



CAPÍTULO 3. ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y EXPLORACIÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE
SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 3. ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y EXPLORACIÓN



Rocas calizas, Veracruz. Consultec Ingenieros Asociados, S.C.

3.1. INTRODUCCIÓN

Los túneles son el tipo de obras de ingeniería que mayor conocimiento geológico del terreno demandan, tanto para ser proyectados como construidos, de forma segura y, en la medida de lo posible, económica. A mayor grado de complejidad geológica del sitio donde será alojado el túnel, mayor será la incertidumbre para el pronóstico de los problemas geológicos esperados y, por lo tanto, la cantidad de estudios de campo y el grado de detalle deberá ser también mayor.

Uno de los factores que causa mayores retrasos e incrementos en los costos de la construcción de un túnel, es sin duda la cantidad de situaciones geológicas inesperadas, mismas que, al no haber sido previstas en la campaña de estudios, repercuten directamente en los procedimientos de excavación, los sistemas de sostenimiento, el tipo de maquinaria empleada, etc.

Las condiciones que más significativamente influyen en la estabilidad de las obras subterráneas pueden clasificarse como sigue:

- a) Geológicas: son diversas, como las que se asocian a los diferentes tipos de litología (rocas y/o suelos), condiciones de las discontinuidades, zonas mayores de debilidad como fallas, el grado de alteración de los materiales, etc.

- b) Hidrogeológicas: la presencia de agua influye sobremanera creando presiones de poro, fuerzas desestabilizadoras de filtración, reducción de la resistencia al corte, aportes de agua indeseables en el interior de la excavación, etc.
- c) Geotécnicas: se relacionan con el comportamiento mecánico del terreno y están asociadas a la resistencia y deformabilidad de los materiales del terreno.

Los problemas de estabilidad, comportamiento e inclusive la falla de un túnel excavado en suelos o roca, estarán relacionados con las propiedades mecánicas e hidráulicas del terreno en el que se construye. Un colapso o una falla local pueden ocurrir por baja resistencia al esfuerzo cortante del terreno, el cual es sometido a un cambio relativamente súbito en su estado natural de esfuerzos inducido por la excavación. La resistencia puede verse comprometida, además, por el grado de alteración en que se encuentra el terreno, sobre todo cuando se trata de materiales poco consolidados y/o cementados. También puede ocurrir una inestabilidad por la presencia de discontinuidades tales como fallas o fracturas que al interceptarse formen bloques con salida hacia la excavación.

Problemas muy frecuentes que se presentan durante la excavación de un túnel son debidos al flujo de agua. Los túneles en ocasiones funcionan como un gran dren dentro del macizo rocoso, provocando, desde simples escurrimientos hasta filtraciones de agua a alta presión, dificultando el avance y la estabilización de la excavación o incluso provocando colapsos. La presencia del agua está asociada a los regímenes hidrogeológicos regionales, así como al tipo litología del sitio y su geología estructural; cada tipo de roca tiene estructuras geológicas particulares.

Los estudios geológicos, hidrológicos y geotécnicos del terreno deben realizarse adecuadamente para obtener un conocimiento exhaustivo del terreno que será afectado (directa o indirectamente) por la construcción y operación del túnel, incluyendo sus zonas de acceso.

El reconocimiento en superficie, se complementará con zanjas, calicatas, sondeos, o estaciones geomecánicas, que deberán extenderse a uno y otro lado del eje en planta del túnel, hasta una distancia tal, que los datos obtenidos puedan servir para correlacionarse con lo que se espera exista en el interior del terreno.

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

Debe destacarse asimismo, la presencia de otras anomalías o singularidades estructurales del terreno o medio rocoso, como zonas cársticas o accidentes topográficos importantes.

Los estudios se centrarán de forma particularmente importante en las zonas de emportalamiento a modo de determinar con mayor precisión las características del terreno, por lo general más débil en términos geotécnicos, y poder fijar óptimamente el punto de arranque del túnel. La probabilidad de flujo de agua en el terreno es bastante mayor en las zonas bajas de las laderas, por lo que su presencia debe tomarse en cuenta en diferentes aspectos del diseño, construcción y operación de los portales; lo anterior exige un adecuado estudio de las condiciones hidrogeológicas del entorno.

La gran variedad de métodos de prospección y ensayos disponibles para determinar las propiedades geotécnicas del terreno implica seleccionar los más adecuados dependiendo de las características del medio por explorar, así como la profundidad e importancia de la obra. Galerías y Pozos de reconocimiento, sondeos mecánicos, zanjas, calicatas, métodos geofísicos, toma de muestras y ensayos de campo o laboratorio, deben ser seleccionados y ubicados óptimamente para obtener una base de datos suficiente para el diseño del túnel.

Para el proyecto de un túnel es de suma importancia caracterizar de la forma más completa posible el terreno que lo alojará. El objetivo principal que deben buscar los ingenieros responsables del diseño es el de garantizar la estabilidad y la seguridad de la obra, sin dejar a un lado la economía y la eficiencia. En la medida en que la cantidad y calidad de los estudios sea más completa y de mejor

calidad, habrá más posibilidades de realizar un proyecto exitoso y viceversa. Lo anterior es necesario, más no suficiente; en los siguientes capítulos de este Manual se abordarán las metodologías de diseño geotécnico, estructural, constructivo y funcional que deben seguirse (partiendo siempre de un adecuado modelo geológico), para conducir el proyecto de un túnel a un resultado satisfactorio.

A continuación se describen algunos lineamientos y recomendaciones para llevar a cabo los estudios geológicos y la exploración necesaria para el proyecto ejecutivo de un túnel de carretera.

3.2. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Antes de iniciar con los estudios geológicos y la exploración, una primera aproximación que debe llevarse a cabo es la recopilación y análisis de información existente de la zona en estudio; se recomienda consultar tanto en el sitio del proyecto, como en las oficinas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Para llevar a cabo el proyecto de un túnel de carretera, el proyectista deberá consultar en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes a través de la Dirección General de Servicios Técnicos, de la Dirección General de Carreteras y de sus centros SCT, ubicados en cada uno de los Estados, toda la información disponible que pudiera ser de utilidad para el proyecto.

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), es el organismo que tiene la responsabilidad de integrar los sistemas de información estadística y geográfica de México, además de promover y orientar el desarrollo informático en el país. Con la tecnología más avanzada en Sistemas de Información Geográfica, utiliza la fotografía aérea, las imágenes de satélite y los trabajos de especialistas en campo para generar las cartografías básicas con información sobre el medio físico, social y los recursos naturales del país.

El proyectista del túnel recopilará toda la información disponible tal como: planos topográficos, bancos de nivel, fotografías aéreas, referencias de estudios que pudieran ser útiles para llevar a cabo el proyecto.

El Servicio Geológico Mexicano (SGM), es un organismo que tiene la responsabilidad de explorar detalladamente las riquezas mineras nacionales, así como la de proveer a la industria minera de todos aquellos elementos indispensables para facilitar la exploración, identificación y cuantificación de los recursos minerales del territorio mexicano. Además su misión es generar el conocimiento geológico de México, promover su difusión y su mejor aplicación, que fomente la inversión, la competitividad y el aprovechamiento sustentable de los recursos minerales y naturales no renovables.

La geología de todo el país a gran escala está publicada por el SGM, ofreciendo datos de estratigrafía, tectónica, historia geológica, hidrogeología, etc., la cual permite conocer datos importantes como: litología, fallas o pliegues, periodo geológico al que corresponden los materiales, etc.

Con base en lo anterior y tomando en cuenta los planos topográficos existentes, el proyectista, antes de iniciar con las campañas de campo y de detalle, deberá ubicar la zona en estudio y consultar los planos, informes y estudios con los que cuente el SGM con objeto de definir preliminarmente los posibles materiales que alojarán el túnel.

Por otro lado, si en las proximidades del túnel en proyecto existen otras obras civiles o explotaciones mineras, es probable que cuenten con información geológica, misma que puede servir en la fase de proyecto y que el proyectista deberá recopilar e integrar.

Concluida la recopilación y análisis de la información existente de la zona que alojará el nuevo túnel carretero, podrán sentarse las bases para continuar con los estudios de campo y gabinete, mismos que se describen a continuación.

3.3. GEOLOGÍA REGIONAL

A partir de la información obtenida en SCT, INEGI y SGM, en particular de las fotografías aéreas y/o imágenes satelitales (Figura 3.1), de los planos topográficos (Figura 3.2) y cartas geológicas (Figura 3.3) disponibles, debe realizarse un reconocimiento preliminar de la geología regional, describiendo cuidadosamente los principales accidentes y estructuras geológicas que podrían tener importancia e incidencia durante la construcción del túnel. De la Figura 3.1 a la Figura 3.3, se muestran ejemplos de estos análisis.

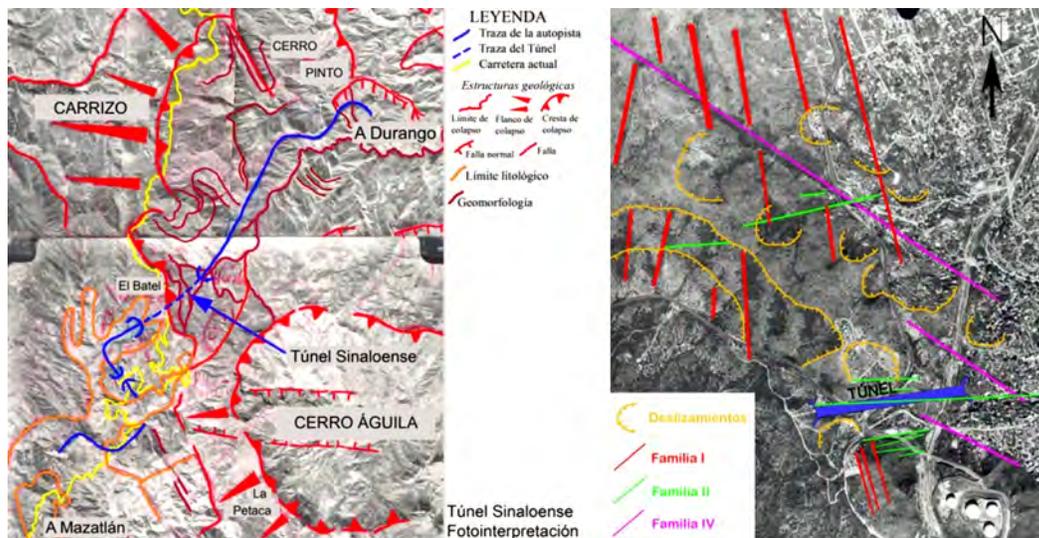


Figura 3.1. Ejemplos sobre imágenes satelitales de algunos túneles de carretera y su mapeo geológico regional.

