

7
rej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



Determinación de las Características del Subsuelo
para la Cimentación de una Estructura Aplicando
Procedimientos Geofísicos de Geosismica y
Geoelectricidad

Tesis Profesional

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A :

CARLOS RENDON GOMEZ

México, D. F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO,
PARA LA CIMENTACION DE UNA ESTRUCTURA APLICANDO PROCEDIMIENTOS
GEOFISICOS DE GEOSISMICA Y GEO-ELECTRICIDAD**

	PAG.
CAPITULO I.- INTRODUCCION	3
I.1 Breve descripción de los métodos geofísicos de exploración	3
I.1.1. El método de refracción	8
I.1.2. El método de reflexión	8
I.1.3. El método eléctrico	9
I.1.4. Relaciones entre el Ingeniero Geofísico y el Ingeniero Civil	11
 CAPITULO II.- DESCRIPCION Y CONSIDERACIONES TEORICAS DEL METODO GEOSISMICO EN GEOTECNIA	 15
II.1. Introducción	16
Principios del método sísmico	
II.2. Ley de Snell	18
II.3. Principios de Huygens	19
II.4. Trayectoria y tiempos de recorrido	21
II.4.1. Fórmulas fundamentales	21
II.5. Interpretación de las curvas T-D	26
II.6. Instrumentación	28
II.6.1. Fuentes para generar ondas elásticas	32
II.6.2. Sensores	33
 CAPITULO III.- DESCRIPCION Y CONSIDERACIONES TEORICAS DEL METODO GEO-ELECTRICO EN GEOTECNIA	 37
III.1. Descripción del método y principios matemáticos	38
III.2. Diferentes dispositivos entre electrodos	45
III.3. Instrumentación	48
III.3.1. Principios de medición	48
III.3.2. Factores que afectan las medidas	52
III.3.3. Instrumentos de medición	57
III.4. Operación	61
III.4.1. Metodología de campo	61
III.4.2. Graficado	63
III.5. Interpretación	64
 CAPITULO IV EJEMPLOS PRACTICOS DE APLICACION, CON LAS INDICACIONES PARA CADA UNO DE:	 81
IV.1. Estudio del subsuelo para la detección de cavernas	82
IV.2. Estudio para la cimentación de un puente	88
IV.3. Estudio para la localización de aguas subterráneas	91

	PAG.
CAPITULO V.- CONCLUSIONES	96
BIBLIOGRAFIA	100

CAPITULO I.- INTRODUCCION

I.1 Breve descripción de los métodos geofísicos de exploración

I.1.1 El método de refracción

I.1.2. El método de reflexión

I.1.3. El método eléctrico

I.1.4. Relaciones entre el Ingeniero Geofísico y el Ingeniero Civil

DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE UNA ESTRUCTURA APLICANDO PROCEDIMIENTOS GEOFISICOS DE GEOSISMICA Y GEO-ELECTRICIDAD

CAPITULO I.- INTRODUCCION

I.1.- Breve descripción de los métodos geofísicos de exploración:

La geofísica constituye una de las ramas de las Ciencias de la Tierra, la cual comprende dos aspectos, a saber:

1º.- El aspecto puramente científico ó de investigación, mediante el cual se estudian todos los fenómenos relacionados con la estructura, condiciones físicas y evolutivas de la tierra, aplicando las siguientes disciplinas:

Sismología, Gravimetría, Magnetometría, Vulcanología, Radioactividad natural, Oceanografía, Meteorología, Climatología y Temperatura de la Tierra.

2º.- Geofísica aplicada

Se refiere a la determinación de los parámetros físicos de la corteza terrestre, con el objeto de obtener información, respecto a la estructura geológica del subsuelo. Los principales parámetros que se estudian son: velocidad de transmisión de las ondas elásticas y consecuentemente los módulos elásticos dinámicos, densidad, resistividad eléctrica y su recíproco la conductividad, radioactividad, temperatura, susceptibilidad magnética, etc.

La tecnología empleada para obtener la información requerida se refiere

al estudio de los campos de fuerza naturales ó artificiales; entre los campos de fuerza naturales tenemos el campo gravitacional, el geomagnético y las velocidades de transmisión de las ondas elásticas, provocadas por terremotos.

La creación y estudio de campos artificiales, encuentra su principal aplicación, en el caso de los métodos eléctricos, sísmicos y registros de pozos.

El mayor o menor grado de dificultad, para obtener los diferentes parámetros, depende del contraste que exhiban las rocas de lo cual depende también, la elección del método, equipo, arreglo, etc., que deberá aplicarse en cada caso particular.

Los principales métodos geofísicos de exploración son:

Gravimétrico

Sísmico

Eléctrico

Magnético

Registros en Pozos

Radiométricos

El método gravimétrico, se aplica para medir las desviaciones o anomalías de la gravedad, desde la superficie de la tierra, aprovechando estos datos para determinar la estructura geológica del subsuelo; el

parámetro físico que origina dichas anomalías gravitacionales, es la densidad.

El método sin embargo, tiene una cuantificación no tan precisa a la que se sitúan dichas anomalías, por un lado, y por el otro, es necesario contrastes de densidad significativas en las rocas, para que se puedan discriminar de los efectos ocasionados por accidentes topográficos regionales; se comprende de lo anterior, que a poca profundidad, no resulta conveniente o muy aplicable el método, a lo anterior hay que añadir, que el poder de resolución del método, es a nivel regional y no a nivel de una zona ó lugar específico.

El método magnético se aplica para medir las anomalías locales del campo geomagnético terrestre, producidas por variaciones, en la intensidad del campo magnético observado. La intensidad inducida depende de la susceptibilidad magnética, así como del campo inductor; mientras que la intensidad permanente, es función de la historia geológica del área.

Este método encuentra su principal aplicación, en Minería, junto con el método electromagnético. Al igual que el método gravimétrico, el magnético es ideal, para reconocimiento de grandes extensiones, sobre todo si se hace por la vía aérea.

