir a profundidades; $H > 350Q^{1/3}$, la resistencia a compresión del macizo rocoso puede estimarse mediante la expresión: $q(\text{Mpa}) \approx 7 \cdot \gamma \cdot Q^{1/3}$, donde γ es la unidad de densidad de la roca en g/cm^3 .			
d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.		SRF	
P	Presión de expansión suave.	5-10	
Q	Presión de expansión intensa.	10-15	

Fuente: González de Vallejo (2002)

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

Tabla 4.13. Clase de roca en base al índice Q según BARTON, 1974

CLASE DE ROCA		ÍNDICE Q
A	Excepcionalmente Buena	400 - 1000
	Extremadamente Buena	100 - 400
	Muy Buena	40 - 100
B	Buena	10 - 40
C	Media	4 - 10
D	Mala	1 - 4
E	Muy Mala	0,1 - 1
F	Extremadamente Mala	0,01 - 0,1
G	Excepcionalmente Mala	0,001 - 0,01

Fuente: González de Vallejo (2002)

CAPITULO V

CARACTERIZACIÓN EN CAMPO DE LOS MACIZOS ROCOSOS

La caracterización en campo de los macizos rocosos va a tener como objetivo el conocimiento de las propiedades y características geotécnicas de los materiales rocosos, para ello se puede sistematizar una serie de etapas que nos permiten la descripción de los afloramientos a estudiar, según González de Vallejo (2002), de la forma siguiente:

- Descripción de las características generales del afloramiento: Incluye la identificación, condiciones y características generales del afloramiento y cada uno de sus componentes: rocas, suelos zonas con agua, discontinuidades, etc.
- División en zonas y descripción general de cada zona: En lo que respecta a la división de las zonas las mismas estarán sujetas a la heterogeneidad de los materiales y estructuras que conformen el macizo rocoso, de la extensión del afloramiento y del grado de detalle y finalidad de la investigación. La descripción de cada zona contendrá las características y propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa y de las discontinuidades; siendo los aspectos y factores a describir los presentes en el tabla 5.1.
- Descripción detallada de cada zona: Contiene las descripciones de la matriz rocosa y las discontinuidades, ver tabla 5.1.
- Descripción de los parámetros del macizo rocoso: Va a depender de los datos recolectados en cada afloramiento; se establecerán los parámetros relacionados al número de familias de discontinuidades, orientación y características representativas de cada una de ellas, determinando tamaño y forma de los bloques que integran al macizo rocoso, grado de facturación, etc., así como el grado de meteorización y

las propiedades hidrogeológicas, las cuales también influyen en el comportamiento del macizo.

- Caracterización global y clasificación geomecánica del macizo rocoso: La caracterización global del macizo rocoso proporciona las condiciones geológicas y geomecánicas del mismo, siendo esta la etapa final del proceso descriptivo. Partiendo de los datos proporcionados de esta última fase se emplean las clasificaciones geomecánicas, que suministran información sobre la calidad y resistencia del macizo, así como datos cuantitativos para su aplicación en los distintos fines constructivos (túneles, taludes, etc.).

Tabla 5.1. Características y propiedades a describir en campo para la caracterización del macizo rocoso.

Ámbito de Estudio	Característica o Propiedad	Método	Clasificación
Matriz Rocosa	Identificación	Observaciones de visu	Clasificación geológica y geotécnica
	Meteorización	Observaciones de visu y con lupa	Índices estándar
	Resistencia	Índices y ensayos de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
Discontinuidades	Orientación	Medida directa con brújula de geólogo	
	Espaciado	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Continuidad		
	Rugosidad	Observaciones y medidas de campo	Comparación con perfiles estándar
	Resistencia de las paredes	Martillo de Schdmit Índice de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
	Abertura	Observaciones y medidas de campo	Índices estándar
	Relleno		
Filtraciones			
Macizo Rocoso	Número de familias de discontinuidades	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Tamaño de bloque		
	Intensidad de fracturación		
	Grado de meteorización	Observaciones de campo	Clasificaciones estándar

Fuente: González de Vallejo (2002)

DESCRIPCIÓN GENERAL Y ZONIFICACIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

La descripción geológica general es el primer paso en el estudio de un macizo rocoso, en la cual se recomienda seguir la siguiente secuencia, según González de Vallejo (2002):

Identificación: Se debe indicar la localización, situación geográfica, accesos, extensión, características geométricas, etc.

Descripción: Consiste en la descripción geológica general, indicando los siguientes aspectos: formación y edad geológica, litologías, estructuras observables a gran escala (fallas, pliegues, corrimientos, etc.), rasgos estructurales generales (macizo estratificado, fallado, fracturado, masivo, etc.), zonas alteradas y meteorizadas y espesores de las mismas, presencia de agua, etc. También se recomienda tomar fotografías y dibujar esquemas, para facilitar la descripción de las zonas a estudiar.

División en Zonas: Las mismas dependerán de los criterios litológicos y estructurales que se consideren más o menos homogéneos.

CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS IDENTIFICADAS

Ya identificadas las zonas de estudios, se debe hacer una caracterización detallada de la matriz rocosa presente en cada una de las zonas a estudiar, describiendo los siguientes aspectos en campo, según González de Vallejo (2002):

Identificación de la Litología: Según el tipo de litología presente se debe identificar los tipos de roca que se encuentran en las distintas zonificaciones, las mismas se pueden nombrar utilizando la clasificación propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) expuesta en la tabla 5.2. No es necesario hacer una descripción geológica exacta, basta con indicar los principales minerales observables a simple vista, su dureza, color, tamaño de grano, y de que manera se presentan dentro de la zona estudiada.

Tabla 5.2. Clasificación de las rocas para usos geotécnicos

Tamaño de grano, mm	Rocas estratificadas (mayormente sedimentarias)				Rocas con foliación		Rocas con estructura masiva y textura cristalina (mayormente ígneas)				
	Descripción por tamaño de grano	CONGLOMERADO Cantos rodados, bolos y gravas cementadas por una matriz fina	>50% de los granos son carbonatados	>50% de los granos son volcánicos de grano fino	ROCAS SALINAS	Descripción por tamaño de grano	GNEISS Foliación bien desarrollada frecuentemente muy espaciada.	Descripción por tamaño de grano	PEGMATITA DIORITA Estas rocas a veces son porfíricas y entonces se describen como granitos porfíricos.	Piroxenita	
Mayor de 20	R U D I T A S	BRECHA Fragmentos irregulares de roca en una matriz fina	C A L I Z A	Fragmentos de productos volcánicos en una matriz fina. Granos redondeados angulosos. BRECHA VOLCANICA	Halita Anhídrita	MARMOL	MIGMATITA Foliación irregular. Esquistos y gneises mezclados.	GRUESO	GRANITO DIORITA Estas rocas a veces son porfíricas y entonces se describen como granitos porfíricos.	Piroxenita	
20								GRUESO	GABRO	Peridotita	
6					Yeso						
2											
0,6	A R E N I T S	ARENISCA Granos angulosos o redondeados, cementados por minerales de arcilla, carbonáticos o de hierro. Cuarcita: granos de cuarzo y cemento silíceo. Arcosa: mayoría de gravas feldespáticas. Grauvaca: diversos fragmentos de roca.	Y D O L O M I A	Ceniza volcánica cementada. TOBA		CORNEANA	ESQUISTO Foliación ondulada bien desarrollada, generalmente abundante mica. FILITA Foliación ligeramente ondulada	MEDIO	MICRO-GRANITO DIORITA A veces son porfíricos y se describen como porfíricos Dolerita		
0,2											
0,06											
0,002	L U T I T A S	MASIVAS LIMOLITA ARCILLITA	C A R B O N A T A S	TOBA de grano fino TOBA de grano grueso				FINO	RIOLITA ANDESITA BASALTO A veces son porfíricos y se describen como porfíricos		
Menor de 0,002		Silex: aparece como bandas o nódulos en la creta. Chert: aparece como nódulos y bandas en limolitas y calcarenitas. Cemento granular excepto rocas amorfas.			CARBON LIGNITO		MILONITA Asociado a zonas de falla, principalmente en áreas ígneas y metamórficas.		Obsidiana Vidrio volcánico		
Amorfo o Cripto cristalino						CRISTALINAS					
		SILICEAS	SILICEAS	SILICEAS		SILICEAS	Principalmente SILICEAS		Claro Color ACIDA Mucho cuarzo INTERMED Algo de cuarzo BÁSICA Poco o nada de cuarzo ULTRA BÁSICA	Oscuro	
		ROCAS SEDIMENTARIAS Las rocas con cemento granular presentan gran variación de resistencia, algunas areniscas son más resistentes que muchas rocas ígneas. La estratificación puede no observarse en muestras de mano sino en afloramientos. Sólo las rocas sedimentarias y algunas rocas metamórficas derivadas de ellas contienen fósiles. Las rocas calcáreas contienen calcita (CO3Ca) que se reconoce por su efervescencia con ácido clorhídrico diluido.		ROCAS METAMORFICAS Se distinguen por su foliación. La foliación en los gneises se observa mejor en el afloramiento. Las rocas metamórficas sin foliación son muy difíciles de reconocer. Cualquier roca generada por metamorfismo de contacto se describen como consernas y generalmente son algo más resistentes que la roca original.			ROCAS ÍGNEAS Constituidas por granos minerales fuertemente unidos. Elevada resistencia cuando aparecen sanos; no porosos. Aparecen como: 1. Batolitos; 2. Lacolitos; 3. Sillis; 4. Diques; 5. Flujo de lava; 6. Filones.				

Fuente: González de Vallejo (2002)

Meteorización: Es de suma importancia indicar el grado de meteorización que la roca presenta en campo, ya que la mismo altera las propiedades físico-químicas de las rocas y por ende su comportamiento geomecánico, en la tabla 5.3 se identifica el grado de meteorización de una roca.

Tabla 5.3. Descripción del grado de meteorización del macizo rocoso

Término	Descripción
Sano	No hay señales visibles de meteorización, si acaso una tenue decoloración en superficies de discontinuidades más desarrolladas
Levemente Meteorizado	Cierta coloración que indica meteorización de la roca intacta y superficies de discontinuidad. La roca puede estar algo más débil externamente en condición fresca
Moderadamente Meteorizado	Menos de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La roca puede estar decolorada en forma de enrejado discontinuo o en forma de pedazos individuales
Muy Meteorizado	Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo
Completamente Meteorizado	Todo el material rocoso está descompuesto y/o desintegrado. La estructura del macizo original está prácticamente intacta

Fuente: Salcedo (1982)

Resistencia: La determinación de la resistencia de la matriz rocosa en los afloramientos se puede estimar mediante la utilización de aparatos sencillos, como lo es el Martillo de Schmidt o los nombrados Índices de Campo. El ensayo del martillo de Schmidt o esclerómetro permite estimar de forma aproximada la resistencia a compresión simple mediante una sencilla correlación; el cual consiste en un pequeño aparato metálico de geometría cilíndrica que dispone de un muelle en su interior y de una punta retráctil, la cual, al ser presionada contra la roca hace que el muelle se dispare (figura 5.2). Para la realización de ensayo, se deben cumplir los siguientes pasos: Limpiar la zona a ensayar, dicha zona debe estar libre de fisuras o grietas, retirar la pátina de roca meteorizada, colocar el aparato perpendicular al plano de ensayo, presionar el martillo hasta que salte el muelle. En función de la dureza o resistencia de la roca el muelle sufre mayor o menor rebote, valor que queda reflejado en una escala situada al costado del aparato. Deben efectuarse en cada plano de estudio 10 percusiones con el martillo,

eliminando los cinco valores más bajos y tomando el valor promedio de los restantes, para dicha correlación se puede utilizar el gráfico mostrado en la figura 5.3. En lo que respecta, los Índices de Campo permiten una estimación del rango de la resistencia de la roca. Los criterios para su caracterización se muestran en la tabla 5.4, y deben aplicarse sobre la superficie de la roca inalterada.



Figura 5.1. Ensayo con el Martillo de Schmidt o Esclerómetro
Orientación: N 53° W. Tomada por: Maira Hernández



Figura 5.2. Medición de resistencia con el Martillo de Schmidt o Esclerómetro.
Tomada por: Maira Hernández.

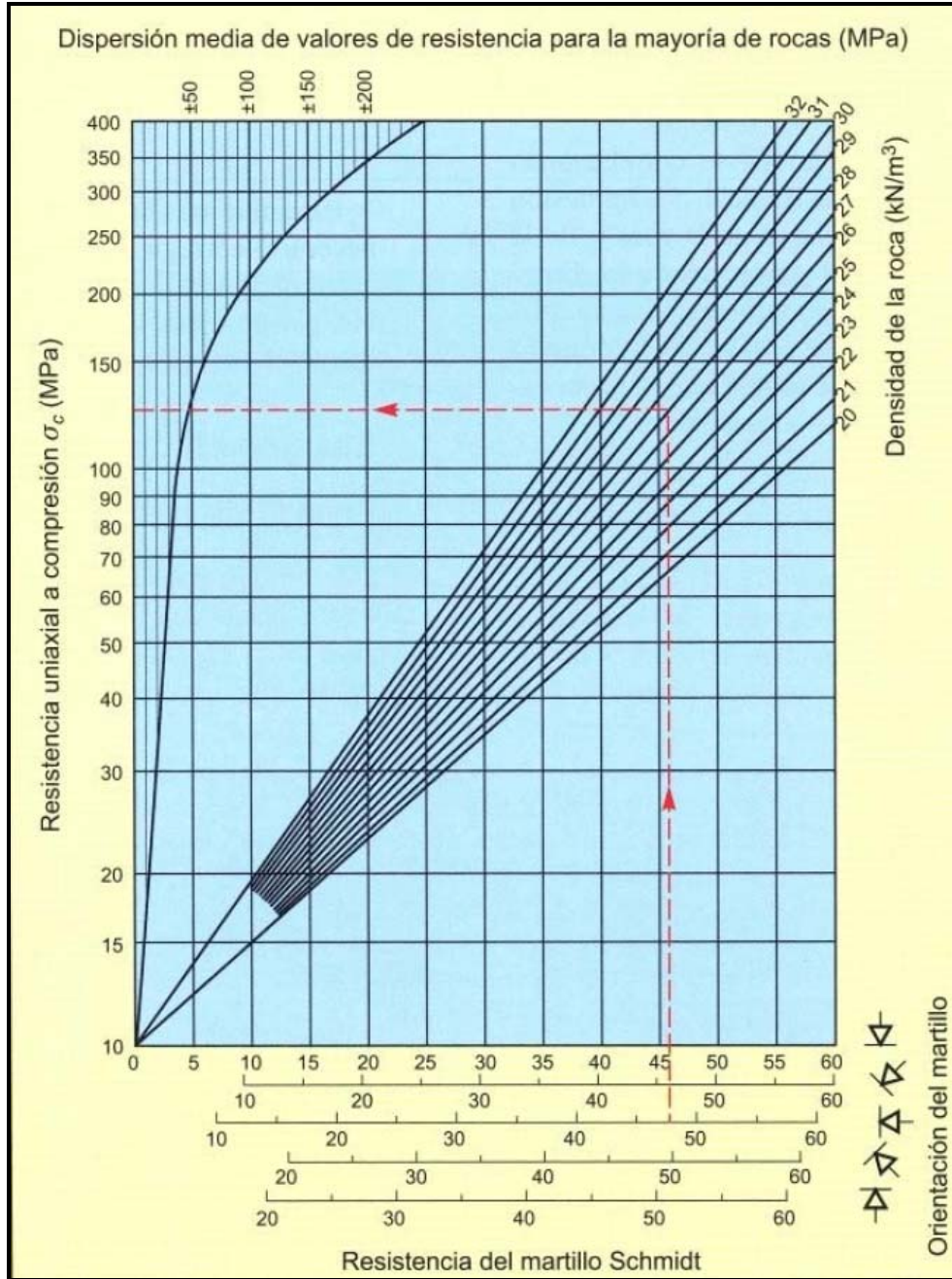


Figura 5.3. Ábaco que correlaciona el valor del rebote del martillo de Schmidt y la resistencia a la compresión de la roca

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tabla 5.4. Índices de campo de la resistencia a la compresión sin confinar de la roca intacta

Clase	Descripción	Identificación de Campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple(Mpa)
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25-1,0
R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente	1,0-5,0
R2	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0-25
R3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con las navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
R4	Roca dura	Se quiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50-100
R5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100-250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo sólo saltan esquirlas.	>250

Fuente: González de Vallejo (2002)

Descripción de las Discontinuidades

Las discontinuidades en los macizos rocosos le dan un carácter discontinuo y anisótropo, haciéndolos más deformables y frágiles, y por ende suman dificultad en cuanto al comportamiento mecánico de los mismos. Es por ello que es de suma importancia evaluar sus características y así poder estimar el comportamiento geomecánico de los macizos, a continuación se citan cada uno de los parámetros a evaluar en campo, según González de Vallejo (2002), ilustrados en la figura 5.4:

- Orientación.
- Espaciado.
- Continuidad.
- Rugosidad.
- Abertura.
- Relleno.
- Filtraciones.

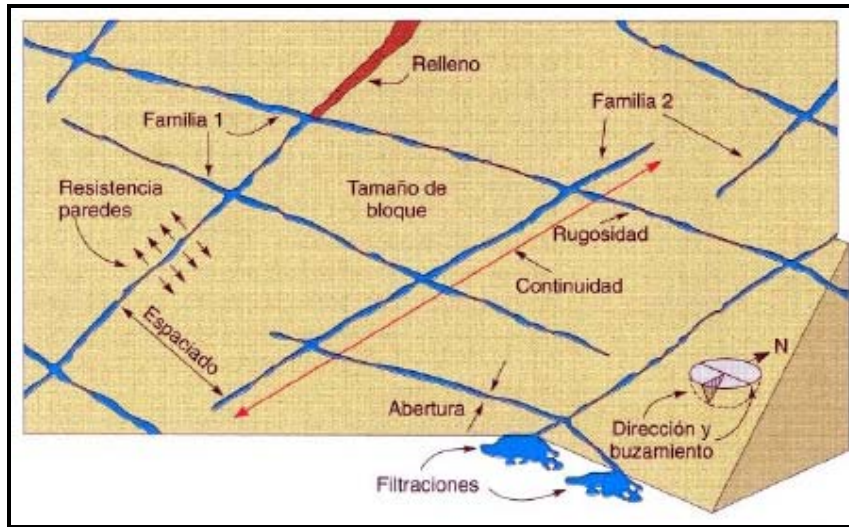


Figura 5.4. Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades. Fuente: González de Vallejo (2002)

Orientación: La orientación de una discontinuidad se obtiene midiendo el rumbo y buzamiento del plano de discontinuidad, utilizando una brújula con clinómetro.

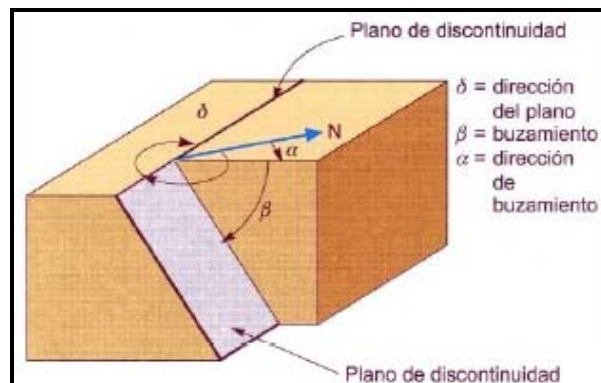


Figura 5.5. Medida de la orientación de las discontinuidades
Fuente: González de Vallejo (2002)

Espaciado: Se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en dirección perpendicular a dichos planos, usando para la misma una cinta métrica. El espaciado en campo se describe según los términos utilizados en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Descripción del espaciado

Descripción	Espaciado
Muy Junto	< 6 cm
Junto	6 cm - 20 cm
Moderadamente Junto	20 cm – 60 cm
Separado	60 cm - 2 m
Muy Separado	> 2 m

Fuente: Tomado y Modificado del González de Vallejo (2002)



Figura 5.6. Espaciado entre una familia de diaclasas

Orientación: N 53° W. Tomada por: Maira Hernández

Continuidad: La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, la cual es medida por la longitud según la dirección del plano y su buzamiento, las mismas se miden con el uso de una cinta métrica.

Los planos de rotura del macizo rocoso estarán condicionados por las familias de diaclasas más continuas, por ello es importantes identificarlas. En campo la continuidad se describe según la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Descripción de la continuidad

Continuidad	Longitud
Muy baja continuidad	< 1 m
Baja continuidad	1 - 3 m
Continuidad media	3 -10 m
Alta continuidad	10 -20 m
Muy alta continuidad	> 20 m

Fuente: González de Vallejo (2002)

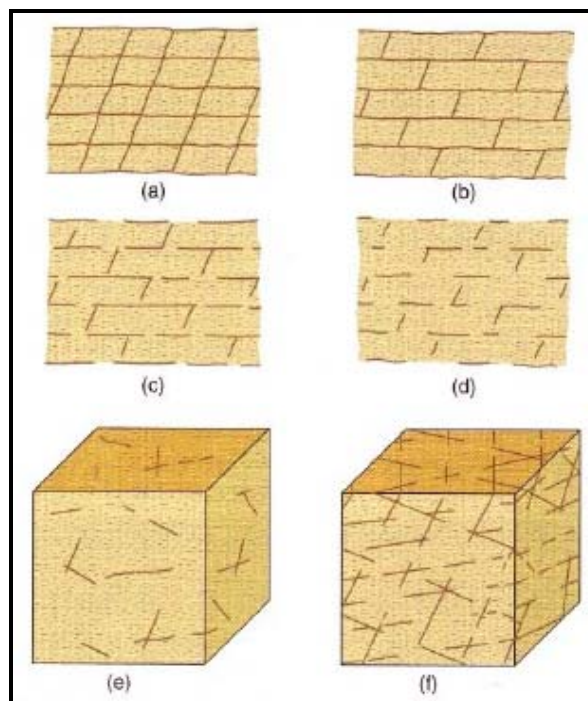


Figura 5.7. Distintos modelos de continuidades de varias familias de discontinuidades.

Fuente: González de Vallejo (2002)

Rugosidad: Se utiliza para hacer referencia a las ondulaciones y rugosidades de las superficies de discontinuidades. Para describir la rugosidad se requiere de dos escalas de observación: Escala de primer orden (decimétrica y métrica) para la ondulación de las superficies planas, onduladas o escalonadas y escala de segundo orden (milimétrica y centimétrica) para las rugosidades de las superficies pulidas, lisas o rugosas. El método utilizado para la definición de la

rugosidad en campo fue el de la comparación visual de la discontinuidad con los perfiles de estándar de rugosidad mostrados en la figura 5.8.

Es importante resaltar que la descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos. También cabe destacar que la rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor de relleno.

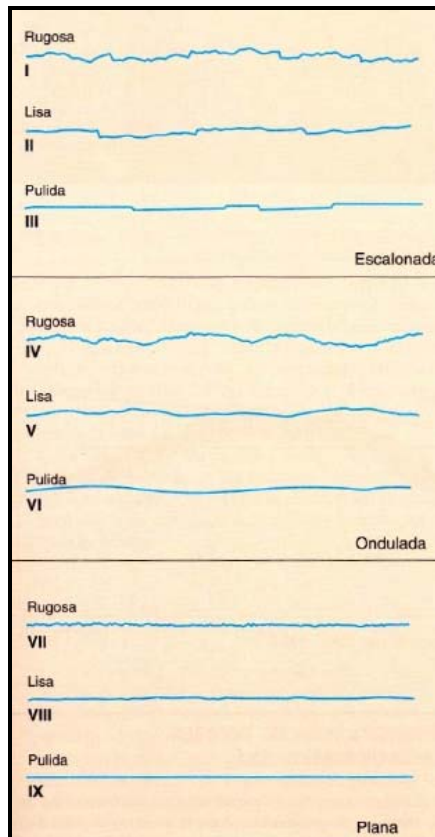


Figura 5.8. Perfiles de rugosidad

Fuente: González de Vallejo (2002)

Abertura: Es la distancia perpendicular que separa dos paredes adyacentes de ésta, para su medida se usa una regla graduada o un vernier. La descripción de la abertura en campo esta expuesta en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Descripción de la abertura

Abertura	Descripción
0	Muy cerrada
< 0,1 mm	Cerrada
0,1 - 1,0 mm	Parcialmente cerrada
1,0 - 5,0 mm	Abierta
> 5 mm	Muy abierta

Fuente: Tomado y Modificado del González de Vallejo (2002)

Relleno: Se define al material de naturaleza distinta a la roca existente entre las paredes adyacentes de las discontinuidades. Dicho parámetro se evalúa en campo describiendo los siguientes aspectos: La composición representa al tipo de material hallado (arcilla, arena, grava, brecha, milonita, etc.), el espesor es el que se mide con una regla graduada en milímetros y la resistencia se clasifica simplemente en materiales blandos y duros.

Filtraciones: Según la fluidez de las filtraciones en los macizos rocosos se pueden definir dos tipos de permeabilidad: Permeabilidad secundaria es cuando el agua fluye por las discontinuidades y permeabilidad primaria al fluir el agua entre los poros de la roca intacta, como se presenta en algunas rocas sedimentarias.

Descripción de los Parámetros del Macizo Rocoso:

En la caracterización global del macizo rocoso en campo es importante la descripción de los parámetros siguientes:

Número de Familias de Discontinuidades: El número de familia de discontinuidades van condicionar el comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura. El macizo rocoso en campo puede clasificarse por el número de familia de discontinuidades según la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades

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

Fuente: González de Vallejo (2002)

Tamaño de Bloque: Los macizos rocosos en cuanto a su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales van estar condicionados a los tamaños de los bloques. La dimensión y la forma de los mismos están definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad.

El parámetro **J_v**, es una de las maneras de describir el tamaño de los bloques, el cual representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen (1 m³) del macizo rocoso. Ante la dificultad de observar tridimensionalmente un afloramiento, el valor J_v se suele determinar contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias, resultando definido el parámetro J_v por la siguiente expresión:

Jv: Σ (n° de discontinuidades / longitud de la medida)

La longitud a medir dependerá del espaciado de cada familia de discontinuidad, variando entre 5 y 10 metros. Luego de calcular el valor Jv se procede a clasificar en función del número de discontinuidades el tamaño del bloque, según la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Descripción del tamaño de bloque en función del número de discontinuidades

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

Fuente: González de Vallejo (2002)

Grado de Meteorización: La apreciación del grado de meteorización del macizo rocoso se efectúa por observación directa del afloramiento y comparación con los índices estándares expresados en la tabla 5.3, presentada anteriormente.

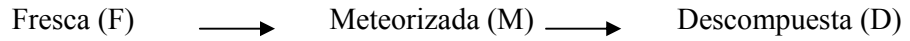
Clasificación Según el Estado Físico de una Roca:

Esta clasificación conocida como la “Clasificación de Flores Calcaño”, fue publicada por el geólogo Carlos E. Flores Calcaño en su trabajo titulado “Representaciones gráficas de los términos geotécnicos más usuales”, donde propuso la siguiente nomenclatura:

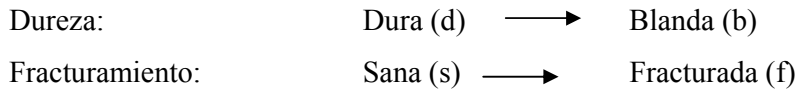
- RD** Roca descompuesta
- RM** Roca meteorizada
- RF** Roca fresca
- b** Blanda
- d** Dura
- f** Fracturada
- s** Sana
- RD**b**** Roca descompuesta, blanda*

- RMb** Roca meteorizada, blanda*
- RMd** Roca meteorizada, dura*
- RMbf** Roca meteorizada, blanda fracturada*
- RMdf** Roca meteorizada, dura fracturada*
- RFds** Roca fresca, dura sana
- (* casos más comunes)

En esta nomenclatura, la primera letra, es decir la R, se refiere siempre a Roca. La segunda letra mayúscula después de la R, indica el grado de meteorización, en orden de menor a mayor grado de meteorización, la roca será:



Las letras en minúscula indican la dureza y el grado de fracturamiento, según la siguiente escala:



Puede utilizarse, antes de cualquiera de las letras excepto la R, una m minúscula que se refiere al término muy, ejemplo: RmMb (roca muy meteorizada, blanda), RFdmf (roca fresca, dura muy fracturada).

Tabla 5.10. Cuadro resumen de la Clasificación de Flores Calcaño.

Roca R	Meteorización	Dureza	Fracturamiento	Grado
	Fresca F	Blanda b	sana s	Menor
	Meteorizada M	↓	↓	↓
	Descompuesta D	Dura d	Fracturada f	Mayor

Fuente: De Marco (2004)

CAPÍTULO VI

RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD DE LA MATRIZ ROCOSA

Conocer y predecir el comportamiento mecánico de los materiales rocosos ante la acción de las fuerzas internas o externas aplicadas sobre ellos, es el objetivo fundamental de la mecánica de rocas.

La caracterización de las rocas y de los macizos rocosos y el estudio de su comportamiento mecánico y deformacional son complejos, debido a la gran variabilidad en sus propiedades físicas (composición mineralógica, densidad, estructura y fábrica, porosidad, permeabilidad, alterabilidad, dureza, etc) y condiciones geológicas (litología y estratigrafía, estructura geológica, discontinuidades tectónicas o diagenéticas, estados de esfuerzos in situ, etc) y al elevado número de factores que los condicionan.

En una obra de ingeniería, conocer las tensiones y deformaciones que pueden llegar a soportar el macizo rocoso ante unas determinadas condiciones permite evaluar su comportamiento mecánico y así abordar el diseño de la misma. Ya que durante la obra, el estado de esfuerzos del macizo cambia, debido a que las condiciones iniciales del mismo han sido modificadas, generando un nuevo sistema de carga

Para abordar con mayor facilidad éste tema se mostrará una lista de conceptos básicos tomados de Gonzales de Vallejo (2002):

CONCEPTOS BÁSICOS

Fuerzas, P

Las fuerzas son las primeras responsables del estado y comportamiento mecánico de un sistema. Las fuerzas existentes sobre los cuerpos rocosos pueden ser de dos tipos: de superficie, que son ejercidas sobre un cuerpo por los materiales que lo rodean, y actúan sobre las superficies de contacto entre las partes adyacentes del sistema rocoso, y se transmiten a cualquier punto del interior del cuerpo y la fuerza de volumen, como la fuerza de gravedad, donde $F=mg$. Las fuerzas superficiales se clasifican en compresivas (positivas) y distensivas (negativas), representadas respectivamente por vectores apuntando hacia dentro o hacia fuera del punto de aplicación

Esfuerzo o tensión, σ

El esfuerzo se define como la reacción interna de un cuerpo a la aplicación de una fuerza o conjunto de fuerzas, y es una cantidad que no se puede medir directamente, ya que el parámetro físico que se mide es la fuerza. Si la fuerza actúa uniformemente en una superficie, el esfuerzo o tensión indica la intensidad de las fuerzas que actúan sobre el plano.

El esfuerzo no varía en función del área considerada siempre que las fuerzas se distribuyan uniformemente sobre la superficie. Si las fuerzas no se distribuyen uniformemente, el esfuerzo variará para diferentes áreas del plano.

Al igual que las fuerzas, los esfuerzos pueden ser descompuestos en sus componentes normal y tangencial, σ y t , referidas a cualquier plano, dependiendo estas componentes de la orientación del plano elegido. De igual modo el esfuerzo puede ser descompuesto en dos componentes, tal como se aprecia en la siguiente figura.

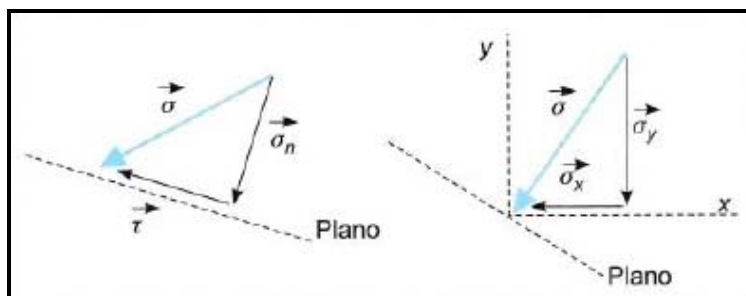


Figura 6.1. Esfuerzos sobre un plano. Fuente: González de Vallejo (2002)

Estado tensional o de esfuerzos

El estado tensional de un sistema es consecuencia de las fuerzas actuando sobre él. Al variar las fuerzas, por tanto, varía el estado de tensiones asociado a los planos considerados.

El estado de esfuerzos o tensiones en un punto queda la cuantificación de todas las fuerzas por unidad de área que son aplicadas sobre un cuerpo en un momento determinado; generalmente se determina definiendo las fuerzas por unidad de área que actúan sobre tres planos ortogonales a través de un punto.

Deformación, ε

La deformación, ε , indica la variación de longitud o espacio entre dos partículas en dos estados mecánicos distintos, y se puede expresar como la relación entre la variación de longitud y la longitud inicial entre las partículas.

La deformación indica el cambio en la forma o configuración de un cuerpo, correspondiéndose con los desplazamientos que sufre la roca al soportar la carga.

Resistencia, σ

La resistencia se define como el esfuerzo que la roca puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación. La resistencia pico, σ_p , es el esfuerzo máximo que se puede alcanzar. Se produce para una cierta deformación a la que

se denomina deformación de pico La resistencia residual, σ_r , es el valor al que cae la resistencia de algunas rocas para deformaciones elevadas. Se produce después de sobrepasar la resistencia pico

Rotura

La rotura es un fenómeno que se produce cuando la roca no puede soportar las fuerzas aplicadas, alcanzando el esfuerzo un valor máximo correspondiente a la resistencia de pico del material.

Fractura

La fractura es la deformación de planos de separación en la roca, rompiéndose los enlaces de las partículas para crear nuevas superficies. Se pierden las fuerzas cohesivas y permanecen únicamente las friccionales

Cohesión, c

La cohesión, c , es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca.

Angulo de fricción interna, ϕ

El ángulo de fricción interna, ϕ , es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca; para la mayoría de las rocas éste ángulo varía entre 25° y 45°.