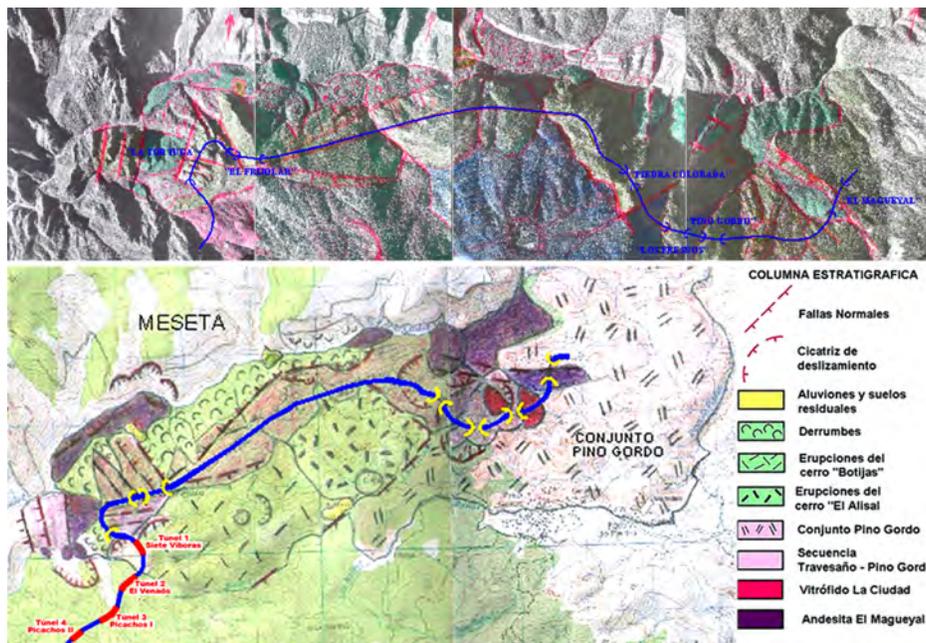


Figura 3.2. Ubicación de una serie de túneles sobre una carta topográfica y, mapeo geológico regional sobre fotografías áreas del mismo sitio.

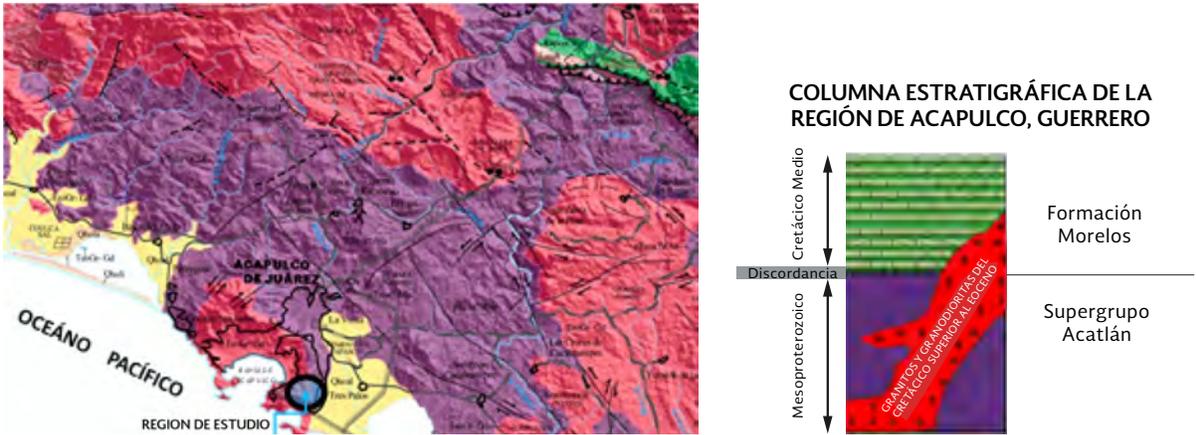


Figura 3.3. Detalle del mapeo geológico regional sobre Carta Geológico-Minera de SGM y, ejemplo de una columna estratigráfica regional.

3.4. GEOLOGÍA LOCAL

En esta fase del proyecto, deberán efectuarse los estudios geológicos de detalle que consisten en recorridos de campo para definir unidades litológicas e identificar las formaciones que fueron anticipadas en el estudio geológico regional y para confirmar y ubicar físicamente los posibles accidentes geológicos, tales como fallas, escarpes, etc.; también debe determinarse el grado de alteración y fracturamiento de la roca en superficie, así como la orientación de los planos principales de las discontinuidades. La geología levantada de forma directa en el campo permitirá disponer de un modelo geológico preliminar, que servirá de apoyo para ubicar los sitios donde se efectuarán los estudios geofísicos y las perforaciones exploratorias directas.

3.4.1. Levantamiento geológico de detalle

Existen varios tipos de condiciones naturales que pueden generar problemas de inestabilidad al excavar un túnel, como son: la orientación desfavorable de discontinuidades, la orientación desfavorable de los esfuerzos in situ respecto al eje del túnel, el flujo de agua hacia el interior de la excavación a través de fracturas, acuíferos o rocas karstificadas, la formación de bloques inestables por combinación de algunas familias de discontinuidades sobre el contorno abierto del túnel, zonas de debilidad como fallas o alteraciones importantes, suelos débiles, etcétera.

La estructura geológica ejerce una gran influencia en la estabilidad del túnel. En general, se considera que las orientaciones de discontinuidades perpendiculares a la dirección de avance del túnel son situaciones muy desfavorables, en especial cuando buzan contrarias a dicho avance.

Las discontinuidades se clasifican principalmente en sistemáticas y singulares. Las diaclasas, planos de estratificación y de esquistosidad pertenecen al primer grupo y se presentan prácticamente en todas las rocas, con mayor incidencia en las zonas poco profundas del macizo, donde los procesos de meteorización, circulación de agua y rellenos arcillosos son más frecuentes; dentro del grupo de discontinuidades singulares se encuentran las fallas, las discordancias, los diques, entre otros (González de Vallejo et al., 2002).

Las discontinuidades más importantes desde el punto de vista de la estabilidad, son las singulares, ya que estas pueden acumular esfuerzos tectónicos importantes y formar planos principales de rotura cuya resistencia es muy baja. La incidencia de las fallas en la estabilidad de una excavación depende de las características de las mismas, las cuales pueden ser (González de Vallejo et al., 2002):

- Una o varias superficies de discontinuidad, planos de despegue o contactos mecánicos entre distintos materiales.

- Una zona de espesor variable y de baja resistencia formada por materiales blandos, inestables, plásticos o expansivos.
- Fallas caracterizadas por una zona de alta transmisividad hidráulica.

En esta etapa del proyecto, con base en la geología regional, se deberá realizar el reconocimiento geológico en campo que consiste en identificar las diferentes unidades litológicas y los datos estructurales de las principales discontinuidades existentes en el macizo rocoso, así como la existencia de estructuras mayores; dicho reconocimiento, se recomienda efectuarlo en la zona del eje del trazo a partir de los afloramientos expuestos en el terreno natural de la ladera donde se emplazará el túnel y en caso de existir, en las cañadas de los arroyos más próximos a los portales del mismo, caminos de acceso y zonas aledañas al túnel.

Los recorridos de campo sobre el terreno que alojará al túnel complementan la información que es posible obtener directamente, tomando en consideración la geomorfología de la zona, la hidrogeología superficial y un estudio riguroso de afloramientos rocosos. Los aspectos que deben estudiarse dentro de la hidrogeología son: aportaciones de agua, indicios superficiales de karstificación y presencia de vegetación.

El estudio y levantamiento geológico a partir de los afloramientos es muy importante, ya que permite caracterizar la roca superficialmente, y tener una idea de cómo se puede encontrar en profundidad. Debe determinarse con precisión la litología exacta del afloramiento, la descripción y caracterización de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso. De la Figura 3.4 a la Figura 3.6, se muestran imágenes de algunos afloramientos y de levantamientos geológico estructural.



Figura 3.4. Vistas de afloramientos de roca durante levantamiento geológico de detalle.



Figura 3.5. Afloramientos de roca y detalle de las discontinuidades.



Figura 3.6. Levantamiento geológico estructural en discontinuidades.

El estudio de la estabilidad como función de las discontinuidades sistemáticas debe basarse en una rigurosa recolección de datos estructurales representativos y en cantidad suficiente para tratar estadísticamente la información.

Debido a que el fracturamiento puede llegar a condicionar las propiedades globales y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos, es de suma importancia que durante los recorridos geológicos de campo se tomen datos estructurales de los diferentes sistemas de discontinuidades tales como: orientación, espaciamiento, persistencia, rugosidad, resistencia de las paredes, apertura, relleno, presencia de agua, con objeto de contar con los elementos necesarios e indispensables para realizar posteriormente las clasificaciones geomecánicas.

Algunos de estos parámetros como la rugosidad, resistencia de las paredes, apertura y relleno, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia al corte de las discontinuidades. La descripción y medida de estos parámetros se realiza en campo durante el levantamiento geológico estructural.

La estabilidad, cuando está regida por la formación de bloques o cuñas, puede estimarse basándose, en un principio, en la caracterización realizada en superficie (y eventualmente a partir de los sondeos), así como en una serie de hipótesis sobre las condiciones que podrían tener las discontinuidades a la profundidad del túnel, mismas deberán verificarse y ajustarse durante la ejecución de la obra.

La orientación de una discontinuidad en el espacio queda definida por su buzamiento (o echado) y por la dirección del mismo. La determinación de la orientación medida de cada familia se establece a partir de valores estadísticos y la representación gráfica de las discontinuidades permite una visión general de la geometría de los macizos rocosos. Los diagramas de bloques representan tridimensionalmente la distribución de los planos, y permiten visualizar la orientación de la fracturación con respecto al túnel (Figura 3.7) (González de Vallejo et al., 2002).