A nivel local, para proyectos de Ingeniería, se podría emplear y de

hecho existen varios antecedentes al respecto, sin embargo, presenta un gran inconveniente que lo nulifica completamente, ya que la precisión de las medidas tomadas con un magnetómetro, se ven afectadas si el operador no tiene la precaución de despojarse de todos los objetos metálicos, como son cinturón, llaves, anillos, etc., a mayor abundamiento, la existencia de líneas de alta tensión, vías de F.F.C.C., etc., influyen también en la precisión de las lecturas. Se deduce que para operar un magnetómetro en condiciones óptimas en el campo, no deben existir objetos metálicos cerca del punto de medida.

Asociados con el método magnético, existen los magnetotélúricos y electromagnéticos. Las corrientes eléctricas inducidas en las rocas, por fluctuaciones del campo geomagnético terrestre, se pueden aprovechar para medir la resistividad eléctrica.

Analizando las variaciones en el tiempo del campo magnético, se puede asegurar que una componente de una onda electromagnética plana, se puede demostrar que existe una simple relación, entre la amplitud de los cambios del campo magnético, con los gradientes de voltaje inducidos y las resistividades de las rocas. Además, como la profundidad a la cual penetra una onda en un material conductor depende de la frecuencia y la resistividad del material, es posible entonces, calcular la resistividad en función de la profundidad, midiendo para ello, las amplitudes de los cambios en los campos eléctrico y magnético.

El método magnetotelégrafo, se aplica para medir la resistividad a grandes profundidades, en virtud de que las medidas se hacen aprovechando las corrientes inducidas en la tierra, por las fluctuaciones del campo geomagnético terrestre. Actualmente en Rusia y otros países, este método está adquiriendo una gran popularidad en la Industria Petrolera y Geotérmica, pero sobre todo, para determinar el basamento a grandes profundidades.

Para proyectos de Ingeniería, el método descrito es inoperante más que nada, por el alto costo de los equipos y porque los mejores resultados se obtienen a grandes profundidades. En realidad este método, forma parte de los métodos electromagnéticos, en los cuales los campos secundarios inducidos, se estudian mediante bobinas adecuadas.

Los métodos radiométricos, consisten en la detección y registro electrónico de las radiaciones gamma, emitidas por material de la superficie terrestre. Estos métodos tienen muy poco poder de penetración, por lo que pueden ser útiles para la localización de anomalías superficiales, que originen una alteración térmica detectable.

La sismología, como ciencia, registra e interpreta las ondas provocadas por los temblores; en cambio, la sismología aplicada, provoca los disturbios en forma artificial, ya sea mediante explosivos, vibradores, impactos, etc., registrando la llegada de las ondas en dispositivos ultrasensibles, que miden los tiempos de llegada en milésimos de segundo.

I.1.1.- Método de Refracción

La sismología aplicada incluye dos métodos a saber:

1º.- Método de Refracción, en el cual la cantidad observada es el tiempo que transcurre, entre la iniciación de una onda y el primer disturbio indicado por un detector o geófono, colocado a cierta distancia de la fuente. La onda que origina el disturbio es la que ha recorrido la distancia, entre el sitio de la explosión o golpe y el detector, en un tiempo mínimo. Registrando los primeros arribos correspondientes a diferentes distancias, se construye la curva tiempo - distancia, que debidamente interpretada, permite determinar las profundidades a los diferentes estratos, en el subsuelo. Desde luego, los primeros arribos corresponden a las ondas que viajan con mayor rapidez y por lo tanto, el método de refracción, se ocupa sólo de registrar las ondas longitudinales y cortanes, que llegan en segundo término.

I.1.2.- Método de Reflexión

El principio en el que se basa este método, es tan simple como calcular la distancia a un muro, mediante el tiempo requerido para que el sonido sea reflejado, es decir, mediante el tiempo de propagación de las ondas sonoras.

En el método de reflexión, las distancias entre el punto de la explosión (P.T.) y los detectores, representa una fracción de la profundidad de las capas que se estudian y se aprovechan los

últimos arribos en los sismogramas. Obviamente, las primeras ondas que alcanzan los detectores son las que viajan horizontalmente, con una velocidad V_1 sin embargo, otras ondas viajan mas o menos verticalmente y parte de la energía de la onda, se refleja en la superficie de contacto de las dos primeras capas, es decir, hay una discontinuidad entre las velocidades V_1 de la primera capa y V_2 de la segunda capa.

El empleo de este método, requiere equipos mas complicados además de explosivos para generar las ondas elásticas para alcanzar grandes profundidades, por lo que este método se utiliza en un 90% en exploración petrolera; los equipos además de complicados y costosos, requieren de brigadas de varios hombres, para su operación.

I.1.3.- Método Eléctrico

De las propiedades físicas de las rocas y minerales, la que muestra mayor variabilidad, es la resistividad eléctrica, la cual se determina para conocer los cambios de litología en el subsuelo. En el método eléctrico, se estudia un campo artificial, con sus líneas de corriente y equipotenciales, creado mediante una fuente de poder (generador ó batería) y 4 electrodos, de los cuales, dos electrodos primarios envían la corriente al terreno; mediante otros dos electrodos de medida, se determina el potencial que se establece entre los mismos, al circular la corriente en el subsuelo. Generalmente la profundidad de investigación se

controla, haciendo variar la distancia entre los electrodos primarios.

En general, los métodos eléctricos y el sísmico de refracción, muestran muchas similitudes, entre las cuales sobresalen las siguientes:

- 1a.- En ambos métodos la profundidad de investigación se puede controlar, variando la abertura entre los puntos de transmisión y recepción. Esto hace que los métodos eléctrico y sísmico, presenten grandes ventajas de interpretación, sobre los demas métodos.
- 2a.- Es posible determinar cuantitativamente, las profundidades o espesor, de las diferentes formaciones incluidas en las medidas.
- 3a.- Tanto el método de refracción como el eléctrico, dependen para su aplicación, de los espesores de las formaciones, comparadas con las profundidades de investigación.

Por otra parte, los métodos eléctricos y sísmico de refracción, disponen de variantes que permiten resolver una gran variedad de problemas, lo que los hace versátiles en su aplicación.

La técnica de correr Registro en Pozos, permite determinar varios parámetros, como son:

Radioactividad de las rocas

Resistividad

Resistencia

Potencial natural

Densidad

Temperatura

Otros

Debido a los altos costos de los equipos registradores, su empleo se justifica sólomente en la Industria Petrolera, Geotérmica, Minera y en algunos casos, en pozos para abastecimiento de agua potable a grandes poblaciones.