ESFUERZOS, TENSIONES Y DEFORMACIONES EN LAS ROCAS

Las rocas en condiciones naturales pueden estar sometidas a diversos esfuerzos y estados de tensiones, como se muestra en la siguiente figura.

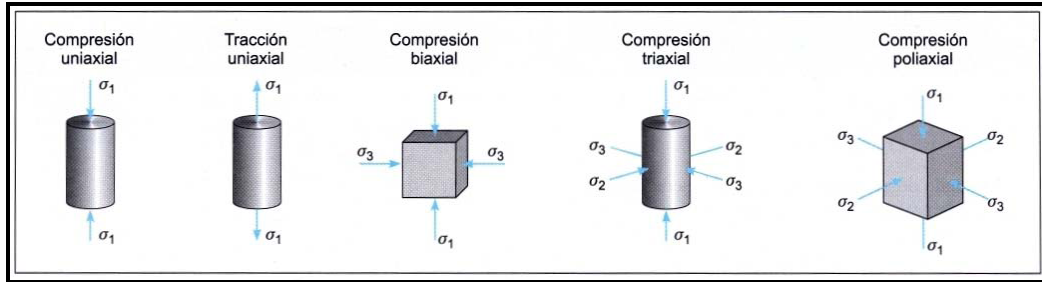


Figura 6.2. Diferentes estados de tensiones aplicados a muestras de laboratorio.
Fuente: González de Vallejo (2002)

Estos esfuerzos o tensiones generados por la aplicación de fuerzas pueden producir en las rocas roturas o deformaciones, dependiendo de la resistencia de las mismas y de otras condiciones extrínsecas al propio material rocoso. Razón por la cual deben estudiarse las relaciones entre los esfuerzos-deformaciones y las leyes que rigen su rotura y deformación.

El comportamiento tensión-deformación, o esfuerzo-deformación se estudia a partir de ensayos de aplicación de fuerzas compresivas, en donde se registran las curvas esfuerzo-deformación de el proceso.

CRITERIOS DE ROTURA, RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD DE LOS MEDIOS ROCOSOS

Criterios de Mohr-Coulomb

De acuerdo con Vallejo (2002), este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura mediante la expresión matemática:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tag} \phi$$

Donde:

t y σ_n son las tensiones tangencial y normal sobre el plano de rotura;

c y ϕ son la cohesión y el ángulo de fricción de la roca intacta.

Este criterio también se puede expresar en función de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , permitiendo obtener la resistencia en cualquier plano definido por θ .

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3[\text{sen } 2\theta + \text{tag } \phi(1 - \cos 2\theta)]}{\text{sen } 2\theta - \text{tag } \phi(1 + \cos 2\theta)}$$

Para el plano crítico de rotura ($\theta = 45^\circ + \phi/2$), la expresión anterior tomará forma:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi + \sigma_3(1 + \text{sen } \phi)}{(1 - \text{sen } \phi)}$$

Si se da la condición donde $\sigma_3 = 0$, σ_1 será la resistencia a la compresión simple de la roca

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \text{sen } \phi}$$

El criterio también proporciona el valor de resistencia a tracción, esto es $\sigma_1 = 0$, σ_3 será igual a la resistencia a la tracción σ_t (negativo), y el criterio define para esto la siguiente expresión:

$$\sigma_3 = -\sigma_t = -\frac{2c \cos \phi}{1 + \text{sen } \phi}$$

Según éste criterio una fractura tiene lugar por corte al alcanzarse la resistencia pico del material.

La representación gráfica de los estados de esfuerzos en un punto recibe el nombre de círculo de Mohr; las intersecciones del círculo con el eje σ n son los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , el radio del círculo representa el máximo esfuerzo tangencial τ . Cualquier punto del círculo representa el estado de esfuerzos sobre un plano cuya normal forma un ángulo θ con la dirección del esfuerzo principal σ_1 , como se ilustra en la figura 6.3; aunque para las aplicaciones de la mecánica

de rocas, el criterio de Mohr-Coulomb para roca intacta queda representado como lo muestra la figura 6.4

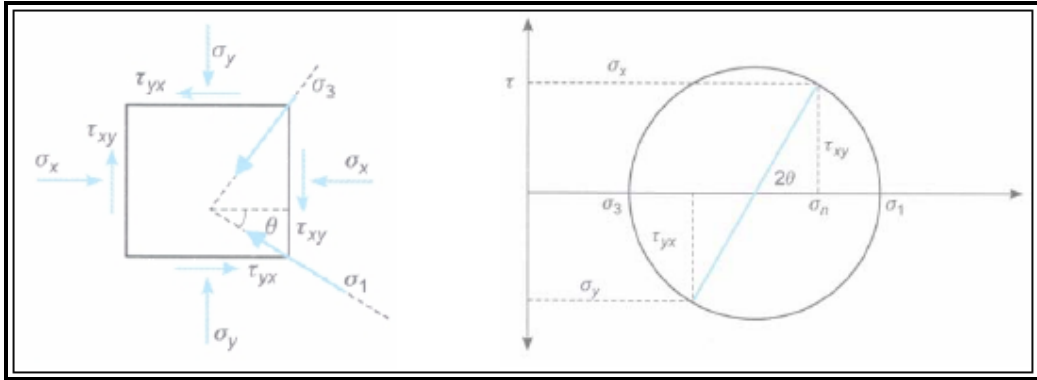


Figura 6.3. Esfuerzos actuando sobre un plano y su representación gráfica mediante el Círculo de Mohr. Fuente: González de Vallejo (2002)

Adicionalmente, también existe un criterio de Mohr-Coulomb para macizos rocosos, en donde tal como lo indica Hoek (2001), la resistencia del macizo rocoso es definida por la cohesión c y el ángulo de fricción ϕ , en la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3$$

donde σ_{cm} es la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso, y k es la pendiente de la relación lineal entre σ_1 y σ_3 . Los valores de ϕ y c se pueden calcular de la siguiente manera:

$$\text{sen}\phi = \frac{k-1}{k+1}$$

$$c = \frac{\sigma_{cm}(1-\text{sen}\phi)}{2\cos\phi}$$

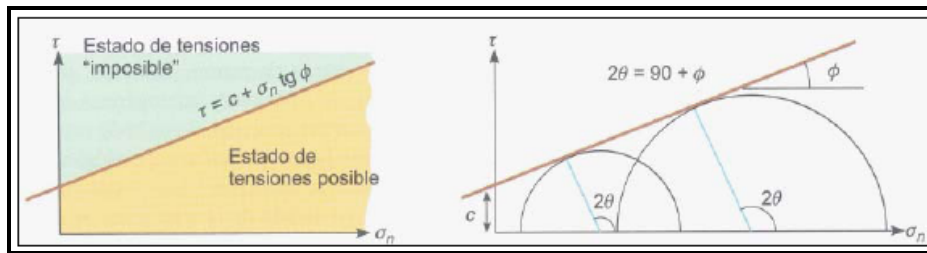


Figura 6.4. Criterio lineal de rotura de Mohr-Coulomb y su envolvente en términos de esfuerzos normales y tangenciales. Fuente: González de Vallejo (2002)

Criterio de Rotura de Hoek y Brown

A continuación se describe el criterio de rotura propuesto por Hoek y Brown tanto para roca intacta como en macizos que exhiben características dominantes de diaclasamiento y meteorización.

Este criterio, está definido por la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s}$$

donde:

σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales mayor y menor aplicados a la muestra en el momento de la rotura,

σ_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta,

m y s son constantes que dependen de las propiedades de la roca y del grado de su fracturamiento antes de ser sometida a los esfuerzos σ_1 y σ_3 .

Para la roca intacta $m = m_i$, y $s = 1$; quedando el criterio de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

En la Tabla 6.1, se pueden apreciar los diferentes valores de m_i , dependiendo del grado de diaclasamiento y de meteorización del macizo (HOOKE, 2000).

Tabla 6.1. Valores para constante mi para roca intacta por grupos de roca

TIPO DE ROCA	CLASE	GRUPO	TEXTURA			
			GRUESA	MEDIA	FINA	MUY FINA
SEDIMENTARIAS	CLÁSTICAS		conglomerado (21±3) Brechas (19±5)	Arenisca (17±4)	Limolitas (7±2) Grauvacas (18±3)	Lutitas (4±2) Arcillas (6±2) Margas (7±2)
	NO CLÁSTICAS	CARBONATOS	Caliza crist (12±3)	Caliza esparitic (10±2) Yeso (8±2)	Caliza micrita (9±2) Anhidrita (12±2)	Dolomita (9±3) Creta (7±2)
		EVAPORITAS				
		ORGANICAS				
METAMÓRFICAS	NO FOLIADAS		Marmol (9±3)	Hornfel (19±4) Metarenisca (19±3)	Cuarcitas (20±3)	
	LIGERAMENTE FOLIADAS		Migmatita (29±3)	Anfibolita (26±6)		
	FOLIADAS		Gneis (28±5)	Esquisto (12±3)	Filita (7±3)	Pizarra (7±4)
ÍGNEAS	PLUTÓNICAS	FÉLSICAS	Granito (32±3) Granodiorita (29±3)	Diorita (25±5)		
		MÁFICAS	Grabro (27±3) Norita (20±5)	Dolerita (16±5)		
	HIPOABISALES		Pórfidos (20±5)		Diabasa (15±5)	Peridotita (25±5)
	VOLCÁNICAS	LAVA		Riolita (25±5) Andesita (25±5)	Dacita (25±3) Basalto (25±5)	Obsidiana (19±3)
		PIROCLÁSTICAS	Aglomerado (19±3)	Brecha (19±5)	Toba (13±5)	

Fuente: González de Vallejo (2002)

D es un factor que depende del grado de perturbación al cual el macizo rocoso ha sido sometido por el daño causado por voladura y la relajación de los esfuerzos; varía de 0 para macizos rocoso imperturbados, hasta 1 para macizos muy perturbados, más adelante se presenta la tabla 6.2 donde se muestran estos valores para su aplicación a túneles.

Hoek y Brown también propusieron un concepto para estimar la *resistencia global del macizo rocoso*, la cual puede estimarse a partir de la relación de Mohr- Coulomb de la siguiente manera:

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

con c y ϕ determinada para un rango de esfuerzos $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{ci}/4$, dando:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b / 4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

Hoek, Carranza-Torres y Corkum (2002) plantean ecuaciones para determinar el ángulo de fricción ϕ y la resistencia a la cohesión c para cada macizo rocoso y rango de esfuerzos, considerados en el criterio de falla de Mohr-Coulomb; las formulas son las siguientes:

$$\phi = \arcsen \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}}$$

Donde

$$\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci}$$

La resistencia la corte τ del criterio de Mohr-Coulomb para un esfuerzo normal dado, se obtiene sustituyendo los valores de c y ϕ en la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

El valor de σ_{3max} corresponde al límite superior de la presión de confinamiento sobre la cual se considera la relación entre el criterio de Hoek-Brown y el de Mohr-Coulomb, y debe determinarse para cada caso individual. La determinación de un valor apropiado para σ_{3max} depende de su aplicación específica, ya que puede ser determinado tanto para túneles como para taludes; se tratará aquí sólo el caso de túneles. En túneles, el valor de σ_{3max} es aquel que dan las curvas características para los dos criterios de falla para los túneles profundos o los equivalentes perfiles de subsidencia para túneles poco profundos.

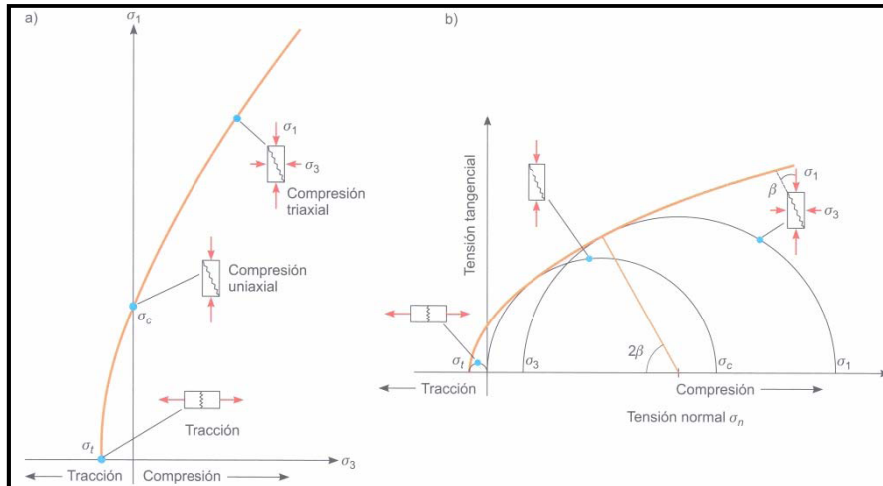


Figura 6.5. Envolventes de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b). Fuente: González de Vallejo (2002)

Adicionalmente en el trabajo de Hoek, Carranza-Torres y Corkum (2002), se plantea una fórmula para estimar el módulo de deformación del macizo rocoso E_m , de la siguiente manera:

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{\left(\frac{GS-10}{40}\right)}$$

aplicada para $\sigma_{ci} \leq 100\text{MPa}$

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) * 10^{\left(\frac{GS-10}{40}\right)}$$

aplicada para $\sigma_{ci} > 100\text{MPa}$

Los valores del factor D , para su aplicación en túneles, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6.2. Valores del factor D

Descripción de la masa rocosa	Valor sugerido para D
Masa rocosa excavada haciendo uso de voladuras controladas de excelente calidad o mediante excavación mecanizada de túneles (TBM), ocasionando un mínimo de perturbación en la masa rocosa confinada alrededor del túnel	$D = 0$
Excavación mecánica o manual (sin voladuras) en masa rocosa de pobre calidad, ocasionando un mínimo de perturbación en la masa rocosa circundante	$D = 0$
Si existe posibilidad de levantamiento del piso del túnel por problemas de fluencia, la masa rocosa puede ser severamente afectada, si no se coloca arco invertido temporal	$D = 0.5$ Sin arco invertido
Masa rocosa competente, excavada haciendo uso de voladuras de pobre calidad, ocasionando daño severo local, extendiéndose 2 o 3 m, en la masa rocosa circundante	$D = 0.8$
Excavación de taludes para obras civiles, utilizando voladuras a pequeña escala, ocasionando daños moderados en la masa rocosa, particularmente si se utilizan voladuras controladas	$D = 0.7$ Voladura de buena calidad
Sin embargo, la relajación de esfuerzos causa perturbación	$D = 1$ Voladura de pobre calidad
Masas rocosas en grandes minas a cielo abierto, las cuales sufren gran perturbación debido a la acción de potentes voladuras de producción, además del efecto de la relajación de esfuerzos debida a la remoción del recubrimiento	$D = 1$ Voladura de producción
Masas rocosas más blandas, que pueden ser extraídas mediante escarificación, ocasionando poco daño en el talud	$D = 0.7$ Excavación mecánica

Fuente: González de Vallejo (2002)

MEDICIONES EN ROCA

El marco teórico de los ensayos que se describen a continuación, fue tomado del de De Marco (2004) denominado Determinación de la Resistencia Mecánica de las Rocas Mediante Ensayos de Laboratorio.

Ensayo Uniaxial o de Compresión Simple

Alcance

Determinar la resistencia a la compresión inconfiada de una muestra de roca de geometría regular, generalmente cilíndrica. Los resultados son utilizados para la clasificación y caracterización geotécnica de la roca intacta. Si se miden las deformaciones, pueden calcularse el módulo de Young y la relación de Poisson.

Aparatos y equipos necesarios

1. Prensa para la aplicación y medida de la carga axial sobre la probeta, a una velocidad controlada (Ver figura 6.6)

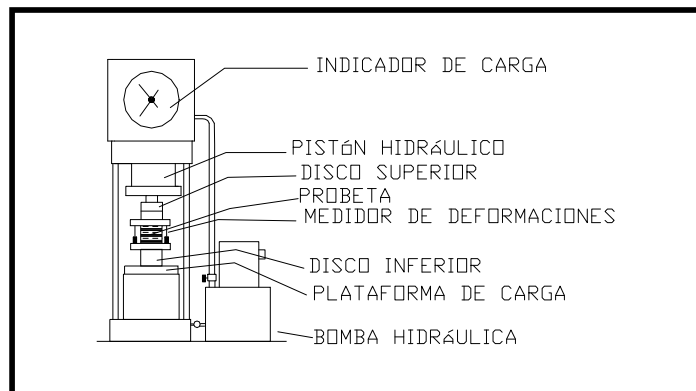


Figura 6.6. Disposición de la muestra en el ensayo de compresión uniaxial

Fuente: De Marco, Pietro (1995)

2. Discos de acero para la transmisión de la carga, de diámetro igual o ligeramente superior al de la muestra ($\approx + 2\text{mm}$), de 15mm de espesor mínimo y de superficie completamente plana (tolerancia 0.005mm).
3. Asiento esférico (ligeramente lubricado) para colocar en el extremo del disco superior.
4. Vernier, cronómetro, transportador

Preparación de las muestras

1. La probeta de roca debe ser completamente cilíndrica, con una altura de 2.5 a 3.0 veces su diámetro, el cuál no debe ser inferior a 54mm. Generalmente se usan núcleos provenientes de perforaciones, de diámetro NX o superior. El diámetro de la muestra debe ser por lo menos 10 veces del mayor grano que constituye la roca. El Comité Conjunto del Concreto Armado (CCCA) (1976), en su norma Ag 25: "Método de Ensayo para determinar la Resistencia a la Compresión de Piedra Natural Para La Construcción", establece que: "...Las probetas de ensayo podrán ser cubos, prismas rectos o cilindros...", "...la dimensión lateral (distancia entre caras verticales opuestas), no deberá ser menor de 5 cm (NOTA 1) y la relación entre la altura (NOTA 2), y la dimensión lateral, no deberá ser menor de 1:1..."
2. Los extremos del núcleo deben ser planos, lisos y perpendiculares a su eje, permitiéndose las siguientes tolerancias: cara/eje = 0.06° y cara/cara = 0.25° .
3. Los lados de la muestra deben ser lisos y libres de irregularidades o desviaciones sobre 0.3mm.
4. El tratamiento de los extremos de la probeta debe hacerse por medios mecánicos; no se permite el uso de "capping".

Procedimiento

1. Determinar el diámetro o dimensión lateral de la muestra con una aproximación de 0.1 mm, promediando dos medidas paralelas entre sí, que se realizarán en la parte superior, media e inferior del espécimen. El área de la sección transversal (A_0) se calculará con el promedio de estos resultados. Determinar la altura del núcleo con una aproximación de 1.0mm.
2. Coloque la muestra centrada en los discos de carga, colocar el asiento esférico en la parte superior y alinear con el eje de carga de la prensa.
3. Aplicar carga vertical en forma continua, con un incremento de esfuerzos constantes entre 5.0 y 10.0 kg/cm²/s, hasta producir la falla, lo cual debe ocurrir entre los 5 y 10 minutos de haber comenzado el ensayo.
4. Registrar la máxima carga ($P_{\text{máx}}$) con error no superior al 1 %.
5. Se recomienda realizar por lo menos 5 ensayos por litología.

Cálculos

Calcular la resistencia a la compresión Uniaxial de la muestra de roca, dividiendo la máxima carga soportada por la probeta entre el área de su sección transversal inicial.

$$C_0 = \frac{P_{\text{máx}}}{A_0} \text{ [Kg/cm}^2 \text{ o N/mm}^2 \text{ = MPa]}$$

Reporte de resultados

1. Descripción litológica de la muestra de roca.
2. Proveniencia de la muestra: Localización geográfica, profundidad, fecha y método de muestreo, orientación.
3. Orientación del eje de carga con respecto a los planos de foliación o estratificación.
4. Diámetro y altura del núcleo ensayado.
5. Velocidad de aplicación del esfuerzo y duración del ensayo.
6. Tipo de fractura (Ver figura 6.7), (también aplicada de forma similar a muestras cúbicas):
 - a) Corte oblicuo
 - b) Resquebrajamiento axial
 - c) Exfoliación axial o combinación de estas
7. Fecha del ensayo y características del equipo mecánico.
8. Otras propiedades físicas disponibles.
9. Resistencia a la compresión uniaxial (monoaxial, no confinada o compresión simple) de cada espécimen ensayado y valor promedio por litología.

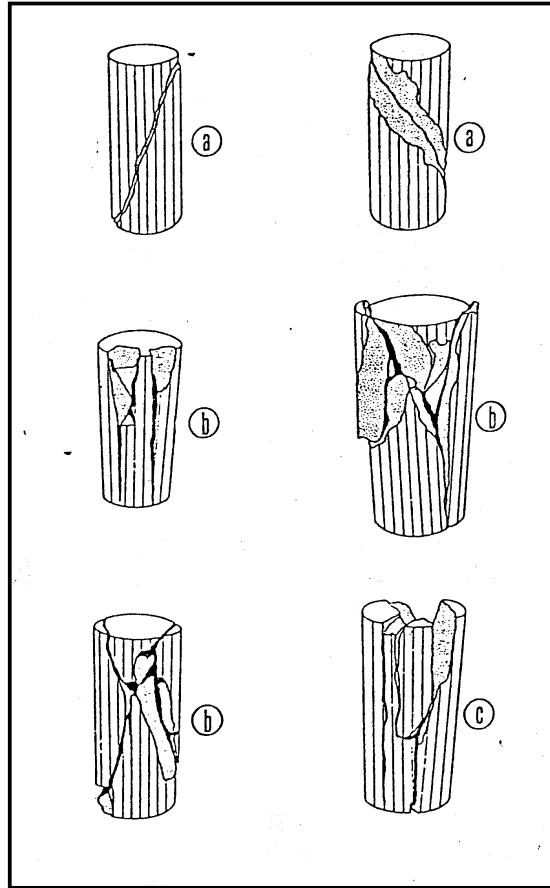


Figura 6.7. Ejemplos de fracturas en muestras de roca.

Fuente: De Marco, Pietro (1995)

Clasificación

En la tabla 6.3, se muestra la clasificación de la calidad de la roca intacta en función de su resistencia a la compresión uniaxial, sugerida por Franklin J. (1989).

Tabla 6.3. Clasificación de la roca en función de su resistencia a la compresión uniaxial.

Clasificación de la roca	Co (Kg/cm ²)
Extremadamente débil	< 20
Muy débil	20 - 60
Débil	60 - 200
Medianamente resistente	200 - 600
Muy resistente	600 - 2000
Extremadamente resistente	> 2000

Fuente: González de Vallejo (2002)

Ensayo de Corte Directo.

Alcance

Determinar la resistencia al corte pico y residual a través de discontinuidades contenidas en bloques o núcleos de roca, en función de la carga normal aplicada sobre el plano.

Los resultados se utilizan en los análisis de equilibrio límite para resolver problemas de estabilidad de taludes y estabilidad de fundaciones.

Aparatos y equipo necesario

1. Para preparar la muestra:
 - a. Sierra de diamante, cincel o cortador de núcleos
 - b. Alambre o cinta adhesiva para mantener los planos de la discontinuidad unidos durante el montaje de la muestra.
 - c. Moldes desarmables para la montura del espécimen.
 - d. Cemento, yeso dental, resina o similar, de resistencia suficiente para fijar cada mitad de la muestra.

2. Caja de corte (Figuras 6.8 y 6.9) constituida por:
 - a. Sistema para aplicación de carga normal, diseñado para asegurar que sea uniformemente distribuida sobre el plano a ensayar. La fuerza resultante debe actuar normal al plano de corte pasando a través del centro del área y mantenerse constante con una tolerancia del 2% del valor deseado.

 - b. Sistema para aplicar fuerza de corte, preferiblemente en dos sentidos, diseñado de manera que la carga sea distribuida uniformemente a lo largo de la superficie de discontinuidad y la fuerza de corte resultante actúe en el plano de corte. El equipo debe permitir un desplazamiento de corte de por lo menos el 10 %

de la longitud del espécimen. Debe poseer un dispositivo de baja fricción (guayas o similares) para asegurar que la resistencia del mecanismo al desplazamiento de corte sea menor que el 1 % de la máxima fuerza de corte aplicada en el ensayo.

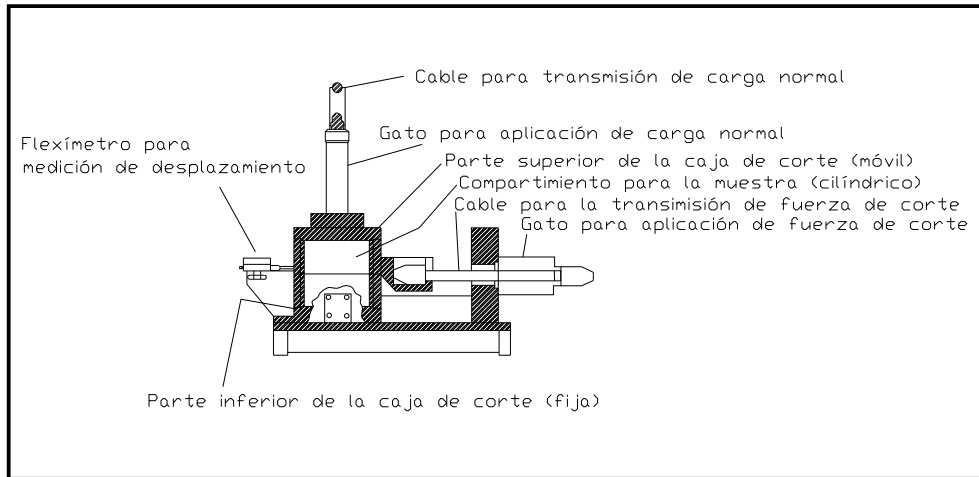


Figura 6.8. Esquema del equipo de Corte Directo, SBEL, RM-101.

Fuente: De Marco (1995)



Figura 6.9. Equipo de Corte Directo, SBEL, RM-102. Laboratorio de Mecánica de Rocas, U.C.V.

Tomada por: Rosangela Martínez

3. Equipo (manómetros) para la medición independiente de las fuerzas normal y de corte con una precisión de $\pm 2\%$ de la máxima fuerza normal alcanzada en el ensayo.
4. Equipo (flexímetros) para la medición de los desplazamientos de corte, normal y lateral. En el primer caso el dispositivo debe permitir registrar un desplazamiento superior al 10 % de la longitud de la muestra, con una precisión de 0.1 mm. Para la medición de los desplazamientos normal y lateral, el equipo debe permitir un desplazamiento de 0.05 mm.
5. Vernier, cronómetro, implementos para la preparación de muestras

Preparación de las Muestras

1. El bloque o núcleo de roca que contenga el plano de discontinuidad a ensayar, debe obtenerse por métodos que eviten en lo posible la perturbación de la muestra. Las dimensiones del espécimen deben ser tales que permitan su acomodo en el molde de montaje y un encapsulamiento adecuado. Se recomienda el uso de muestras preferiblemente cuadradas con un área de corte mínima de 2500 mm² y una altura de 40 mm. Para el caso de núcleos, se sugiere utilizar los provenientes de perforaciones de diámetro NX (≈ 54 mm), con una longitud (medida en su centro) igual o superior que el diámetro. Las dimensiones máximas para el equipo SBEL –RM 102 son 80 * 80 * 80 mm.
2. Durante el montaje, la integridad mecánica del espécimen debe asegurarse, manteniendo en posición y apretadas ambas caras de la discontinuidad con alambre o cinta adhesiva, que serán cortados justo antes de iniciar el ensayo.(Ver figura 6.10)

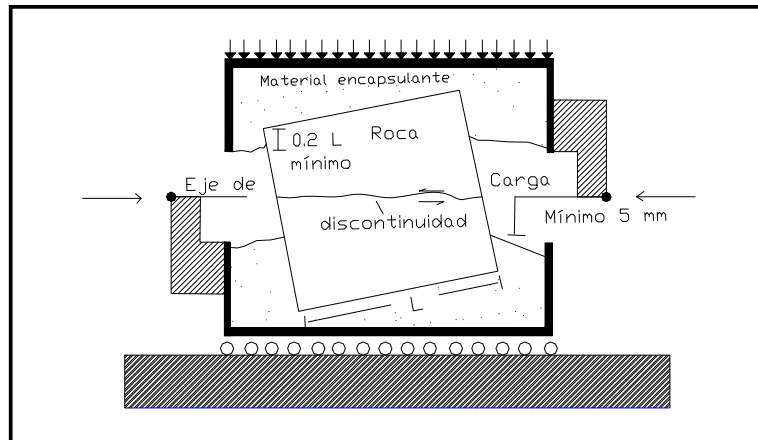


Figura 6.10. Posición de la muestra en la Caja de Corte

Fuente: De Marco (1995)

3. Colocar la muestra en el molde inferior de manera que la superficie de discontinuidad quede centrada, orientada horizontalmente y sobresalga unos 5 mm por encima del molde (Figuras 6.11). El espesor de empotramiento de cada parte de la muestra en el material de encapsulamiento será de por lo menos el 20% de la longitud del bloque ensayado y nunca menor de 10mm

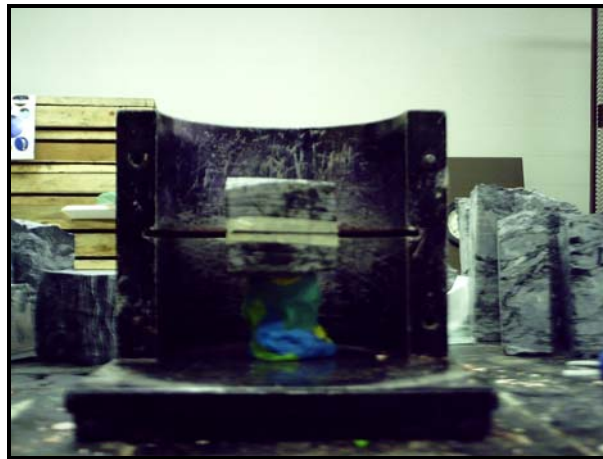


Figura 6.11. Montaje de la muestra en el material encapsulante

Tomada por: Rosangela Martínez. (2008)

3. Verter en el molde el material de encapsulamiento, hasta alcanzar su tope, y esperar el fraguado.

5. Preparar el molde para la segunda mitad de la muestra, verter el material de encapsulado y colocar cuatro separadores de 1cm de espesor, en el tope del molde.
6. Colocar (en forma invertida) el molde con la primera parte de la muestra (ya fija), sobre el segundo molde de manera que la porción de muestra restante, quede embebida en el material de encapsulamiento según las mismas indicaciones que las especificadas para la primera porción (punto 3).
7. Esperar el fraguado, desmontar cuidadosamente el espécimen de los moldes, identificar la muestra e indicar la dirección de corte en el material de fijación.



Figura 6.12. Montaje de la muestra para ensayo corte directo
Tomada por: Rosangela Martínez (2008)

Procedimiento

1. Colocar la muestra en la base inferior de la caja de corte, orientada según la indicación correspondiente y cubrir con la parte superior. Colocar los dispositivos para aplicación de la carga (cables, mangueras hidráulicas).
2. Cortar la cinta adhesiva y/o alambres colocados para sujetar las dos mitades de la muestra en posición.
3. Colocar los flexímetros para medición de las deformaciones normal, de corte y lateral.
4. Aplicar la carga normal hasta el valor especificado para el ensayo y registrar el desplazamiento normal. Las muestras húmedas o con relleno en el plano de corte, deberán someterse a una etapa de consolidación la cual se considerará completa cuando la variación en el desplazamiento normal sea inferior de 0.05mm en 10 min.
5. Aplicar carga de corte en forma continua, con un incremento de esfuerzos constante (del orden de 0.25 kg/cm^2) registrando los desplazamientos para cada incremento, hasta alcanzar la resistencia pico. (Deben tomarse por lo menos 10 lecturas antes de la rotura). La velocidad de aplicación de la carga debe ser tal que permita realizar las lecturas cómodamente y no debe ser superior a 0.1mm/min en esta etapa. Esta velocidad puede ser incrementada a unos 0.5mm/min entre lecturas, siempre que el valor de la resistencia pueda ser adecuadamente registrado.
6. Luego de alcanzar la resistencia pico, las lecturas pueden ser tomadas en incrementos que pueden variar entre 0.5 y 5mm de desplazamiento de corte, seleccionando el valor más conveniente para la definición adecuada de la curva esfuerzo-desplazamiento. La velocidad de los desplazamientos de corte, en esta fase del ensayo, será de 0.5 a 1mm/min.

7. Si se desea establecer la resistencia residual, se continuará con las lecturas hasta alcanzar por lo menos 1cm de desplazamiento de corte. En este intervalo se registrarán 4 mediciones, las cuales no deben mostrar una variación mayor a 5 % en el valor de resistencia cortante, para satisfacer la condición residual.
8. Habiendo establecido la resistencia residual, el esfuerzo normal puede ser incrementado o reducido y puede continuarse el corte para obtener los valores de resistencia residual para diferentes esfuerzos normales. Para alcanzar el desplazamiento necesario, pudiera ser necesario tener que invertir la dirección de corte o regresar la muestra a su posición inicial, sin embargo esta práctica no es conveniente. Es recomendable, el uso de muestras diferentes para la determinación de resistencia pico y residual para cada esfuerzo normal aplicado.
9. Una vez finalizado el ensayo, retirar los flexímetros, descargar los gatos y desmontar la caja de corte.
10. Retirar la muestra, exponer el plano de corte y describirlo detalladamente según lo indicado en el punto V. Determinar el área de la superficie de corte tomando sus dimensiones con una aproximación de 0.1 mm.
11. Se recomienda realizar por lo menos cinco ensayos para la misma discontinuidad, ensayando cada espécimen a un esfuerzo normal diferente, pero constante.

Cálculos y gráficos

1. Calcular el esfuerzo normal y de corte, para cada una de las lecturas efectuadas, de acuerdo a las siguientes expresiones:

Esfuerzo Normal $\sigma_n = \frac{P_n}{A}$ [Kg/cm² o N/mm² (MPa)]

Esfuerzo de corte $\tau = \frac{P_c}{A}$ [Kg/cm² o N/mm² (MPa)]

Donde:

P_n = Fuerza Normal aplicada en Kg o N.

P_c = Fuerza de corte aplicada en Kg o N.