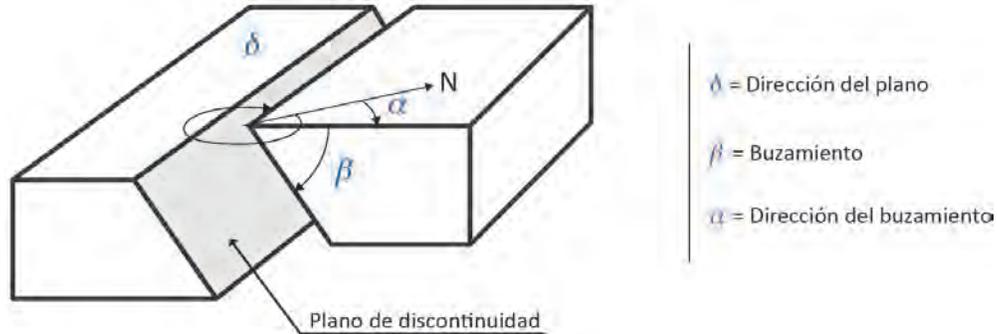


Figura 3.7. Representación de las familias de discontinuidades mediante un bloque diagrama. A partir de González de Vallejo et al. (2002).

La orientación de una discontinuidad también puede definirse por su rumbo o dirección (ángulo que forma una línea horizontal trazada sobre el plano de discontinuidad con el norte magnético, midiendo hacia el este) y su buzamiento, debiendo indicar en este caso el sentido del buzamiento (norte, sur, este, oeste). La dirección del plano y la dirección del buzamiento forman un ángulo de 90° (Figura 3.8) (González de Vallejo et al., 2002).

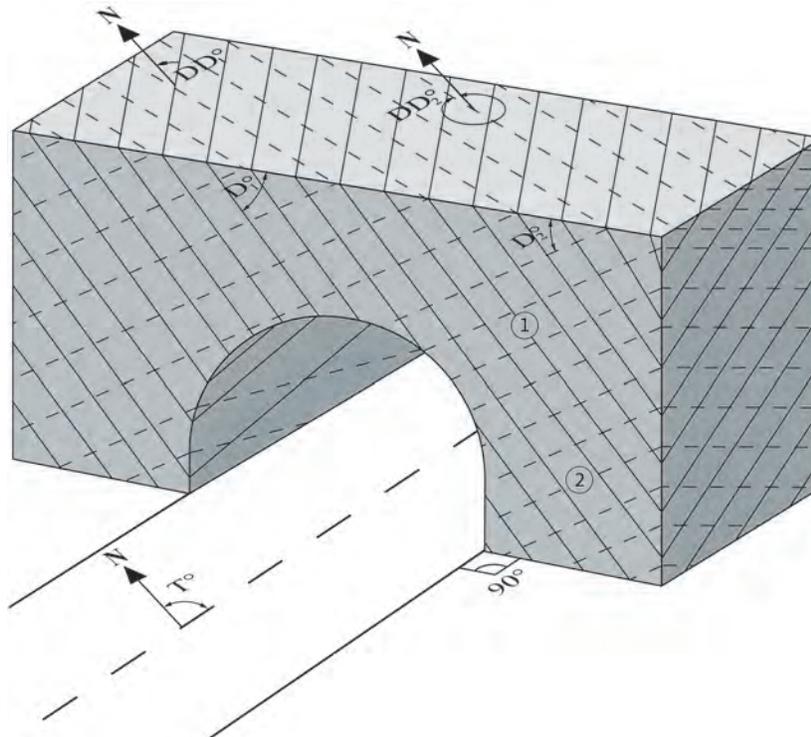


Figura 3.8. Medición de la orientación de discontinuidades. A partir de González de Vallejo et al. (2002).

A continuación se describen cada una de las propiedades geométricas de las discontinuidades.

El espaciamiento, es la distancia media perpendicular entre los planos de discontinuidad de una misma familia; influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques de matriz rocosa que forman las diferentes familias (González de Vallejo et al., 2002).

La continuidad o persistencia, es la extensión del plano de discontinuidad; define en gran medida si la matriz rocosa va a estar involucrada o no en los procesos de rotura del macizo rocoso, y en qué grado condiciona los parámetros globales del macizo rocoso (González de Vallejo et al., 2002).

La rugosidad de un plano de discontinuidad determina su resistencia al corte, debe tomarse en cuenta que a mayor rugosidad mayor es la resistencia. Asimismo la abertura, es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno; debe tomarse en cuenta que este parámetro puede sufrir gran variación en diferentes zonas del macizo rocoso, ya que en superficie la abertura puede llegar a tener una magnitud considerable y al aumentar la profundidad se reduce incluso puede llegar a cerrarse (González de Vallejo et al., 2002).

El relleno dentro de las discontinuidades influye en el comportamiento. El relleno puede ser de materiales blandos arcillosos, material producto de la meteorización de la roca o con material rocoso de naturaleza distinta a la de las paredes. Las propiedades físicas y mecánicas del relleno, tales como: la resistencia al corte, deformabilidad y permeabilidad, pueden ser muy variables y controlan el comportamiento de la discontinuidad. Es importante tomar en cuenta que si existe o no relleno, las discontinuidades son el camino preferente para las filtraciones de agua en el macizo rocoso y posteriormente, hacia la excavación del túnel (González de Vallejo et al., 2002).

Finalmente, la resistencia a compresión simple de la pared de una discontinuidad depende del tipo de matriz rocosa, de la existencia o no de relleno, y del grado de alteración de las paredes, esto influye en la resistencia al corte y en la deformabilidad del plano de discontinuidad. En la Figura 3.9, se muestra un esquema que representa las propiedades geométricas de las discontinuidades (González de Vallejo et al., 2002).

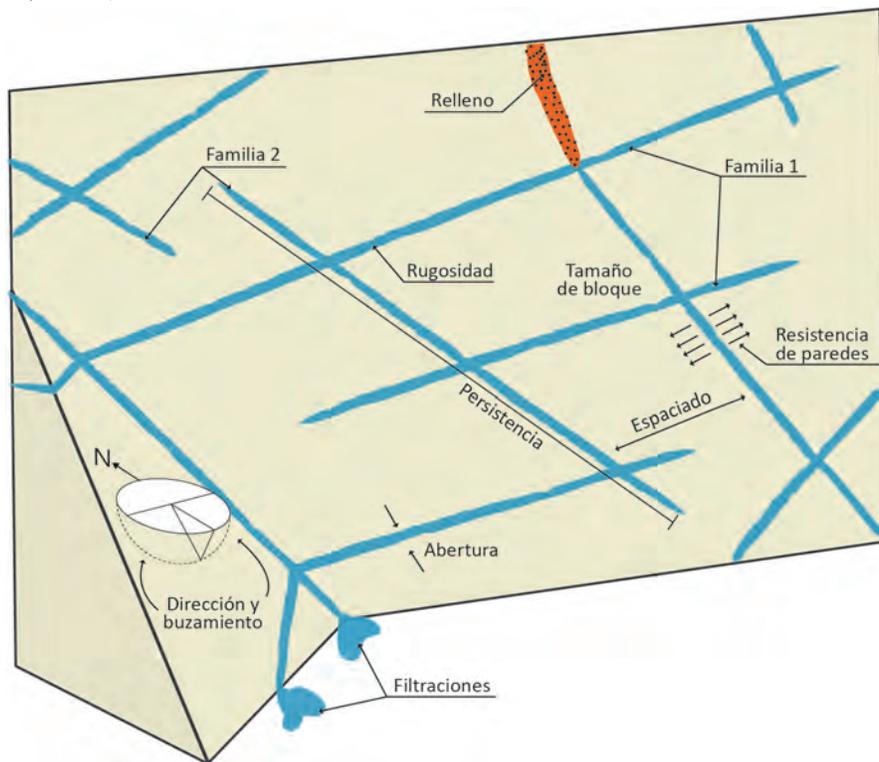


Figura 3.9. Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades. A partir de González de Vallejo et al. (2002).

Una vez efectuado el levantamiento geológico estructural y definidas las características y propiedades de cada una de las discontinuidades del macizo rocoso que alojará al túnel, se realiza la representación gráfica de las diferentes familias de discontinuidades mediante una proyección estereográfica, en la que además, se representan los polos o planos con valores medidos de las diferentes familias (Figura 3.10).

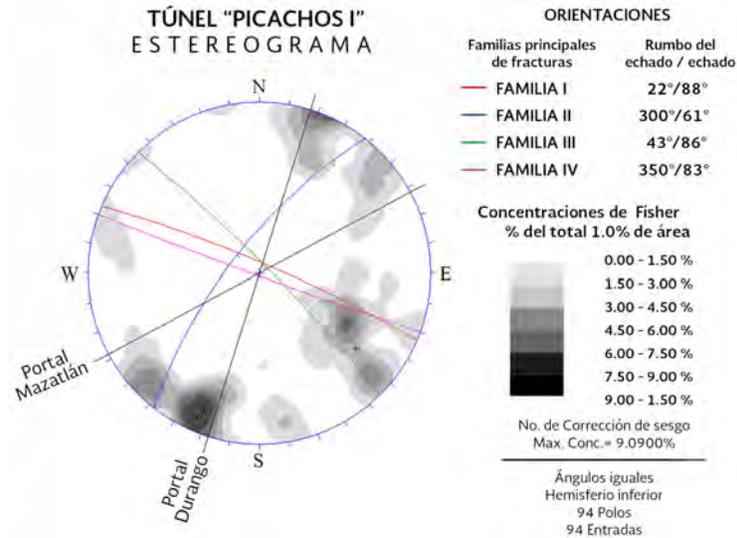


Figura 3.10. Diagrama estereográfico

Es aconsejable medir varias orientaciones de discontinuidades para definir adecuadamente cada familia. El número de medidas dependerá de la extensión de la zona de estudio, de la aleatoriedad de las orientaciones de los planos y del detalle del análisis (González de Vallejo et al., 2002).

3.5. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Algunos métodos geofísicos son utilizados en los estudios geológico-geotécnicos para túneles de carretera y presentan varias ventajas. En primer lugar, se trata de métodos relativamente económicos, por lo que pueden utilizarse con cierta amplitud. Por otro lado, la obtención de datos en campo y la interpretación de resultados pueden llevarse a cabo en tiempos relativamente cortos; por último son métodos no destructivos, que no suelen requerir caminos de acceso o grandes maniobras para su realización, por lo que no deterioran las zonas donde son utilizados. Dentro de las desventajas que se tienen, son: tienen una precisión menor que los sondeos directos y para su interpretación son necesarios conocimientos específicos, así como una experiencia importante y adecuada tanto de los operadores de los equipos como del personal que interpreta los resultados.