I.1.4.- Relaciones entre el Ingeniero Geofísico y el Ingeniero Civil.

Para una buena coordinación entre el empleo de la Geofísica en proyectos de Ingeniería Civil, las relaciones entre ambos profesionistas, deben estar inspiradas o basadas en la confianza mutua.

Si el Ingeniero Civil, como ocurría hasta hace pocos años, considera al Geofísico como un teórico y consecuentemente no deposita en él su confianza y por su parte el Geofísico, siente que el Ingeniero Civil es un profesional, cuyo criterio no le permite pensar en otra cosa que no sean números, es posible esperar muy poco provecho, de la asociación de ambas disciplinas.

En cambio cuando la relación se basa en mutuas consideraciones y un alto grado de confiabilidad, para conjugar diferentes puntos de vista divergentes, se puede llegar a un mayor acercamiento y consecuentemente, aumentan las posibilidades de obtener resultados mas confiables.

Una vez superada la etapa preliminar de confianza mutua, se plantean las siguientes interrogantes:

1a.- ¿En qué etapa del proyecto, es importante la participación del Geofísico?

2a.- Dónde termina su colaboración?

Con respecto a la primer pregunta, debe señalarse que el Ingeniero Geofísico, interviene en la etapa preliminar del Proyecto, en el momento en que se requiere tener un conocimiento de las características del subsuelo, sobre el cual se piensa desplantar una estructura, construir un túnel, puente, etc. Debe auxiliar al Ingeniero Civil a formarse un juicio preciso respecto al grado de seguridad de las conclusiones obtenidas a partir del estudio geofísico. Debe pensar además en el factor económico o sea, que al estudiar dos o más alternativas, debe elegirse la mas económica, segura y factible de realizar, en un tiempo razonablemente posible.

Con respecto a la clase de información que proporcione el Ingeniero Geofísico, debe confinarse sólo a los datos de la

obra en cuestión. Tomemos por ejemplo, el caso de una cimentación, al Ingeniero Civil, le importa conocer la clase de suelos que va a encontrar, su grado de dureza, profundidad de la roca firme o algún estrato duro, que garantice la estabilidad de la obra; al Ingeniero Civil, no le interesa una descripción que abunde en términos geológicos rebuscados, que no le reportan ninguna utilidad; decirle por ejemplo, que una roca corresponde a determinado período geológico, su composición mineralógica, etc., no le es de gran utilidad, en cambio una descripción de la clase de suelos, con base en el Sistema de clasificación unificado, su granulometría, dureza, etc., le permiten disponer de los elementos necesarios para el diseño de sus estructuras.

A veces sucede que las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de un estudio geofísico, resultan determinantes, para la ejecución de un programa de exploraciones mecánicas, un ejemplo aclara más este caso: supongamos que el Ingeniero Civil ha programado un grupo de exploraciones mecánicas, en un proyecto de cimentación; puede suceder en este caso que el dictamen del geofísico recomiende reducir el número de pozos, hasta en un 60 ó 70% basado en la correlación de un sondeo paramétrico, con una exploración mecánica; en este caso, al Ingeniero Civil le conviene aceptar esta alternativa.

Los ejemplos descritos, muestran claramente la importancia que

representa la confianza y el diálogo mutuos, entre ambos profesionistas. Estas situaciones son muy comunes en proyectos de presas, puentes vías terrestres, túneles, aeropuertos, obras marítimas, etc.

En última instancia, la participación del geofísico, en proyectos de Ingeniería, representa una gran utilidad, al proporcionar al Ingeniero Civil, las características de los suelos, rocas y materiales de construcción, así como la posible presencia de hechos estructurales como fallas, fracturas, etc., en proyectos de túneles, puentes, etc., con todos estos datos, el ingeniero esta en posibilidades de aplicar su ingenio, para sortear los problemas que se le presentan.

"La mayor recompensa para el Ingeniero Geofísico, se refiere a la comprobación de sus deducciones, al efectuarse las excavaciones y perforaciones, en los lugares por él recomendados".

CAPITULO II.- DESCRIPCION Y CONSIDERACIONES TEORICAS DEL METODO GEOSISMICO EN GEOTECNIA

- II.1.- INTRODUCCION**
Principios del método sísmico
- II.2.- LEY DE SNELL**
- II.3.- PRINCIPIO DE HUYGENS**
- II.4.- TRAYECTORIA Y TIEMPOS DE RECORRIDO**
II.4.1. Fórmulas fundamentales
- II.5.- INTERPRETACION DE LAS CURVAS T-D**
- II.6.- INSTRUMENTACION**
II.6.1. Fuentes para generar ondas elásticas
II.6.2. Sensores

II.1.- Introducción

Principios del Método Sísmico

En todos los tipos de ondas elásticas, la velocidad de propagación depende de alguna propiedad física del medio, a través del cual se propagan. En general, la velocidad de las ondas elásticas, depende del módulo de elasticidad y de la densidad del medio.

El hecho de que la velocidad de propagación de las ondas, depende del medio, da lugar a los fenómenos de reflexión y refracción que ocurren cuando una onda, cruza la superficie de separación (contacto) entre los dos medios.

La onda reflejada, es una nueva onda que se propaga, en el medio, en el cual la onda original se estaba propagando.

En cambio, la onda refractada, se transmite al segundo medio. De este criterio se derivan los métodos de Reflexión y Refracción, respectivos.

El método de Refracción, es el que mayor aplicación tiene en proyectos de Ingeniería Civil, por las razones que más adelante se establecen.

En sismología se estudian 4 clases principales de ondas, a saber:

Longitudinales	<u>P</u>
Transversales o cortantes	<u>S</u>
Superficiales o de Rayleigh	R
De Love	L

Las dos primeras se pueden propagar en la superficie y a profundidad, retornando a la superficie por reflexión o refracción; en cambio las ondas de Rayleigh, se propagan solamente en la superficie, como una perturbación, cuya amplitud se disipa rápidamente con la profundidad. Las ondas de Love, se mueven horizontalmente en sentido normal a la dirección de propagación.