A = Área de la superficie de corte en cm² ó mm²

2. Graficar para cada muestra la curva esfuerzo de corte vs. Desplazamiento de corte, indicando el esfuerzo normal aplicado, y los valores de resistencia pico y residual (Figura 6.13).
3. Graficar para varios especímenes de la misma discontinuidad, los valores de las presiones normales aplicadas, en el eje de las abscisas y sus correspondientes valores de resistencia al corte pico y residual, en el eje de las ordenadas (figura 6.14).

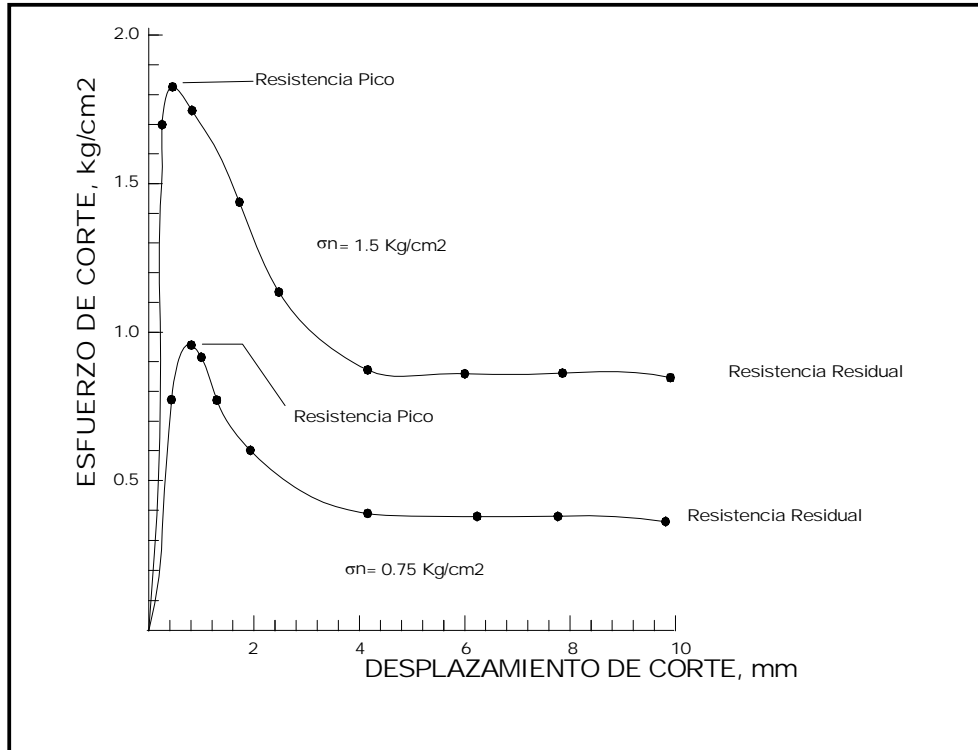


Figura 6.13. Curva típica esfuerzo de corte-desplazamiento, en planos de foliación de esquistos cuarzo-micáceo-calcáreo de la Formación Las Mercedes, Caracas. Fuente: De Marco (1995)

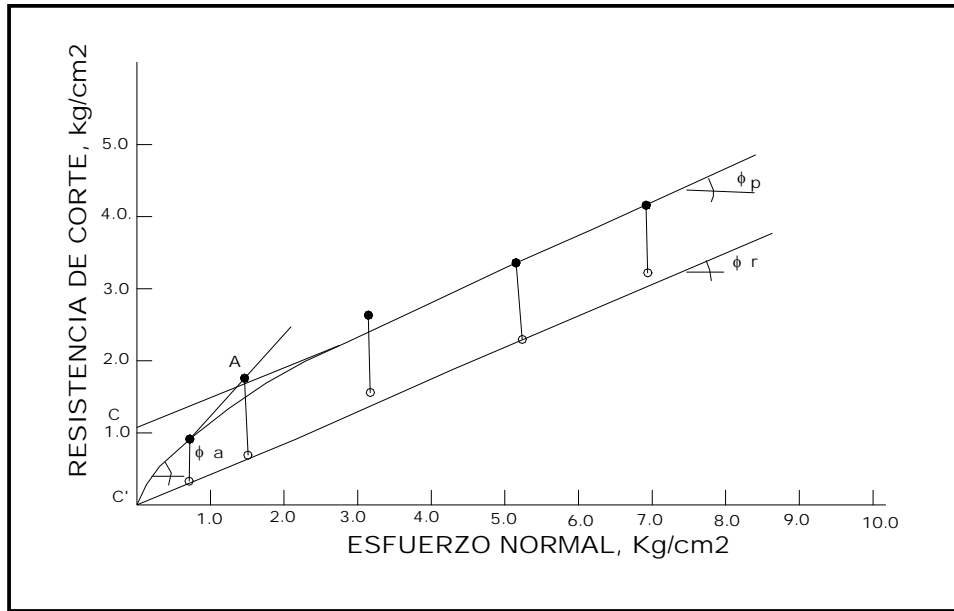


Figura 6.14. Representación del ensayo de corte directo para varios ensayos realizados a través de planos de foliación de esquistos cuarzo-micáceo-calcáreos de la formación Las Mercedes, Caracas. Fuente: De Marco (1995)

4. Las envolventes de resistencia pueden ser obtenidas, ajustando una curva a los puntos graficados anteriormente. Por consideraciones prácticas es aconsejable trazar una línea recta entre los puntos más relevantes o varias líneas rectas si fuera el caso (Figura 6.14). Cada línea se caracteriza calculando su gradiente (m) y su intercepto en el eje de las ordenadas (b).
5. Determine, de acuerdo a las envolventes trazadas, los parámetros de resistencia al corte ϕ_r , ϕ_a , ϕ_p , c' y c , según se muestra en la figura y donde:
 - ϕ_r : ángulo de fricción residual
 - ϕ_a : ángulo de fricción para bajos esfuerzos normales, influenciado por la rugosidad (i) de la discontinuidad. $\phi_a \approx \phi_r + i$.
 - ϕ_p : ángulo de fricción para niveles de esfuerzos normales superiores a σ_a (ver punto A, figura 6.11)
 - c' : intercepto de cohesión para la curva de resistencia pico (puede ser cero).
 - c : cohesión aparente para los niveles de esfuerzos correspondientes a ϕ_p .

Reporte de resultados

1. Descripción litológica de la muestra de roca.
2. Descripción de la superficie de discontinuidad: tipo, perfil de rugosidad, presencia de relleno y sus características geométricas y litológicas, preferiblemente complementadas con propiedades índice relevantes (p.e) contenido de humedad natural, límites de consistencia y granulometría del material de relleno, resistencia en la pared de la discontinuidad determinada con el martillo de Schmidt (ISRM, 1981).
3. Forma y dimensiones del espécimen ensayado.
4. Fecha del ensayo y características del equipo mecánico.
5. Otras propiedades físicas disponibles.
6. Tabulación y gráfico de los valores de esfuerzo de corte y desplazamiento correspondiente, para cada nivel de esfuerzo normal aplicado (Figura 6.13).
7. Gráfico esfuerzo normal vs. Resistencia de corte, elaborado preferiblemente en base a resultados obtenidos de ensayar diferentes especímenes de la misma discontinuidad, indicando las correspondientes envolventes y parámetros de resistencia al corte interpretado (Figura 6.14).

CAPÍTULO VII

INGENIERÍA DE TÚNELES

CONCEPTOS BÁSICOS

Previo al estudio en detalle de la ingeniería de túneles, es preciso manejar la terminología empleada en su respecto. Entre los conceptos más importantes se tiene:

Túnel: Paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación. Dicha cavidad debe ser estabilizada a corto y a largo plazo, desde su apertura y durante toda la vida útil establecida para la obra.

Frente de excavación: Se define como la zona vulnerable que se genera una vez iniciada la excavación



Figura 7.1. Sección tipo de un túnel. Fuente González de Vallejo (2002)

Soporte o Sostenimiento: Se refiere a los elementos estructurales de sujeción del terreno, aplicados inmediatamente después de la excavación del túnel, con el fin de asegurar su estabilidad durante la construcción y después de ella, así como garantizar las condiciones de seguridad. Los principales tipos de sostenimientos se describen a continuación:



Figura 7.2. Colocación de Costillas. Túnel trasvase Taguaguay-Valles de Tucutunemo.

Tomada por: Rosangela Martínez (2008)

Revestimiento: Se coloca con posterioridad al sostenimiento y consiste en aplicar sobre dicho sostenimiento otros elementos estructurales (como una capa de hormigón proyectado), con el fin de proporcionar resistencia a largo plazo al túnel y dar un acabado regular, mejorando su funcionalidad.

Cerchas o Costillas: Son perfiles de acero laminados en forma de arco que ejercen una función resistente cuando trabajan en contacto con el terreno, por lo tanto, se han de colocar en contacto con el mismo a lo largo de toda su longitud y firmemente apoyadas en el suelo.



Figura 7.3. Costillas utilizadas en el Túnel trasvase Taguaguay-Valles de Tucutunemo.

Tomada por: Maira Hernández (2008)

Malla Electrosoldada o Mallazo: Está formada por una parrilla de barras corrugadas unidas mediante electrosoldadura, y se utiliza como refuerzo del hormigón, proyectado por su facilidad de adaptación a la forma del túnel. Generalmente se usan mallazos de 4, 5 ó 6 cm de diámetros con separaciones comprendidas entre 10 y 20 centímetros.



Figura 7.4. Malla electrosoldada 10X10 utilizada en el Túnel trasvase Taguiguay-Valles de Tucutunemo. Tomada por: Rosangela Martínez (2008)

Concreto Proyectado: Tal como lo indican Megaw y Bartlett (1988), es una técnica muy utilizada como soporte del terreno, bien sea solo o en combinación con otros métodos, y consiste en proyectar sobre la roca un concreto a gran velocidad, que es transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente mediante una boquilla sobre un soporte.

El concreto se aplica a la superficie de la roca con espesores variables, que dependen de la calidad de la roca. Generalmente está constituido por agregados de hasta 12 mm, cemento, agua y aditivo para un secado rápido (de apenas unos pocos minutos), los cuales se mezclan y se proyectan o se lanza a gran velocidad sobre la superficie de la roca; si el proceso es *seco*, todos los componentes a excepción del agua, son previamente mezclados hasta conseguir una perfecta homogeneidad y el agua es incorporada en la boquilla de salida, y desde ahí la mezcla ya húmeda se proyecta. Si el proceso es húmedo, todos los componentes

del concreto incluyendo el agua, son mezclados antes de ser incorporados a la manguera que los transportará hasta la boquilla de salida.

Tiene dos finalidades principales: sellar la superficie de la roca, cerrando las juntas, y evitar la descompresión y alteración de la roca.



Figura 7.5. Aplicación del concreto proyectado en el Túnel trasvase Taguaguay-Valles de Tucutunemo. Tomada por: Rosangela Martínez. 2008

Cuando el hormigón se utiliza únicamente para el sellado de la excavación no se combina con elementos de refuerzo adicional, siendo los espesores empleados generalmente inferiores a 5cm. Cuando se pretende que funcione como elemento resistente el hormigón proyectado se refuerza con malla electrosoldada o mediante fibras de acero.

Pernos o Anclajes: Barras de acero con un extremo redondeado, el cual va introducido en el macizo rocoso y el extremo restante queda asegurado en superficie con rosca y una plancha para ajustar.

Micropilotes o Bulones: Consisten en tubos de acero de 20 a 40 mm de sección y longitudes variables, normalmente de 3 a 6 m, los cuales se instalan en el terreno previa perforación del taladro correspondiente. Por su forma de actuar pueden ser activos o pasivos. Los primeros funcionan como un anclaje, tienen un fuste libre, y la cabeza (parte que sobresale de la excavación) se sujeta mediante una placa y una rosca, aplicándoles tensión. El bulón pasivo se adhiere a la roca en toda su longitud y no se le aplica tensión.



Figura 7.6. Colocación de swellex en el túnel trasvase Taguiguay-Valles de Tucutunemo.

Tomada por: Maira Hernández (2008)

Paraguas: Se usan para pasar zonas de roca muy fracturada o muy alterada, con riesgo de desprendimientos al efectuarse el avance. Pueden utilizarse micropilotes instalados alrededor de la sección o de la clave del túnel.

Vidrioresinas: Está constituida básicamente por resina de poliéster armada con fibra de vidrio; ésta se inyecta en el material a perforar con el fin de consolidarlo.

Solera Provisional o Contrabóveda: Cuando el terreno empuja sobre el sostenimiento, y éste soporta grandes esfuerzos horizontales y/o verticales, puede ser necesario cerrar por abajo, para que la estructura que estamos colocando para resistir, efectivamente lo haga. El sostenimiento y el revestimiento son unos arcos que deben estar bien apoyados, de forma que no se muevan verticalmente (por hincado en el terreno, rotura de éste, u otros) ni horizontalmente.



Figura 7.7. Colocación de arco invertido como medida de seguridad.

Tomada por: Rosangela Martínez (2008)

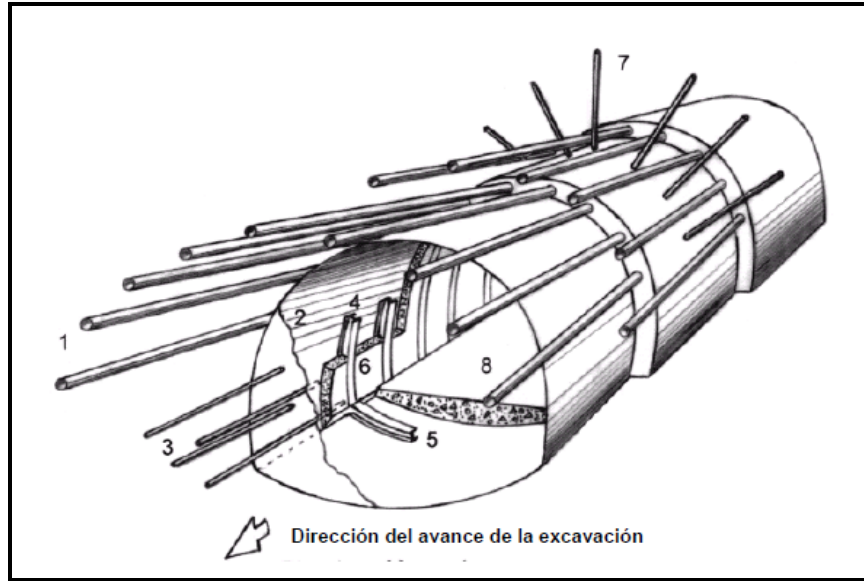


Figura 7.8. Sección completa de la excavación de un túnel mostrando los diferentes sostenimientos aplicables: 1) Micropilotes en paraguas, 2) Concreto proyectado, 3) Vidrioresina, 4 y 5) Costillas de acero, 6) Concreto proyectado, 7) Anclajes, 8) Arco invertido o contrabóveda.

Fuente: Hoek (2001)

EL PROYECTO DE UN TÚNEL

Antes de que un túnel se pueda planear en líneas generales y diseñar en detalle, se deberá reunir información sobre los aspectos físicos del proyecto, además de los estudios económicos, los cuales tienen una relación directa. La necesidad de una detallada y extensa investigación es probablemente mayor que para la mayoría de los otros tipos de construcción.

“El proyecto de un túnel comienza en la fase del estudio geológico y geotécnico del sitio y termina cuando se pone en servicio la obra”.

Los estudios geológicos y geotécnicos son absolutamente necesarios para poder proyectar y construir una obra subterránea, ya que los mismos nos permiten:

- Determinar las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del trazado.
- Identificar zonas singulares o zonas de mayor complejidad geológica, hidrogeológica o geotécnica.
- Clasificar y sectorizar geomecánicamente, propiedades y parámetros de diseño del macizo rocoso.
- Estimar cargas y deformaciones del macizo.
- Utilizar criterios geomecánicos para el diseño de sostenimientos y selección de los métodos de excavación.
- Determinar el emplazamiento, la excavación y estabilización de los portales y accesos intermedios del túnel.
- Establecer tratamientos del terreno para la estabilización, refuerzo, drenaje o impermeabilización del terreno.

El conocimiento de la geología, así como los estudios y estimaciones geotécnicas, no solo es necesario para proyectar adecuadamente el túnel, sino fundamental para evitar sobrecostos, accidentes y retrasos imprevistos.

Hay diversas partes del proyecto que condicionan el comportamiento futuro del túnel, se analizan a continuación las más importantes:

Trazado

El trazado del eje del túnel está condicionado fundamentalmente por las características del proyecto, la topografía, la geología y los costos. Es decir, para fijar un trazado se debe analizar si, se pueden evitar los terrenos más conflictivos, fallas de gran importancia, zonas de karst, de grandes aportes de agua, la afectación de obras existentes, entre otras.

En caso de obtener varios trazados alternativos y aparentemente más económicos, se deberá dejar muy bien argumentado en el proyecto las razones de

la elección, para evitar en lo posible que se cambie ese trazado durante la fase de construcción.

Forma

Influye tanto la geometría como el tamaño, es en el proyecto donde se debe estudiar con detenimiento y resolver este aspecto debido a que generalmente, durante la construcción no se podrá modificar.

Las formas circulares son geoméricamente más favorables que las formas ovaladas o rectangulares. Las formas de la sección influyen en el estado tensional que se desarrolla alrededor de los túneles, por ello, se debe evitar que aparezcan zonas fraccionadas, que descomprimen el terreno y lo inestabilizan.

Una vez fijado el gálibo de explotación, se debe ajustar la bóveda a una forma que sea lo más circular posible, y a la vez optimizar el volumen de la excavación. En caso que la construcción del túnel exija una contra bóveda debido a la inestabilidad del material, esta deberá aproximar más aun la forma del túnel al círculo. Es importante la forma, ya que determina la minimización de los sostenimientos, así como una mayor seguridad en el proceso constructivo.

Geología y Geotecnia

Los levantamientos geológicos y los estudios geotécnicos son fundamentales en el proyecto, diseño y construcción.

Al excavar un túnel se pueden encontrar tres tipos de condiciones naturales que dan lugar a la pérdida de resistencia del macizo y por tanto, a problemas de estabilidad. Ver figura 7.9

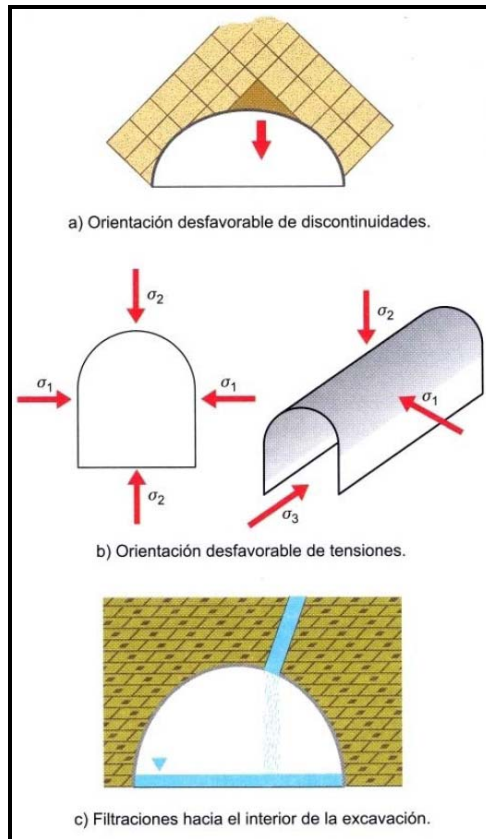


Figura 7.9. Condiciones naturales de inestabilidad en excavación de túneles en roca.

Fuente: González de Vallejo (2002)

Estas condiciones están directamente relacionadas con los siguientes factores geológicos: estructura, discontinuidades, resistencia de la roca matriz, condiciones hidrogeológicas y estado tensional.

Por otro lado, la excavación del túnel también genera una serie de acciones inducidas que se suman a las citadas condiciones naturales, como son:

— Pérdida de resistencia del macizo que rodea a la excavación como consecuencia de la descompresión creada: apertura de discontinuidades, figuración por voladuras, alteraciones, flujos de agua hacia el interior del túnel, etc.

- Reorientación de los campos tensionales, dando lugar a cambios de tensiones.
- Otros efectos como subsidencias en superficie, movimientos de ladera, cambios en los acuíferos, etc.

La respuesta del macizo rocoso ante las acciones naturales e inducidas determina las condiciones de estabilidad del túnel y, como consecuencia las medidas de sostenimiento a aplicar.

El estudio geotécnico tiene por objeto prever el comportamiento mecánico del macizo rocoso cuando se le someta a modificaciones en su estado tensional de equilibrio, como resultado de la construcción del túnel.

PROYECTO TÚNEL TRASVASE TAGUAIGUAY-VALLES DE TUCUTUNEMO

El túnel trasvase tendrá una longitud de 828,4 metros, y se excavará con una sección de herradura de aproximadamente 6m de diámetro, bajo una muy modesta cobertura ascendente desde ambos portales alcanzando su máximo hacia las progresivas centrales sin superar los 120 metros.

La unidad litológica identificada en la zona de estudio corresponde a Filita de Tucutunemo, caracterizada principalmente por la presencia de filitas y esquistos cuarzo-micáceo-grafitosos, con presencia de gran cantidad de fallas y plegamientos, según los resultados del estudio geológico correspondiente a este proyecto, elaborado por la oficina Técnica Ingeniero José V. Heredia.

El proyecto de los soportes del túnel establece los criterios y los mecanismos de selección de los soportes a emplear de acuerdo con su capacidad estructural en función de las condiciones geomecánicas y de la consecuente

demanda a esperar. Debe señalarse que el proyecto del soporte primario de los túneles debe ser considerado como referencial, ya que el mismo estará sujeto a los ajustes y modificaciones que las condiciones y los comportamientos reales de las excavaciones a efectuar, sugieran o impongan en el curso de las obras.

La sección transversal típica prevista para el túnel, se presenta con un radio de bóveda de 3m, con un radio interno en los hastiales de 3.82m, con dos andenes laterales y con una sección tipo canal en la solera, dichas características geométricas están ilustradas en la figura anexa.

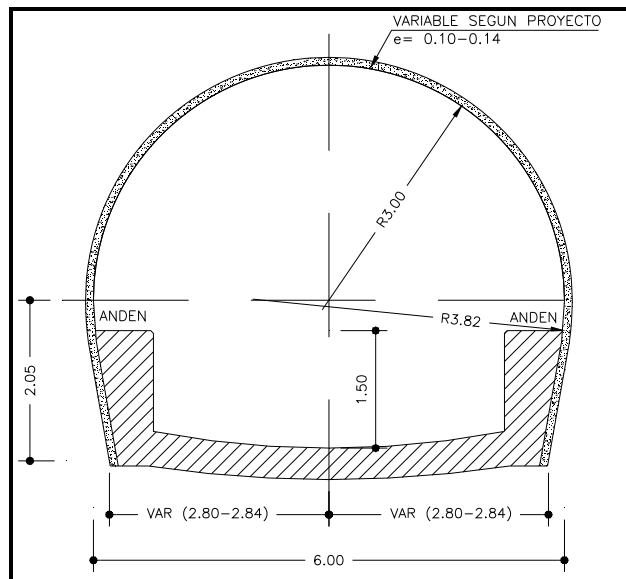


Figura 7.10. Sección del Túnel Trasmase Taguaguay-Valles de Tucutunemo.

Fuente: De Marco & Perri (2007)

Soporte Primario

La caracterización geomecánica de los sectores macroscópicamente homogéneos del túnel se ha basado en los tres parámetros geomecánicos independientes: el primero el Geological Strength Index (GSI) relativo al macizo rocoso, y los otros dos, la resistencia a la compresión inconfiada σ_{ci} y el parámetro friccionante de Hoek m_i relativos al material rocoso.

El GSI se ha evaluado a partir del levantamiento geológico, mientras los parámetros de resistencia σ_{ci} y m_i se han deducido de la caracterización litológica.

Luego, las cargas a esperar sobre los soportes primarios se han calculado para todos los tramos del túnel siguiendo la metodología del sólido de cargas.

Finalmente de acuerdo con los criterios de diseño, después de haber pre-seleccionado los soportes primarios en base a la clase de comportamiento de la excavación y una vez calculadas las cargas, o demanda (D), se han seleccionado los soportes primarios correspondientes a cada sector de túnel en forma tal que los mismos posean una resistencia, o capacidad (C), compatiblemente superior a la respectiva demanda (D).

Se incluye a continuación la tabla con las características geométricas y mecánicas de los soportes primarios seleccionados, de acuerdo con los resultados de los cálculos estructurales suministrados por oficina técnica en el informe de “Proyecto de las Excavaciones Soportes y Portales”

Tabla 7.1. Características geométricas y estructurales de soportes primarios

TIPO	CONCRETO PROYECTADO ($F'c = 150 \text{ Kg/cm}^2$)	COSTILLAS METÁLICAS ($f'y = 2500 \text{ Kg/cm}^2$)	PERNOS METÁLICOS (20 toneladas)	CAPACIDAD (Kg/cm^2)	RIGIDEZ ($\text{Kg/cm}^2/\text{cm}$)
SP-A	10 cm	—	eventuales de 3m	2.6 ($\delta = 0.4$)	13.0 ($\delta = 1.4$)
SP-B	14 cm	2 IPN 140 @ 100 cm	2*3 m @ par costillas	5.0 ($\delta = 0.6$)	25.5 ($\delta = 2.3$)

Fuente: De Marco & Perri (2007)

A continuación se reportan las tablas resumen del proyecto inicial, las cuales contienen los más representativos resultados del proceso de análisis, cálculos y diseño que se ha descrito con anterioridad y finalmente el principal resultado obtenido: la selección y distribución del soporte a aplicar a lo largo de las excavaciones.

Tabla 7.2. Características Geotécnicas Básicas “independientes”

TIPO DE TERRENO	GSI [(Min-Med-Max)]	mi [(Min-Med-Max)]	σ_{ci} (Mpa) [(Min-Med-Max)]
GG5 Suelo coluvial Suelo residual Roca descompuesta	< 25	< 7	< 10
GG4 - GG3 Roca meteorizada a muy meteorizada blanda a dura foliada y muy fracturada	(25-33-40)	(7-8-9)	(10-20-30)
GG2 Roca fresca dura foliada y poco fracturada	> 40	(9-11-13)	(30-40-50)

Fuente: De Marco & Perri (2007)

Tabla 7.3. Características Geotécnicas Básicas “derivadas” (*)

Tipo de terreno	ϕ_m [Med. - Des.]	σ_m (Mpa) [Med. - Des.]	E_m (MPa) [Med. - Des.]	K_n (t/m³) [Med. - Des.]
GG5 * Suelo Coluvial * Suelo Residual * Roca descompuesta	32 ($\delta=3$)	0,29 ($\delta=0,02$)	612 ($\delta=45$)	15728 ($\delta=1242$)
GG4 - GG3 * Roca meteorizada a muy meteorizada blanda a dura foliada y muy fracturada	45 ($\delta=3$)	1,31 ($\delta=0,08$)	1661 ($\delta=340$)	42703 ($\delta=8851$)
GG2 * Roca fresca dura foliada y poco fracturada	51 ($\delta=3$)	4,84 ($\delta=0,30$)	3600 ($\delta=465$)	92372 ($\delta=12451$)

Fuente: De Marco & Perri (2007).

(*) Los parámetros geomecánicos para el macizo rocoso derivados con simulación estadística (sumnistrados por De Marco & Perri. 2007), útiles para los análisis a ejecutar, se han obtenido con la aplicación de las siguientes correlaciones:

- $\varphi_m = 0.424 \text{ GSI} - 0.0016 \text{ GSI}^2 - 6 + 9L_n m_i$
- $\sigma_{cm} = (0.0034 m_i^{0.8}) \sigma_{ci} [1.029 + 0.025 e^{(-0.1 m_i)}]^{GSI}$
- $E_m = 1000 (\sigma_{ci} / 100)^{1/2} 10^{(GSI-10) / 40}$
- $K_n = E_m (1 + \nu) / D$ ($\nu = \text{Módulo de Poisson}$; $D = \text{diámetro de la excavación}$).

Tabla 7.4. Demanda (D) sobre el Soporte Primario (*) para Secciones Superficiales e Intermedias (Kg/cm²)

COBERTURAS (m)	5 - 15	15 - 50
GSI ≤ 25	γH = 2,4 (desv. 0,7)	γ α (h + b) = 3,8 (desv. 0,4)
25 ≤ GSI ≤ 40	γH = 2,4 (desv. 0,7)	γ α (h + b) = 3,2 (desv. 0,6)
GSI ≤ 40	γH = 2,4 (desv. 0,7)	γ α (h + b) = 1,4 (desv. 0,1)

Fuente: De Marco & Perri (2007)

Para las secciones profundas, resultan los siguientes rangos de cargas (“demanda” a esperar sobre el soporte), obtenidos aplicando el Método de las Líneas Características, en función de los rangos de cobertura previstos y en función de los posibles grupos geomecánicos (GGx) del terreno que se estima encontrar.

Tabla 7.5. Demanda (D) sobre el Soporte Primario (*) para Secciones Profundas (Kg/cm²)

COBERTURAS (m)	50 - 100	100 - 120
GSI ≤ 25	3,2 (desv. 0,9)	4,1 (desv. 0,5)
25 ≤ GSI ≤ 40	1,4 (desv. 0,6)	1,9 (desv. 0,4)
GSI ≤ 40	0,7 (desv. 0,2)	1,1 (desv. 0,2)

Fuente: De Marco & Perri (2007)

Selección y Distribución de Soportes para el Túnel Trasvase

Tabla 7.6. Demanda (D) a esperar sobre el Soporte Primario a lo largo del túnel (Kg/cm²)

COBERTURAS (m)	5 - 15	15 - 50	50 - 100	100 - 120
Progresivas (m)	0+025-0+060 0+833-0+884	0+060-0+157 0+621-0+833	0+157-0+300 0+440-0+621	0+300-0+440
GSI ≤ 25	2,4 (desv. 0,7)	3,8 (desv. 0,4)	3,2 (desv. 0,9)	4,1 (desv. 0,5)
25 ≤ GSI ≤ 40	2,4 (desv. 0,7)	3,2 (desv. 0,6)	1,4 (desv. 0,6)	1,9 (desv. 0,4)
GSI ≤ 40	2,4 (desv. 0,7)	1,4 (desv. 0,1)	0,7 (desv. 0,2)	1,1 (desv. 0,2)

Fuente: De Marco & Perri (2007).

Tabla 7.7. Selección y Distribución a lo largo del túnel del Tipo de Soporte Vs. GSI y Cobertura

COBERTURAS (m)	5 - 15	15 - 50	50 - 100	100 - 120
Progresivas (m)	0+025-0+060 0+833-0+884	0+060-0+157 0+621-0+833	0+157-0+300 0+440-0+621	0+300-0+440
GSI ≤ 25	SP-B	SP-B	SP-B	SP-B
25 ≤ GSI ≤ 40	SP-B	SP-B	SP-A	SP-A
GSI ≤ 40	SP-B	SP-A	SP-A	SP-A

Fuente: De Marco & Perri (2007)

Tabla 7.8. Margen de Seguridad (C-D), Probabilidad de Falla (p%) y Factor de Seguridad (FS)

COBERTURAS (m)	5 - 15	15 - 50	50 - 100	100 - 120
Progresivas (m)	0+025-0+060 0+833-0+884	0+060-0+157 0+621-0+833	0+157-0+300 0+440-0+621	0+300-0+440
GSI ≤ 25	5,0 - 2,4 p = 2,3 % FS = 2,0	5,0 - 3,8 p = 4,2 % FS = 1,3	5,0 - 3,2 p = 4,2 % FS = 1,6	5,0 - 4,1 p = 4,4 % FS = 1,3
25 ≤ GSI ≤ 40	5,0 - 2,4 p = 2,3 % FS = 2,0	5,0 - 3,2 p = 2,5 % FS = 1,6	2,6 - 1,4 p = 1,0 % FS = 1,9	2,6 - 1,9 p = 4,9 % FS = 1,4
GSI ≤ 40	5,0 - 2,4 p = 2,3 % FS = 2,0	2,6 - 1,4 p = 0,9 % FS = 1,9	2,6 - 0,7 p = 0,6 % FS > 3,0	2,6 - 1,1 p = 1,1 % FS > 2,0

Fuente: De Marco & Perri (2007)

Aspectos Constructivos

El túnel en referencia deberá ejecutarse por métodos convencionales, mediante el abatimiento mecánico de los terrenos o recurriendo, cuando las condiciones geomecánicas del macizo rocoso lo requieran, a la técnica de perforación y voladuras.

A continuación se comentan las fases constructivas y tipo de maquinaria más adecuado para la construcción del túnel en referencia.

En general, los métodos de excavación a emplear para un túnel dependen fundamentalmente del tipo de terreno a atravesar. Básicamente se pueden emplear dos métodos convencionales: el de perforación y voladura, mediante utilización de explosivos, y la excavación mecánica con máquinas de ataque puntual como rozadoras, martillos de impacto o excavadoras hidráulicas.

El método de perforación y voladura, es el más utilizado para túneles en roca dura y es el único posible cuando la roca es muy abrasiva, muy resistente o se encuentra en estado masivo. Básicamente consiste en efectuar unos taladros en el frente de excavación, cargarlos con explosivos y hacerlos detonar. La reacción explosiva genera una energía en forma de presión de gases y energía de vibración, capaz de quebrantar la estructura de la roca.

Cuando las condiciones del terreno lo inducen (resistencia mecánica de los materiales rocosos que no superan los 250 a 300 Kg/cm²) o cuando otros motivos prácticos y de seguridad no hacen aconsejable la utilización de explosivos, se recurre al empleo de excavación mecánica. Este método concentra la energía en la punta del útil o útiles de la máquina en contacto con la roca, de modo que supera la resistencia del material a su penetración y la resistencia a la tracción y cizallamiento. A continuación se describen, más detalladamente, cada uno de los sistemas:

Perforación y voladura

Es el método a usar cuando las condiciones mecánicas de las rocas lo requieran y las vibraciones producidas por las voladuras no presenten inconvenientes.

Los trabajos elementales de que consta el ciclo característico son las siguientes:

- Replanteo en el frente del esquema de voladura (patrón).
- Perforación de los taladros.
- Carga de los taladros con explosivos.
- Voladura y ventilación.
- Retirada de escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.