Actualmente la exploración geofísica ofrece una variedad amplia de métodos y modalidades:

- Métodos Sísmicos
 - Sísmica de Refracción
 - Sísmica de Reflexión
- Métodos Eléctricos
 - Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)
 - Calicatas Eléctricas
 - Dipolo – Dipolo
 - Potencial Natural

- Métodos Gravimétricos
- Métodos Magnéticos
- Métodos Electromagnéticos de Alta Frecuencia

Algunas de sus finalidades principales son:

- Determinar los espesores de los diferentes materiales que constituyen el macizo rocoso, así como sus implicaciones estructurales en la zona de excavación del túnel.
- Determinar los tiempos de arribo de las ondas longitudinales “P” y transversales “S” de los diferentes estratos presentes en el subsuelo de los portales tanto de entrada como de salida, con objeto de obtener el espesor del material de baja calidad.
- Correlacionar los espesores, y velocidades de propagación con las características litológicas y geotécnicas de los diferentes paquetes de roca que constituyen la estratigrafía del sitio que alojará el túnel.

3.5.1. Método Sísmico

La sísmica de refracción se basa en el estudio de propagación de las ondas sísmicas en el terreno. Estos métodos permiten conocer el grado de compacidad, alteración, fracturamiento, y características del terreno, así como de sus propiedades elásticas. Las ondas sísmicas son producidas artificialmente con el objetivo de definir la velocidad de propagación de las ondas y definir la configuración geológica del subsuelo. La velocidad depende de las propiedades físicas del terreno (composición y propiedades elásticas) y varía cuando pasa de un medio a otro, definiendo superficies de contacto de diferente composición. A lo largo de estas superficies las ondas sufrirán refracción y reflexión (Ley de Snell) tal como se muestra en la Figura 3.11.

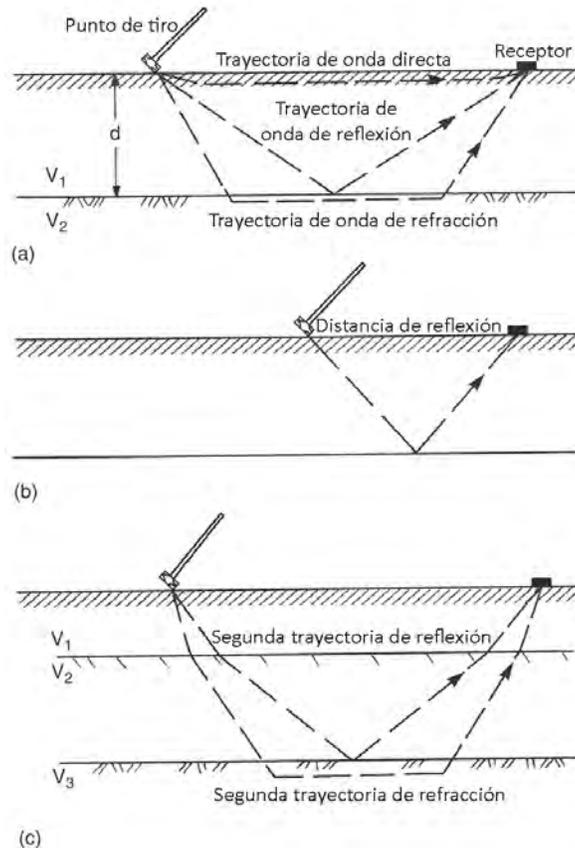


Figura 3.11. Trayectorias de ondas sísmicas a través del subsuelo. (a) directa, (b) reflejada, y (c) refractada. Tomada de Hunt, 2005.

En la aplicación del método sísmico de refracción se busca conocer el tiempo mínimo que tardan las ondas sísmicas o elásticas en propagarse desde el punto en que se generan mediante una excitación en el terreno, las ondas se propagan y se refractan en los distintos estratos del subsuelo hasta emerger en la superficie, en donde las vibraciones son detectadas por una serie de geófonos cuya distribución en conjunto se conoce como tendido sísmico.

Las ondas sísmicas se generan en lugares previamente definidos denominados puntos de tiro (PT) (Figura 3.12). El efecto se logra por medio de un disparo de dinamita o con el impacto de un cuerpo pesado (un golpe de martillo) sobre una placa metálica colocada en la superficie del terreno; ambos elementos (martillo y placa) al entrar en contacto disparan el tren de ondas en el terreno registrándose este instante en el sismógrafo activándose el registro de la señal de los geófonos detectores, que son los elementos transductores que convierten el movimiento vibratorio del terreno en una señal eléctrica que se envía al sismógrafo, el cual finalmente amplifica las señales y las presenta en forma gráfica como sismograma (Figura 3.14).



Figura 3.12. Ubicación de un punto de tiro (PT3) durante la ejecución de un tendido sísmico.



Figura 3.13. Sismógrafo Geometrics ES-3000, laptop y batería utilizados para la ejecución de los tendidos de refracción sísmica.

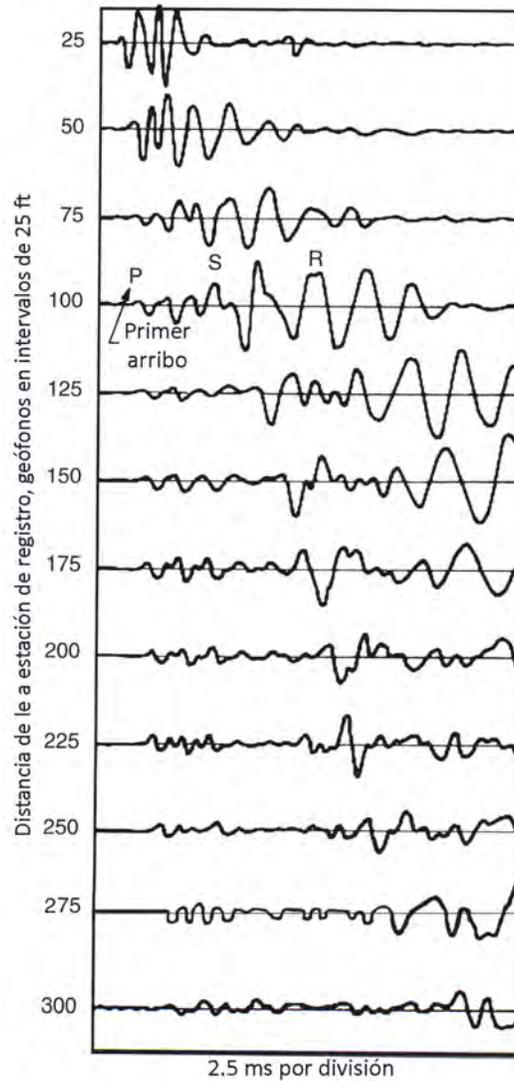


Figura 3.14. Sismograma obtenido de distintos geófonos. Tomada de Hunt, 2005.

Una vez obtenidos los sismogramas en campo, se procesa la información que incluye la lectura de los tiempos de los primeros arribos que con las ubicaciones tanto de los puntos de tiro como de los geófonos y con ello se elaboran las gráficas tiempo-distancia (gráficas dromocrónicas) donde el eje de las ordenadas corresponde con los tiempos de arribo de las ondas longitudinales expresadas en milisegundos y el eje de las abscisas corresponde con las separaciones entre geófonos y puntos de tiro (Figura 3.15).

La interpretación se realiza a través de estas gráficas en donde se analizan los contrastes de velocidad sísmica aparentes, las cuales corresponden con las condiciones naturales de los materiales del subsuelo; posteriormente se obtienen las velocidades reales y los espesores de cada una de las capas detectadas para formar un modelo geosísmico del sitio, el cual agrupa zonas con características similares de valores de velocidad.

El procesamiento, análisis e interpretación de los valores de velocidad obtenidos durante los trabajos de prospección sísmica realizados en campo, dan como resultado los perfiles geosísmicos que se muestran en la Figura 3.19, cuyos valores de velocidad de onda longitudinal se asocian con las diferentes características de alteración, fracturamiento y compacidad de los materiales del subsuelo presentes en el sitio de estudio.

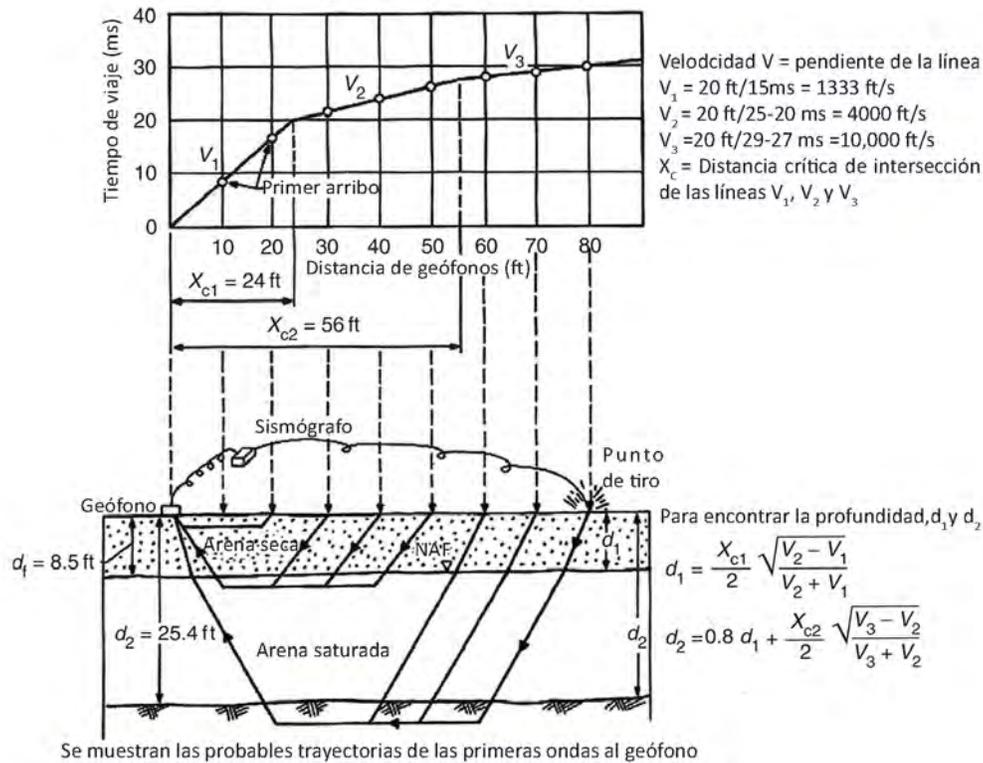


Figura 3.15. Esquema de arreglo para método sísmico y gráfica dromocrónica de la prueba. Tomada de Hunt, 2005.