Cada una de las ondas mencionadas provoca un ligero desplazamiento de la corteza terrestre en forma instantánea. Las ondas P se desplazan hacia adelante y hacia atrás, en un movimiento paralelo a la dirección en la cual la onda se propaga. Las ondas S, se desplazan en sentido normal, a la dirección en que se propaga la onda. Las ondas Rayleigh ó superficiales, representan un tipo especial de movimiento elíptico, parte del cual es paralelo a la superficie del terreno y otra parte es normal a la superficie, es decir, estas ondas incluyen 3 componentes de desplazamiento, uno vertical y 2 horizontales. Las ondas de Love se propagan horizontalmente y en sentido normal a la dirección de propagación, como ya se explicó.

Cada uno de los 4 tipos de ondas descrito, viaja a diferente velocidad.

Las ondas P son las que viajan a mayor velocidad dependiendo de la naturaleza del terreno. La velocidad de las ondas S es aproximadamente entre 1/3 a 2/3 de la velocidad de las ondas P; las ondas de Rayleigh,

se propagan aproximadamente a una velocidad de $0.9 S$ cuando la relación de Poisson es de 0.25. En los terremotos, las ondas de Love se desplazan con velocidades, que superan a las Rayleigh en 4.5 Km/seg.

En sismología de Refracción, los estudios se basan en la determinación de las ondas P y S . Los primeros arribos corresponden a las ondas P , en segundo lugar llegan las ondas cortantes S y por último las ondas Rayleigh; estas últimas, son más fáciles de reconocer, ya que se caracterizan, por ser señales de baja frecuencia y gran amplitud, sin embargo, para fines prácticos no interesan, en virtud de que no contienen información útil, precisamente por propagarse superficialmente, lo mismo se puede decir de las ondas Love.

La proporción de energía sísmica que transportan los 4 tipos de ondas, dependen del tipo de fuente empleado; las fuentes a base de impactos, tienden a generar en forma desproporcionada, grandes cantidades de ondas Rayleigh, sin embargo también generan ondas P ; en cambio el empleo de explosivos, transforma solo una pequeña parte de su energía, en ondas superficiales.

II.2.- Ley de Snell

Consideremos una onda plana que se propaga (Fig. II.2.1), en el medio 1 ; según la dirección indicada por el vector U_i ; cuando la onda alcanza la superficie AB (contacto entre los dos medios) se transmite

una onda al segundo medio, esta es una onda refractada, cuya dirección esta indicada por el vector Ur.

Los ángulos Θ_i y Θ_r , medidos con respecto a la normal N , se denominan ángulo de incidencia y refracción respectivamente y están relacionados por la siguiente ley $\frac{\text{sen } \Theta_i}{\text{sen } \Theta_r} = N_{21}$ (Fig. II.2.1), que se conoce como Ley de Snell, la cual expresa que "la relación entre los ángulos de incidencia y refracción es constante". La constante N_{21} se conoce como Índice de refracción del medio 2 con respecto al 1, y su valor numérico depende de la naturaleza y de las densidades entre los dos medios.

II.3.- Principio de Huygens

Si conocemos la fuente productora de una onda, podemos en principio seguir su propagación de un medio a otro tomando en consideración, claro está los cambios en las propiedades físicas de los medios. También es posible calcular la amplitud de una onda en un punto particular del espacio, sin hacer referencia a las fuentes.

En 1860 el físico Danés Christian Huygens desarrolló un método sencillo para trazar la propagación de las ondas elásticas.

Se parte del concepto de superficie de onda ó frente de onda, el cual se refiere a una superficie que pasa por todos los puntos del medio

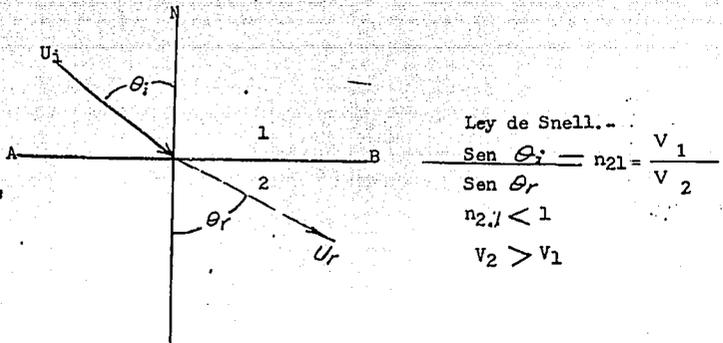


Figura II.2.1.-Ondas incidente y refractada, en un contacto AB, que separa dos medios 1 y 2, para el caso en que $V_2 > V_1$.

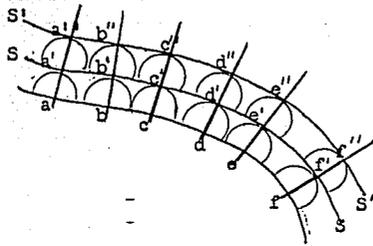


Figura II.3.1.-Principio de Huygens para una onda progresiva.

FACULTAD DE INGENIERIA.	
U N A M	TESIS PROFESIONAL
	DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMICO Y ELECTRICO.
CARLOS RENDON G.	MEXICO, D.F.

involucrados en el movimiento ondulatorio en el mismo instante, consecuentemente la perturbación en todos los puntos de una superficie tiene la misma fase.

El método desarrollado por Huygens, para pasar de una superficie de onda a otra, consiste en lo siguiente:

Consideremos una superficie de onda S (Fig. 11.3.1.), cuando el movimiento ondulatorio alcanza esta superficie, cada partícula a , b , c , sobre el frente de onda, se convierte en una fuente generadora de ondas, que emite ondas secundarias (indicadas por semicírculos), las cuales alcanzan la próxima capa de partículas del medio; enseguida estas partículas se ponen en movimiento, constituyendo otra superficie de onda S' la cual es tangente a todas las ondas secundarias.

Esta representación gráfica de la propagación de las ondas, se aplica a las ondas elásticas.

11.4.- Trayectorias y tiempos de recorrido

11.4.1.- "Fórmulas Fundamentales"

Un registro de las ondas sísmicas o sismograma representa el movimiento del terreno en función del tiempo, mostrando distintos tiempos de llegada, para los diferentes tipos de onda y a diferentes trayectorias en el subsuelo.