La perforación de los taladros se realiza con martillos hidráulicos montados sobre una máquina automóvil denominada jumbo. La elección del tipo de jumbo dependerá principalmente de los siguientes factores:

- La superficie de la sección de avance que tenga que perforar sin tener que cambiar de posición.
- El tipo de material que tenga que perforar influirá en la potencia de los martillos hidráulicos y el tipo de barrenas y bocas de perforación.
- La longitud de los pases condiciona la profundidad de los taladros y por consiguiente el tamaño de la barrena de perforación y de la lanzadera.
- El número de taladros de la sección y el rendimiento que se quiera conseguir influirá en la elección del número de brazos perforadores que monte el jumbo.

– La posible utilización de la máquina en la fase de bulonado, ya que la longitud de los bulones a colocar influirá en el tamaño de la lanzadera y deberá estar acorde con la altura máxima de la sección de avance.

La gran sección de los túneles previstos, requerirá el empleo de jumbos de alta capacidad de al menos dos brazos perforadores.

Excavación mecánica con rozadora

Cuando las condiciones del terreno no requieren o no admiten el empleo de voladuras, hay que pensar en la excavación mecánica. La rozadora es una máquina de ataque puntual de alto rendimiento que porta un brazo extensible que bate la sección de excavación y que lleva en su extremo un cabezal provisto de las herramientas de corte o picas.

El par de rotación del cabezal, el empuje de los cilindros hidráulicos del brazo y las fuerzas de reacción de la máquina, se concentran todos en las puntas de las picas iniciadoras del rozado. Completan la rozadora un sistema de recogida y transporte del escombros y un chasis móvil sobre orugas.

Las rozadoras se clasifican por su peso, dado que la fuerza que ejerce la cabeza contra la roca es contrarrestada únicamente por el peso de la máquina. De este modo, a mayor peso más alta será la capacidad de la rozadora para excavar rocas más resistentes, y por tanto tendrá mayor potencia de corte, aunque en el caso específico hay que destacar que su utilización es limitada a las condiciones de roca de menor resistencia y mayor meteorización.

El tipo y potencia de la rozadora se elegirá de acuerdo a las características del terreno y de la sección tipo. Los principales factores para seleccionar la máquina adecuada son:

- Resistencia máxima de la roca a compresión simple. Determinará la potencia y por lo tanto el peso de la máquina.

- Gálibos de excavación. El gran tamaño de las secciones tipo obligan a subdividirla al menos en dos fases: avance y destroza. Las condiciones del terreno pueden hacer aconsejable subdividir estas fases en otras de menor tamaño. Por lo tanto el área de rozado de la máquina debe cubrir cada una de las fases de excavación para no tener que volver a posicionar la máquina.

- Condiciones de maniobrabilidad. Las condiciones de trabajo definidas por la sección tipo, el tipo de material y el método constructivo condicionan las características finales de la máquina como pueden ser el sistema de desescombro y la altura de la máquina.

- La abrasividad de la roca es también un factor importante a tener en cuenta por la reducción en el rendimiento y en el desgaste de los cortadores o picas.

Las ventajas de la utilización de un minador continuo o rozadora sobre otros tipos de maquinaria de excavación mecánica, son los altos rendimientos que se pueden conseguir si el tipo de máquina elegido concuerda con las características del material. También el sistema de desescombro disminuye la duración de los ciclos.

Excavación mecánica con martillo hidráulico

Se trata del uso de máquinas de ataque que transmiten la energía generada por motores eléctricos o diesel a través de un circuito hidráulico a la herramienta o pica situada en el extremo articulado de la máquina. Tiene gran utilidad cuando se trata de excavar rocas blandas plegadas fracturadas.

El martillo se puede montar sobre una retroexcavadora de cadenas con el peso y potencia hidráulica necesaria para que el martillo trabaje a pleno

rendimiento. Las ventajas principales son: el bajo coste, la necesidad de pocos operarios, la movilidad y la flexibilidad de operación.

También se montan martillos sobre excavadoras-cargadoras provistas de un sistema de evacuación de escombros. El coste de estas máquinas es superior a una retroexcavadora convencional, pero al estar especialmente diseñadas para trabajar en obras subterráneas consiguen mejores rendimientos en pequeñas galerías ya que sus dimensiones son menores y también por no tener que retirarse durante la fase de desescombro.

Excavación mecánica con excavadora hidráulica

En suelos o rocas muy blandas, el empleo de una máquina retroexcavadora es eficaz. Es conveniente disponer de un martillo picador que se pueda montar para atravesar zonas de roca más dura.

Actualmente existen máquinas retroexcavadoras pensadas para la excavación de túneles, de gran versatilidad. Algunas son especialmente diseñadas para excavar el frente, otras presentan la articulación del brazo y otras poseen protecciones contra desprendimientos.

Un sistema eficiente de carga y transporte de los escombros es imprescindible para conseguir reducir el tiempo de los ciclos de trabajo y el coste de la excavación del túnel. El poco espacio disponible y las dificultades de acceso al frente de excavación hacen que esta tarea sea muchas veces crítica ya que es fundamental retirar el escombros rápidamente para que puedan iniciarse las tareas de sostenimiento.

El sistema y maquinaria a emplear dependerá del volumen de material a transportar por ciclo de excavación y de la longitud del transporte hasta el lugar de acopio.

Los principales factores a tener en cuenta a la hora de elegir el mejor y más rentable sistema de desescombro son los siguientes:

- El volumen de escombros producido por la máquina de excavación.
- La pendiente y el sentido de avance del túnel.
- La distancia entre el frente y el lugar de acopio.
- La eventual presencia de agua.
- El espacio disponible en el frente y en el túnel condicionan las maniobras y el gálibo de la maquinaria de desescombro.

Para el túnel de la referencia, no puede excluirse que se deba localmente recurrir al uso de las voladuras, hacia las progresivas centrales del túnel donde las más elevadas coberturas favorecen la presencia de macizos rocosos poco alterados y hasta frescos, aunque siempre plegados y fracturados.

Por lo general sin embargo, es de prever que a lo largo de la mayor parte de las progresivas a excavar, el recurso al abatimiento mecánico podrá resultar, además de conveniente, también relativamente eficiente.

Tal abatimiento mecánico se podrá llevar a cabo inicialmente mediante el uso de una excavadora y más extensamente mediante el uso de un martillo demoledor.

En consideración de la longitud prevista para el túnel, la distancia entre el lugar de acopio y el frente no será en general excesiva, mientras al mismo tiempo el tamaño de la sección hace prever que las maquinarias comunes no tendrán problemas para maniobrar en el interior del subterráneo. Por lo tanto la combinación de una pala cargadora y camiones de carga convencionales es probablemente el sistema más adecuado y económico para efectuar el desescombro de los terrenos abatidos.

La longitud del túnel hace inducir a evaluar la posibilidad de atacar la excavación desde ambos portales en contemporáneo para no alargar en exceso la duración de las obras, mientras para el caso de no resultar prácticamente implementable tal metodología de excavación, los principales aspectos que hay que evaluar a la hora de situar el frente de ataque son los siguientes:

La excavación en ascenso siempre es más favorable ya que el drenaje de las aguas procedentes de filtraciones se puede realizar por gravedad. Si el avance se realiza en descenso y la presencia de agua es importante, el drenaje en el frente se convierte en un problema difícil y que si no se resuelve convenientemente, puede llegar a producir daños en las maquinarias y disminuir los rendimientos previstos.

Deben garantizarse; la accesibilidad de equipos, las condiciones de acceso del personal y las facilidades para las instalaciones auxiliares de montaje, desescombro, ventilación, etc.

En cuanto al soporte a aplicar, se trata esencialmente de concreto proyectado sistemático localmente y eventualmente complementado con pernos metálicos y con costillas metálicas.

El concreto proyectado es conveniente que sea reforzado con fibras dosificadas a 35 Kg/m^3 para evitar el uso de la malla electro-soldada cuya colocación es complicada e ineficiente.

Los pernos metálicos, de 3 metros de largo deben poseer una capacidad última de 20 toneladas y podrán emplear cualquier tecnología que resulte prácticamente adecuada, desde las barras metálicas (cabillas de adherencia mejorada de 1 pulgada de diámetro inyectadas con mortero de agua-cemento) hasta los super-swellex de adherencia mecánica instantánea, etc.

Las costillas metálicas serán perfiles IPN 140 y podrán ser colocadas en pares a cada metro, o aisladamente a cada 50 centímetros. En zonas particularmente descompuestas o muy fracturadas, podría ser necesario el avance a media sección. Estas condiciones serán definidas con el proyectista durante los trabajos de excavación.

La solera será de concreto armado vaciado, para ofrecer una superficie de escorrentía de las aguas suficiente resistente al desgaste.

CAPÍTULO VIII

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Para el desarrollo de este proyecto se realizaron las actividades contenidas en las siguientes etapas:

1. Etapa pre-campo.
2. Etapa de campo.
3. Etapa post-campo.

Etapa Pre-Campo

Búsqueda, recopilación y síntesis de la información geológica y geotécnica de la zona a estudiar (publicada o inédita) existente en:

- Trabajos Especiales de Grado de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (UCV).
- Publicaciones y congresos geológicos y geotécnicos nacionales e internacionales.
- Hojas topográficas y ortofotomapas a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB).
- Informes geológico, geofísico, geotécnico y diseño del túnel del Proyecto de Obra del Trasvase Taguaiguay_Valles de Tucutunemo, Estado Aragua, suministrados por la Oficina Técnica José V. Heredia y Asociados C.A.

Etapa de Campo

El trabajo de campo consistió en el desarrollo de las siguientes actividades:

- Levantamiento de la geología de superficie de la zona de estudio, aproximadamente en área de 203Ha. Ver anexo 1.
- Levantamiento de los frentes de excavación del túnel. Progresivas 0+000-0+200, ver anexos 4 -17.

Los parámetros a recolectados de los levantamientos antes citados, son:

- Descripción litológica de los tipos de roca presentes.
- Principales estructuras.
- Grado de meteorización.
- Grado de resistencia de las rocas observadas.
- En cuanto a las discontinuidades presentes: Orientación, proyección estereográfica, espaciado, continuidad, abertura, rugosidad, rellenos, número de familias, filtraciones.
- Clasificación de roca según resistencia a la compresión simple en campo (ISRM 1981).
- Estimación en campo de la resistencia a la compresión simple mediante el uso del Martillo de Schmidt.
- Estimación del índice de la designación de la calidad de la roca (RQD).
- Estimación del índice de resistencia geológica (GSI).

Todos los puntos antes mencionados se pueden consultar en el capítulo V, caracterización en campo de los macizos rocosos, a excepción de los dos últimos punto explicados en al capítulo IV, mecánica de rocas.

Etapa Post-Campo

La etapa post-campo comprendió las siguientes actividades:

- Estudio petrográfico de las muestras tomadas en campo con el uso de un microscopio especializado, a fin de precisar la mineralogía de las diferentes litologías encontradas.
- Determinación en laboratorio de la resistencia uniaxial no confinada de la roca, a través del ensayo uniaxial o de compresión simple de las muestras recolectadas en campo, dicho ensayo se explica en el capítulo VI, resistencia y definición de la matriz rocosa.
- Determinación del ángulo de fricción y cohesión en discontinuidades de las muestras seleccionadas en campo, a través del ensayo de corte directo en discontinuidades, expuesto en el capítulo VI, resistencia y definición de la matriz rocosa.
- Procesamiento y análisis continuo de los datos recolectados en campo mediante el uso de los siguientes programas: *Dips*, para construcción de proyecciones hemisféricas de los planos de foliación y discontinuidades y su relación con la orientación del túnel; *RocLab*, para el análisis de la resistencia del macizo rocoso según Hoek y AutoCad 2007, para la elaboración del perfil y cálculo de la cobertura del túnel, elaboración de mapas topográficos, etc. Dichos programas son de adquisición gratuita a través de internet.
- Determinación de la calidad de la roca excavada, a través de las clasificaciones del macizo rocoso según los siguientes autores:

Bieniaswki y Barton, teorías explicadas en el capítulo IV, mecánica de rocas.

- Integración de la información contenida en mapas geológicos – estructurales, mapas topográficos y ortofotomapas de la zona en estudio, así como la descripción de caracteres estructurales y litológicos, a partir de la revisión de trabajos previos y en conjunto con los estudios realizados en campo.

CAPÍTULO IX

RESULTADOS Y ANÁLISIS

GEOLOGÍA SUPERFICIAL

Luego de un estudio detallado de los afloramientos presentes en la zona de estudio, se pudo determinar que la misma consta de cuatro litotipos en superficie, compuestos por rocas metamórficas.

Los litotipos descritos se infieren, pertenecen a la Formación Filitas de Tucutunemo, por lo cual el orden en que se describen está relacionado con el porcentaje de aparición, en orden decreciente. Los mismos fueron clasificados de acuerdo a la mineralogía y características texturales de la roca.

ESQUISTO CUARZOSO (EQ)

Localización Específica: Es la unidad más común en el área de estudio, se presenta al noroeste de la Fila Ancón. También aflora al sureste del portal sur del túnel trasvase, ver anexo 1.

Descripción Litológica Macroscópica: En esta sección de estudio fueron observadas dos litologías principalmente: la primera, y de mayor abundancia es un esquisto con marcada foliación y variada mineralogía: cuarzo, feldespato, micas, bastante deformado y cuyos productos de alteración se caracterizan por presentar texturas limosas y arenosas, por la gran cantidad de vetas de cuarzo deformadas y trituradas en la roca. Los diversos tipos de esquisto observados se presentan de manera caótica, debido al complejo arreglo estructural en la zona. La otra litología es una roca de fábrica granular ligeramente foliada, con presencia de feldespato, cuarzo y minerales verdes, de aspecto moteado y dureza variable de acuerdo a los

niveles de meteorización. Cabe destacar que para esta última, el producto de alteración por los procesos de meteorización es una arcilla blancuzca, plástica al humedecer. Las litologías nombradas anteriormente se encuentran intercaladas. El macizo se presenta en bloques y bastante fracturado.

Color Fresco: Los colores varían de acuerdo a la concentración de los minerales, desde gris claro hasta blancuzco, y algunos con tonalidades rosadas.

Color Meteorizado: En muchas ocasiones el esquistos suele teñirse de un color rojizo, debido a la presencia de óxidos de hierro en la composición. En general predominan los ocres claros.



Figura 9.1. Esquisto Cuarzoso. Parada 12N. Orientación N - S
Tomada por: Rosangela Martínez (2007)



Figura 9.2. Esquisto Cuarzoso. Parada 4 S. Orientación S 40° W
Tomada por: Maira Hernández (2007)

Petrografía:

Muestra: FT-01

Ubicación: 666123 E – 1112846 N

Tabla 9.1. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos cuarzo-micáceo

Muestra	Qz	Mu	Ab	He
FT-01	54	45	1	<1

Cuarzo (Qz); Muscovita (Mu); Albita (Ab); Hematita (He)

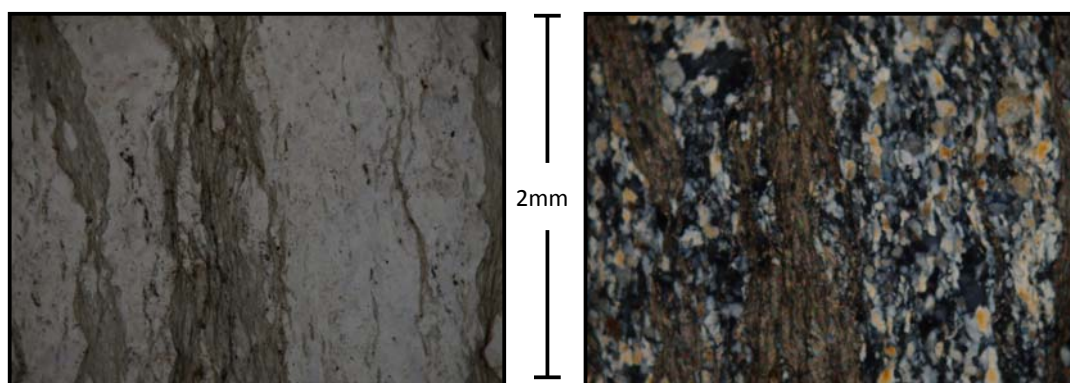


Figura 9.3. Cristales de muscovita orientados con minerales de cuarzo. Textura esquistosa. Izquierda: nicols paralelos. Derecha: nicols cruzados. Foto tomada con objetivo 10X de aumento.

Observaciones: Roca de textura esquistosa, con gran cantidad de minerales cuarzo, anhedral, de distintos tamaños, tanto monocristalinos como policristalinos, con extinción ondulatoria, intercalados con moscovita (sericita) levemente pleocroica. El mineral opaco se encuentra en trazas, amorfo.

ESQUISTO MICÁCEO (EM)

Localización Específica: Esta unidad se encuentra distribuida al noroeste de la Fila El Ancón. Igualmente se encontraron afloramientos al suroeste del portal sur del trazado del túnel trasvase, ver anexo 1.

Descripción Litológica Macroscópica: Esquisto de marcada foliación cuya característica principal es la presencia de micas, lo cual genera que su resistencia a la acción de los agentes erosivos sea baja, en su mayoría estos afloramientos son deleznable. En algunos casos suele observarse intervalos o capas grafitosas entre las capas micáceas. De acuerdo a los colores frescos se infiere que la mica sea muscovita con presencia de clorita también. La fractura de la roca es hojosa, siguiendo los planos de foliación. Se cree, de acuerdo a los datos suministrados por las perforaciones realizadas que esta unidad se encuentra por encima de la Unidad de Esquistos Verdes explicada más adelante. Igualmente se observaron vetas de cuarzo de variadas longitudes y espesores. rango

Color Fresco: El color fresco es gris claro en general, observándose coloraciones más oscuras en las capas grafitosas.

Color Meteorizado: Colores ocres claros y rojizos en la mayoría de los afloramientos encontrados.



Figura 9.4. Esquisto Micáceo. Parada 2N. Orientación N53° W
Tomada por: Rosangela Martínez (2007)



Figura 9.5. Esquisto Micáceo. Parada 9S. Orientación S 30° W
Tomada por: Maira Hernández (2007)

Petrografía:

Muestra: FT-03

Ubicación: 667174 E – 1113387 N

Tabla 9.2. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en filita micácea

Muestra	Mu	Est	Cl	Qz	Gf	Hm
FT-03	40	30	14	10	5	1

Muscovita (Mu); Estilphomelana (Est); Clorita (Cl); Cuarzo (Qz); Grafito (Gf); Hematita (Hm)

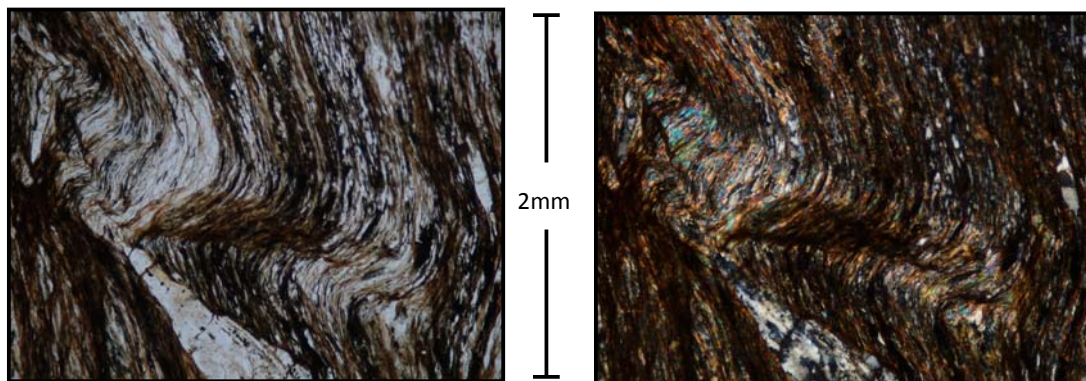


Figura 9.6. Muestra FT-03. Mica entrelazada con grafito, clivaje de crenulación. Textura filítica.
Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados.
Foto tomada con objetivo 10X de aumento.

Observaciones: Muestra de textura filítica, formada mayormente por minerales de color verde tales como clorita, muscovita y estilfomelana, con clivaje de crenulación y pequeñas cantidades de cuarzo entre las micas. El mineral opaco se encuentra como accesorio.

ESQUISTO CALCÁREO VERDOSO (ECV)

Localización Específica: La unidad se encuentra presente en la zona central del área de estudio con un rumbo aproximado N 32° W, ver Anexo 1.

Descripción Litológica Macroscópica: De acuerdo a los colores observados se infiere la presencia de minerales de color verde tales como muscovita en la composición de estos esquistos, además se observa la presencia de vetas de cuarzo e intercalaciones de capas grafitosas. La secuencia se compone de franjas de esquistos de forma tabular perfectamente foliados de colores verdes claros con procesos de oxidación, esquistos verdes grisáceos oscuros de mayor dureza intercalados con pequeñas capas (milimétricas) de rocas ricas en hierro.

Color Fresco: Los colores son gris verdosos principalmente, en algunos casos pequeñas capas gris oscura por la presencia de grafito.

Color Meteorizado: En su mayoría se tiñen de colores rojizos al contacto con los agentes atmosféricos, el resto presentan tonalidades ocres oscuras



Figura 9.7. Esquisto calcáreo verdoso. Parada 4N. Orientación S 80° W
Tomada por: Maira Hernández (2007)



Figura 9.8. Esquisto calcáreo verdoso. Parada 10 N. Orientación N70° W
Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

Petrografía:

Muestra: FT-02

Ubicación: 666507 E – 1113638 N

Tabla 9.3. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos calcáreos verdosos

Muestra	Mu	Cc	Qz	Py
FT-02	25	35	35	5

Muscovita (Mu); calcita (Cc); Cuarzo (Qz); Pirita(Py)

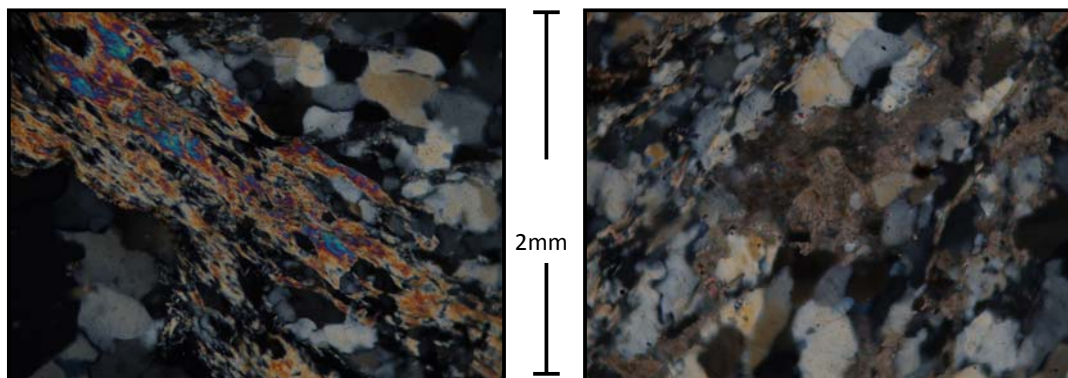


Figura 9.9. Muestra FT-02. Izquierda: Cristales de muscovita orientados con minerales de cuarzo. Derecha: presencia de calcita. Foto tomada con objetivo 20X de aumento, en nicols cruzados.

Observaciones: Minerales desorientados, de distintos tamaños, con gran contenido de minerales calcáreos, se observan alteraciones de color rojizo.

MÁRMOL (M)

Localización Específica: Se encuentra ubicada hacia la ladera Este de la Fila Ancón, en el extremo sur del área de estudio, entre las cotas 640 y 660. representan el porcentaje más bajo de las rocas expuestas, ver anexo 1.

Descripción Litológica Macroscópica: Está conformada por mármol azules laminadas y vetas de CaCO_3 de hasta 10cm de espesor, de meteorización moderada.

Color Fresco: Gris oscuro azulado.

Color Meteorizado: Gris oscuro.



Figura 9.10. Mármol. Parada 14 S. Orientación N54° W

Tomada por: Maira Hernández (2007)



Figura 9.11. Mármol. Parada 14 S. Orientación E – W. Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

Petrografías:

Muestra: FT-04

Ubicación: 667309 E – 1113116 N

Tabla 9.4. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en mármol

Muestra	Cc	Gf	Qz
FT-04	89	10	1

Calcita (Ca); Grafito (Gr); Cuarzo (Qz)

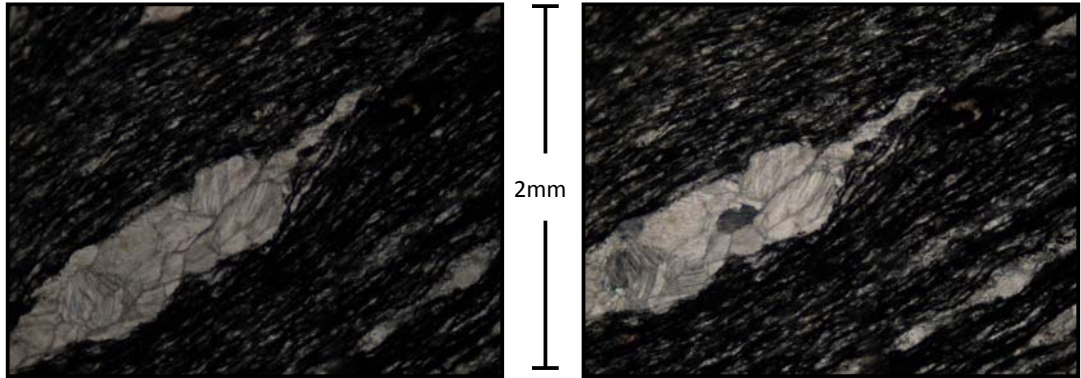


Figura 9.12. Muestra FT-04. Posible fósil recrystalizado. Izquierda: nicols paralelos. Derecha: nicols cruzados. Foto tomada con objetivo 10X de aumento.

Observaciones: Los mármoles se encuentran recrystalizados, constituidos por calcitas intercaladas con grafito dando una textura de aspecto filítica, se observan recrystalizaciones de calcita en forma de mosaico, de posibles fósiles. El cuarzo se observa como mineral accesorio.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

La zona de estudio se encuentra caracterizada por un complejo arreglo estructural, presentando diversas fallas locales que obedecen a los patrones de cizallamiento a nivel regional. Estas fallas han generado una deformación considerable en las rocas allí presentes. Se han identificado tres direcciones principales, las cuales se explican a continuación:

Falla con dirección SE-NW (F1). Esta es la falla más grande inferida en por el estudio. Genera numerosos rasgos geomórficos, dentro de los cuales se encuentran escarpes de alturas pronunciadas, drenajes y valles rectilíneos. Es aproximadamente paralela a la dirección de la Falla de Río Guárico. La figura 9.13 muestra la ubicación de las principales fallas en la zona. Se cree a su vez, que las mismas puedan estar generando las ensilladuras de falla que se observan en el tope de la fila El Ancón. Dadas las características geométricas observadas se infiere un movimiento dextral para la mayoría de las fallas, siendo la ubicada más

al sur la de más rápido movimiento. La figura 9.14 muestra algunos rasgos típicos de ésta.

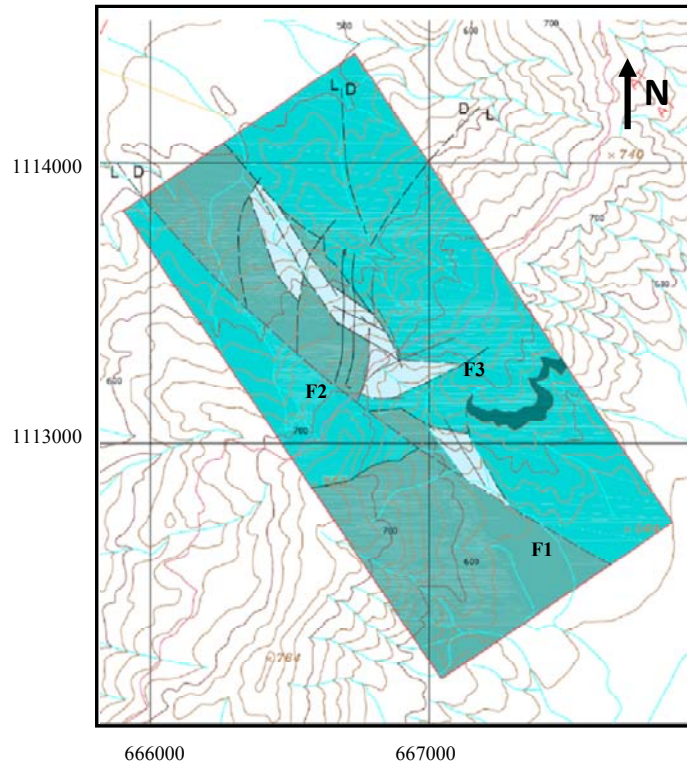


Figura 9.13. Croquis estructural de la zona de estudio ubicando las discontinuidades de mayor envergadura.



Figura 9.14. Vista SO del escarpe de falla generado al sur de la Fila El Ancón
Tomada por: Ing Adriana Alvarado (2007).

Fallas con dirección N-S (F2). Estas fallas se presentan de menor tamaño que las descritas anteriormente, fueron interpretadas a partir de la conductividad eléctrica aparente a VMD 20m, en análisis geofísico suministrado por *Geophysical Survey C.A 2007*, mostrada en la figura 9.15; corroboradas en campo por la zona de falla observada en la parada geológica P8N, (ver figura 9.16) y por la extensión de la zona problema en la excavación del túnel entre las progresivas 0+089 y 0+130 (ver anexo 2). Se presume son rampas laterales dentro del contexto de napas planteado en el modelo estructural antes mencionado (ver anexo 3), por lo cual se observa el grado de cizallamiento. La zona de falla presenta un ancho de 40m aproximadamente. Es importante acotar que dentro de la zona de falla los materiales se encuentran de manera caótica en bloques grandes y pequeños, y con muchas mineralizaciones de cuarzo blanco totalmente fragmentado.

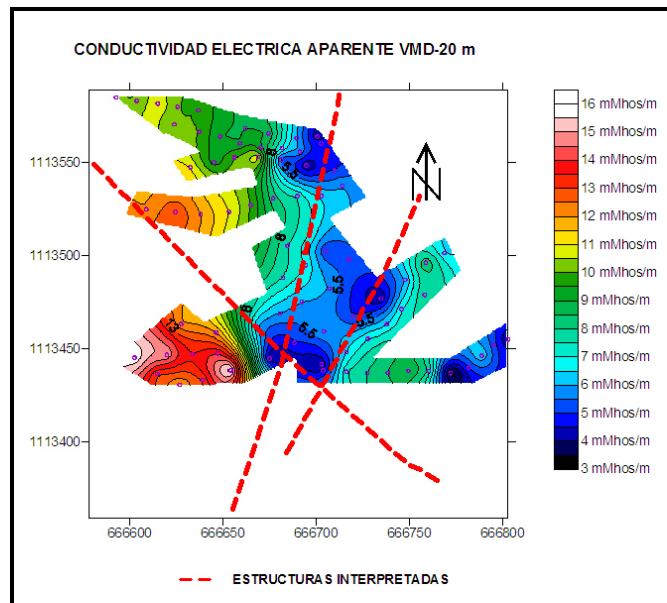


Figura 9.15. Estructuras interpretadas a partir de la conductividad eléctrica aparente a VMD 20m, Portal Norte. Fuente: Geophysical Survey C.A. (2007)



Figura 9.16. Disposición caótica de los materiales en la zona de falla.

Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

Fallas con dirección NE-SW (F3). Estas son las fallas de menor frecuencia en la zona, sin embargo sus expresiones geomórficas son evidentes. Los drenajes rectilíneos en dirección $N60^{\circ}E$ y $N76^{\circ}E$ observados en las paradas P7S y P8S respectivamente, que marcan contacto litológico entre los litotipos EQ y EM, (ver figura 9.17). Se presume que estas fallas son los frentes de corrimiento, del modelo estructural propuesto, ver anexo 1.



Figura 9.17. Rasgos geomorfológicos de una de las discontinuidades F3.

Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

Por lo expuesto anteriormente, se infiere que el sentido del esfuerzo principal σ_1 en la zona de estudio posee dirección NO-SE, por lo cual la dirección propuesta para el túnel trasvase tendría un ángulo de 23° (aproximadamente) con respecto a dicha dirección.

FOLIACIÓN

Los datos recolectados en el levantamiento de la geología de superficie, fueron agrupados y representados en las figuras 9.18 y 9.19, mostrando así las orientaciones preferenciales en la zona estudiada.

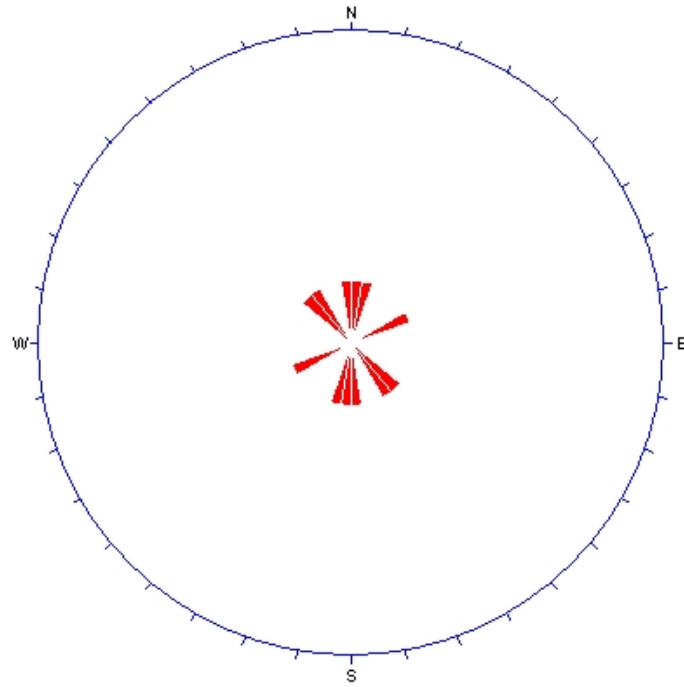


Figura 9.18. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de foliación con rumbos muy dispersos en superficie.