En el proyecto de túneles de carretera, la aplicación más habitual de la sísmica de refracción es en el estudio de los emportalamientos, esto debido a que su profundidad de penetración es limitada; sin embargo, con ellos pueden determinarse de manera bastante precisa las fronteras entre suelo o roca de mala calidad y la roca sana, lo cual coadyuva en la ubicación más conveniente para emportalar el túnel.

3.5.2. Métodos Eléctricos¹

Los métodos eléctricos también ofrecen una amplia variedad de modalidades y dispositivos acordes con objetivos específicos. La propiedad eléctrica que se emplea para inferir las características de los materiales del subsuelo en los métodos eléctricos es la resistividad, o su inverso, la conductividad. La resistividad es la oposición de los materiales al paso de la corriente eléctrica.

Los materiales en el subsuelo conducen la corriente eléctrica en forma iónica y electródica; en el primer caso la conducción se realiza a través de los fluidos contenidos en los poros de la roca y en el segundo caso la conductividad se realiza por medio de los minerales metálicos. Para fines prácticos se considera que la conducción de la corriente eléctrica en el subsuelo predominantemente es de forma iónica, por lo que la resistividad eléctrica es un parámetro que depende de las condiciones físico - químicas a las que se encuentran sometidas las rocas en el subsuelo, tales como: el grado de saturación, grado de fracturamiento, compacidad entre otras.

En la prospección eléctrica lo más común es emplear corriente continua, estableciendo contacto entre los aparatos de medición (transmisor y receptor) y el suelo, protegiéndolos de fenómenos parásitos como la polarización y la resistencia. También es posible utilizar corriente alterna para aprovechar fenómenos de inducción del tipo electromagnético.

¹ En el libro Ingeniería Geológica (González de Vallejo et al., 2002) se incluye una amplia descripción de los métodos de prospección geoelectrica. Para mayor información sobre dichos métodos, se recomienda la consulta de la citada obra.

La medida de la resistividad del subsuelo se lleva a cabo en los siguientes pasos (González de Vallejo et al., 2002):

- 1) Introducción en el terreno de una corriente continua de intensidad I, mediante dos electrodos, denominados A y B, conectados a una fuente de energía.
- 2) Medida de diferencia de potencial, ΔV, generada por el paso de la corriente entre dos electrodos denominados M y N (Figura 3.16).
- 3) Cálculo de la resistividad del espesor del terreno afectado por el paso de la corriente.

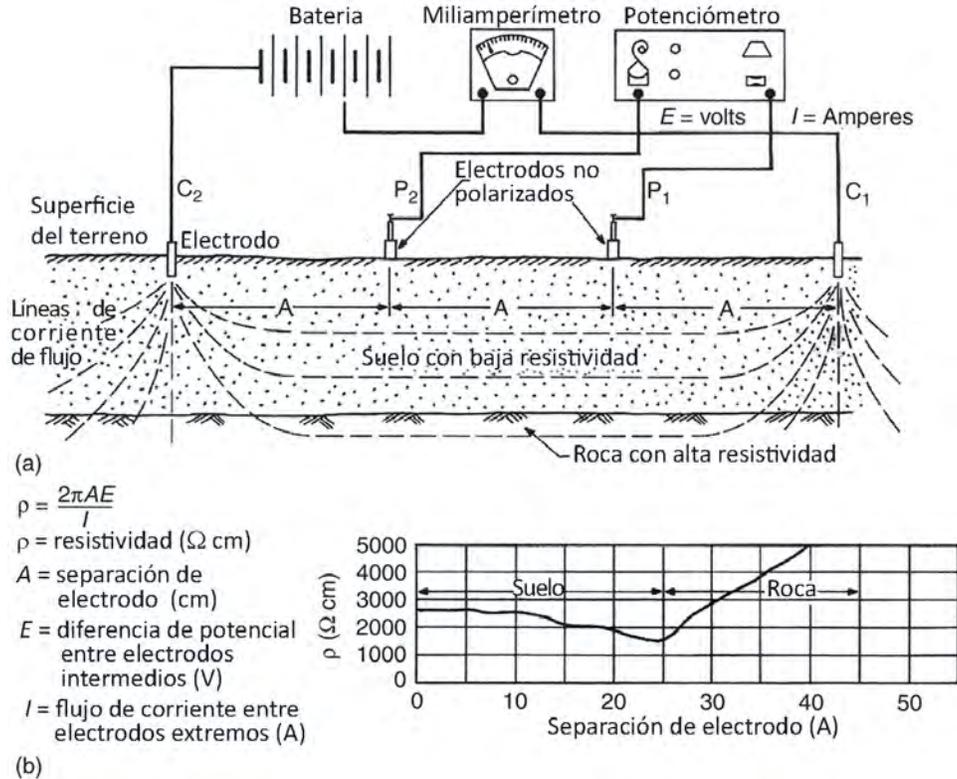


Figura 3.16. Componentes de un aparato típico de resistividad eléctrica en un arreglo Wenner y curva típica de resistividad. Tomada de Hunt, 2005.

La resistividad para un medio homogéneo, se calcula con la ecuación (3.1).

$$\rho_a = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) K \quad (3.1)$$

Donde:

- ρ_a = Resistividad
- ΔV = Diferencia de potencial
- I = Corriente eléctrica
- K = Constante que es función del arreglo geométrico

Cuando en la ecuación 3.1 se emplean datos de diferencia de potencial y corriente, obtenidos para un medio heterogéneo o parcialmente homogéneo, a la resistividad obtenida se le denomina aparente y es la base para que mediante una serie de procesos pueda obtenerse el espesor y la resistividad real de los materiales del subsuelo.

La configuración Schlumberger (Figura 3.17a) es el arreglo más usado, seguido por el Wenner (Figura 3.17b), a través de estos métodos se determina la resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo. A continuación se describen algunos métodos eléctricos.

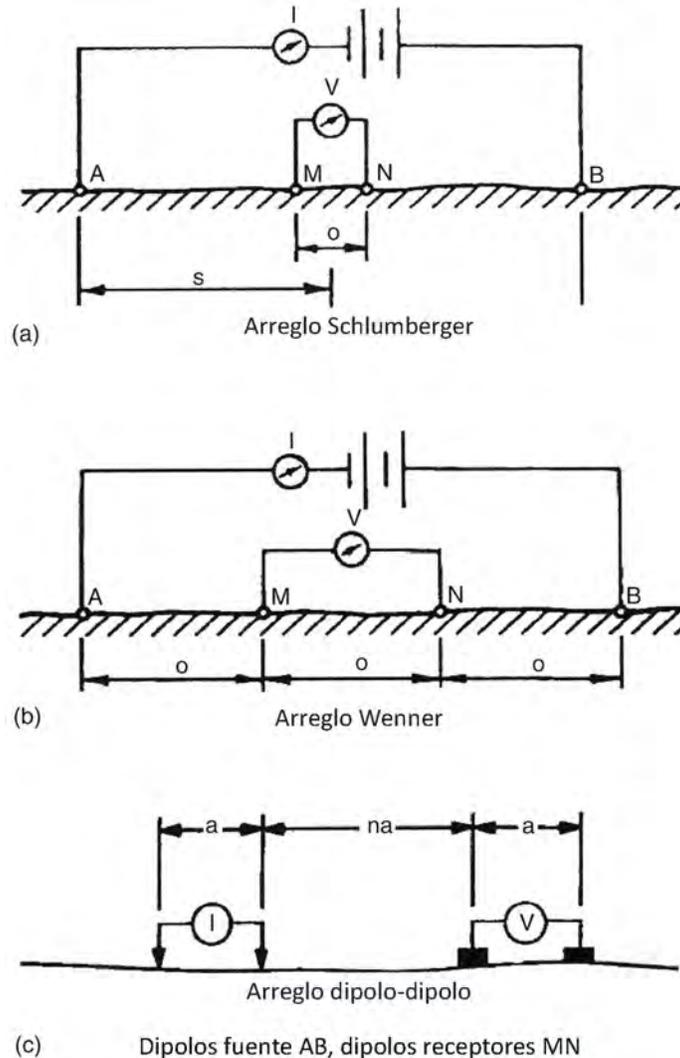


Figura 3.17. Configuraciones de arreglos de electrodos para medir la resistividad.

3.5.2.1. Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

La aplicación del método resistivo mediante sondeos eléctricos verticales (SEV's) se realiza con el fin de obtener una correlación de los valores de resistividad y espesores de las diferentes capas del subsuelo, para ello se emplea un dispositivo lineal y simétrico de cuatro electrodos tipo Schlumberger (Figura 3.18).

En este arreglo de cuatro electrodos, se integran dos de ellos al circuito de transmisión y dos al circuito de recepción. Los electrodos exteriores A y B constituyen el circuito en la superficie del terreno; la energía eléctrica circula por los materiales del subsuelo en forma tridimensional, creando un campo eléctrico cuyo potencial es medido a través de los electrodos M y N que constituyen el circuito de recepción.

El dispositivo electródico Schlumberger considera que los electrodos de potencial M y N se encuentran colocados a una distancia infinitesimal con respecto al centro del dispositivo, sin embargo, para fines prácticos es suficiente colocar, los electrodos M y N, a una distancia menor o igual a la quinta parte de la distancia de separación que existe entre los electrodos A y B; esto permite un mínimo de error en las mediciones.

El resultado que se obtiene del SEV es la variación de la resistividad, ρ_a con la profundidad en el punto central del perfil investigado; normalmente estas técnicas se aplican cuando es necesario conocer las características de fracturamiento, contenido de arcilla, nivel freático, o bien la posible saturación de los materiales del subsuelo.



Figura 3.18. Serie de fotos, que muestran actividades durante la ejecución de SEV'S y foto que muestra el resistímetro y transmisor de corriente eléctrica utilizados.