Desde el punto de vista práctico, en proyectos de ingeniería, interesa conocer principalmente los datos relacionados con las ondas P y S .

Las diferentes trayectorias corresponden a diferentes tiempos de llegada, de manera que una gráfica que muestra los tiempos de llegada, en función de la distancia entre la fuente y los detectores, mostrará 3 diferentes arribos; el primero es el más fácil de reconocer, los otros representan mayor dificultad. A la gráfica, así obtenida se le conoce como gráfica tiempo-distancia (T-D).

La figura II.4.1, representa una estructura sencilla, formada por una capa superficial de velocidad V 1 (descansando sobre un estrato de velocidad V 2), por ejemplo una roca. Se trata de determinar la profundidad Z de la capa superficial.

En general, las refracciones se verifican de acuerdo con la Ley de Snel, es decir:

$$\frac{\text{Sen } \Theta_i}{\text{Sen } \Theta_r} = \frac{V_1}{V_2}$$

Para resolver el problema, interesa en particular el rayo refractado para el cual $\text{Sen } i_c = 90^\circ = 1$, con lo cual la Ley de Snell se reduce a $\text{Sen } i_c = \frac{V_1}{V_2}$

El ángulo i_c se conoce como ángulo crítico y la onda refractada según este ángulo, se considera como un disturbio que viaja a lo largo, del contacto entre las dos capas, con la velocidad V_2 del medio inferior.

Mediante las relaciones de las velocidades en los dos medios, se deduce que el frente de onda, de estas perturbaciones, avanzan en el medio superior, según trayectorias que forman con la normal al contacto, el ángulo crítico i_c ; en estas condiciones la energía de la onda, se dirige al contacto según la trayectoria ab y el ángulo i_c , continuando por el contacto, según bc y refractándose a la superficie, según el ángulo i_c y la trayectoria cd .

Se puede demostrar que la trayectoria $abcd$, es la que corresponde a un tiempo mínimo, con base en lo cual se obtienen las curvas $T-D$ y las fórmulas para casos de dos, tres o más capas.

Por otra parte, las primeras ondas que alcanzan el punto d ,

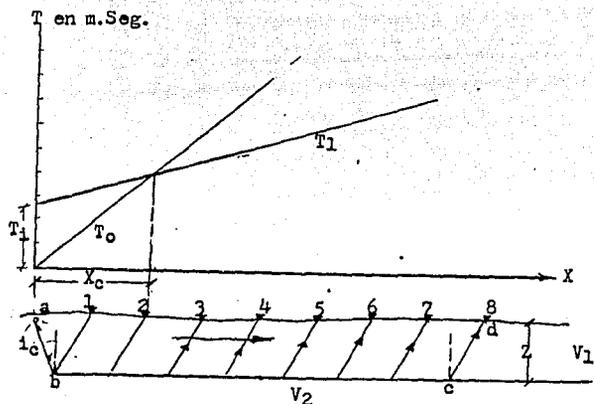


Figura II.4.1.-Trayectorias de tiempo mínimo y curvas T-D para el caso de dos capas, siendo $V_2 > V_1$

$$z_1 = \frac{X_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

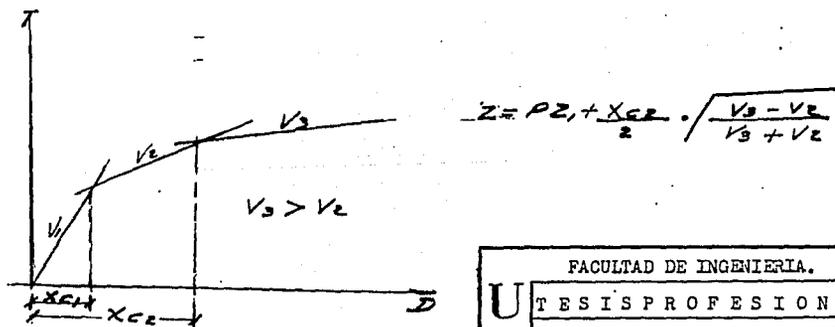


Figura II.4.2. Caso de 3 capas

FACULTAD DE INGENIERIA.	
U N A M	TESIS PROFESIONAL
	DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SIMICO Y ELECTRICO.
	CARLOS RENDON G. MEXICO, D.F.

viajan horizontalmente en el medio superior a la velocidad V_1 ó sea que el tiempo de recorrido de esta primera etapa es $T_0 = \frac{X}{V_1}$

De acuerdo con este criterio, la curva T-D se inicia a partir del origen, con una pendiente $1/V_1$

A cierta distancia X_c , conocida como distancia crítica, una onda refractada a lo largo del contacto, alcanza un detector en la superficie, al mismo tiempo que una onda, que ha recorrido horizontalmente la distancia ad con una velocidad V_1 . Esto sucede, cuando el tiempo ganado al recorrer la distancia bc con la velocidad V_2 se compensa con el tiempo perdido, al recorrer las distancias ab y cd con la velocidad V_1 . Para todas las distancias mayores a la distancia crítica X_c la onda refractada, a lo largo del contacto, alcanza los detectores 3, 4, 5, 6, 7 y 8 primero, constituyendo los primeros arribos. (Fig. II.4.1)

Si T_1 es el tiempo requerido para que una onda recorra la distancia $a b c d$, este tiempo vale $T = \frac{ab}{V_1} + \frac{bc}{V_2} + \frac{cd}{V_1}$ Fig.

II.4.1

$$T = \frac{ab}{V_1} + \frac{bc}{V_2} + \frac{cd}{V_1}$$

Por simples consideraciones geométricas, se obtienen las fórmulas para resolver problemas de dos o tres capas, cuya aplicación permite resolver prácticamente, cualquier problema que se presente en Proyectos de Ingeniería.

Las fórmulas requeridas son las siguientes:

1º. Problema de dos capas, como el mostrado en la Fig.II.4.1

$$Z_1 = \frac{X_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad \text{Fig.II.4.1}$$

2º. Problema de tres capas

$$Z_2 = P Z_1 + \frac{X_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2}} \quad \text{Fig. II.4.2}$$

La cantidad P es una función de las velocidades, prácticamente se ha encontrado que P = 0.8 lo que dá muy buenas aproximaciones al aplicar la fórmula anterior.