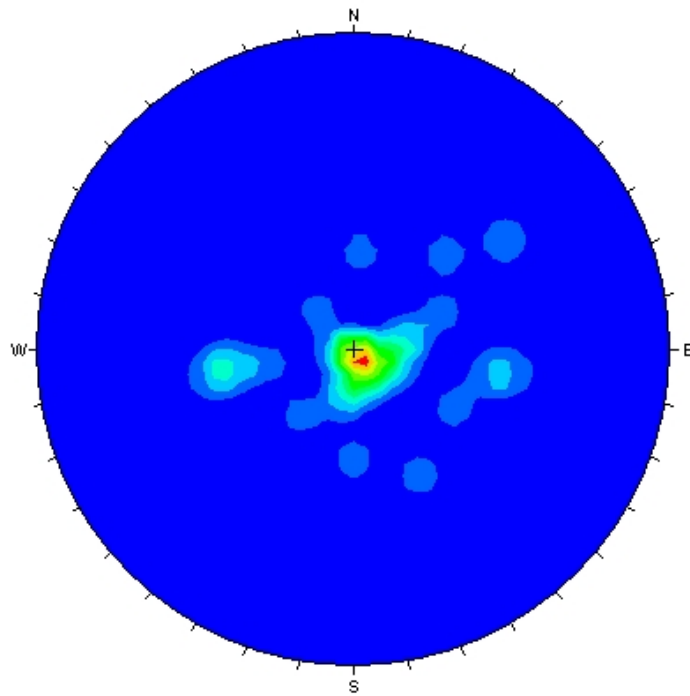


Figura 9.19. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de foliación en superficie.

En general los planos de foliación son horizontales, lo cual puede evidenciarse claramente por el diagrama de concentración de polos (figura 9.19).

DIACLASAS

A continuación se muestra el diagrama de roseta y densidad de polos, en los cuales se representan los datos recolectados en el levantamiento superficial de los planos de diaclasas.

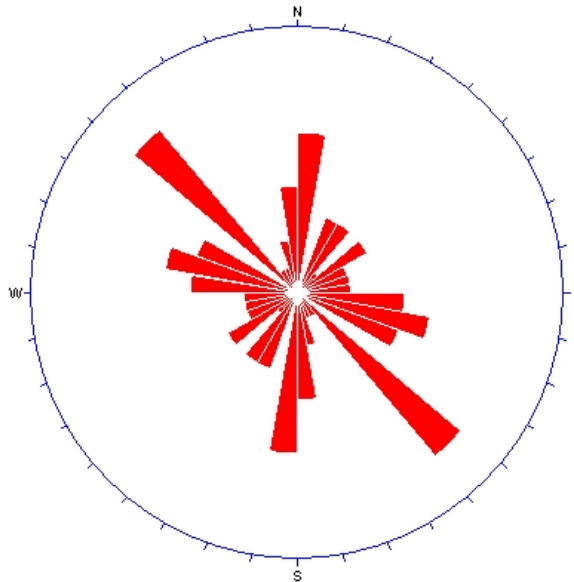


Figura 9.20. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de las familias de diaclasas en superficie, con rumbos dominantes N 40-50° W, N 0-10° E y N 70-80° W.

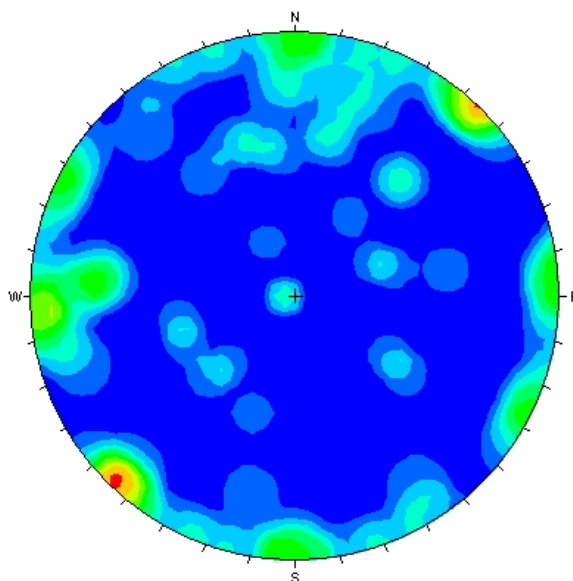


Figura 9.21. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de las familias de diaclasas en superficie.

Los datos usados, para la elaboración de los diagramas anteriores, se encuentran expuestos en la tabla anexo 18.

GEOLOGÍA DEL TÚNEL

Para presentar la geología del túnel, se elaboraron resúmenes semanales de los frentes de excavación levantados diariamente, mostrados en las tablas anexas 4 – 17.

En la excavación del túnel se encontraron cuatro litotipos:

Esquisto Cuarzoso (EQ)

Esquisto Micáceo (EM)

Esquisto Calcáreo Verdoso (ECV)

Filita y Esquisto Grafítico (FGr, EGr)

Los primeros tres litotipos mencionados, presentan las mismas características litológicas que las que afloraron en superficie. Es importante

destacar que el litotipo de filitas y esquistos grafitosos a pesar de no aflorar nunca en superficie es el que dominó durante las excavaciones del túnel.

A continuación se presentan las secciones petrográficas realizadas de dos de los litotipos encontrados en el túnel:

ESQUISTO CUARZOSO (EQ)

Petrografía:

Muestra: SFT-04

Progresiva: 0 + 158

Tabla 9.5 Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en filita cuarzosa.

Muestra	Qz	Mu	Gf	Cc	Py
SFT-04	55	19.5	15	10	0.5

Cuarzo (Qz); Moscovita (Mu ; Grafito (Gf); Calcita (Cc); Pirita (Py).

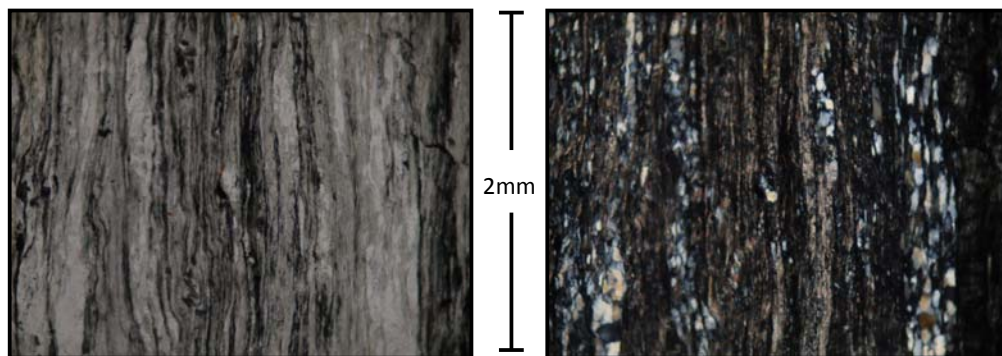


Figura 9.22. Muestra SFT-04. Textura filítica. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo 10X de aumento.

Observaciones: Roca de textura filítica, los minerales de moscovita se encuentran entrelazados con el grafito. En su totalidad los granos de cuarzo son de origen metamórfico (30% policristalino y 25% monocristalinos).

ESQUISTO CALCÁREO VERDOSO (ECV)

Petrografía:

Muestra: SFT-05

Progresiva: 0 + 181

Tabla 9.6. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en filita calcárea.

Muestra	Cc	Qz	Mu	Py	Gf
SFT-05	40	29.5	25	5	0.5

Calcita (Cc); Cuarzo (Qz); Moscovita (Mu); Pirita (Py); Grafito (Gf).

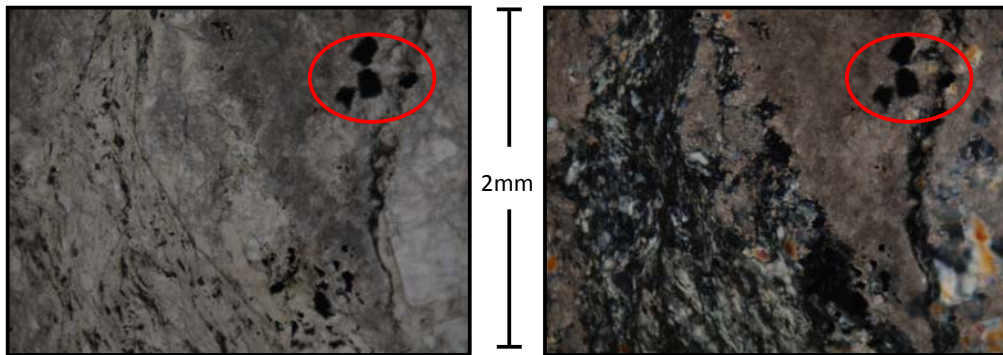


Figura 9.23. Muestra SFT-05. Filita calcárea, granos de pirita resaltados en rojo. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo 10X de aumento.

Observaciones: Roca denominada filita calcárea/calcítica, muy deformada. El grafito se presenta en forma de trazas y de todas las muestras estudiadas es la que contiene mayor cantidad de cristales cúbicos de pirita, los cuales se encuentran dentro de la calcita. Al igual que las muestras anteriores los granos de cuarzo son de origen metamórfico (20% policristalino y 10% monocristalino).

FILITA Y ESQUISTO GRAFITOSO

Localización Específica: Desde la progresiva 0+068,36 hasta la progresiva 0+767,7 es la litología predominante durante toda la excavación, ver anexo 2.

Descripción Litológica Macroscópica: Este tipo litológico es el que se presenta con mayor frecuencia en la excavación del túnel, aún cuando no aflora en superficie. Consiste de filitas o esquistos con mínimo 70% de grafito, con intercalaciones de finas láminas de esquisto micáceo ó esquisto cuarzoso.

La foliación es marcada, muy plegada generalmente de carácter filítico, aunque puede variar a esquistosa, sobre todo las variedades limosas y arenosas. En general presentan vetas de cuarzo o de calcita y es común la presencia de pirritas cúbicas visibles en muestra de mano.

Color Fresco: Gris oscuro

Color Meteorizado: Gris oscuro y ocre rojizo



Figura 9.24. Frente de excavación Túnel Tránsito Taguaiguay-Valles de Tucutunemo. Filita Grafítica. Tomada por: Rosangela Martínez. (2008).

Por las características tan evidentes de este litotipo, no se realizaron petrografías para corroborar su mineralogía; sin embargo dentro de este tipo litológico se encontraron algunos bloques con características mineralógicas distintas a todos los litotipos antes mencionados, razón por la cual se les realizaron las siguientes petrografías:

Petrografía:

Muestra: SFT-01

Progresiva: 0 + 015

Tabla 9.7. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en esquistos cuarzo micáceo

Muestra	Qz	Mu	Ab	Tur	Est	Gf	Cr	Py
SFT-01	68	25	2	2	2	<1	<1	<1

Cuarzo (Qz); Muscovita (Mu); Albita (Ab) Turmalina (Tur); Estilphomelana (Est); Grafito (Gf); Circón (Cr); Pirita (Py)

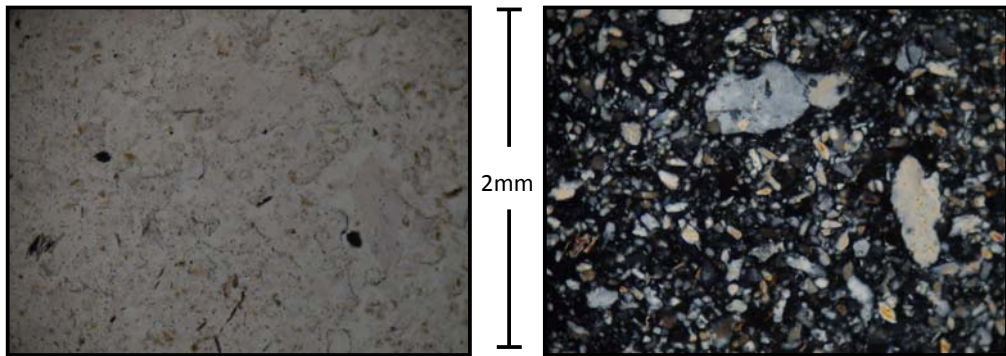


Figura 9.25. Muestra SFT-01. Esquisto cuarzo micáceo. Izquierda: nicols paralelos. Derecha: nicols cruzados. Foto tomada con objetivo 10X de aumento.

Observaciones: La pirita, el grafito y el circón se encuentran como minerales accesorios. El grafito se encuentra entrelazado entre la muscovita.

Petrografía:

Muestra: SFT-02

Progresiva: 0 + 102.75

Tabla 9.8. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en meta-arenisca.

Muestra	Qz	Tur	Mu	Py	Cr	Plag
SFT-02	96,5	1	1	0.5	0.5	0.5

Cuarzo (Qz); Turmalina (Tur);); Muscovita (Mu); Pirita (Py); Circon (Cr); Plagioclasa (Plag)

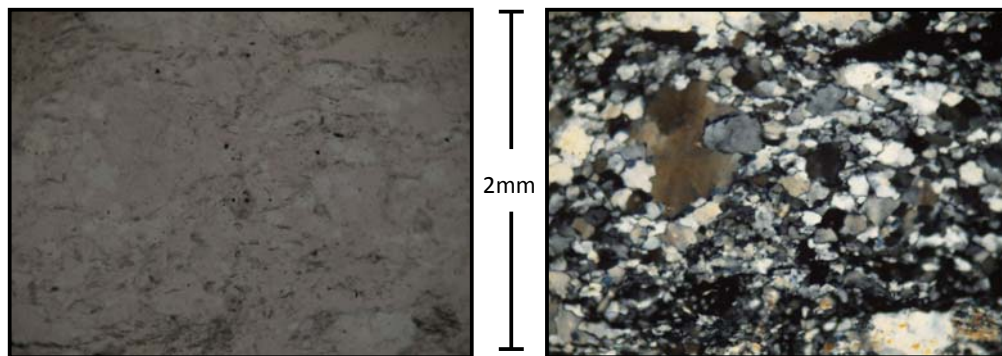


Figura 9.26. Muestra SFT-02. Meta-arenisca. Izquierda: nicols paralelos. Derecha: nicols cruzados. Foto tomada con objetivo 10X de aumento.

Observaciones: Roca no foliada, de textura porfibrística, con cristales inequigranulares y minerales reliquias. Es una roca compuesta básicamente por cuarzo (85% policristalino y 11.5% monocristalino).



Figura 9.27. Disposición del bloque de meta-arenisca en el frente de excavación.
Progresiva 0+102.75. Tomada por: Rosangela Martínez (2008)

Petrografía:

Muestra: SFT-03

Progresiva: 0 + 110.57

Tabla 9.9. Valores de abundancia mineral expresados en porcentaje en diabasa.

Muestra	CPx	Plag	Ep	Cl	Ef
SFT-03	70	28	1	1	<1

Clino-piroxeno(CPx); Plagioclasa (Plag); Epidoto (Ep), Clorita (Cl); Esfena (Ef)

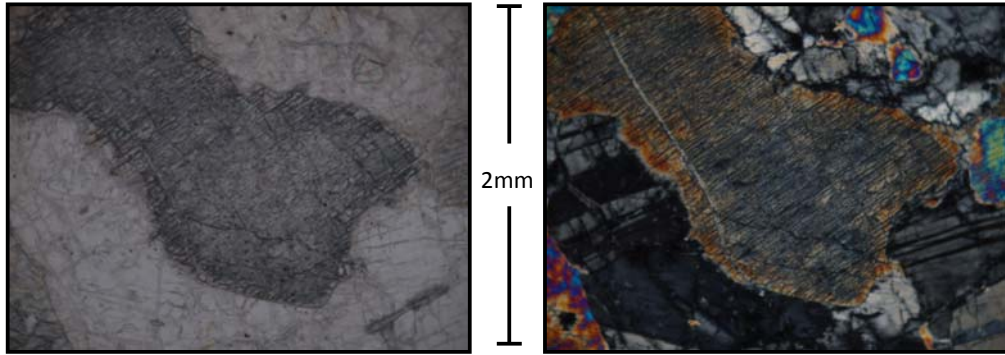


Figura 9.28. Muestra SFT-02. Textura reliquia. Izquierda: nicoles paralelos. Derecha: nicoles cruzados. Foto tomada con objetivo 10X de aumento.

Observaciones: enormes cristales de clinopiroxenos embebidos en plagioclasas, conserva la textura reliquia ofita y subofítica, algunas plagioclasas se encuentran zonadas. Se observa epidoto en los rebordes de los piroxenos en contacto con las plagioclasas y la clorita como alteración del piroxeno.



Figura 9.29. Disposición del bloque de diabasa en el frente de excavación. Progresiva 0+110.57. Tomada por: Rosangela Martínez (2008)

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL TÚNEL

Los datos analizados de las discontinuidades, fueron agrupados en tres tramos, según los resultados arrojados por la geomecánica (ver anexo 2), establecidos en las progresivas siguientes:

- Tramo I: Entre las progresivas 0 + 000 y 0 + 031
- Tramo II: Entre las progresivas 0 + 031 y 0 + 089.26
- Tramo III: Entre las progresivas 0 + 089.26 y 0 + 200

TRAMO I (Progresivas 0+000 – 0+031)

FOLIACIÓN

Los planos de foliación del tramo I en su mayoría son horizontales o con ángulo de buzamiento muy bajo, hecho que se ve reflejado en el diagrama de concentración de polos, por esta razón el diagrama de roseta no mostró ninguna orientación preferencial.

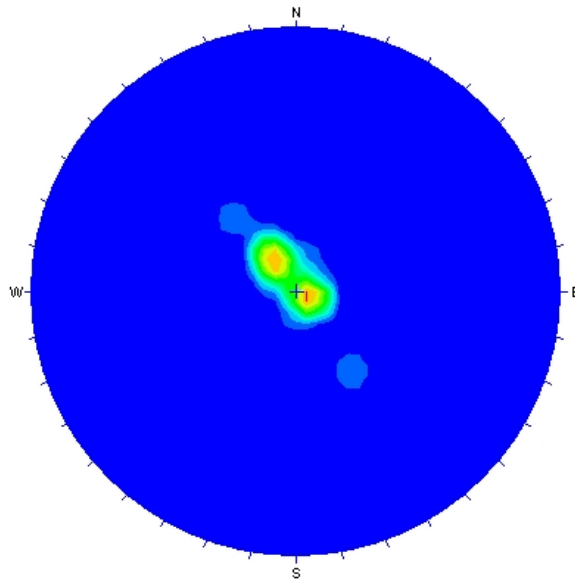


Figura 9.30. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de foliación en el tramo I.

DIACLASAS

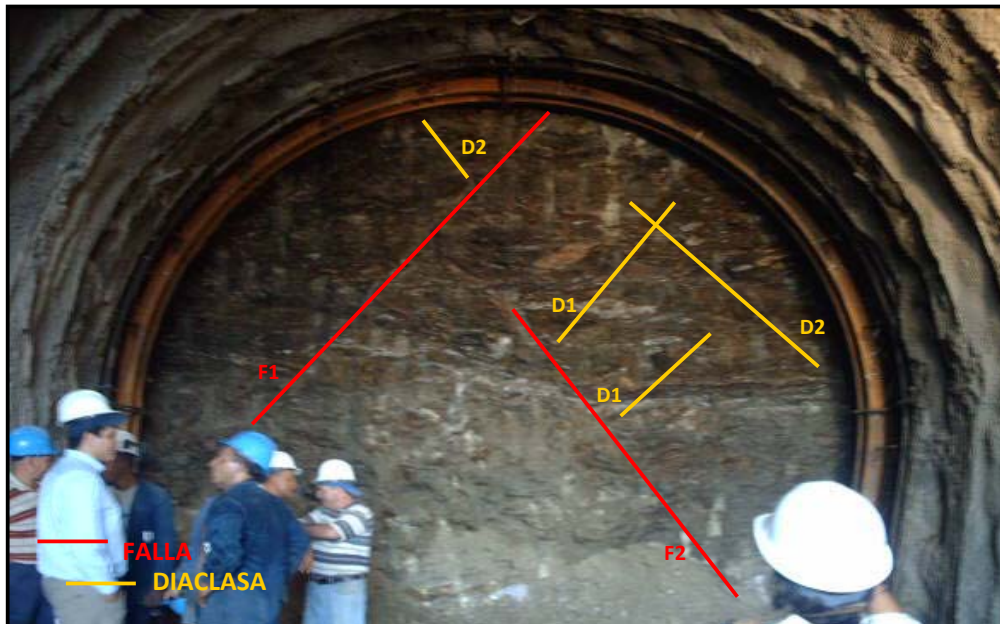


Figura 9.31. Vista de las discontinuidades del frente de excavación, observe foliación horizontal. Resaltadas fallas y diaclasas progresiva 0+021.5. Tomada por: Ing. Adriana Alvarado (2007)

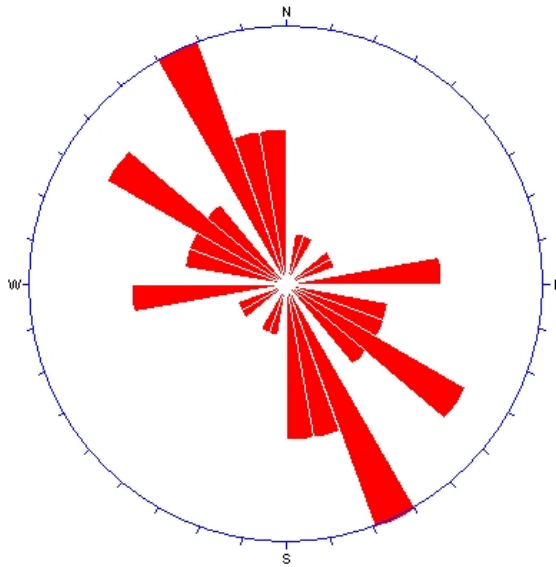


Figura 9.32. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de las familias de diaclasas en el tramo I, con rumbos dominantes N 20-30° W, N 50-60° W y E-W.

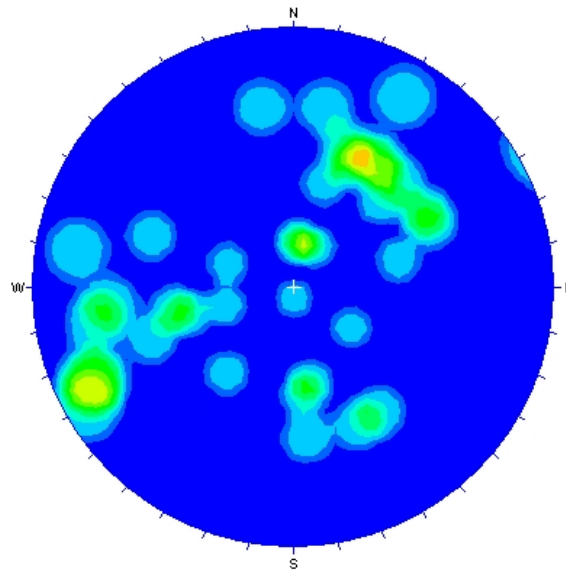


Figura 9.33. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de las familias de diaclasas en el tramo I.

FALLAS

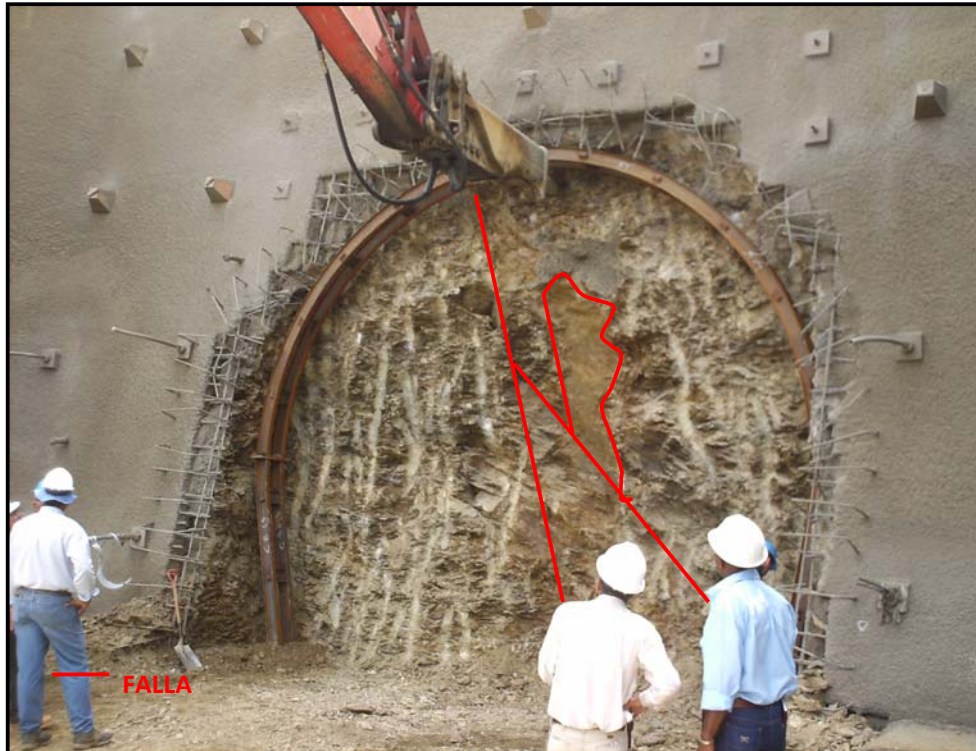


Figura 9.34. Vista de las fallas del primer frente de excavación.

Tomada por: Ing. Adriana Alvarado (2007)

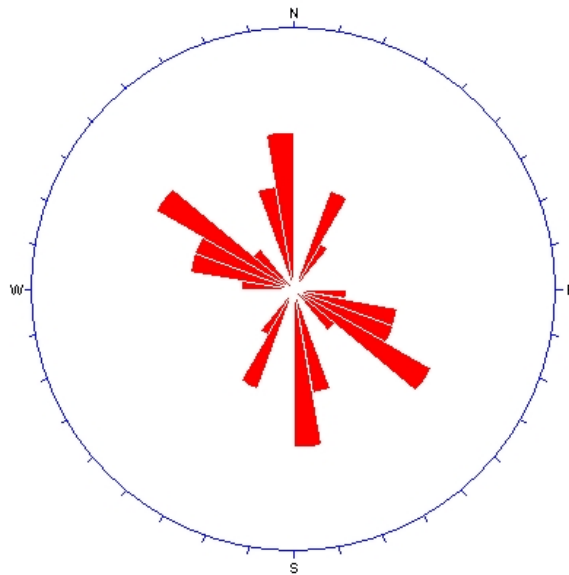


Figura 9.35. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de fallas en el tramo I, con rumbos dominante N 0-10° W, E-W, N 50-60° W y N 20-30° E.

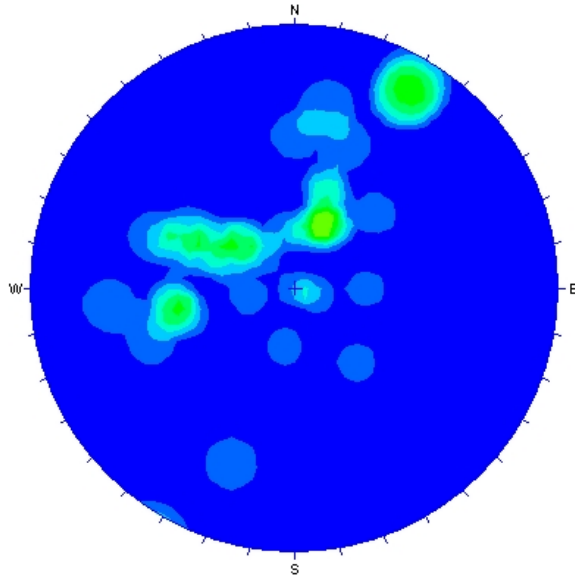


Figura 9.36. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de fallas en el tramo I

TRAMO II (Progresivas 0+031 – 0+089.26)

FOLIACIÓN

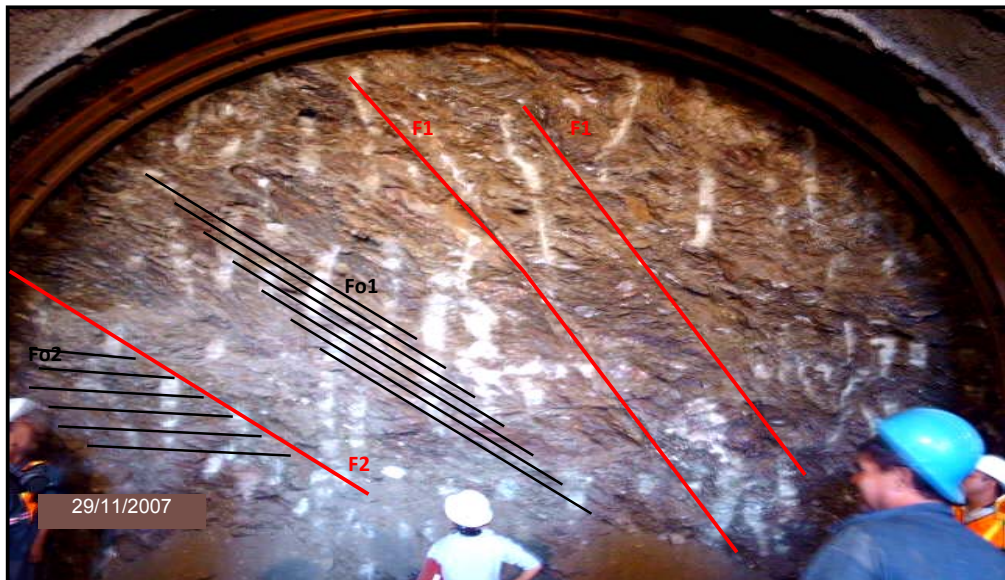


Figura 9.37. Variación de las foliaciones. Resaltadas fallas en rojo. Progresiva 0+037.9.

Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

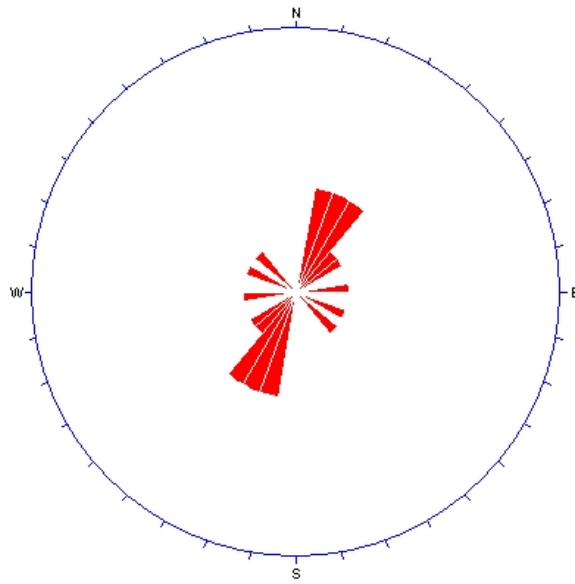


Figura 9.38. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de foliación con rumbo dominante N 10-40° E en el tramo II.

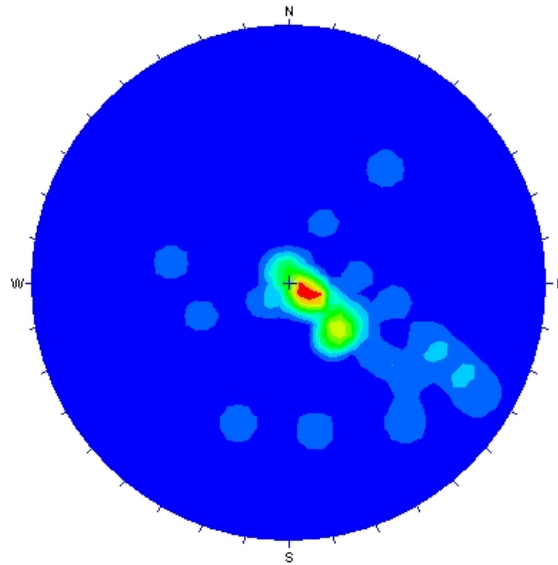


Figura 9.39. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de foliación en el tramo II.

DIACLASAS

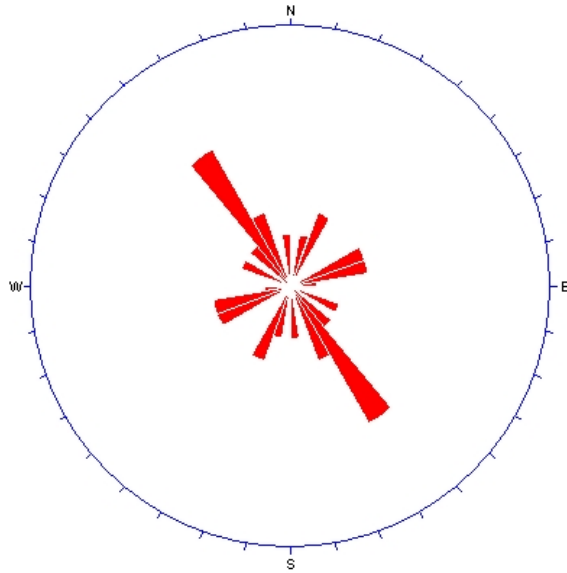


Figura 9.40. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de las familias de diaclasas en el tramo II, con rumbo dominante N 30-40° W.

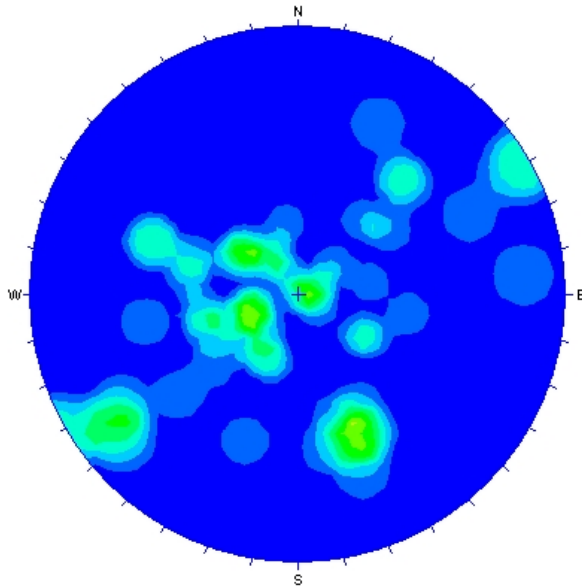


Figura 9.41. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de las familias de diaclasas en el tramo II.