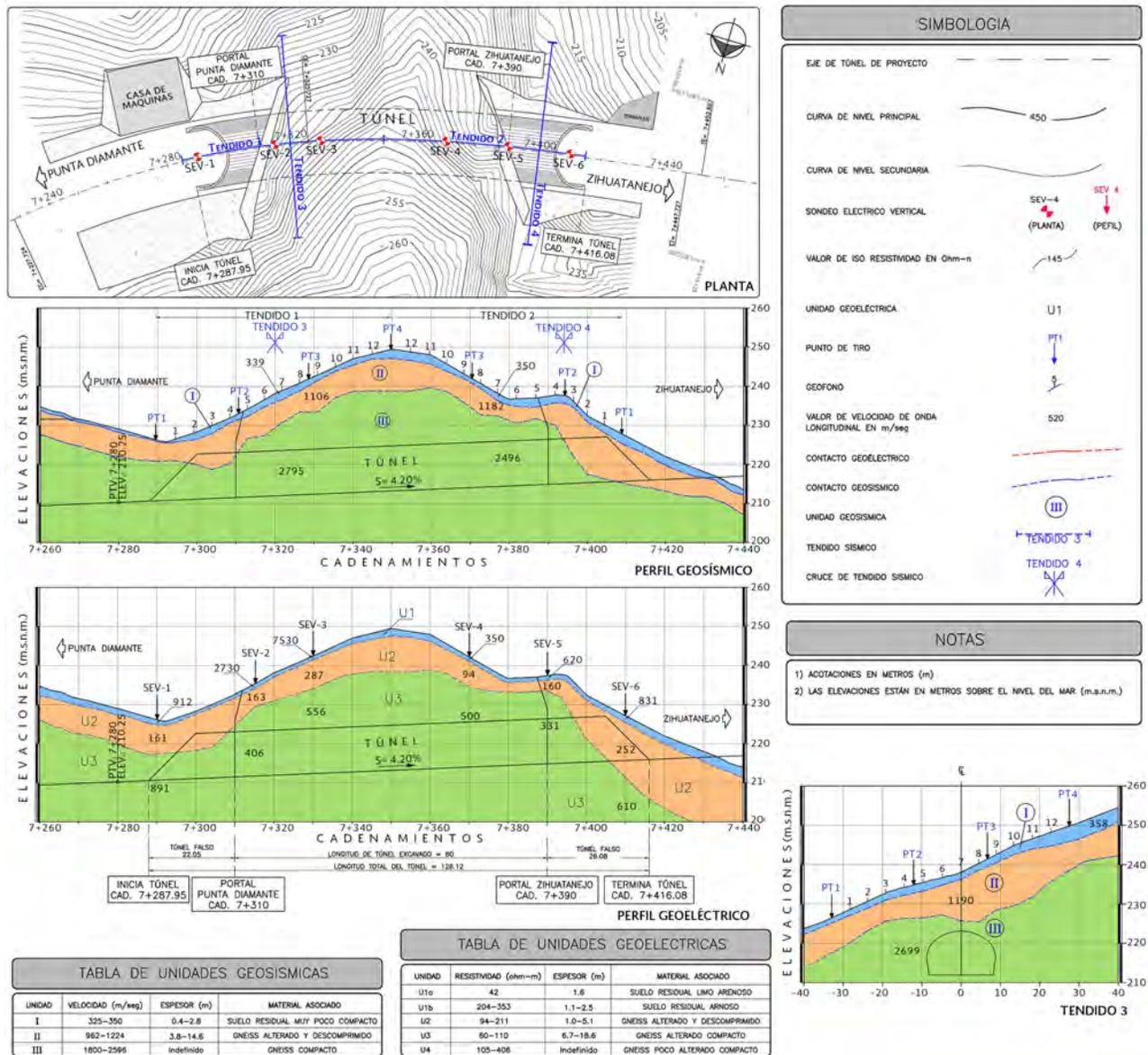


Figura 3.19. Resultados de exploración geoelectrica (SEV'S) y sísmica de refracción.

Mediante el procesamiento, análisis e interpretación de los valores de resistividad obtenidos durante los trabajos de prospección eléctrica realizados en campo, se logran definir unidades geoelectricas con sus correspondientes subunidades; la representación de los resultados de los sondeos eléctricos verticales generalmente se hace por medio de perfiles geoelectricos; éstos perfiles muestran la conformación de las unidades geoelectricas, indicando los espesores y material asociado. En la Figura 3.19, se muestra un plano que resume los resultados del estudio geofísico realizado para un túnel de carretera.

3.5.2.2. Calicatas Eléctricas

Para su realización se adopta un dispositivo de tipo Wenner, donde las distancias entre los electrodos son iguales, moviendo lateralmente el dispositivo a lo largo de un perfil seleccionado. De esta manera se detectan las variaciones de resistividad aparente, ρ_a , a una profundidad aproximadamente constante, las profundidades más habituales de investigación oscilan entre 0 y 50 m.

3.5.2.3. Dipolo-dipolo o pseudosecciones

Con este método se sitúa el dipolo MN lateralmente y alineado al dipolo AB. Posteriormente, y manteniendo fijo el dipolo AB, se desplaza sucesivamente el MN, a continuación, se mueve un paso el dipolo AB y se repite el proceso. El resultado de esta técnica es un perfil de resistividades del terreno o pseudosección (González de Vallejo et al., 2002).

3.5.2.4. Métodos electromagnéticos

Son aquellos que estudian la respuesta del terreno cuando se propagan, a través de él, campos electromagnéticos (EM). La gran variedad de generación o detección de estos campos EM, así como la diversidad de sus características dan lugar a un número mayor de técnicas de aplicación que cualquier otro método geofísico.

a) Prospección electromagnética en dominio de frecuencias.

Consiste en la emisión de impulsos electromagnéticos desde una bobina emisora hasta una receptora situada sobre el terreno. La profundidad de penetración depende de la frecuencia de emisión, que suele oscilar entre rangos de 100 Hz a 10 kHz, y de la distancia entre emisor y receptor. El método operativo consiste en situar un punto emisor y receptor a una cierta distancia (5 a 50 m como norma), e ir desplazándolos a intervalos regulares a lo largo de perfiles. En cada punto de medición, se obtiene un resultado el cual se asigna a cada punto situado a media distancia entre emisor y receptor y a una profundidad que depende de la frecuencia utilizada y la orientación de las bobinas (horizontal o vertical).

b) Prospección electromagnética en dominio de tiempo.

Con este método se registran las variaciones del campo magnético secundario generado en periodos cortos de tiempo, esto se logra cuando se coloca la bobina receptora en el interior de la emisora mientras la bobina transmisora no produce emisiones, con esto se evita la generación de ruido y permite una medición con relativa facilidad. El resultado es un campo magnético secundario que decrece hacia la superficie, la medida de la relación con la que decrece el campo magnético permite detectar la presencia de materiales conductores en el subsuelo y con ello se puede determinar la conductividad en el terreno.

c) Very Low Frequency (V.L.F.)

Esta técnica se diferencia de las anteriores en que la frecuencia emisora es una estación lejana. El campo primario es generado por antenas de radio lejanas (varios cientos o miles de kilómetros) de muy baja frecuencia. La gran ventaja de estos sistemas, independientemente de su precisión, es evitar colocar equipos generadores del campo primario en el sitio de estudio, utilizando solamente ligeras bobinas que capten el campo resultante.

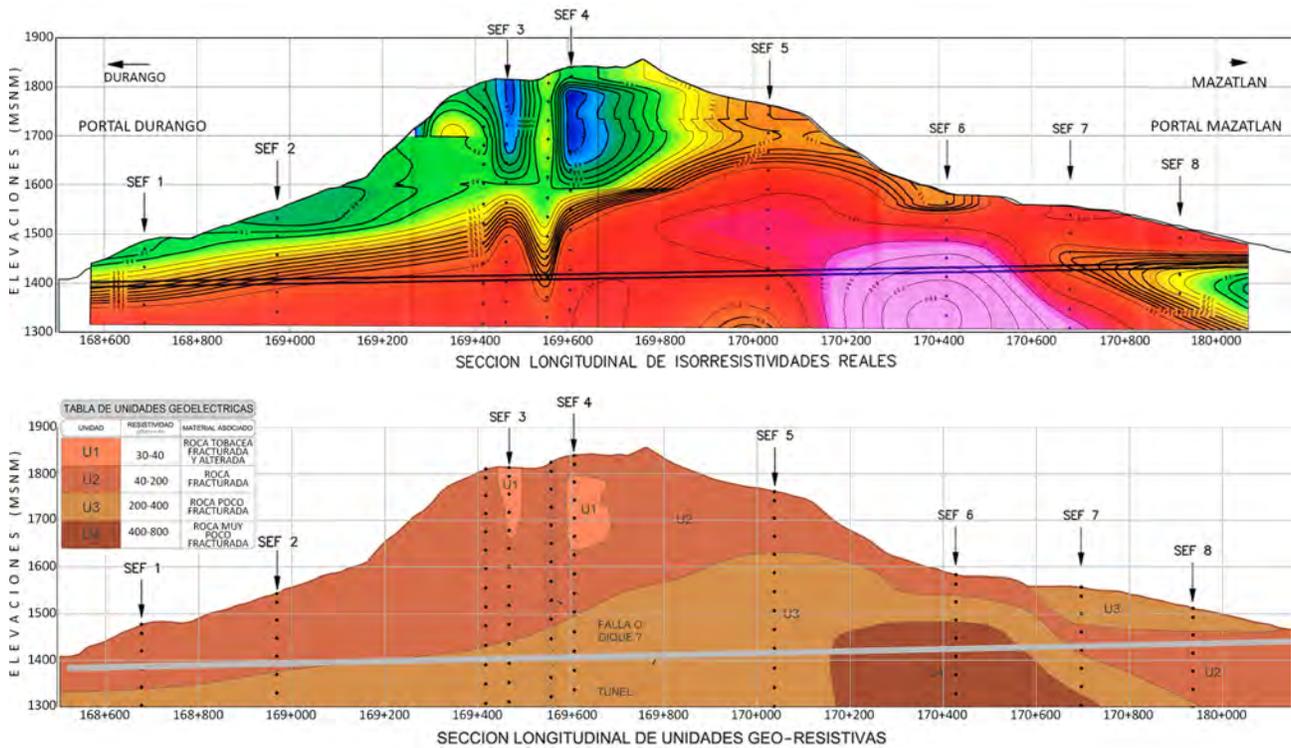


Figura 3.20. Ejemplo de resultados de la exploración goelectrica, mediante la técnica de sondeos electromagnéticos por frecuencias.

d) Geo-Radar (GPR)

Es un método que funciona por reflexión, obteniéndose perfiles continuos de alta resolución similares a los conseguidos por sísmica de reflexión. Sus ventajas principales son la rapidez de toma de datos y su versatilidad, gracias a la posibilidad de intercambiar antenas con diferentes frecuencias. La principal desventaja es la excesiva dependencia de las características superficiales del terreno al que aplica.