II.5.- Interpretación de las curvas T-D

La interpretación de las curvas T-D en proyectos de ingeniería, resulta relativamente sencilla por tratarse de estudios superficiales, normalmente se requiere determinar el espesor del relleno que cubre un estrato firme (roca); o bien, la posible existencia de fallas, fracturas, etc. En otros casos, se requiere clasificar los materiales

en función de su densidad, grado de dureza, etc.; cualquiera que sea el tipo de problema, las mediciones no pasan de 30/40 m. de profundidad.

La aplicación de las fórmulas anotadas permite conocer las profundidades buscadas.

La determinación de las velocidades se hace automáticamente mediante nomogramas, o bien, empleando análisis gráficos.

El Departamento de carreteras (Bureau of Public Roads) de EE. UU., utiliza métodos gráficos, que hacen uso de los tiempos de intercepción para determinar las profundidades ó espesores de la primera y segunda capa.

Se puede recurrir también al empleo de catálogos de diferentes gráficas que representan diversos tipos de problemas, como son terrenos estratificados que incluyen dos y tres capas; casos de capas inclinadas; estructuras que cambian lateralmente; diques, fallas, etc.

El empleo de este catálogo de curvas T-D permite clasificar en primera instancia el tipo de gráfica obtenido, lo que permite formarse una idea preliminar, de la estructura que se va a encontrar.

Existen además programas que permiten procesar los datos obtenidos

En el campo, ya sea empleando computadoras grandes o bien calculadoras de escritorio o portátiles. Sin embargo, el empleo de estos métodos se justifica para problemas más especiales, de varias capas, con grandes echados.

II.6.- Instrumentación

Los tipos de ondas sísmicas que más interesa conocer en Sismología de Refracción, son las longitudinales P y las transversales S. La función básica en sismología consiste en medir el tiempo transcurrido entre el instante en que se produce el impacto o disparo y el tiempo de llegada a los diferentes sensores o geófonos.

Actualmente existen, un gran variedad de instrumentos, desde los simples que operan con un sólo geófono, hasta los más complicados de 12 y más detectores, normalmente empleados en exploración petrolera.

El dispositivo básico para medir los tiempos es un cronómetro electrónico altamente sensible, el cual inicia el conteo cuando se produce el impacto y se detiene en función del tiempo programado por el operador. El arribo de interés debe ser mayor en amplitud, que las vibraciones que le preceden, ó sean las señales que constituyen el llamado ruido sísmico, que involucran vibraciones naturales, y en el caso de ondas cortantes, las ondas P constituyen las señales no deseables.

Aparte del sismógrafo, puede usarse un Osciloscopio diseñado específicamente para sustituir al Sismógrafo, aún cuando pueden usarse Osciloscopios del tipo industrial. Normalmente disponen de dispositivos para almacenar los registros, lo cual resulta mucho mejor, que tratar de observar la forma de onda en la pantalla. Disponen además de un amplio rango de velocidades y respuestas de frecuencias más sobresalientes, de modo que resultan útiles en particular, para levantamientos de perfiles cortos, donde los tiempos medidos resultan muy pequeños.

Actualmente han proliferado los Sismógrafos conocidos como "Signal enhancement Seismograph", o sea, que son capaces de amplificar la señal que interesa medir. Las ventajas de estos instrumentos son las siguientes:

1. Las ondas de llegada son registradas, amplificadas y almacenadas en una memoria digital.
2. El contenido de la memoria se registra en una pantalla de rayos catódicos.
3. Cuando los impactos son repetidos, las señales de interés se suman amplificándose las ondas; esto se puede apreciar en la pantalla de registro. En cambio, las señales que representan ruidos sísmicos se cancelan.

Estas ventajas permiten hacer investigaciones hasta 40 o más metros de profundidad, por el método de golpes; para mayores profundidades

Se requiere el empleo de una fuente mas pesada o bien el empleo de explosivos, sin embargo, para Proyectos de Ingenierfa, el sistema descrito resulta suficiente.

Mediante una cámara polaroide especial, se pueden fotografiar las ondas registradas en la pantalla de registro, para su análisis posterior, archivo, etc.

Se puede acoplar también al instrumento, un registrador de cinta, para conservar los datos.

Otro instrumento que permite operar por el mismo método de refracción, es el oscilógrafo, especialmente para determinar las ondas cortantes; estos aparatos permiten obtener registro simultáneo de varios sensores en un sólo sismograma.

Resulta más práctico operar con este tipo de registro múltiple, usando geófonos ortogonales en vez de un sólo sensor; la ventaja es obvia, sobre todo en lo que se refiere al ahorro de tiempo y a la facilidad para analizar los datos en el campo.

La frecuencia de respuesta, sin embargo, esta limitada por los rangos de frecuencia de los galvanómetros (comúnmente de 200 a 700 Hz.), y por la velocidad del papel, normalmente de 1 m/seg.

Otra limitación consiste en que los tiempos de llegada, se registran

con una precisión máxima de tan solo escasos milisegundos, por lo que estos instrumentos no son útiles para estudios en perfiles cortos o donde existan materiales de alta velocidad.

Estos instrumentos, son más costosos que los Sismógrafos.

Una buena opción para efectuar estudios en Proyectos de Ingeniería, así como para determinar los módulos dinámicos elásticos de Poisson, Young, etc., determinar profundidades de dragado en planicies costeras, zonas lacustres; así como en estudios en cimentaciones, corresponde a un Sismógrafo de refracción, fabricado por algunas firmas norteamericanas y japonesas siendo sumamente versátiles y alcanzando profundidades de 40 m. efectivos, por el método de impactos repetidos.

Otro tipo de instrumentos diseñado y construido especialmente para estudios en aguas someras como son lagos y lugares cercanos a la línea costera, es el que opera por el método de descargar capacitores, provocando pulsos alrededor de una serie de hidrófonos alojados en un cable que se coloca en la superficie del agua.

El equipo se coloca en un pequeño bote o lancha y opera en forma similar al eco-sonda, con la salvedad de que la frecuencia del pulso sónico generado es inferior, del orden de 300 Hz a 5 KHz, para obtener mayor penetración.