Figura 9.42. Vista de las discontinuidades del frente de excavación. Fallas y diaclasas resaltadas. Progresiva 0+033.6. Tomada por: Maira Hernández (2007)

FALLAS

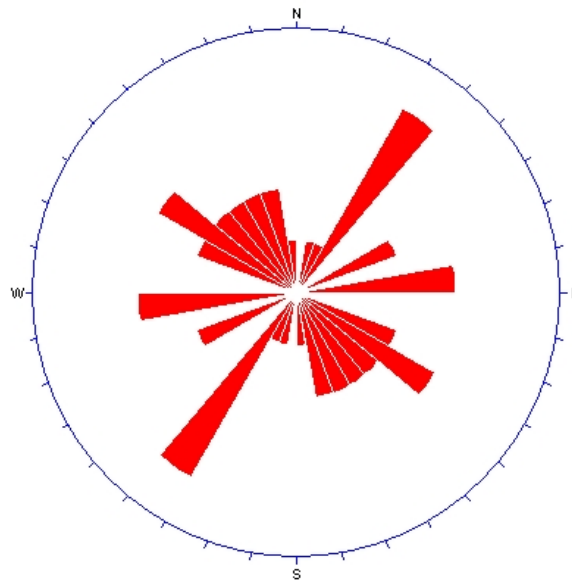


Figura 9.43. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de fallas en el tramo II, con rumbos dominante N 30-40° E, E-W y N 50-60° W.

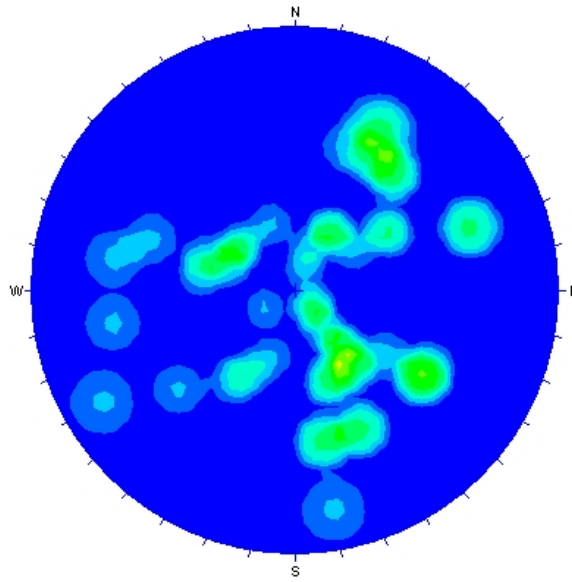


Figura 9.44. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de fallas en el tramo II.

TRAMO III (Progresivas 0+089.26 – 0+200)

FOLIACIÓN

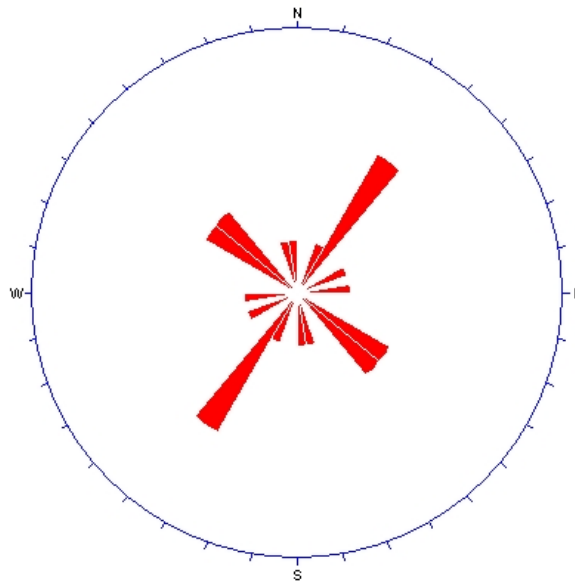


Figura 9.45. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de foliación en el tramo III, con rumbos dominantes N 30-40° E, N 40-50° W.

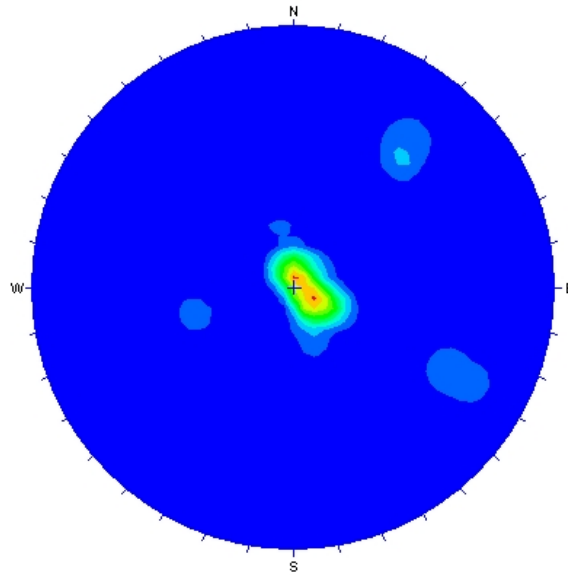


Figura 9.46. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de foliación en el tramo III.

DIACLASAS

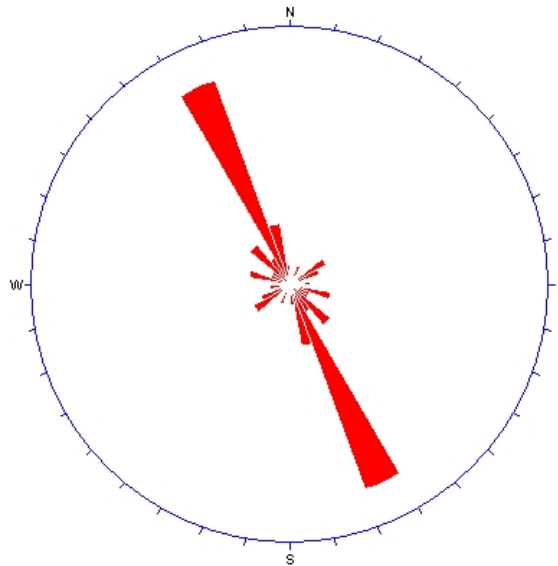


Figura 9.47. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de las familias de diaclasas en el tramo III, con rumbo dominante N 20-30° W.

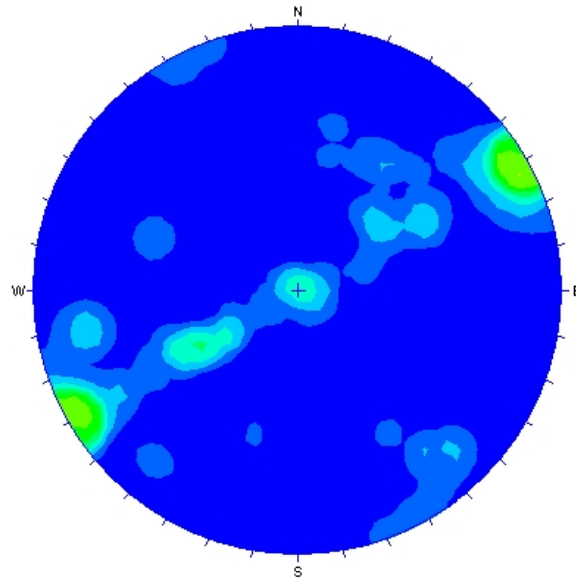


Figura 9.48. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de las familias de diaclasas en el tramo III.

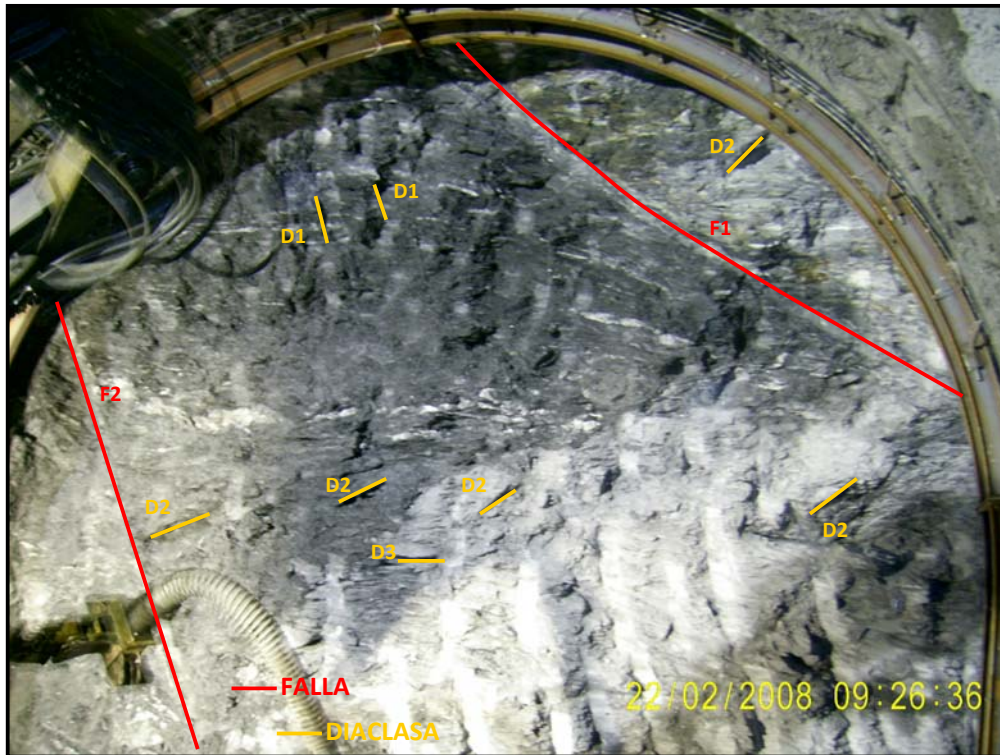


Figura 9.49. Vista de las discontinuidades del frente de excavación. Fallas y diaclasas resaltadas. Progresiva 0+162. Tomada por: Maira Hernández (2007)

FALLAS

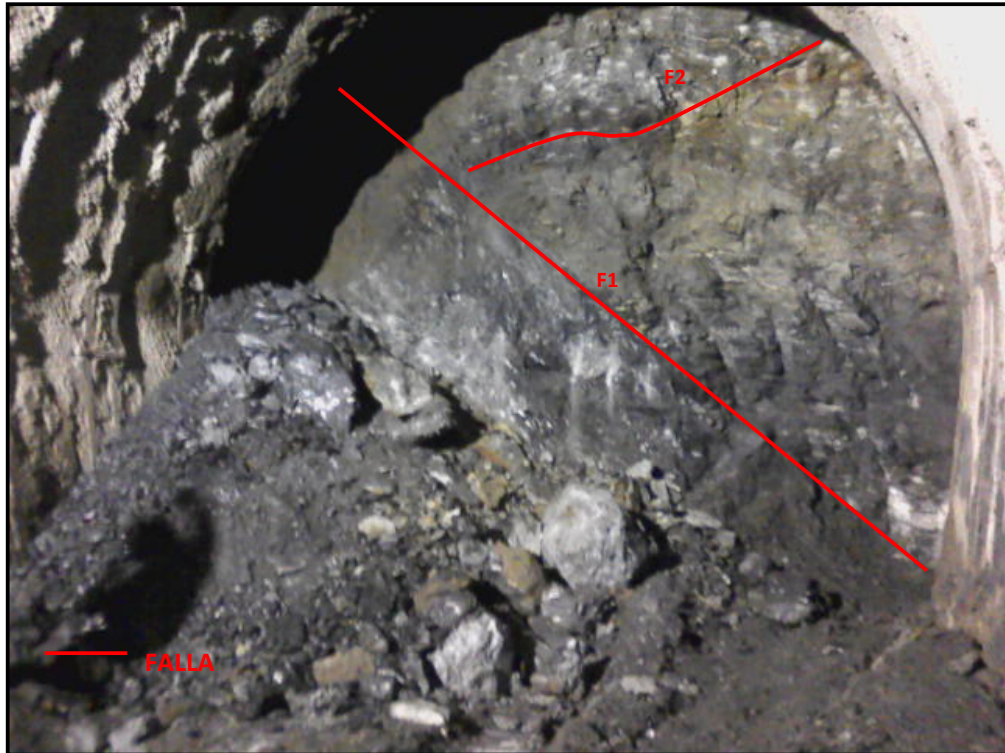


Figura 9.50. Sobre-excavación. El material grafitoso se desprende en la misma dirección de F1. Progresiva 0+126. Tomada por: Rosangela Martínez (2007)

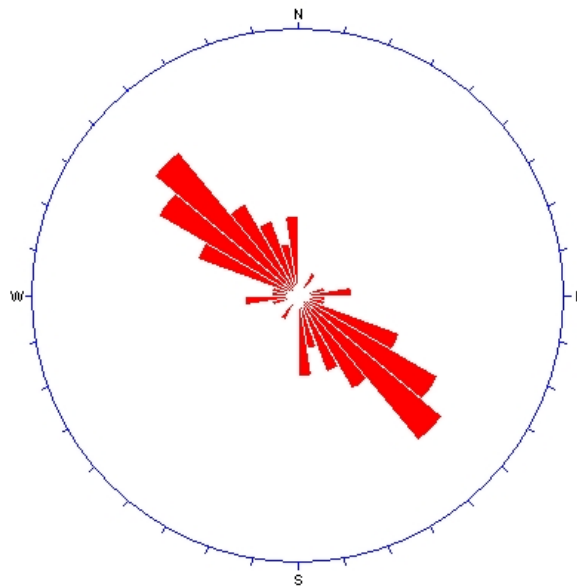


Figura 9.51. Diagrama que muestra la orientación preferencial de los planos de fallas en el tramo III, con rumbo dominante N 40-60° W.

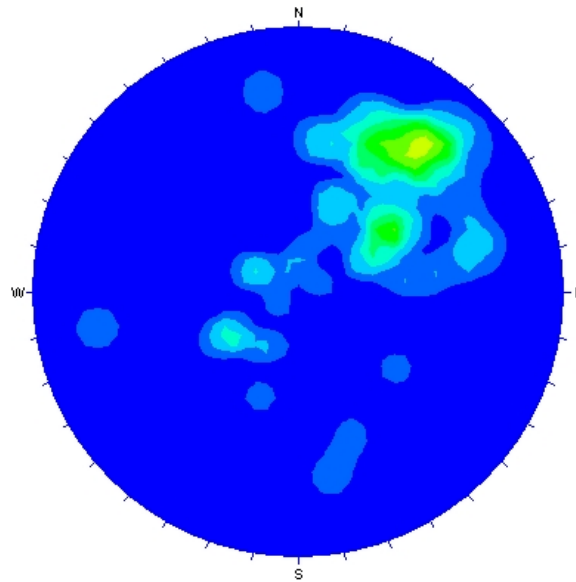


Figura 9.52. Diagrama que muestra la concentración de polos de los planos de fallas en el tramo III.

MODELO ESTRUCTURAL

El levantamiento geológico de superficie del área de estudio, en conjunto con el permanente levantamiento de los frentes de excavación del túnel, durante la 828.4m de longitud total del túnel, permitió el planteamiento de un modelo estructural, que se muestra a continuación (ver anexo 3):

Las evidencias encontradas y analizadas permiten inferir que la zona de estudio se encuentra dentro de un contexto de napas imbricadas, dichas evidencias son presentadas a continuación:

Evidencias en Superficie

Estructurales:

Las expresiones topográficas tales como drenajes rectilíneos, escarpes pronunciados y ensilladura de falla que coinciden con las formas estructurales (F1, F2, F3) presentadas en mapa anexo 1.

Las fallas observadas en superficie, F1S y F2S de rumbo NE-SW levantadas en campo, que coinciden con los contactos litológicos y drenajes rectilíneos mostrados en el anexo 1.

Geomorfológicas:

La asimetría de las formas topográficas, específicamente en la fila el Ancón, donde se puede observar mayor pendiente en la ladera SE que hacia el NW.

El cambio de dirección en la línea de cresta de la fila El Ancón, es posible evidencia de rampa de despegue lateral.

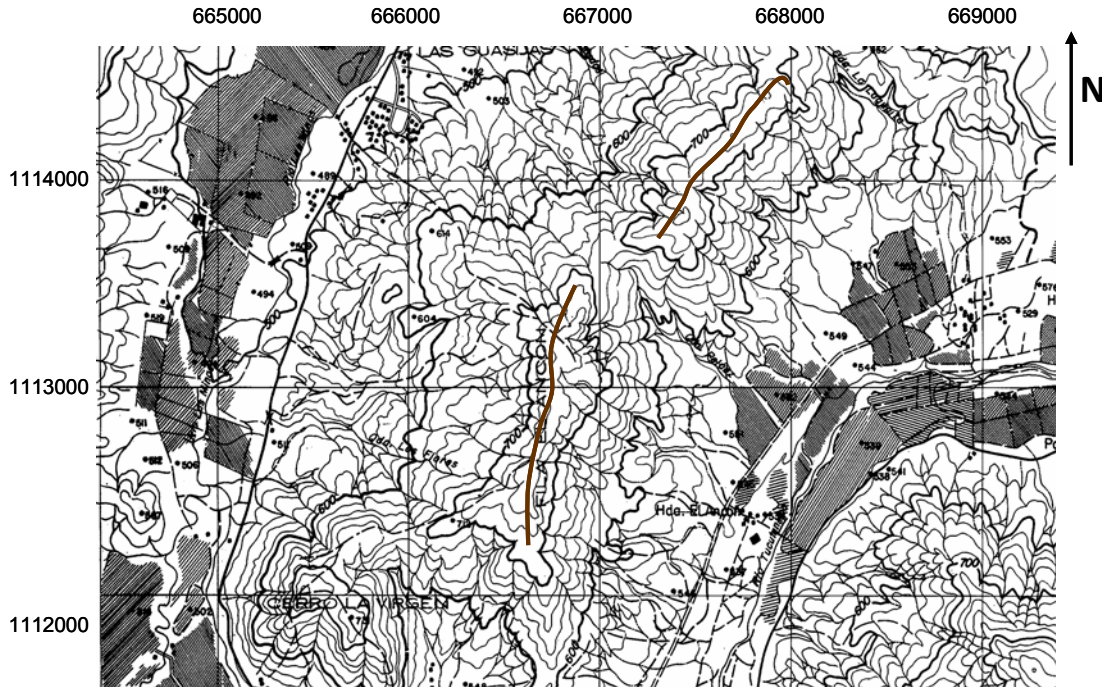


Figura 9.53. Asimetría y quiebre de la Fila el Ancón.

Fuente: Hoja 6746-III-SO, Cartografía Nacional (1979)

Evidencias Túnel:

Litológicas:

El tipo de material deleznable y de baja calidad (filita y esquisto grafitoso) encontrado en el túnel, en contacto con el material duro, que trabaja como rampa de despegue de la napa.

Estructurales:

Presencia persistente de falla de ángulo bajo a lo largo del túnel, observadas en las planillas de levantamiento de los frentes de excavación ubicados en los anexos 4 - 17.

La foliación favorece al desplazamiento de las napas, ya que su rumbo, en la mayoría de los casos, es perpendicular a la dirección del movimiento de la napa. (Este hecho es evidenciado en los diagramas de las figuras 9.38, 9.45).

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

Para realizar la caracterización geomecánica del área de estudio, se calcularon los parámetros geomecánicos por semanas y finalmente se dividió el trazado en tres sectores delimitados por la calidad del macizo rocoso. En la siguiente tabla se muestran las progresivas correspondientes a cada sector y sus parámetros geomecánicos:

Tabla 9.10. Resultados de los parámetros geomecánicos del túnel

SECTOR	PROGRESIVA		GSI		RMR	Q	C (MPa)	ϕ (°)	σ_{cm} (Mpa)	E (Mpa)	CLASE
	INICIAL	FINAL	MIN	MAX							
1	0+000	0+010	33	40	38	1.06	0.04	43.7	1.04	105.34	IV
	0+010	0+015	33	40	45	4.02	0.05	42.2	1.07	107.58	III
	0+015	0+031	30	38	41	3.91	0.03	25.84	0.19	18.52	III, IV
2	0+031	0+046	31	36	40	0.26	0.03	24.7	0.019	17.08	IV
	0+046	0+056	31	39	40	0.22	0.05	27.5	0.4	39.73	IV
	0+056	0+074	29	36	36	0.18	0.02	22.29	0.43	17.11	IV
	0+074	0+089.26	34	39	40	0.23	0.04	21.79	0.20	22.17	IV
	0+089.26	0+099.5	30	35	37	0.16	0.06	23.22	0.41	40.00	IV
3	0+099.5	0+110.57	L1: 24 L2: 35	L1: 29 L2: 42	28	0.11	L1: 0.03 L2: 0.10	L1: 15.06 L2: 27.41	L1: 0.12 L2: 1.14	L1: 10.96 L2: 221.4	IV
	0+110.57	0+121.8	L1: 15 L2: 45	L1: 22 L2: 52	34	0.14	L1: 0.02 L2: 0.24	L1: 8.00 L2: 45.64	L1: 0.04 L2: 3.97	L1: 3.92 L2: 675.83	IV
	0+121.8	0+127.6	L1: 17 L2: 33	L1: 27 L2: 43	32	0.07	L1: 0.01 L2: 0.18	L1: 6.74 L2: 40.11	L1: 0.02 L2: 2.81	L1: 1.94 L2: 330.27	IV
	0+127.6	0+154	L1: 14 L2: 39	L1: 22 L2: 48	29	0.08	L1: 0.01 L2: 0.21	L1: 6.22 L2: 42.02	L1: 0.02 L2: 3.27	L1: 1.61 L2: 490.77	IV
	0+154	0+171	L1: 16 L2: 36	L1: 26 L2: 45	29	0.12	L1: 0.04 L2: 0.23	L1: 10.27 L2: 39.87	L1: 0.21 L2: 3.61	L1: 21.47 L2: 452.38	IV
	0+171	0+200	24	33	27	0.12	0.09	19.45	0.68	62.77	IV

En el perfil anexo 2, se puede observar claramente las diferencias geomecánicas entre los tres sectores. El sector 1 (0+000-0+031) se caracteriza por presentar RMR de calidad media, por ende es el sector más estable en la zona de estudio. Por otro lado en el sector 2 (0+031-0+089.26) la calidad del macizo pasa a ser mala, observándose inestabilidad en el mismo. Y por ultimo en el sector 3 (0+089.26-0+200) la calidad del macizo pasa a ser un poco más mala con respecto al sector antes mencionado, caracterizándose el mismo, por presentar zonas problemas, en donde ocurrieron sobreexcavaciones en varios tramos.

CLASIFICACIÓN SEGÚN TIPO DE COBERTURA Y SOPORTES

Establecer los rangos de los tipos de cobertura permite determinar las cargas demandadas por las mismas en el túnel, y así definir sus respectivos soportes.

Tabla 9.11. Tipos de Cobertura y soportes del túnel

COBERTURA	INICIAL	FINAL	p (Kg/cm ²)	SOPORTE
Superficial	0+000	0+010	2.765	P-c1
	0+010	0+011.48	2.95	P-c1
Intermedia	0+011.48	0+015	3.37675	P-d2
	0+015	0+031	4.71225	P-e1
	0+031	0+046	5.545	P-f2
	0+046	0+056	6.0645	P-f2
	0+056	0+073	7.375	P-f4
Profunda	0+073	0+074	3.288124393	P-d2
	0+074	0+089.26	5.084430075	P-f1
	0+089.26	0+099.5	5.016867551	P-f1
	0+099.5	0+110.57	8.077470647	P-f5
	0+110.57	0+121.8	10.31571914	P-f6
	0+121.8	0+127.6	28.06605722	P-f6
	0+127.6	0+154	12.71609528	P-f6
	0+154	0+171	12.25132953	P-f6
0+171	0+200	10.00323712	P-f6	

Los resultados expresados en la tabla anterior nos indican una ligera variación con los resultados obtenidos en el diseño inicial del túnel, esto se debe a que en los sectores problemas señalados en el perfil anexo 2 hubo que acercar las costillas y colocar otros soportes (swellex, toberas, arcos invertidos) para estabilizar el mismo.

En el tramo estudiado del túnel se colocó una sección de arcos invertido (en 5 costillas) entre las progresivas 0+123 y 0+130, debido a que en esta sección se observó convergencia de 33cm en el hastial izquierdo y 45cm en el hastial derecho.

ENSAYOS

Perforaciones en Roca (RQD):

Previo al diseño del proyecto del Túnel Tránsito Taguaguay-Valles de Tucutunemo se realizaron seis (6) perforaciones a lo largo del eje del túnel, de variadas profundidades, para determinar algunas de las características geológicas y geotécnicas de las rocas en la fila El Ancón.

Estas perforaciones fueron combinadas, a percusión (suelo, suelo residual, roca descompuesta) y rotación (roca dura). La ubicación de las perforaciones se muestra en la figura 9.54. y las coordenadas y características de las rocas extraídas se especifican en la tabla 9.12.

Tabla 9. 12. Resumen, ubicación y características de las perforaciones en roca en la fila El Ancón del túnel trasvase

PERFORACIÓN	PROGRESIVA TÚNEL	COORDENADAS		PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA
		N	E		
P1	—	1113636	666624	20	ESQ. MIC, ESQ VER
P2	0 + 011.39	1113590	666645	31	SR, ESQ. MIC, ESQ VER
P3	0 + 182.88	1113460	666754	23	ESQ. QZ. FELD
P4	0 + 753.53	1112872	667167	26	ESQ. MIC, ESQ. QZ. FELD
P5	0 + 784.45	1112972	667107	25	ESQ. MIC, ESQ. QZ. FELD
P6	—	1113004	667099	30	SR, ESQ. MIC, ESQ VER

Fuente: Oficina Técnica Ingeniero Heredia y Asociados (2007)

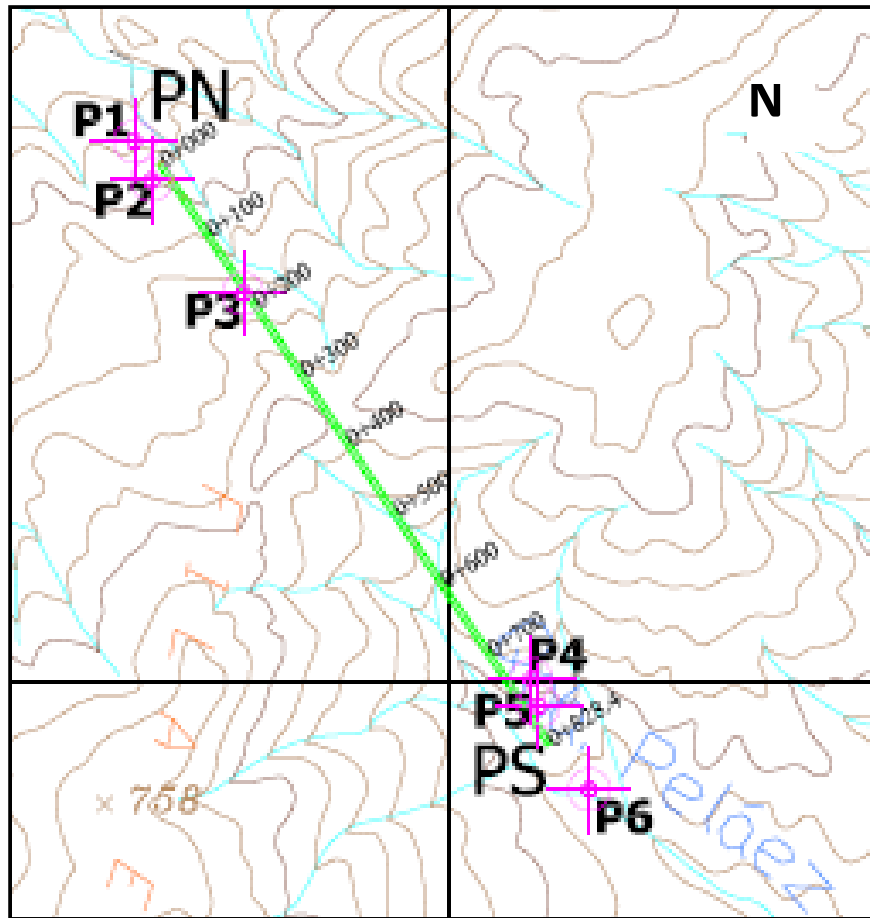


Figura 9.54. Croquis mostrando la ubicación de las perforaciones en la zona del trazado del túnel trasvase en la fila El Ancón. PT N=Portal Norte; PT S= Portal Sur. La dirección del túnel (S 32° E) ha sido delimitada en color verde.

Los núcleos de roca obtenidos de las perforaciones se encontraron fuertemente fracturados, por lo cual el dato de RQD = 0 para todos los casos, ya que durante la excavación al igual que en éstas perforaciones no se obtuvieron núcleos ≥ 10 cm en ninguno de los casos.



Figura 9.55. Fractura del material rocoso en la excavación del túnel.
Tomada por Maira Hernández (2008)

Ensayo del Martillo de Schmidt o Esclerómetro

Tabla 9.13. Resistencia a la compresión simple tomadas en superficie con el esclerómetro

PARADA GEOLÓGICA	PTO GPS		PESO UNITARIO (kN/m ³)	RESIS. DEL MARTILLO	RESISTENCIA (MPa)	DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA
	E	N				
P1N	666869	1113329	21.2	13	17	ECV
P2N	666865	1113392	24.09	16	22	EM
P4N	666753	1113455	21.2	13	17	ECV
P5N	666680	1113494	25.1	18	25.5	ECV
P6N	666650	1113591	22.28	0	< 10	EM
P7N	666814	1113261	21.2	0	< 10	ECV
P8N	666726	1113198	22.09	14	18	EQ
P9N	666484	1113316	25.87	24	36	EQ
P10N	666507	1113638	25.1	27	39	ECV
P11N	666342	1114114	22.28	0	< 10	EM
P12N	666724	1113713	22.09	15	20	EQ
P13N	666624	1113767	22.09	16	21	EQ
P14N	666539	1113854	25.87	24	36	EQ
P1S	666894	1113298	21.2	16	20	ECV
P2S	666953	1113215	21.2	12	16	ECV
P3S	667014	1113120	24.09	15	21	EM
P4S	666123	1112846	25.87	20	28	EQ
P5S	666997	1113161	24.09	23	31	EM
P6S	666808	1113199	25.87	23	33	EQ
P7S	666842	1113064	24.09	15	21	EM
P8S	666852	1112922	25.87	19*	23	EQ
P9S	666918	1112914	24.09	27	36	EM
P10S	666088	1112730	22.28	0	< 10	EM
P11S	667158	1112671	22.28	0	< 10	EM
P12S	667174	1113387	24.09	17	23	EM
P13S	667287	1113190	24.09	16	22	EM
P14S	667309	1113116	28.3	49	160	M
P15S	666994	1113073	24.09	26	35	EM
P16S	667019	1113034	21.2	14	18	ECV
P17S	667032	1112993	21.2	13	17	ECV
P18S	667204	1112844	21.2	13	17	ECV
P19S	667287	1112796	21.2	14	18	ECV

Esquisto Calcáreo Verdoso (ECV), Esquisto Cuarzoso (EQ), Esquisto Micáceo (EM), Mármol (M), *dirección paralela a la foliación.

Según la tabla 5.4 del capítulo 5 de éste trabajo, que muestra la clasificación de la resistencia a compresión simple de rocas a partir de índices de campo, los resultados obtenidos con el martillo de Schmidt en superficie nos muestra para los litotipos ECV y EM que estamos ante una roca blanda (clase R2), con una resistencia a la compresión simple promedio de 19 MPa y 21 MPa respectivamente; mientras que para el litotipo EQM se trata de una roca moderadamente dura (clase R3), con una resistencia promedio de 27 MPa, es decir, más dura que los litotipos anteriores, como se esperaba debido al tipo de litología presente. Y finalmente para el litotipo M la resistencia obtenida con éste ensayo es de 160 MPa, tratándose de una roca muy dura (clase R5)

Tabla 9.14. Resistencia a la compresión simple tomadas en la excavación del túnel con el esclerómetro

MUESTRA	PROGRESIVA	PESO UNITARIO (kN/m ³)	RESIS. DEL MARTILLO	RESISTENCIA (MPa)	DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA
TFT-02-1	0+062,23	22.28	0	<10	Esquisto Micáceo
TFT-03-1	0+076	24.10	0	<10	Esquisto Micáceo
TFT-04-2	0+092,31	25.62	12	18.2	Filita Grafítica
TFT-11-1	0+124,75	23.33	10	16	Esquisto Grafítico
TFT-12-4	0+158	27.91	0	<10	Esquisto Grafítico
TFT-12-5	0+158	25.15	0	<10	Esquisto Grafítico
TFT-13-1	0+181	21.25	0	<10	Esquisto Grafítico

Las rocas encontradas durante la excavación del túnel son de muy baja resistencia, roca muy blanda a extremadamente blanda, hecho que se vió reflejado en campo durante toda la excavación y puede apreciarse en el anexo 2, además, los pocos ensayos realizados con el esclerómetro durante la excavación marcaron 0, es decir que tiene una resistencia <10MPa (Clase R0 y R1).

ENSAYOS DE LABORATORIO

Peso Unitario

Tabla 9. 15. Peso unitario de muestras tomadas durante la excavación del túnel

MUESTRA	PROGRESIVA	MEDIDAS			VOLUMEN (cm ³)	MASA (g)	PESO UNITARIO(kN/m ³)	DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA
		a(cm)	b(cm)	c(cm)				
TFT-02-1	0+062,23	9.8	8	7	548.8	1247	22.28	Esquisto Micáceo
TFT-03-1	0+076	7.4	3	5.5	122.1	300	24.10	Esquisto Micáceo
TFT-04-1	0+092,31	9	5	13.8	621	1568	24.76	Filita Grafítica
TFT-04-2	0+092,31	11.2	5.5	13.3	819.28	1952	23.37	Filita Grafítica
TFT-04-4	0+092,31	8.4	9.5	7	558.6	1524	26.76	Filita Grafítica
TFT-08-1	0+110,57	6.5	7	8.6	391.3	1024	25.66	Metaínea
TFT-11-1	0+124,75	9.2	7.5	8.7	600.3	1428	23.33	Esquisto Grafítico
TFT-12-1	0+158	10.5	10.7	10	1123.5	3118	27.22	Esquisto Grafítico
TFT-12-4	0+158	11	6	4.2	277.2	789	27.91	Esquisto Grafítico
TFT-12-5	0+158	10	5	4	200	513	25.15	Esquisto Grafítico
TFT-13-1	0+181	13.5	7	9	850.5	1843	21.25	Esquisto OcreVerdoso
TFT-15-1	0+195,3	9.7	14	8.5	1154.3	2973	25.26	Esquisto OcreVerdoso
TFT-16-2	0+195,3	11.5	9	10	1035	2289	21.69	Filita Grafítica
TFT-17-1	0+195,3	9	11.6	7.3	762.12	1939	24.95	Esquisto OcreVerdoso

El peso unitario obtenido en campo, al igual que el suministrado por Perri y De Marco (2007) en el informe del diseño del túnel trasvase Tucutunemo titulado: Proyecto de las excavaciones, soportes y portales; dio un promedio de 25 kN/m³.