Los equipos GPR trabajan mediante una antena transmisora y con impulsos cortos de energía electromagnética, actualmente se utilizan frecuencias entre 50 MHz y 1.5 GHz. Cuando la onda radiada halla heterogeneidades en las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo (contacto entre materiales, fracturas, huecos, zonas de distinta calidad, elementos metálicos), parte de la energía se refracta de nuevo a la superficie y otra parte se transmite hacia profundidades mayores. La señal reflejada se amplifica y se transforma al espectro de la audiofrecuencia, obteniéndose un perfil continuo en el que se indica el tiempo total de viaje de una señal al pasar a través del subsuelo y reflejarse en una heterogeneidad para volver a la superficie.

La interpretación de los registros de geo-radar también llamados radargramas, se basa generalmente en la caracterización de la textura, amplitud, continuidad y terminación de las reflexiones.

3.5.2.5. Geofísica en el interior de sondeos

Las técnicas geofísicas en el interior de sondeos constituyen una herramienta de gran utilidad para medir determinadas propiedades físicas de las formaciones geológicas atravesadas por las perforaciones, complementando la información obtenida en la recuperación de los sondeos y los resultados de la geofísica de superficie.

e) Sísmica de sondeos

Se realizan mediante la introducción de una sonda triaxial en un sondeo, previamente revestido, que registra los tiempos de llegada de las ondas P y S, a partir de los cuales se calculan las velocidades de transmisión y el módulo de deformación dinámico del terreno. Estas constantes dependen de las velocidades de las ondas elásticas longitudinales, V_p , y transversales V_s , y de la densidad del material. A continuación se describen las técnicas de investigación empleadas habitualmente.

i. Cross Hole

Se realiza entre dos o tres sondeos próximos. En dos de ellos se introduce la sonda triaxial a distintas profundidades y en el otro se realiza el golpeo también a profundidad variable. El resultado es una sección de las diferentes velocidades del terreno entre los sondeos.

ii. Down Hole y Up Hole

Se lleva a cabo en un único sondeo en el que la sonda triaxial se dispone en distintas cotas, generalmente con un espacio regular entre ellas, procediendo a realizar los golpes desde la superficie del sondeo (down hole) o desde el fondo (up hole). Los impulsos en superficie se realizan por golpeo natural sobre un cuerpo fijado al suelo con un peso que lo inmoviliza, de esta manera se obtiene un perfil de velocidades del terreno (Figura 3.21).

El geófono que se utiliza tiene tres componentes: dos dispuestas horizontalmente y ortogonales entre sí, y una tercera vertical. Esta configuración permite identificar la llegada de las ondas S por comparación de los sismogramas recibidos en la misma componente pero procedente de golpeo en dirección contraria. Identificando el tiempo de llegada de las ondas P y S, se procede con la representación de curvas tiempo-distancia (domocrónicas) que permiten calcular las velocidades V_p y V_s , y con estos parámetros se pueden obtener el módulo de Young y la relación de Poisson.

Debe tomarse en cuenta que existen más métodos de exploración geofísica, sin embargo, se salen del alcance del presente manual lo cual no significa que no sean aplicables para el proyecto de un túnel de carretera.

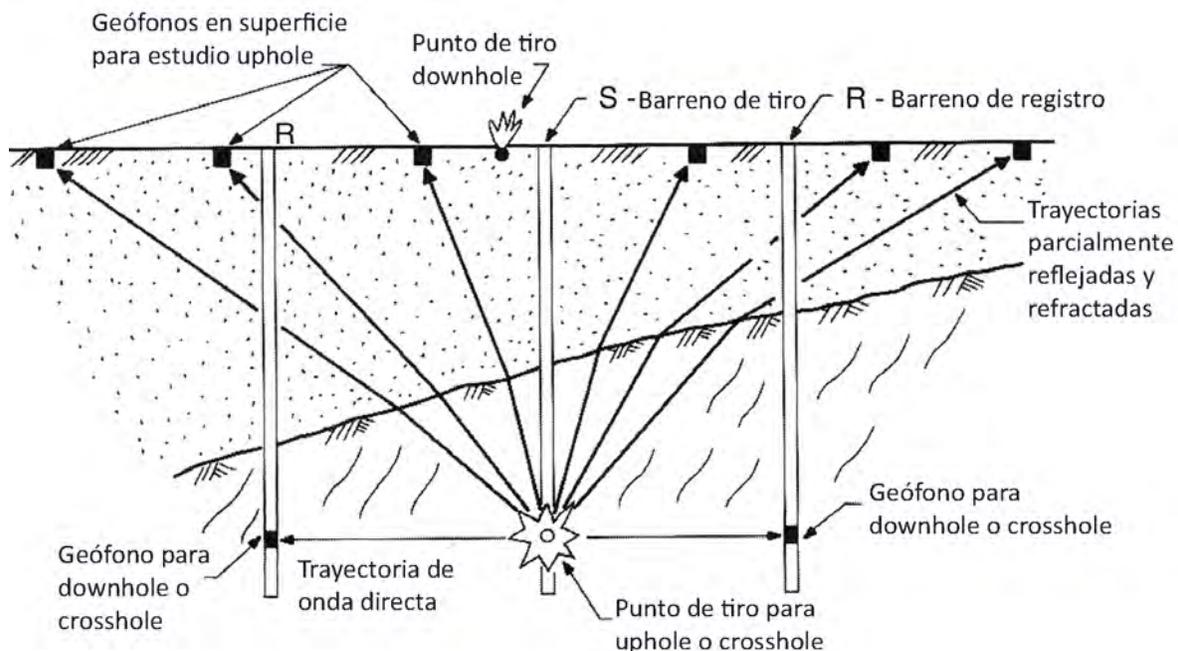


Figura 3.21. Esquema de métodos *Down Hole* y *Up Hole*. Tomada de Hunt, 2005.

Como se ha visto a lo largo de este subcapítulo de prospección geofísica, existe una diversidad importante de métodos aplicables para llevar a cabo el estudio del subsuelo donde se pretenda proyectar y construir un túnel de carretera. La aplicación de un método u otro, está en función de la ubicación del túnel, del trazo y de su longitud, del espesor de la cobertura, pero sobre todo del tipo y calidad de terreno.

A partir de los registros de campo obtenidos de los métodos indirectos geofísicos, se debe procesar e interpretar la información para conocer la distribución de los diferentes materiales del subsuelo y se conforman los modelos geosísmicos y/o geoeléctricos, los cuales son expresados en planos que deben incluirse en el proyecto como los mostrados en la Figura 3.19 y Figura 3.20.

3.6. EXPLORACIÓN DIRECTA

3.6.1. Sondeos exploratorios

Los sondeos mecánicos son el método más utilizado para la investigación geológica directa en los estudios para túneles de carretera, ya que proporcionan una información física real del material rocoso que se encuentra en profundidad. La campaña de sondeos debe ser cuidadosamente preparada con objeto de optimizar al máximo el número y la longitud de los barrenos.

Antes de llevar a cabo la planeación de la campaña de perforación debe realizarse el estudio geológico de superficie que permita tener una idea aproximada de la roca que se va a encontrar y donde pueden localizarse los sitios potencialmente más complicados.

Algunos de los objetivos que se persiguen con la campaña de sondeos previa al proyecto del túnel son:

- a) Estudiar la zona de portales: litología, profundidad de la roca sana, presencia de agua, etc.
- b) Determinar las distintas litologías presentes en el túnel, y de cada una obtener muestras para ser analizadas, clasificadas y posteriormente ensayadas en el laboratorio.
- c) Con base en los estudios geológicos de superficie y de prospección geofísica, se pueden analizar las zonas donde potencialmente pueden existir fallas, cavernas, contactos litológicos o roca de peores características.

Los sondeos pueden ser verticales, horizontales o inclinados, normalmente se realizan verticales, aunque en ocasiones se emplean inclinados para fines especiales. El método usual de perforación es con brocas de diamante, que permiten obtener núcleos continuos de terreno. En las zonas donde no sea posible recuperar muestras de roca se debe optar por otra técnica de perforación, por ejemplo, sondeos con pruebas de penetración estándar, obteniendo de igual forma muestras alteradas e inalteradas de terreno.

Los sondeos para túneles de carretera se perforan con equipo ligero (Figura 3.22) y/o pesado (Figura 3.23) utilizando barriles muestreadores BQ y NQ principalmente; en ocasiones cuando no es necesario recuperar, se emplean brocas tricónicas para el avance en el sondeo. La elección del tipo de equipo está en función de varios factores tales como: presupuesto, tiempo para elaborar el proyecto, longitud y cobertura del túnel, accesos disponibles para llegar a la zona del proyecto, entre otros.

La ubicación y orientación de los sondeos se debe realizar de forma tal que se obtenga el mayor conocimiento posible del macizo a la profundidad del túnel y en su porción central, para poder apreciar la calidad de la roca a distintas profundidades; sin embargo, se complica la ejecución cuando los túneles son de longitudes considerables y coberturas por encima de los 100 m, sobre todo si las zonas donde se efectuarán son inaccesibles; en tal caso se realizan los sondeos con equipos ligeros con la limitante de la profundidad ya que este tipo de equipos no perforan más allá de los 70 m; luego entonces se deben emplear las técnicas de geofísica para investigar las características del terreno a la profundidad del túnel y correlacionar con la información de los sondeos.



Figura 3.22. Ejecución de sondeos mediante equipo ligero.



Figura 3.23. Ejecución de sondeos mediante equipo pesado.

Los sondeos, en general son caros, dan únicamente información puntual que, si no se correlaciona con los reconocimientos de superficie (afloramientos, fracturas fallas, grietas, etc.) y con las prospecciones geofísicas, no producen información del todo útil. Con base en lo anterior es recomendable efectuar un sondeo en la zona de cada portal hasta la profundidad de la rasante; si la longitud del túnel es de no más de 200 m y presenta coberturas de alrededor de los 100 m, se recomienda efectuar un sondeo que no coincida con el eje del túnel, es decir se deben realizar a un costado para evitar que el barreno sea un conducto de agua hacia la excavación del túnel durante su construcción. Sí el túnel tiene un longitud mayor a 200 m y coberturas mayores a 100 m, se recomienda efectuar sondeos a por lo menos cada 100 m o en zonas de posibles accidentes geológico o zonas de falla y, cuando sea posible llegar por lo menos a la rasante o atravesar mínimo dos unidades litológicas diferentes.