El instrumento descarga capacitores de alto voltaje generando pulsos acústicos de alta presión; al tocar el fondo marino o lacustre, los pulsos sonoros se reflejan, siendo recibidos por los hidrófonos alojados en un cable especial; en una etapa posterior las ondas son amplificadas, filtradas y registradas en un registrador gráfico, obteniéndose así un perfil continuo de la roca firme.

Como fuente para accionar el sistema se requiere un generador portátil a 115 volts; 60 Hertz y 300 watts máximo; con este equipo es posible realizar estudios en Proyectos de Ingeniería a 50/60 m. de profundidad, lo cual resulta suficiente sobre todo en proyectos de obras portuarias para determinar la profundidad de dragado; profundidad de hincado de pilotes para la cimentación de obras marítimas, etc.

II.6.1. "Fuentes para generar ondas elásticas"

La fuente de energía más práctica es la de impactos repetidos, mediante un marro de 6 kgs. de peso y una placa de Al ó Fe de unos 25 cms. de diámetro o de lado si es cuadrada. Esta fuente es suficiente para obtener datos hasta 30 m. de profundidad. Normalmente cuando la distancia entre la fuente y el geófono es mayor de 90/100 m. se puede tener dificultades para discriminar la señal deseada; este problema se resuelve excavando una pequeña cepa a unos 10 ó 15 cm. de profundidad, es decir eliminando la tierra suelta, para que la placa haga contacto con el terreno, con lo cual se logran señales nítidas.

Cuando se requieren datos a mayor profundidad, se hace necesario el empleo de explosivos, dependiendo de la profundidad que se desee alcanzar.

El empleo de una masa que se deja caer de determinada altura permite incrementar ,la profundidad de investigación.

Existen también fuentes a base de vibradores, aunque estos resulten menos convenientes, ya que se adaptan mejor a instrumentos mas complicados.

Para operar con equipos que trabajan a base de descargas ó chispas, en lagunas y zonas costeras, la fuente consiste como ya se explicó como un generador portátil a 115 volts; 60 Hz. y 300 watts., acoplado al instrumento.

II.6.2. Sensores

El sensor más comúnmente empleado es conocido como geófono, el cual consiste de una bobina móvil y un magneto; otros tipos de sensores son los acelerómetros y sensores torsionales, los cuales no tienen aplicación en el tipo de instrumentos descritos.

Los geófonos son de dos tipos principales, vertical y horizontal, con un alto rango de frecuencias naturales. Por ejemplo, un geófono especificado para 8 Hz, responde a vibraciones de 8 Hz y mayores. Sin embargo, los geófonos también responden en cierto

modo a frecuencias menores, con salidas menores, a medida que la frecuencia disminuye por abajo de la especificada.

En la práctica y de acuerdo con la naturaleza del problema a resolver, se seleccionan los geófonos, con frecuencias menores que las que se supone se van a obtener de la fuente; es común en Proyectos de Ingeniería, encontrar frecuencias menores de 30 Hz, sobre todo cuando se trata de estudios someros para determinar las ondas cortantes.

Los geófonos de mayor frecuencia, tienen la ventaja de que son menos sensibles a la orientación, o sea que aún cuando estén inclinados, pueden funcionar.

Un tipo de geófono especial, son los ortogonales, muy usados en las técnicas conocidas como Cross-Hole y Down-Hole, para estudiar las ondas cortantes. En estos casos pueden emplearse geófonos sencillos y de tres componentes. Comúnmente estos geofonos disponen de abrazaderas para fijarse en la pared del pozo a cualquier nivel o posición.

Los equipos a que se hace referencia en el presente trabajo, son los usados en exploraciones superficiales no mayores de 100 m.

1o. El equipo debe ser portátil, fácilmente transportable en un vehículo ligero tipo pick-up y operable en el campo por dos

personas: el operador y un peón.

Antes del advenimiento de estos equipos portátiles, el ingeniero civil cuando requería el auxilio de la sismología, pensaba en equipos complicados, con altos costos de operación, etc., como los usados en exploraciones petroleras. Actualmente, esta limitación ha ido desapareciendo al disponer de equipos portátiles, altamente sensibles, con bajos costos de operación y que permitan conocer los resultados inmediatamente.

2o. Que disponga de memoria que permita almacenar la señal recibida, de manera que repitiendo los impactos dos o más veces, se suman las señales; de este modo las señales sísmicas de interés se amplifican, produciendo una señal clara y nítida, en cambio las señales extrañas o ruido sísmico, producido por vibración de maquinaria, tráfico, etc., se cancelan.

3o. Registro de señales en forma permanente en una pantalla de rayos catódicos tipo osciloscopio. La señal debe permanecer en la pantalla hasta que el operador considere que es la señal correcta, lo cual se realiza al repetir los impactos y amplificarse la señal. Se puede recurrir al empleo de equipos que registren las ondas en cintas de papel o magnéticas para su posterior análisis en el gabinete y archivo.

4o. Expansión de la forma de onda en dos coordenadas X, Y.- lo cual aumenta el poder de solución, al ampliar las ondas en sentido

horizontal y vertical.

5o. Tiempos. La escala de tiempos de grabación puede variarse de 10, 20, 50, 100, 500 milisegundos; los tiempos aparecen en lectura digital debajo de la pantalla de registro.

6o. Conviene que el instrumento disponga de un interruptor para invertir la polaridad del geófono, lo cual permite realizar estudios de fuerza cortante; este procedimiento se simplifica mediante el empleo de un geófono horizontal.

7o. Exactitud del orden 0.1%

8o. Una cámara polaroide especial, es muy útil cuando no se dispone de un registrador tipo cinta, para el archivo de datos.

9o. Una computadora personal tipo "lap top" permite agilizar los trabajos, ya que directamente en el campo se pueden hacer las interpretaciones, rectificar lecturas dudosas, etc.

El equipo ya descrito reúne todas las especificaciones señaladas con un alto grado de precisión; además dispone de un dispositivo especial incorporado al circuito electrónico, que permite saber si el equipo está funcionando bien; este hecho es análogo al sistema de calibración de que deben disponer los equipos de resistividad eléctrica.