Compresión Simple

Tabla 9.16. Resistencia a la compresión simple por el ensayo uniaxial de muestras tomadas del túnel

MUESTRA	PROGRESIVA	MEDIDAS			ÁREA (cm ²)	CARGA (Kg)	l/d	FACTOR DE CORRECCIÓN	RESISTENCIA (Kg/cm ²)	RESISTENCIA A (Mpa)	DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA
		a (cm)	b (cm)	c (cm)							
TFT-04-1	0+092,31	9	5	13.8	124.2	1568	0.44	0.87	10.98	1.08	Filita Grafítica
TFT-04-2	0+092,31	11.2	5.5	13.3	148.96	1953	0.45	0.87	11.41	1.12	Filita Grafítica
TFT-04-3	0+092,31	8.4	9.5	7	58.8	2270	1.23	0.9252	35.72	3.50	Filita Grafítica
TFT-08-1	0+110,57	6.5	7	8.6	55.9	24290	0.93	0.87	378.04	37.07	Metaínea
TFT-12-1	0+158	10.5	10.7	10	105	9000	1.04	0.8796	75.39	7.39	Esquisto Grafítico
TFT-15-1	0+195,3	9.7	14	8.5	82.45	15460	1.54	0.9624	180.46	17.70	Esquisto OcreVerdoso
TFT-16-2	0+195,3	11.5	9	10	115	7800	0.84	0.87	59.01	5.79	Filita Grafítica
TFT-17-1	0+195,3	9	11.6	7.3	65.7	21820	1.42	0.9504	315.64	30.95	Esquisto OcreVerdoso

Los datos obtenidos en estos ensayos son coherentes con los ensayos obtenidos en campo y con los resultados obtenidos del roclab, en general se trata de una roca blanda y de muy baja resistencia.

Corte Directo en Discontinuidades

Se realizaron doce (12) ensayos, de los cuales se desecharon siete (7), debido a que no arrojaron datos confiables, los otros cinco (5) ensayos dieron como resultado, los siguientes ángulos de fricción y cohesión (ver graficas anexas 9.19 – 9.23):

Tabla 9.17. Resultados del ensayo de corte directo en discontinuidades (muestras túnel)

MUESTRA	φ (°)	c (MPa)
TFT-01-1	15	5
TFT-04-1	8	7.5
TFT-11-1	11	14
TFT-12-1	10.5	30
TFT-18-1	8	6

CAPÍTULO X

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Finalizado el procesamiento e interpretación de los datos recolectados durante el presente estudio, se concluyen los siguientes aspectos más resaltantes:

Los litotipos estudiados en el proyecto (esquisto cuarzoso, esquisto micáceo, esquisto calcáreo verdoso, mármol, esquisto grafitoso y filita grafitosa) son todas rocas metamórficas, siendo las más típicas los esquistos y filitas grafitosas, que no afloran, siendo ésta la litología crítica durante el proceso de construcción. Ésta es una de las razones fundamentales en los cambios de soportes existentes entre el diseño inicial y la ejecución del proyecto. Esta unidad es equivalente a la Formación Tucutunemo, que presenta un grado de metamorfismo bajo, en la Filita de subfacies clorita de la facies del esquisto verde.

Las condiciones geomecánicas de las rocas encontradas durante todo el proyecto hicieron que las labores de excavación del túnel de trasvase fueran complicadas, debido a los problemas de estabilidad que se presentaron, tales como: el buzamiento de los planos de foliación en contra a la dirección de la excavación, las familias de diaclasas verticales encontradas cercanas a la bóveda, la baja cohesión y fricción entre los planos de discontinuidad, las superficies pulidas, las deformaciones e intenso cizallamiento en el macizo y las filtraciones locales.

Estos problemas se solventaron mediante la excavación de tramos cortos y colocación continua de costillas. El espaciamiento de las mismas dependió directamente de la calidad del macizo definido durante los levantamientos geológicos de la excavación del túnel realizados diariamente.

El análisis de los parámetros geomecánicos antes y durante la construcción de obras subterráneas es de gran utilidad, ya que permite garantizar un mejor desarrollo de las mismas, en cuanto a seguridad, calidad y rendimiento.

La gran cantidad de datos recolectados en este proyecto fue un aporte significativo para la conclusión satisfactoria de la obra, ya que se pudo tener un control más estricto de los parámetros geomecánicos y así resolver oportunamente los problemas presentados.

Las diferencias presentadas entre los soportes del diseño y los soportes de la ejecución, se debieron a la variación litológica expuesta anteriormente, por lo cual es importante resaltar que en los tramos problemas, hubo cambios importantes, debido a la diferencia de escalas entre el estudio inicial del proyecto, por tal motivo se implementaron medidas de emergencia, tales como: reemplazar costillas de IPN 140 por costillas de IPN 200, acercar costillas con calabrés de 25cm, colocación de micropilotes, arcos invertidos.

Otro aspecto es la presencia de una cantidad considerable de fallas paralelas y transversales al trazado del túnel inferidas en el estudio geológico superficial y geofísico de la etapa inicial del proyecto y corroboradas durante su ejecución. Ésta condición llevó al planteamiento del modelo estructural de la zona de estudio, el cual se ubica en un contexto de napas imbricadas, dicho criterio permitió optimizar el diseño.

RECOMENDACIONES

Es necesario realizar perforaciones a lo largo del eje del túnel y no sólo en los portales.

Ejecutar las medidas de seguridad recomendadas por la inspección geológica en los tramos problemáticos del túnel.

Prever el material a usar en planes de emergencia desde el inicio del proyecto, para evitar retrasos.

Tener presentes constantemente, las medidas de convergencia del túnel, ya que indican movimientos de los esfuerzos actuantes dentro del macizo.

En caso de hacer una exploración geotécnica y que arroje valores deficientes se debe hacer un diseño conservador y no un diseño ajustado, para evitar cambios importantes en los cálculos de los soportes.

BIBLIOGRAFIA

AUDEMARD, F., M. M achette, J. Cox, R. Dart & K Haller (2000). **Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey, Open File Report 00-018.**

BENJAMINI C., R Shagan & A Menéndez (1986). **Formación Tucutunemo.** Mem. VI. Congr. Geol. Venezolano, Caracas, 10: 6551-6574.

DE MARCO, Pietro (1995). **Determinación de la Resistencia Mecánica de las Rocas Mediante Ensayos de Laboratorio.** Trabajo de ascenso. Inédito. UCV, Caracas.

DE MARCO, Pietro (2004). **Guía de Estudio de la Cátedra Mecánica de Rocas.** Inédito. UCV, Caracas.

DE MARCO & Perri (2007). **Proyecto de las Excavaciones Soportes y Portales, Tunel trasvase Taguaguay-Valles de Tucutunemo,edo. Aragua.** Informe Inédito. 68pp.

GEOPHYSICAL SURVEY C.A. (2007). **Adquisición, procesamiento e interpretación de datos electromagnéticos EM34-2 y EMMF-38 en la zona Tránsito Tucutunemo Las Guasduas – Villa de Cura, edo. Aragua.** Informe Inédito. 28 pp.

GONZÁLEZ DE JUANA, C., Iturralde Arozena, J. M. y Picard, X. (1980). **Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas.** Ediciones Foninves. Tomo I, 407 pp.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis I., y otros. (2002). **Ingeniería Geológica.** Pearson Prentice Hall, Madrid. 744 pp.

GRANDE, Sebastián (1995). **Caracterización Geoquímica de las Metalavas de Miembro Los Naranjos, Formación Tucutunemo, Aragua Central, y su interpretación tectónica.** U.C.V, Trabajo de Ascenso Inédito, 45p.

KERR, Paul (1965). **Mineralogía Óptica.** Tercera Edición, McGraw-Hill Book Company, New York, 443 pp.

MEGAN, T.M. (1981). **Túneles: Planificación, Diseño y Construcción.** Voumen I. Editorial Limusa, México, 331 pp.

MENENDEZ, A. (1965). **Geología del Área de El Tinaco, centro norte del estado Cojedes, Venezuela.** Bol. De Geol. (Venezuela) Vol. 6., (12): 417-537.

MENENDEZ Baamonde, José (2006). **Petrología.** Instituto de Ciencias de la Tierra, UCV, Facultad de Ciencias, pp 303-343.

NAVARRO, E. (1983). **Geología y Petrogénesis de las Rocas Metavolcánicas del Grupo de Villa de Cura.** Geos, UCV, Caracas (28): 170-317.

OFICINA TECNICA INGENIERO HEREDIA Y ASOCIADOS (2007). **Informe Geológico Embalse de Taiguaguay-Valles de Tucutunemo, estado Aragua:** Alvarado Adriana.

SALCEDO, Daniel. (1982). **Macizos Rocosos: Caracterización, resistencia al corte y mecanismos de rotura.** Trabajo presentado en la conferencia del 25 aniversario de la SVMSSH, Caracas.

SEIDERS, V. M. (1965). **Geología de Miranda Central.** Bol. De Geol. (Venezuela) Vol. 6., Nº 12, p. 289-410.

SHAGAM, R., (1960). **Geología de Aragua Central (Venezuela).** III Congreso Geológico Venezolano, Caracas. Tomo 2: 574-675.

URBANI, F., A. Chirinos y M. Marquina. (1990). **Geología del Área de Guatopo-El Guapo. Estado Miranda y Guárico.** Parte 1: Grupo Villa de Cura. Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV, Caracas, 5 (1): 96-124.


URBANI, F. y Rodríguez, J. (2003). **Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa. Venezuela.** UCV. FUNVISIS.

<http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm>

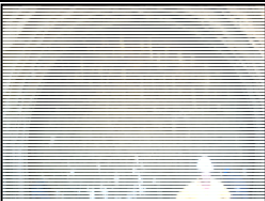
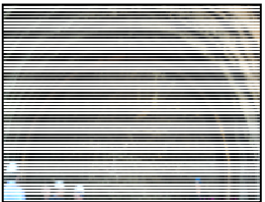
<http://www.venezuela-online.net>

ANEXOS



Anexo 4. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+000-0+010) del Túnel Trasvase-Valles de Tucutunemo

SEMANA:	1	DESDE:	02-Nov-07	HASTA :	12-Nov-07																																																
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO																																																					
UBICACION		COSTILLA	COBERTURA	AVANCE	PLANILLAS																																																
PROG.INICIA 0+000	NUMERO	1-11	INICIAL FINAL	PROM.DIARIO	2m																																																
PROG.FINAL 0+010	SEPARACION	0.75-1.0 m	9.2m 11.06m	TOTAL	10 m																																																
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA																																																					
MACIZO ROCOSO MUY FOLIADO. ESQUISTO CUARZO MICÁCEO. COLOR METEORIZADO OCRE. COLOR FRESCO GRIS OCRE. ROCA METEORIZADA DURA Y BLANDA. A PARTIR DE PROGRESIVA 0+009 SE OBSERVA UN ESQUISTO VERDE CON OXIDACIÓN, DE MAYOR DUREZA, EN LA ZONA BAJA DEL FRENTE DE EXCAVACIÓN.																																																					
ISRM, 1981 RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO <table border="1"> <tr> <th>CLASE</th> <th>DESCRIPCIÓN</th> </tr> <tr> <td>R2</td> <td>ROCA BLANDA</td> </tr> </table>			CLASE	DESCRIPCIÓN	R2	ROCA BLANDA	HOEK & BROWN (1997). ADAPTADO POR TRUSMAN (1999) GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA <table border="1"> <tr> <td>33-40</td> <td>ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA</td> </tr> </table>			33-40	ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA																																										
CLASE	DESCRIPCIÓN																																																				
R2	ROCA BLANDA																																																				
33-40	ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA																																																				
REGISTRO FOTOGRAFICO  <p>02/11 - 05/11 2007. FRENTE DEL TÚNEL. PROG. 0+000 - 0+002.3 PLANO DE FALLA F1 EN ZONA DE CIZALLA (ZC)</p> <p>06/11/07. FRENTE DEL TÚNEL. PROG. 0+004.1</p>			HOEK, 2000 mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN <table border="1"> <tr> <td>10</td> <td>ESQUISTO</td> </tr> </table>			10	ESQUISTO																																														
10	ESQUISTO																																																				
			DEBILITAMIENTO <table border="1"> <tr> <td>0.7</td> <td>BAJA CALIDAD</td> </tr> </table>			0.7	BAJA CALIDAD																																														
0.7	BAJA CALIDAD																																																				
			RQD <table border="1"> <tr> <td>0</td> <td>CALIDAD: MUY MALA</td> </tr> </table>			0	CALIDAD: MUY MALA																																														
0	CALIDAD: MUY MALA																																																				
			BIENIAWSKI, 1989 RMR <table border="1"> <tr> <td>38</td> <td>CALIDAD: CLASE IV, MALA</td> </tr> </table>			38	CALIDAD: CLASE IV, MALA																																														
38	CALIDAD: CLASE IV, MALA																																																				
			BARTON, 1974 Q <table border="1"> <tr> <td>1.06</td> <td>CALIDAD: MALA</td> </tr> </table>			1.06	CALIDAD: MALA																																														
1.06	CALIDAD: MALA																																																				
			HOEK, 2000 C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa) <table border="1"> <tr> <td>0.04</td> <td></td> </tr> </table>			0.04																																															
0.04																																																					
			HOEK, 2000 φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°) <table border="1"> <tr> <td>43.7</td> <td></td> </tr> </table>			43.7																																															
43.7																																																					
			HOEK, 2000 σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa) <table border="1"> <tr> <td>1.04</td> <td></td> </tr> </table>			1.04																																															
1.04																																																					
			HOEK, 2000 E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa) <table border="1"> <tr> <td>105.34</td> <td></td> </tr> </table>			105.34																																															
105.34																																																					
07/11/07. MUESTRA DE NÚCLEO/FRENTE DEL TUNEL. PROG. 0+006.11 <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">FOLIACION</th> <th colspan="2">FALLAS</th> <th colspan="2">DIACLASAS</th> </tr> <tr> <th>RUMBO</th> <th>BUZ</th> <th>RUMBO</th> <th>BUZ</th> <th>RUMBO</th> <th>BUZ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>60°-65° E</td> <td>10°-25° N</td> <td>N 20°-30° E</td> <td>40°-60° S</td> <td>N 80° E</td> <td>70° S</td> </tr> <tr> <td>N 60° E</td> <td>5° N</td> <td>N 80° W</td> <td>70° S</td> <td>N 10°-20° E</td> <td>60°-80° S</td> </tr> <tr> <td>N 50°-70° E</td> <td>15° N</td> <td>*N 70° W</td> <td>40° S</td> <td>N 25° E</td> <td>60° N</td> </tr> <tr> <td>N 75° W</td> <td>15° S</td> <td>N 60° W</td> <td>80° S</td> <td>E-W</td> <td>20° S</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>N 60°-80° W</td> <td>70°-80° S</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>N 10°-25° W</td> <td>80° N</td> </tr> </tbody> </table>						FOLIACION		FALLAS		DIACLASAS		RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	60°-65° E	10°-25° N	N 20°-30° E	40°-60° S	N 80° E	70° S	N 60° E	5° N	N 80° W	70° S	N 10°-20° E	60°-80° S	N 50°-70° E	15° N	*N 70° W	40° S	N 25° E	60° N	N 75° W	15° S	N 60° W	80° S	E-W	20° S					N 60°-80° W	70°-80° S					N 10°-25° W	80° N
FOLIACION		FALLAS		DIACLASAS																																																	
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ																																																
60°-65° E	10°-25° N	N 20°-30° E	40°-60° S	N 80° E	70° S																																																
N 60° E	5° N	N 80° W	70° S	N 10°-20° E	60°-80° S																																																
N 50°-70° E	15° N	*N 70° W	40° S	N 25° E	60° N																																																
N 75° W	15° S	N 60° W	80° S	E-W	20° S																																																
				N 60°-80° W	70°-80° S																																																
				N 10°-25° W	80° N																																																



**Anexo 5. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+010-0+015) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo**

SEMANA: 2	DESDE: 13-Nov-07	HASTA: 19-Nov-07			
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO					
UBICACION		COSTILLA	COBERTURA	AVANCE	PLANILLAS
PROG.INICIAL	0+010	NÚMERO	12-21	INICIAL FINAL	PROM.DIARIO
PROG.FINAL	0+015	SEPARACIÓN	1.0 m	11.06 m 13.507 m	TOTAL
					1 m
					5m
					5
DESCRIPCION LITOLOGICA					
MACIZO ROCOSO FOLIADO, FRACTURADO. DOS TIPOS DE ESQUISTO: HACIA LA BÓVEDA, CUARZO MICÁCEO, COLOR METEORIZADO PARDO ROJIZO, CON POCA ESTABILIDAD. HACIA LA SOLERA, ESQUISTO MICÁCEO CON MINERALES VERDES OSCUROS, COLOR FRESCO VERDE, CON MAYOR DUREZA Y ESTABILIDAD. PRESENCIA DE VETAS DE CUARZO.					
ISRM, 1981			HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)		
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO			GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA		
CLASE	DESCRIPCIÓN		33-40	ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA	
R2	ROCA BLANDA				
REGISTRO FOTOGRAFICO			HOEK, 2000		
 <p>15/11/07. FRENTE DEL TÚNEL. PROG. 0+014.86</p>  <p>19/11/07. FRENTE DEL TÚNEL. PROG 0+015</p>			mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN		
			11	ESQUISTO	
			DEBILITAMIENTO		
			0.7	BAJA CALIDAD	
			RQD		
			0	CALIDAD: MUY MALA	
			BIENIAWSKI, 1989		
			RMR		
			45	CALIDAD: CLASE III, MEDIA	
			BARTON, 1974		
			Q		
			4.02	CALIDAD: MEDIA	
			HOEK, 2000		
			C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)		
			0.05		
			HOEK, 2000		
			φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)		
			42.2		
			HOEK, 2000		
			σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)		
			1.07		
			HOEK, 2000		
			E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)		
			107.58		
FOLIACION		FALLAS		DIACLASAS	
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
N 70° E	10° N	N 20°-30° E	50° S	N 60° W	20° S
E-W	15°-10° N	N 40°-45° E	20°-30° S	N 5° W	70° N
		N 80° E	25° S	N 70° W	60° S
		N 5° W	70° N	N 25°-45° W	50°-60° S
		N 70° W	70° N		
		*N 60°-75° W	25°-30° S		
		N 70° W	25° S		



**Anexo 6. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+015-0+031) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo**

SEMANA:	3	DESDE:	20-Nov-07	HASTA :	26-Nov-07
PLANILLAS DE CLASIFICACION DE MACIZO ROCOSO					
UBICACION		COSTILLA		COBERTURA	
PROG.INICIAL	0+015	NUMERO	22-32	INICIAL	FINAL
PROG.FINAL	0+031	SEPARACION	0.75 - 1.0 m	13.507 m	18.849 m
				AVANCE	
				PROM.DIARIO	3.2 m
				TOTAL	16 m
PLANILLAS					
7					
DESCRIPCION LITOLÓGICA					
MACIZO ROCOSO FOLIADO, FRACTURADO. ESQUISTO MICACEO CON PRESENCIA DE GRAFITO, MUY DEFORMADO, CON CAIDA DE BLOQUES Y EXTENSA ZONAS DE CIZALLA. SE OBSERVAN CAMBIOS DE DIRECCIÓN Y BUZAMIENTO DE LA FOLIACIÓN, PRINCIPALMENTE ASOCIADO A LAS ZONAS DE CIZALLA EN LA BÓVEDA. PRESENCIA DE VETAS DE CUARZO COLOR METEORIZADO PARDO ROJIZO, CON POCA ESTABILIDAD. HACIA LA SOLERA, ESQUISTO MICACEO CON MINERALES VERDES OSCUROS, COLOR FRESCO VERDE, CON MAYOR DUREZA Y ESTABILIDAD. PRESENCIA DE VETAS DE CUARZO.					
ISRM, 1981					
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO					
CLASE		DESCRIPCION			
RI		EXTREMADAMENTE DEBIL			
REGISTRO FOTOGRAFICO					
					
21/11/07. FRENTE DE EXCAVACION. PROG 0+024.6					
					
21/11/07. COLOCACION DE COSTILLA 25					
FOLIACION					
RUMBO		FALLAS		DIACLASAS	
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
N 35° E	40° N	N 40° E	40° N	N 5° E	45°-60° N
N 50°-55° E	20°-40° S	*N 75° E	10° N	N 35°-55° E	30°-60° N
N 55°-60° E	20°-25° S	N 20° E	30°-40° S	N 10°-20° W	50°-60° N
N 70° E	5° S	*N-S	30° W	N 15° W	45° S
N 20° W	10° S	N 5°-10° W	20° N	N 55°-74°W	45°-60° S
		N 14°-20° W	45°-60° N	N 30° W	85° N
		*N 80° W	25° N		
		*N 70° W	30°-45° S		
HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)					
GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA					
30-38		ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA			
HOEK, 2000					
mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN					
10		ESQUISTO			
DEBILITAMIENTO					
0.7		BAJA CALIDAD			
RQD					
0		CALIDAD: MUY MALA			
BIENIAWSKI, 1989					
RMR					
41		CALIDAD: CLASE III-IV, MEDIA-MALA			
BARTON, 1974					
Q					
3.91		CALIDAD: MALA-MEDIA			
HOEK, 2000					
C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)					
0.03					
PERRI, 1999					
φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)					
25.84					
HOEK, 2000					
σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)					
0.19					
HOEK, 2000					
E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)					
18.52					


**Anexo 7. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+031-0+046) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo**

SEMANA:	4	DESDE:	27-Nov-07	HASTA:	03-Dic-07
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO					
UBICACION		COSTILLA		COBERTURA	
PROG.INICIAL	0+031	NÚMERO	33-49	INICIAL	FINAL
PROG.FINAL	0+046	SEPARACION	0.75 - 1.0 m	PROM.DIARIO	3 m
				TOTAL	15 m
PLANILLAS					
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA					
MACIZO ROCOSO BLANDO FRACTURADO. ESQUISTO MICÁCEO CON VETAS DE CUARZO. PRESENCIA DE RELLENOS EN LAS FALLAS, LA DIRECCIÓN DE LA FOLIACIÓN ES VARIABLE EN CUANTO AL RUMBO Y BUZAMIENTO, SIENDO ÉSTE ÚLTIMO GENERALMENTE EN CONTRA DE LA DIRECCIÓN DE EXCAVACIÓN DEL TÚNEL					
ISRM, 1981			HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)		
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO			GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA		
CLASE	DESCRIPCIÓN		31-36	ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA	
RI	ROCA MUY DEBIL				
REGISTRO FOTOGRAFICO			HOEK, 2000		
 <p>27/11/07. FRENTE DE EXCAVACIÓN. PROG 0+033.6</p>  <p>29/11/07. PLANOS DE FALLA. PROG 0+037.9</p>			mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN		
			11	ESQUISTO	
			DEBILITAMIENTO		
			0.7	BAJA CALIDAD	
			RQD		
			0	CALIDAD: MUY MALA	
			BIENIAWSKI, 1989		
			RMR		
			40	CALIDAD: CLASE IV, MALA	
			BARTON, 1974		
			Q		
			0.26	CALIDAD: MUY MALA	
			HOEK, 2000		
			C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)		
			0.03		
			HOEK, 2000		
			φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)		
			24.7		
			HOEK, 2000		
			σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)		
			0.019		
			HOEK, 2000		
			E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)		
			17.08		
FOLIACIÓN		FALLAS		DIACLASAS	
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
N 10° E	60° N	N 10° E	60°-80° N	N 20°-30° E	40°-50° N
N 35°-45° E	30° N	*N 20°-40° E	40° N	N 56° E	30° N
N 60°-65° E	20° N	N 55° E	60° S	N 30°-40° E	30° S
N 10° W	30° S	N 30° W	80° N	N 60° E	10° S
N 50°-60° E	30°-60° S	N 20° W	70° S	N 10°-20° W	30°-40° N
		*N 50°-60° W	30°-60° S	N 40° W	30°-45° N
		N 40° E	10° N	N 30° W	PV

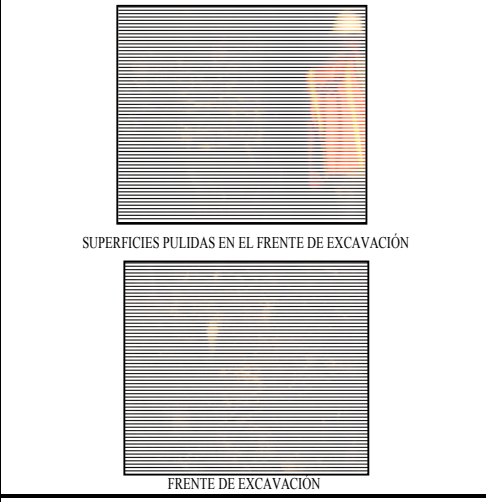
Anexo 8. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+046-0+056) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo

SEMANA:	5	DESDE:	04-Dic-07	HASTA :	10-Dic-07				
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO									
UBICACION		COSTILLA		COBERTURA		AVANCE		PLANILLAS	
PROG.INICIAL	0+046	NÚMERO	50-61	INICIAL	FINAL	PROM.DIARIO	2 m	6	
PROG.FINAL	0+056	SEPARACIÓN	1.0 m	22.18 m	24.258 m	TOTAL	10 m		
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA									
MACIZO ROCOSO BLANDO FRACTURADO. ESQUISTO MICÁCEO CON VETAS DE CUARZO. ZONAS CON INTENSA DEFORMACIÓN, MUY GRAFITOSAS Y BRILLANTES. LA FOLIACIÓN SE ENCUENTRA EN SENTIDO CONTRARIO A LA DIRECCIÓN DEL TÚNEL, LO CUAL GENERA INESTABILIDAD.HACIA LA PROGRESIVA 0+056 LA CONDICIÓN DEL MACIZO MEJORA.									
ISRM, 1981					HOEK & BROWN (1997). ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)				
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO					GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA				
CLASE	DESCRIPCIÓN				31-39	ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA			
RI	ROCA MUY DEBIL								
REGISTRO FOTOGRAFICO					HOEK, 2000				
 <p>05/12/07. FRENTE DE EXCAVACIÓN. PROG 0+048.44</p>  <p>10/12/07. FRENTE DE EXCAVACIÓN. PROG 0+056.1</p>					mí. CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN				
					11	ESQUISTO			
DEBILITAMIENTO					RQD				
0.7	BAJA CALIDAD				0	CALIDAD: MUY MALA			
BIENIAWSKI, 1989					HOEK, 2000				
RMR					C_m COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)				
40	CALIDAD: CLASE IV, MALA				0.05				
BARTON, 1974					HOEK, 2000				
Q					Φ_m FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)				
0.22	CALIDAD: MUY MALA				27.5				
HOEK, 2000					HOEK, 2000				
σ_{cm} RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)					E_m MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)				
0.4					39.73				
FOLIACIÓN		FALLAS		DIACLASAS					
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ				
N 40° E	30° N	N 25° E	60° N	N 25° E	60° N				
N 50°-60° E	30°-60° N	*N 40° E	30° N	N 10° E	45° S				
N 64° E	70° N	N 55° E	45°-60° N	N 80° E	30° S				
N 20° W	40° N	N 20° E	30° S	N 20° W	20°-40° N				
		N 30° W	15° N	N 25° W	10° S				
		N 50°-70° W	60° S	N 30° W	85° S				
		*N 70° E	30° S	N 50°-60° W	40°-60° S				
		*N 20° E	30° S						



**Anexo 9. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+056-0+074) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo**

SEMANA: 6		DESDE: 11-Dic-07		HASTA : 17-Dic-07	
PLANILLAS DE CLASIFICACION DE MACIZO ROCOSO					
UBICACION		COSTILLA		COBERTURA	
PROG.INICIAL	0+056	NUMERO	62-76	INICIAL	FINAL
PROG.FINAL	0+074	SEPARACION	1.0 m	24.258 m	29.19 m
				AVANCE	
				PROM.DIARIO	3.6 m
				TOTAL	18
PLANILLAS					
5					
DESCRIPCION LITOLOGICA					
MACIZO ROCOSO FOLIADO, FRACTURADO. DOS TIPOS DE ESQUISTO: HACIA LA BÓVEDA, ESQUISTO MICÁCEO, CON VETAS DE CUARZO, COLOR METEORIZADO PARDO ROJIZO, CON POCA ESTABILIDAD. HACIA LA SOLERA, ESQUISTO GRAFITOSO CON VETAS DE CUARZO, COLOR FRESCO GRIS OSCURO, CON MAYOR DUREZA Y ESTABILIDAD. SE HA OBSERVADO QUE EL ESQUISTO GRAFITOSO SUELE ACUMULARSE EN LAS ZONA CERCANAS A FALLAS Y ZONAS DE CIZALLA. POR LO QUE SE CREE SE PUEDA ESTAR CERCA DE UNA GRAN ZONA DE CIZALLA. HACIA LA PROG. 0+068 EL BUZAMIENTO D ELA FOLIACIÓN ES CONTRARIO A LA DIRECCIÓN DEL TÚNEL Y CON UN ÁNGULO ENTRE 60° Y 80°					
ISRM, 1981					
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO					
CLASE		DESCRIPCION			
RI		ROCA MUY DEBIL			
REGISTRO FOTOGRAFICO					
					
14/12/07. FRENTA DE EXCAVACIÓN. PROG 0+068.36					
FOLIACION		FALLAS		DIACLASAS	
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
N 40° E	70° N	N 55° E	10° N	N 55° E	10° N
N 50° E	10°-30° N	N 60° E	60° N	N 20° E	60° S
N 60° E	80° N	N 36° E	30° S	N 10°-35° W	60°-80° N
N 70° W	60° N	N 10° W	70° N	N 50° W	20° N
N 65° W	10° S	*N 60° W	30°-60° S	N 25° W	70° S
N 80° E	45° N	*N 70° W	20° S	N 40° W	20° S
				N 45° W	60° S
HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)					
GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA					
29-36		ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA			
HOEK, 2000					
mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN					
10		ESQUISTO			
DEBILITAMIENTO					
0.7		BAJA CALIDAD			
RQD					
0		CALIDAD: MUY MALA			
BIENIAWSKI, 1989					
RMR					
36		CALIDAD: CLASE IV, MALA			
BARTON, 1974					
Q					
0.18		CALIDAD: MUY MALA			
HOEK, 2000					
C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)					
		0.04			
HOEK, 2000					
φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)					
		22.29			
HOEK, 2000					
σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)					
		0.43			
HOEK, 2000					
E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)					
		17.11			

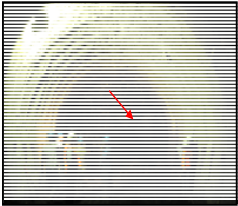

Anexo 10. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+074-0+089.26) del Túnel Trasvase-Valles de Tucutunemo

SEMANA:	7	DESDE:	04-Ene-08	HASTA:	14-Ene-08
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO					
UBICACIÓN		COSTILLA	COBERTURA	AVANCE	PLANILLAS
PROG.INICIAL	0+074	NUMERO	77-92	INICIAL FINAL	PROM.DIARIO 2.44 m
PROG.FINAL	0+089.26	SEPARACIÓN	1 m	29.19 m 36.531	TOTAL 17.07 m
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA					
MACIZO ROCOSO FRACTURADO Y FOLIADO. SE OBSERVAN DOS TIPOS DE LITOLOGÍA. FILITAS GRAFITOSAS DE COLOR GRIS OSCURO CON VETAS DE Q ₂ CON CaCO ₃ Y MINERALIZACIONES DE PIRITA (EN TODO EL FRENTE). HACIA EL HASTIAL IZQUIERDO EN LA BÓVEDA SE ENCUENTRA ESQUISTO MICÁCEO OCRE-VERDOSO BASTANTE INESTABLE.					
ISRM, 1981			HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)		
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO			GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA		
CLASE	DESCRIPCIÓN		34-39	ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA	
R1	ROCA MUY BLANDA				
REGISTRO FOTOGRAFICO			HOEK, 2000		
			mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN		
			9	FILITA, ESQUISTO	
			DEBILITAMIENTO		
			0.7	BAJA CALIDAD	
			RQD		
			0	CALIDAD: MUY MALA	
			BIENIAWSKI, 1989		
			RMR		
			40	CALIDAD: CLASE IV, MALA	
			BARTON, 1974		
			Q		
			0.23	CALIDAD: MUY MALA	
			HOEK, 2000		
			C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)		
			0.04		
			HOEK, 2000		
			φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)		
			21.79		
			HOEK, 2000		
			σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)		
			0.20		
			HOEK, 2000		
			E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)		
			22.17		
FOLIACIÓN		FALLAS		DIACLASAS	
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
N10-20E	60-70N	N10-20E	40-70S	N32-40W	60-80N
N40-80E	5-35N	N40-70E	5-30S	N60-70W	30N
N10E	50S	*N10-32W	5-20S	N35W	30-45S
		*N 70° W	30° N	N60-65W	70S
		*N 70° W	10° S		

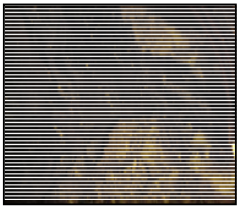

Anexo 11. Planilla del Frente de Excavación(Progresivas 0+089.26-0+099.5) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo

SEMANA:	8	DESDE:	15-Ene-08	HASTA :	21-Ene-08				
PLANILLAS DE CLASIFICACION DE MACIZO ROCOSO									
UBICACIÓN		COSTILLA		COBERTURA		AVANCE		PLANILLAS	
PROG.INICIAL	0+089.26	NUMERO	93-103	INICIAL	FINAL	PROM.DIARIO	3.41 m	3	
PROG.FINAL	0+099.5	SEPARACIÓN	0.75-1 m	36.531	41.49	TOTAL	10.24 m		
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA									
<p>MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO, DEFORMADO Y FOLIADO. PRESENCIA DE ZONAS DE ALTA INESTABILIDAD EN LA BÓVEDA Y HACIA EL HASTIAL DERECHO. DERRUMBE EL DÍA 16 ENERO 2007. LA CHIMENEA FORMADA TIENE APROXIMADAMENTE 8 M DE ALTURA, COMO MEDIDA DE CONTENCIÓN A PRÓXIMOS DERRUMBES, SE COLOCAN COSTILLAS A 0.75 M DE DISTANCIA, PROYECTADO DEL FRENTE Y ZONA DE SOBREECAVACIÓN DEL MACIZO ROCOSO Y COLOCACIÓN DE UNA TOBERA EN LA PARED NORTE DEL DERRUMBE LOS PRÓXIMOS 3 DÍAS DESPUÉS DEL DERRUMBE, SE SIGUE NOTANDO INESTABILIDAD Y SOBREECAVACIÓN EN LA BÓVEDA-HASTIAL DERECHO, EN MENOR PROPORCIÓN. SE COLOCAN LAS COSTILLAS A 1 M DE DISTANCIA ENTRE SI LA ROCA QUE PRESENTA PROBLEMAS DE INESTABILIDAD ES EL ESQUISTO-FILITA MICÁCEA, COLOR METEORIZADO OCRE ROJIZO-VERDOSO. LA FILITA GRAFITOSA CON CAPAS DE CUARZO SE PRESENTA EN EL CENTRO Y HASTIAL IZQUIERDO BRINDANDO ESTABILIDAD AL MACIZO EN DICHA ZONA.</p>									
ISRM, 1981					HOEK & BROWN (1997). ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)				
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO					GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA				
CLASE	DESCRIPCIÓN				30-35	ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA			
R1,R2	ROCA MUY BLANDA.ROCA BLANDA								
REGISTRO FOTOGRAFICO									
 <p>15/01/08. FRENTE DE EXCAVACION. PROG. 0+092.31</p>  <p>17/01/08. TOBERA. PROG. 0+095</p>									
FOLIACION		FALLAS		DIACLASAS		HOEK, 2000			
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	C_m , COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)			
N 60° E	10° S	*N 40°-50° W	45° S	N 40°-50° W	45° S	0.06			
N 55°-75° W	10° S	*N 70° W	45° N	N 20°-30° W	50°-80° N	HOEK, 2000			
				N 70°-80° W	45°-60° N	ϕ_m , FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)			
						23.22			
						HOEK, 2000			
						σ_{cm} , RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)			
						0.41			
						HOEK, 2000			
						E_m , MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)			
						40			



Anexo 12. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+099.5-0+110.57) del Túnel Trasmase-Valles de Tucutunemo

SEMANA:	9	DESDE:	22-Ene-08	HASTA:	28-Ene-08	
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO						
UBICACION		COSTILLA	COBERTURA		AVANCE	
PROG.INICIAL	0+99.5	NUMERO	104-116	INICIAL	FINAL	
PROG.FINAL	0+110.57	SEPARACION	0.75-1 m	41.49	46.20	
					PROM.DIARIO	1.84 m
					TOTAL	11.07 m
PLANILLAS						
6						
DESCRIPCION LITOLÓGICA						
<p>EL FRENTE DE EXCAVACIÓN ESTÁ CONFORMADO POR DOS Y HASTA TRES LITOLOGÍAS DIFERENTES EN CONTACTO DE FALLA: ESQUISTO MICACEO OCRE VERDOSO(L1) MUY CIZALLADO Y FOLIADO INTERCLADO CON FILITA GRAFITOSA, DE PLANOS PULIDOS A CAUSA DE LA ZONA DE FALLA. ESTA LITOLOGÍA ES LA MÁS INESTABLE Y HA OCASIONADO PROBLEMAS DURANTE LAS ÚLTIMAS DOS SEMANAS YA QUE TIENDE A DERRUMBARSE ENTRE LA BÓVEDA Y EL HASTIAL DERECHO. LAS OTRAS LITOLOGÍAS ESTÁN REPRESENTADAS POR: UN ESQUISTO GRAFITOSO CON VETAS DE CUARZO Y UN BLOQUE DE GRAN RESISTENCIA DE UNA ROCA METAIGNEA (L2) DE COLOR CLARO CON MINERALES VERDES. AMBOS PRESENTAN MAYOR DUREZA Y DAN ESTABILIDAD AL FRENTE YA QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO Y HASTIAL IZQUIERDO DEL TÚNEL.</p>						
ISRM, 1981						
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO						
CLASE	DESCRIPCIÓN					
R1,R3	ROCA MUY BLANDA,ROCA MODERADAMENTE DURA					
REGISTRO FOTOGRAFICO						
						
22/01/08 APARICIÓN DE BLOQUE DURO(GNEIS CUARZOSO). PROG. 100.5						
						
23/01/08 BLOQUE DURO(GNEIS CUARZOSO). PROG. 0+102.75						
FOLIACIÓN						
RUMBO		FALLAS		DIACLASAS		
	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	
N 65° E	30° S	N 18° W	70° S	N 30° W	PV	
N 70° E	10°-30° N	*N 30° W	35°-40° N	N 30°-50° W	35°-70° N	
N 80° E	10° S	*N 50°-85° W	20°-70° S	N 80° W	60° S	
N 50° W	10° S	N 20° E	60° N	N 76° E	PV	
N 60° W	45° N	N 24° E	25° S	N 80° E	75° S	
		N 70° W	40° S			
HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)						
GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA						
L1:24-29						
L2:35-42	ROCA FOLIADA, CALIDAD MALA A MEDIA					
HOEK, 2000						
mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN						
9-12	FILITA, ESQUISTO, METAIGNEO					
DEBILITAMIENTO						
0.7	BAJA CALIDAD					
RQD						
0	CALIDAD: MUY MALA					
BIENIAWSKI, 1989						
RMR						
28	CALIDAD: CLASE IV, MALA					
BARTON, 1974						
Q						
0.11	CALIDAD: MUY MALA					
HOEK, 2000						
C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)						
L1: 0.03 / L2: 0.10						
HOEK, 2000						
φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)						
L1: 15.06 / L2: 27.41						
HOEK, 2000						
σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)						
L1: 0.12 / L2: 1.14						
HOEK, 2000						
E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)						
L1: 10.96 / L2: 221.40						



Anexo 13. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+110.57-0+121.8) del Túnel Traslase-Valles de Tucutumemo

SEMANA:	10	DESDE:	29-Ene-08	HASTA:	04-Feb-08
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO					
UBICACIÓN		COSTILLA		COBERTURA	
PROG.INICIAL	0+110.57	NÚMERO	117-130	INICIAL	FINAL
PROG.FINAL	0+121.8	SEPARACION	0.75-1 m	46.20	48.75
				AVANCE	
				PROM.DIARIO	2.25 m
				TOTAL	11.23 m
PLANILLAS					
5					
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA					
<p>MACIZO ROCOSO HETEROGÉNEO, EN EL CUAL SE PRESENTAN DOS LITOLOGÍAS PRINCIPALES: L1: FILITA/ESQUISTO GRAFITOSO, COLOR FRESCO GRIS OSCURO, MUY DESLEÑABLE, CON PLANOS DE FOLIACIÓN PULIDOS, MUY DEFORMADO (PRESENCIA DE GRAN CANTIDAD DE PLIEGUES). AL ESCARIFICAR EL MARTILLO SÓLO ROZA EL MACIZO PARA DESTROZAR LA ROCA, LA CUAL SEDE CON MUCHA FACILIDAD. LA LITOLOGÍA L2 CONSISTE DE UN ESQUISTO GNEIS CUARZOSO, COLOR GRIS VERDUZCO CLARO, MUY DURO. EL MARTILLO GOLPEA CON DIFICULTAD LA MISMA, POR LO CUAL SE INFIERE QUE SU RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN Y CORTE ES MEDIA. SE OBSERVÓ LA PRESENCIA DE AGUA ENTRE LAS PROGRESIVAS 115-120 APROXIMADAMENTE, EL FLUIDO MANABA DESDE EL CONTACTO ENTRE L1 Y L2, ENTRE LA BOVEDA Y EL HASTIAL DERECHO. SE HIZO UN BOQUETE EN EL CONCRETO DE LA COSTILLA 123 PARA DEJAR SALIR EL AGUA.</p>					
ISRM, 1981					
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO					
CLASE	DESCRIPCIÓN				
RO,R3	ROCA EXTREMADAMENTE BLANDA,ROCA MODERADAMENTE DURA				
REGISTRO FOTOGRAFICO					
					
30/01/08 DERRUMBE EN FRENTE DE EXCAVACIÓN, 10-15 M ³ DE MATERIAL. PROG. 0+113,7					
					
31/01/08 FRENTE CON PROYECTADO. PROG. 118.5					
HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)					
GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA					
L1:15-22	ROCA FOLIADA, CALIDAD MUY MALA A MEDIA				
L2:45-52					
HOEK, 2000					
m_i, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN					
7-13	FILITA, ESQUISTO, GNEIS				
DEBILITAMIENTO					
0.7	BAJA CALIDAD				
ROD					
0	CALIDAD: MUY MALA				
BIENIAWSKI, 1989					
RMR					
34	CALIDAD: CLASE IV, MALA				
BARTON, 1974					
Q					
0.14	CALIDAD: MUY MALA				
HOEK, 2000					
C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)					
L1: 0.02 / L2: 0.24					
HOEK, 2000					
φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)					
L1: 8.00 / L2: 45.64					
HOEK, 2000					
σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)					
L1: 0.04 / L2: 3.97					
HOEK, 2000					
E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)					
L1: 3.92 / L2: 675.83					
FOLIACION		FALLAS		DIACLASAS	
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
E-W	25° N	N 86° E	10° S	N 8°-25° E	10°-30° N
N 75° E	20° N	*N 48°-70° W	40°-70° S	N 20°-48° W	60°-85° S
N 48°-54° W	60°-70° S			N 30° W	80° N
N 20° W	40° N			N 66° W	60° N

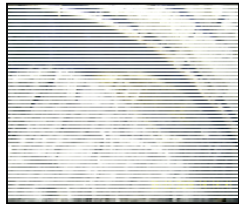

Anexo 14. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+121.8-0+127.6) del Túnel Trasvase-Valles de Tucutunemo

SEMANA:	11	DESDE:	05-Feb-08	HASTA:	11-Feb-08				
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO									
UBICACIÓN		COSTILLA		COBERTURA		AVANCE		PLANILLAS	
PROG.INICIAL	0+121.8	NUMERO	131-136	INICIAL	FINAL	PROM.DIARIO	1.93 m	3	
PROG.FINAL	0+127.6	SEPARACIÓN	0.75-1 m	48.75	49.412	TOTAL	5.8 m		
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA									
<p>EL FRENTE DE EXCAVACIÓN ESTÁ CONFORMADO POR DOS Y HASTA TRES LITOLOGÍAS DIFERENTES, SIENDO LAS MÁS IMPORTANTES L1: FILITA GRAFTOSA DELEZNABLE, PLEGADA DE COLOR FRESCO GRIS OSCURO. L2: ESQUISTO MICACEO DE COLOR METEORIZADO OCRE VERDOSO CON UN ALTO GRADO DE OXIDACIÓN, HACIA EL HASTIAL DERECHO, EL CUAL PRESENTA ABUNDANTES VETAS DE CUARZO QUE LE DAN ESTABILIDAD AL MACIZO.</p>									
ISRM, 1981					HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)				
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO					GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA				
CLASE	DESCRIPCIÓN				L1:(17-27)	ROCA FOLIADA, CALIDAD MUY MALA A MEDIA			
R0,R3	ROCA EXTREMADAMENTE BLANDA,ROCA MODERADAMENTE DURA				L2:(33-43)				
REGISTRO FOTOGRAFICO					HOEK, 2000				
 <p>06/02/08 DERRUMBE EN FRENTE DE EXCAVACIÓN. PROG. 0+126</p>  <p>06/02/08 DERRUMBE EN FRENTE DE EXCAVACIÓN. PROG. 0+126</p>					mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN				
					7-12	FILITA, ESQUISTO			
DEBILITAMIENTO					RQD				
0.7	BAJA CALIDAD				0	CALIDAD: MUY MALA			
BIENIAWSKI, 1989					RMR				
32	CALIDAD: CLASE IV, MALA								
BARTON, 1974					Q				
0.07	CALIDAD: EXTREMADAMENTE MALA								
HOEK, 2000					C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)				
					L1: 0.01 / L2: 0.18				
HOEK, 2000					φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)				
					L1: 6.74 / L2: 40.11				
HOEK, 2000					σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)				
					L1: 0.02 / L2: 2.81				
HOEK, 2000					E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)				
					L1: 1.94 / L2: 330.27				
FOLIACIÓN		FALLAS		DIACLASAS					
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ				
N 10° W	45° N	*N 40° W	45° S	N 15°-30° W	45°-55° S				
N 24° E	15° N			N 24° W	0°				
N 62° E	25° N			N 30° W	30°-50° N				
				N 50° W	85° N				



**Anexo 15. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+127.6-0+154) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo**

SEMANA:	12	DESDE:	12-Feb-08	HASTA :	19-Feb-08				
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO									
UBICACIÓN		COSTILLA		COBERTURA		AVANCE		PLANILLAS	
PROG.INICIAL	0+127.6	NÚMERO	137-164	INICIAL	FINAL	PROM.DIARIO	5.28 m	5	
PROG.FINAL	0+154	SEPARACIÓN	0.75-1 m	49.412	57.64	TOTAL	26.4 m		
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA									
<p>MACIZO ROCOSO HETEROGÉNEO, EN EL CUAL SE PRESENTAN 3 LITOLOGÍAS PRINCIPALES: L1: FILITA GRAFITOSA PLEGADA, COLOR FRESCO GRIS OSCURO, AL ESCARIFICAR EL MARTILLO SÓLO ROZA EL MACIZO PARA DESTROZAR LA ROCA, LA CUAL SEDE CON MUCHA FACILIDAD. LA LITOLOGÍA L2 CONSISTE DE UN ESQUISTO GRAFITOSO, COLOR FRESCO GRIS OSCURO, MUY DURO. EL MARTILLO GOLPEA CON DIFICULTAD. L3: ESQUISTO DE COLOR METEORIZADO OCRE VERDOSO, DURO. SE OBSERVO LA PRESENCIA DE AGUA DURANTE CASI TODA LA SEMANA EN EL HASTIAL DERECHO. LAS LITOLOGÍAS L2 Y L3 PRESENTAN GRAN CANTIDAD DE VETAS DE CUARZO, DÁNDOLE ESTABILIDAD AL MACIZO. DURANTE LA JORNADA DEL DÍA JUEVES 14, OCURRIÓ UN PEQUEÑO DERRUMBE DE 5M' APROX., CONSISTENTE DEL MATERIAL L1 Y FALLAMIENTO EN CUÑA. COLOCACIÓN DE DRENE EN EL HASTIAL DERECHO, DEBIDO A FILTRACIONES LOCALES.</p>									
ISRM, 1981					HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)				
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO					GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA				
CLASE	DESCRIPCIÓN				L1:14-22	ROCA FOLIADA, CALIDAD MUY MALA A MEDIA			
RO,R3	ROCA EXTREMADAMENTE BLANDA,ROCA MODERADAMENTE DURA				L2:39-48				
REGISTRO FOTOGRAFICO									
									
15/02/08. FRENTE DE EXCAVACION. PROG. 0+141									
									
15/02/08. FRENTE DE EXCAVACION. PROG. 0+141									
FOLIACION			FALLAS			DIACLASAS			
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
N 20° E	20°-30° N	*N 30°-45° W	40°-70° S	N 10° E	70° N				
N 60°-65° E	5°-10° N	N 10° W	40° S	N 65° E	PV				
N 60°-70° E	5°-10° S			N 50° E	5° S				
				N 10°-30° W	8°-15° N				
				N 30° W	50° N				
				N 30°-45° W	60°-70° S				
HOEK, 2000									
C _m , COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)									
L1: 0.01 / L2: 0.21									
HOEK, 2000									
φ _m , FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)									
L1: 6.22 / L2: 42.02									
HOEK, 2000									
σ _{cm} , RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)									
L1: 0.02 / L2: 3.28									
HOEK, 2000									
E _m , MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)									
L1: 1.61 / L2: 490.77									

**Anexo 16. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+154-0+171) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo**

SEMANA:	13	DESDE:	20-Feb-08	HASTA:	26-Feb-08				
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO									
UBICACION		COSTILLA		COBERTURA		AVANCE		PLANILLAS	
PROG.INICIAL	0+154	NUMERO	165-184	INICIAL	FINAL	PROM.DIARIO	3.4 m	5	
PROG.FINAL	0+171	SEPARACION	0.75-1 m	57.453	63.922	TOTAL	17 m		
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA									
MACIZO ROCOSO HETEROGÉNEO, EN EL CUAL SE PRESENTAN DOS LITOLOGÍAS PRINCIPALES: L1-FILITA/ESQUISTO GRAFITOSO, COLOR FRESCO GRIS OSCURO, MUY DESLLENABLE Y DEFORMADA. LA LITOLOGÍA L2 CONSISTE DE UN ESQUISTO GRAFITOSO CUARZOSO, COLOR GRIS, MUY DURO. EL MARTILLO GOLPEA CON DIFICULTAD LA MISMA, POR LO CUAL SE GENERAN RETRAZOS EN LA EXCAVACIÓN. FILTRACIONES LOCALES HACIA EL HASTIAL DERECHO A PARTIR DE LA PROGRESIVA 170, POR LO CUAL SE RECOMIENDA LA COLOCACIÓN DE DRENAJES. SOBREEXCAVACIÓN EN LA PROGRESIVA 0+166 (COLOCACIÓN DE TOBERAS).									
ISRM, 1981									
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO									
CLASE	DESCRIPCIÓN								
RO,R3	ROCA EXTREMADAMENTE BLANDA,ROCA MODERADAMENTE DURA								
REGISTRO FOTOGRAFICO									
 <p>25/02/08 ESPEJO DE FALLA. PROGR. 0+166</p>  <p>25/02/08 TOBERAS. PROGR. 0+166</p>									
FOLIACION									
RUMBO		FALLAS				DIACLASAS			
	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
N 42°-60° E	10° N	N 22°-42° E	15°-20° S	N 20° E	60° S				
N 70° E	5° N	* N 20°-30° W	10°-30° S	N 30° W	45°-90° N				
		* N 60° W	55°-60° S	N 60° W	60° S				
		N 30° W	30° S						
HOEK & BROWN (1997). ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)									
GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA									
L1:16-26	ROCA FOLIADA, CALIDAD MUY MALA A MEDIA								
L2:36-45									
HOEK, 2000									
mi, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN									
7-11	FILITA, ESQUISTO								
DEBILITAMIENTO									
0.7	BAJA CALIDAD								
RQD									
0	CALIDAD: MUY MALA								
BIENIAWSKI, 1989									
RMR									
29	CALIDAD: CLASE IV, MALA								
BARTON, 1974									
Q									
0.12	CALIDAD: MUY MALA								
HOEK, 2000									
C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)									
L1: 0.04 / L2: 0.23									
HOEK, 2000									
φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)									
L1: 10.27 / L2: 39.87									
HOEK, 2000									
σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)									
L1: 0.21 / L2: 3.61									
HOEK, 2000									
E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)									
L1: 21.47 / L2: 452.38									

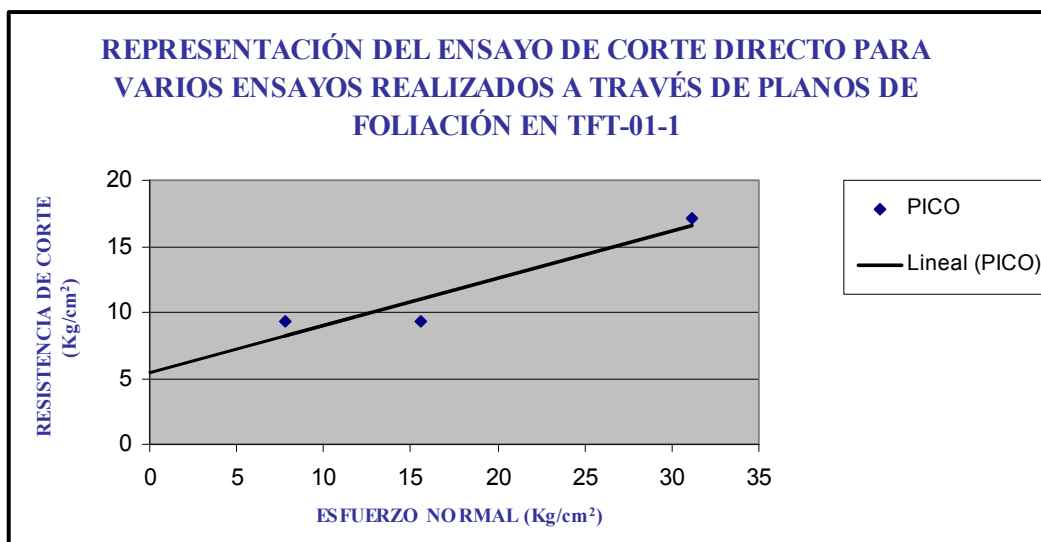
**Anexo 17. Planilla del Frente de Excavación (Progresivas 0+171-0+200) del Túnel
Trasvase-Valles de Tucutunemo**

SEMANA:	14	DESDE:	27-Feb-08	HASTA:	05-Mar-08
PLANILLAS DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO					
UBICACIÓN		COSTILLA	COBERTURA	AVANCE	
PROG.INICIAL	0+171	NUMERO	185-216	INICIAL	FINAL
PROG.FINAL	0+ 200	SEPARACIÓN	0.75-1 m	64.13	73.86
				PROM.DIARIO	4.14 m
				TOTAL	29 m
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA					
MACIZO ROCOSO MUY DEFORMADO Y FRACTURADO. SE OBSERVAN 3 LITOLOGÍAS. L1: ESQUISTO OCRE-VERDOSO CON CaCO ₃ DE RESISTENCIA VARIABLE. L2: FILITA GRAFITOSA, DE BAJA RESISTENCIA, L3: ESQUISTO GRAFITOSO CON VETAS DE CUARZO, DE MEDIANA RESISTENCIA, LO CUAL PERMITIÓ QUE EL AVANCE SEA MÁS RÁPIDO. SE PRESENTÓ INESTABILIDAD EN LA BÓVEDA Y FRENTE LOS DÍAS 28 Y 29, PROVOCANDO CAIDA DE BLOQUES Y DESLIZAMIENTOS. PERMANECEN LAS FILTRACIONES LOCALES, ESPECIALMENTE EN EL HASTIAL DERECHO, POR LO QUE SE RECOMENDÓ LA CONSTRUCCIÓN DE UN CANAL DE DESAGUE PARA EL MISMO. SE COLOCARON 3 DRENAJES DURANTE ESTA SEMANA.					
ISRM, 1981					
RESIST. COMPRES. SIMPLE ESTIMADA EN CAMPO					
CLASE	DESCRIPCIÓN				
R2	ROCA BLANDA				
REGISTRO FOTOGRAFICO					
					
27/02/08. FRENTE DE EXCAVACION. PROG. 0+174,8					
					
03/03/08. FRENTE DE EXCAVACION. PROG. 0+ 191					
HOEK & BROWN (1997), ADAPTADO POR TRUSMAN (1999)					
GSI, ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA					
24-33	ROCA FRACTURADA Y DEFORMADA				
HOEK, 2000					
m_i, CONSTANTE DE ROCA DE HOEK & BROWN					
9	FILITA, ESQUISTO				
DEBILITAMIENTO					
0.7	BAJA CALIDAD				
RQD					
0	CALIDAD: MUY MALA				
BIENIAWSKI, 1989					
RMR					
27	CALIDAD: CLASE IV, MALA				
BARTON, 1974					
Q					
0.12	CALIDAD: MUY MALA				
HOEK, 2000					
C_m, COHESIÓN DEL MACIZO ROCOSO (MPa)					
0.09					
HOEK, 2000					
φ_m, FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (°)					
19.45					
HOEK, 2000					
σ_{cm}, RESISTENCIA COMPRESIÓN SIN CONFINAR (MPa)					
0.68					
HOEK, 2000					
E_m, MÓDULO DE DEFORM DEL MACIZO ROCOSO (MPa)					
62.77					
FOLIACIÓN		FALLAS		DIACLASAS	
RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ	RUMBO	BUZ
N 50°-55° E	15° N	N 30° W	10°-30° N	N 78° E	80° N
N 30°-60° E	45°-60° N	N 30° W	PV	N 30°-35° E	60°-70° N
N 10° E	70° N	*N 10°-48° W	30°-60° S	N 12°-48° W	30°-80° S
N 60° E	75° N	*N 48°-60° W	30° S	N 30° W	PV
		*N 66° W	25° N	N 30°-40° W	15°-40° N

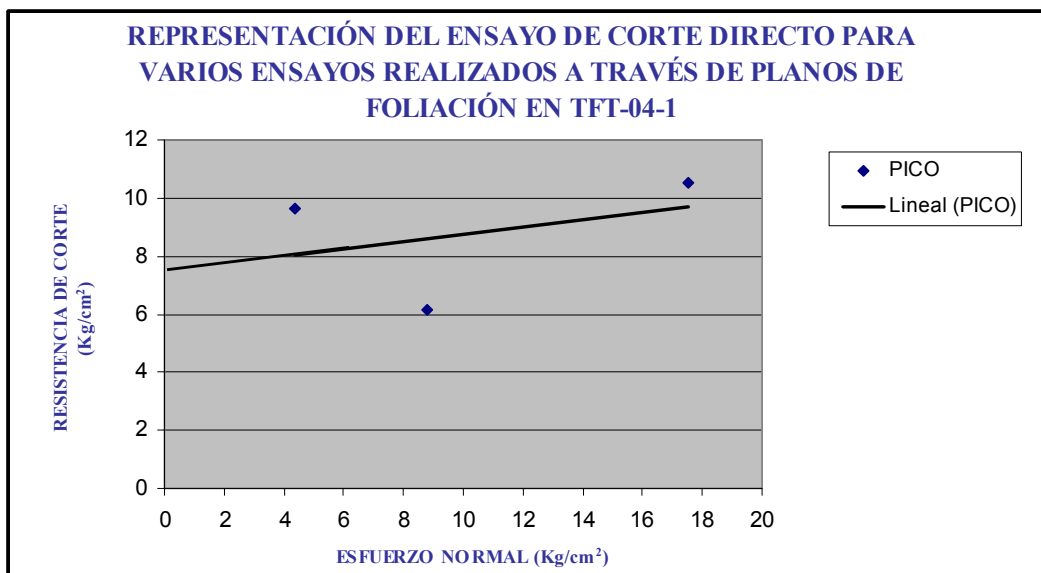
Anexo 18. Medidas de direcciones de las discontinuidades de rocas encontradas en los afloramientos ubicados en la zona de estudio

UBICACIÓN			ESTRUCTURAS				LITOTIPO
PTO GEOLÓGICO	PTO GPS		FOLIACIÓN		DIACLASAS		
	E	N	RUMBO	BUZ.	RUMBO	BUZ.	
P1S	666894	1113298	N26°E	10°N	N76°E	PV	ECV
P2S	666953	1113215	N15°W	17S	N34°E	PV	ECV
P3S	667014	1113120	N53°E	15N	—	—	EM
P4S	666123	1112846	N51°W	30N	N4°W	PV	EQ
			—	—	N46°W	83N	
P5S	666997	1113161	N 5° W	43° N	N 68° W	75° S	EM
P6S	666808	1113199	PH		N 28° E	PV	EQ
			—	—	N 6° W	PV	
			—	—	N 76° W	61° S	
P7S	666842	1113064	E-W	38° N	N 85° E	57° S	EM
			—	—	N 63° E	26° S	
P8S	666852	1112922	N 75° W	8° N	N 53° E	60° S	EQ
			—	—	N 63° W	PV	
			—	—	N 16° W	42° S	
P9S	666918	1112914	N 18° E	15° N	N-S	80° E	EM
			—	—	N 76° W	78 °S	
			—	—	N 70° W	50° N	
			—	—	N 58° E	45 °N	
P10S	666088	1112730	N11°W	43° N	N 77° W	74° N	EM
			—	—	N 58° E	PV	
P11S	667158	1112671	N 23° W	34° S	N 76° E	62° S	EM
			—	—	N 8° E	74° S	
			—	—	N 85° E	76° S	
P12S	667174	1113387	N 60° E	40° N	N46° W	62° S	EM
P13S	667287	1113190	N76°E	19°N	N48°E	80°S	EM
			—	—	E-W	80°S	
P14S	667309	1113116	—	—	—	—	M
P15S	666994	1113073	N86°W	34°S	N-S	PV	EM
			—	—	N50°W	PV	
P16S	667019	1113034	N48°E	19°S	N55°E	54°N	ECV
			—	—	N68°E	64°S	
			—	—	N11°W	48°N	
			—	—	N50°W	60°S	
P17S	667032	1112993	N-S	18°E	N13°E	4°S	ECV
			—	—	N68°E	PV	
P18	667204	1112844	PH		E-W	PV	ECV
			—	—	N40°W	PV	
P19S	667287	1112796	PH		N50°W	PV	ECV
			—	—	E-W	85°N	
			—	—	N3°E	75°S	

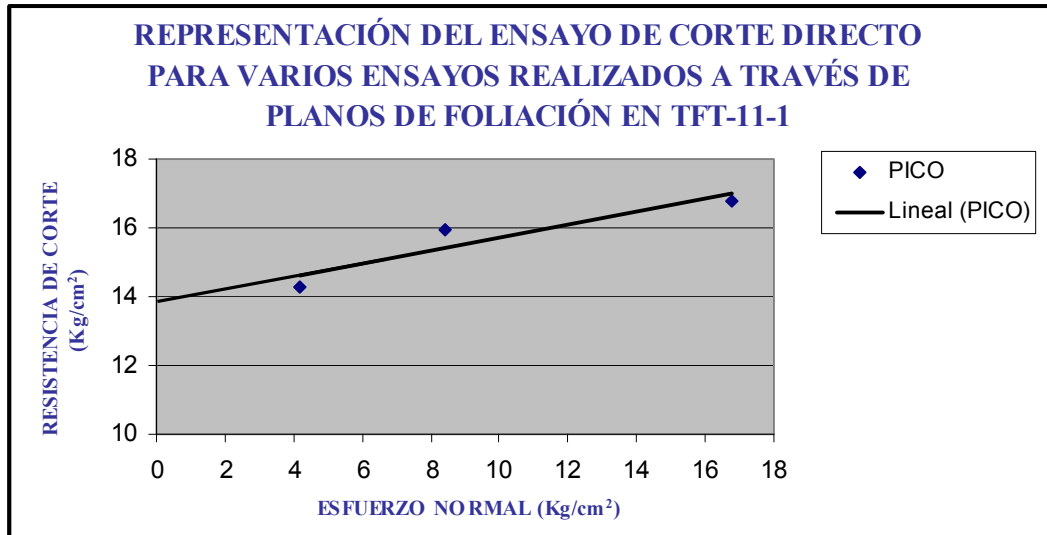
Anexo 19. Gráfica de resistencia de corte-esfuerzo normal. Muestra TFT-01-1



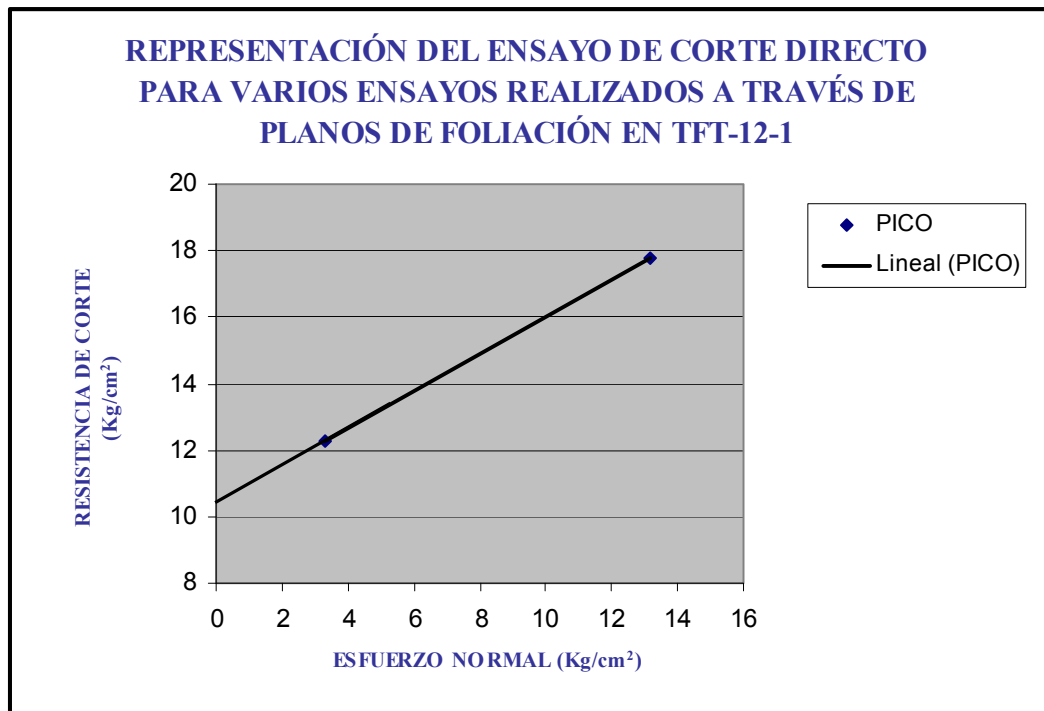
Anexo 20. Gráfica de resistencia de corte-esfuerzo normal. Muestra TFT-04-1



Anexo 21 .Gráfica de resistencia de corte-esfuerzo normal. Muestra TFT-11-1



Anexo 22. Gráfica de resistencia de corte-esfuerzo normal. Muestra TFT-12-1



Anexo 23. Gráfica de resistencia de corte-esfuerzo normal. Muestra TFT-18-1