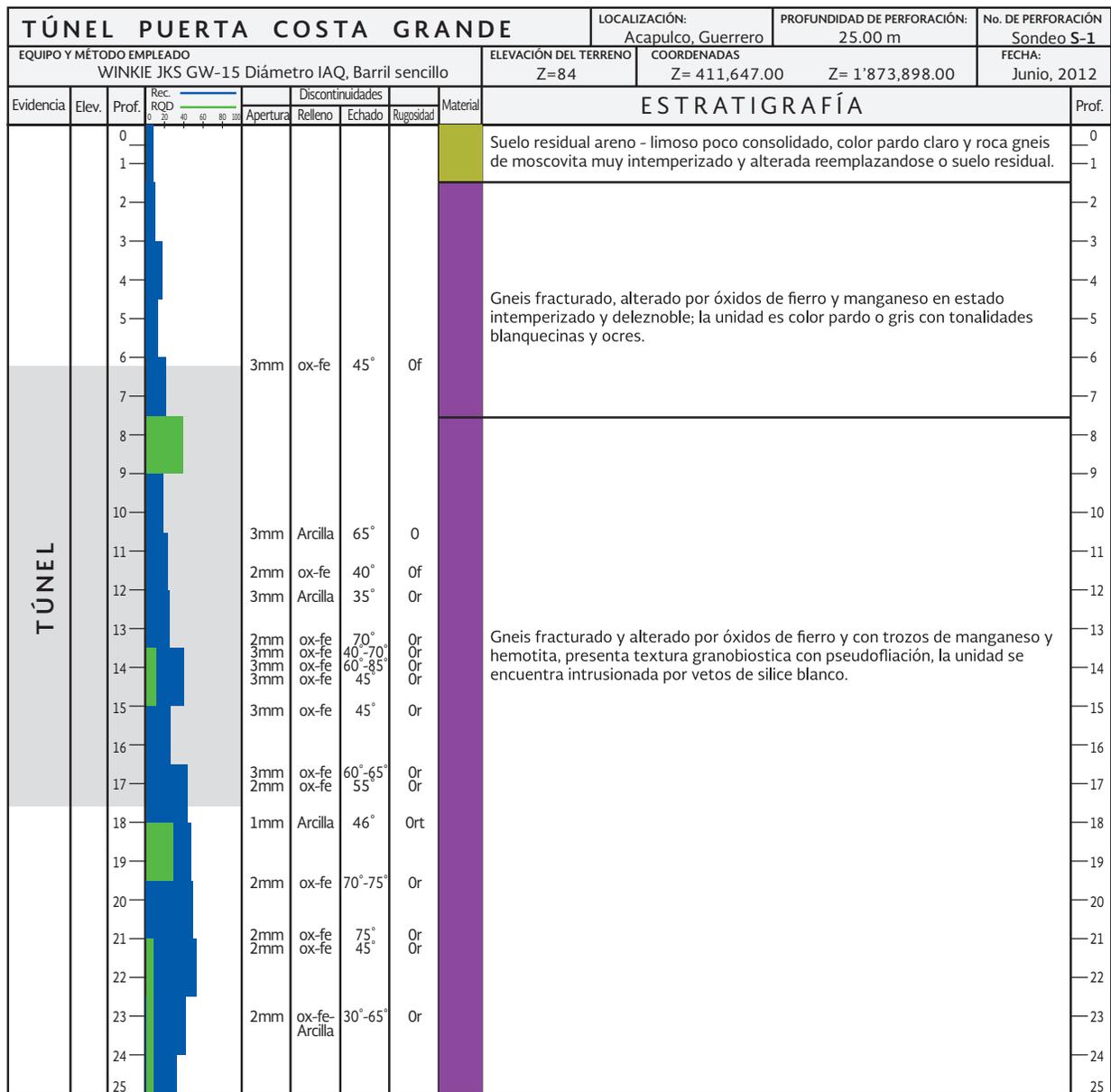
De cada uno de los sondeos realizados se recuperan núcleos de roca, de los cuales se debe hacer una clasificación litológica macroscópica, evaluando los parámetros de recuperación (REC) e índice de calidad de la roca (*RQD*) y se deben describir detalladamente las características de las fracturas.

Así mismo deben tomar fotografías de los núcleos extraídos (Figura 3.24), identificando claramente el nombre del túnel, cadenamiento de ubicación, el número de sondeo y profundidad.



Figura 3.24. Núcleos de roca diámetro NQ .

Una vez analizados los núcleos, se debe proceder a realizar los perfiles estratigráficos de cada uno de los barrenos (Figura 3.25); en los cuales se debe reflejar la litología, características de fracturamiento, porcentaje de recuperación e índice de calidad de la roca (RQD).



- NOTAS:
- Rec % de recuperación de núcleos
 - RQD Índice de calidad de roca
 - or-fe Óxido de hierro
 - or-mn Óxido de manganeso
 - f Rugoso
 - qu Resistencia a la compresión simple
 - Ensayo da compresión simple
 - Ensayo para prueba brasileña
 - Or Ondulado rugoso
 - Ort Ondulado rugoso terso
 - 0 Ondulado

PROFUNDIDADES: TODOS LOS VALORES SON EN METROS (m)
ELEVACIONES: EN METROS SOBRE NIVEL MEDIO DEL MAR (msnm)

Figura 3.25. Perfil estratigráfico.

Finalmente, en la última etapa de los estudios geológicos y exploración, se debe integrar toda la información disponible y se debe conformar el modelo estratigráfico, litológico y estructural del túnel, expresado en el plano de integración geológico-geofísica como los que se muestran en las Figura 3.26 y Figura 3.27; en el plano geológico de proyecto se debe presentar, en planta y perfil, la disposición de las unidades encontradas en el entorno, así como aquellas que cortará el túnel y las estructuras geológicas presentes en el área.

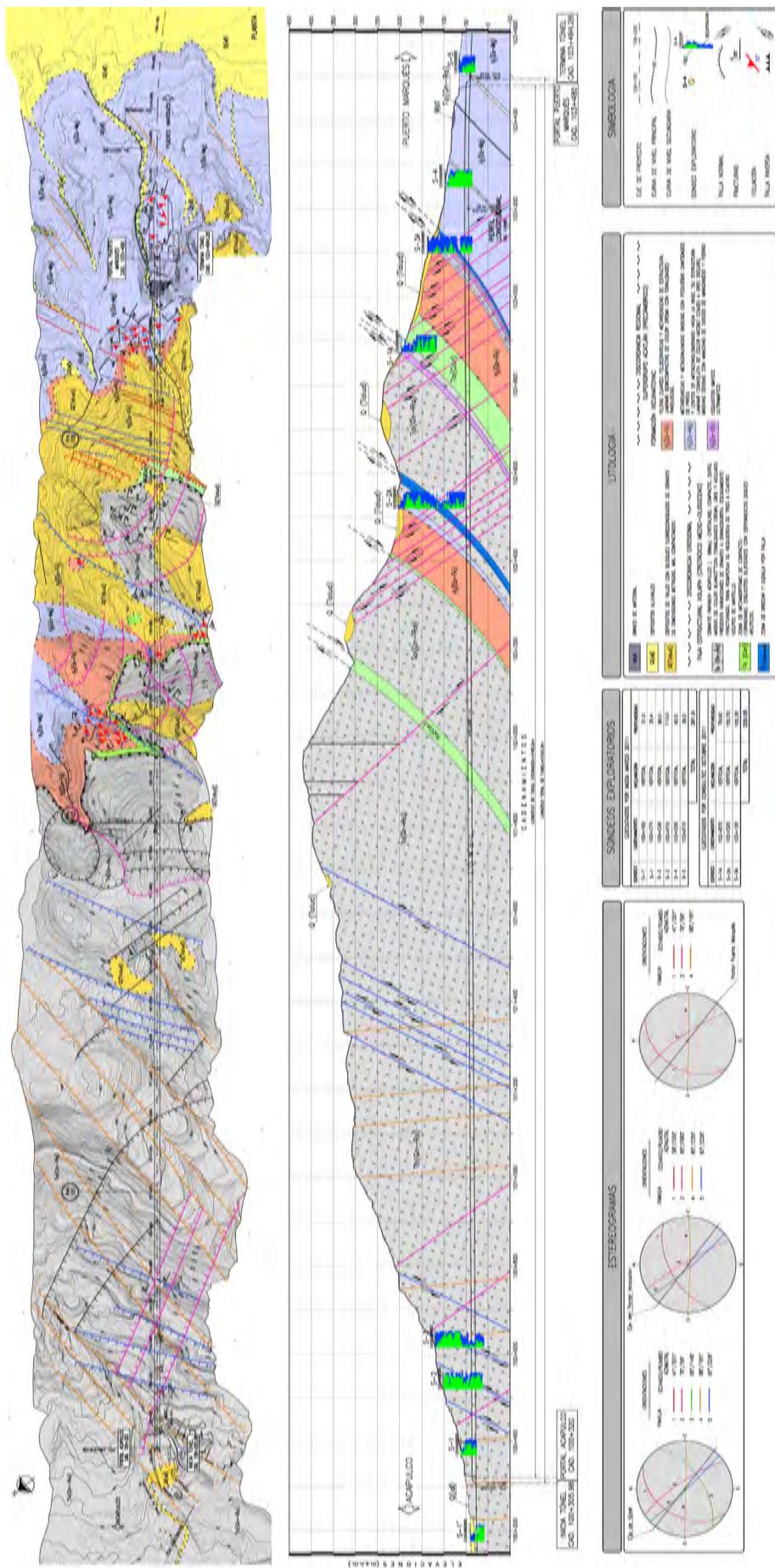


Figura 3.27. Modelo Geológico, túnel Acapulco L= 3.188 m, Escénica Alternativa Acapulco.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- 1 CFE (2006). “Manual de Diseño de Obras Civiles” Sección B. Geotecnia; Tema 1. Geología; Capítulo 3. Información Geológica Existente; Tomo 1. Recomendaciones. Ruíz Vázquez Mariano, Pedrazzini Nessi Carmen.
- 2 Clayton, C. R. I., Matthewes, M. C. y Simon, N. E. (1995). “Site investigations” Ed. Blackwell Science.
- 3 González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). “Ingeniería Geológica”. Pearson Educación, S.A., Madrid.
- 4 Joyce, M. D. (1982). “Site investigations practice”. Ed. E. and F.N. Spon.
- 5 López Jimeno, C. et al. (2000). “Manual de sondeos” Escuela técnica Superior de Ingenieros de Minas. Madrid.
- 6 Reynolds, J. M. (1997). “An introduction to applied an enviromental geophysics”. Jonh Wiley and Sons Ltd.
- 7 Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. y Keys, D. A. (1990). “Applied geophysics”. Cambridge University Press.