**CAPITULO III.- DESCRIPCION Y CONSIDERACIONES TEORICAS
DEL METODO GEO-ELECTRICO EN GEOTECNIA**

III.1. DESCRIPCION DEL METODO Y PRINCIPIOS MATEMATICOS

III.2. DIFERENTES DISPOSITIVOS ENTRE ELECTRODOS

III.3. INSTRUMENTACION

III.3.1. Principios de medición

III.3.2. Factores que afectan las medidas

III.3.3. Instrumentos de medición

III.4. OPERACION

III.4.1. Metodología de campo

III.4.2. Graficado

III.5. INTERPRETACION

III.1. DESCRIPCION DEL METODO Y PRINCIPIOS MATEMATICOS

El método estudia mediante mediciones efectuadas desde la superficie del terreno, parámetros electromagnéticos a diferentes profundidades.

Los principales parámetros estudiados, son:

μ Permeabilidad magnética

ϵ Permitividad

ρ Resistividad eléctrica, que es la

que interesa determinar en el método eléctrico

La resistencia eléctrica de un material conductor, homogéneo y de forma prismática, vale: $R = \rho \frac{l}{S}$

donde l es longitud del prisma

S , la sección transversal

ρ es un coeficiente que depende de la naturaleza física y del estado del cuerpo, se conoce como resistividad, sus dimensiones son: ohms- m^2/m .

En la práctica se considera dimensionalmente la resistividad como el producto resistencia eléctrica-longitud, es decir ohms-cm. ó ohms-metro. Se acostumbra también en Registros Eléctricos expresar la resistividad como ohms- m^2 / m , lo que conduce a la siguiente definición. "es la resistencia de un cubo de longitud y sección transversal unitarias de cualquier material, al paso de la corriente eléctrica".

La resistividad, es una medida de la oposición que la corriente eléctrica encuentra a su paso a través de algún material, siendo su recíproca la conductividad, es decir:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

cuya unidad se define como mho/m

Resistividad de las Rocas.-

Los poros ó vacíos que contienen las rocas, suelen ser ocupados en mayor ó menor cantidad por electrolitos, los cuales le transmiten a las rocas la propiedad de ser conductores, en mayor ó menor grado.

Se hace necesario por lo tanto, estudiar la resistividad eléctrica en medios heterogéneos, lo que origina dos clases de resistividades la ρ_1 de la matriz y ρ_2 que corresponden a los electrolitos dispersos en la matriz. Estas dos resistividades están íntimamente ligadas al factor formación F, que es la relación existente entre la resistividad de la roca y la del electrolito que la circunda. Por otra parte, la resistividad se ve afectada por otros factores, como son la humedad, anisotropía, temperatura y presión.

Consideremos un semiespacio de resistividad ρ (Fig. III.1.1), hemisférico, isótropo y homogéneo. En su forma más simple, podemos ilustrar un instrumento para medir la resistividad, consistiendo de una fuente de corriente (generador ó baterías), un miliamperímetro y un voltímetro. Estos elementos se conectan como

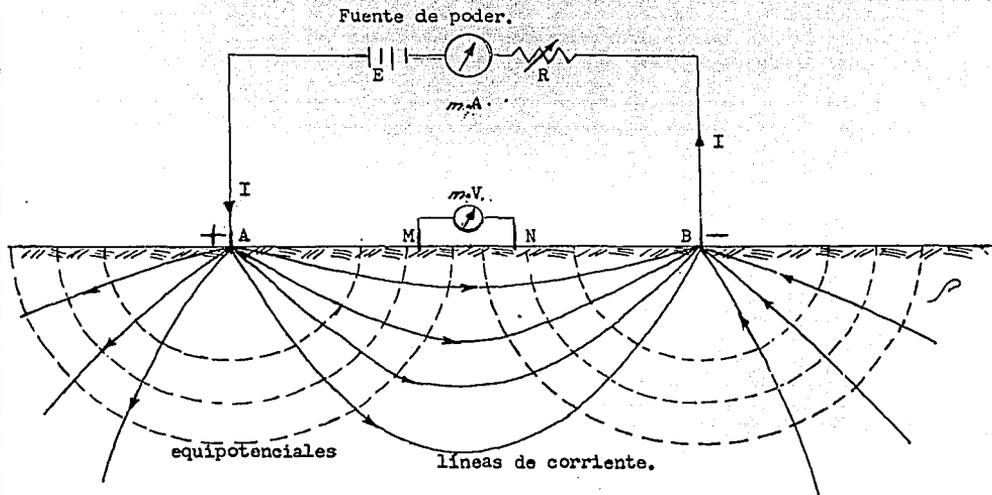


Fig.III.1.1.-Dispositivo para medir la resistividad en el terreno.

A y B, son electrodos primari o de corriente.

M y N, son electrodos secur: s o de medida.

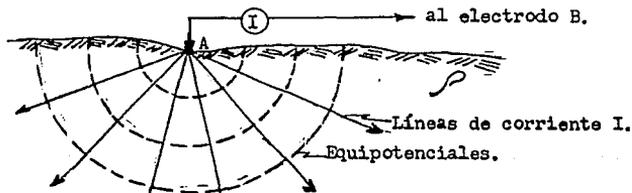


Fig.III.1.2.-Punto fuente de corriente A, en un semiespacio homogéneo, de resistividad ρ , estando el --
electrodo B en el --
infinito.

FACULTAD DE INGENIERIA.

U N A M	TESIS PROFESIONAL
	DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMI- CO Y ELECTRICO.
	CARLOS RENDON G. MEXICO, D.F.

se muestra en la figura III.1.1 a 4 electrodos o barras de cobre, que se hincan en el terreno unos cuantos centímetros, con el objeto de lograr un buen contacto. Al cerrar el circuito de corriente, fluye una corriente de intensidad I , a través del terreno o subsuelo. El flujo de la corriente eléctrica en el subsuelo es tridimensional en forma análoga, al flujo del agua en el subsuelo.

Sea dA un elemento de superficie y J la densidad de corriente en corriente en Amp/m^2 . La corriente que se establece a través de dA es $J \cdot dA$ III.1.1 y el campo eléctrico E se relacionan mediante la ley de Ohm, es decir $J = \sigma \cdot E$ III.1.2 las unidades de E son volts/m y σ es la conductividad del medio en mhos/m.

El campo eléctrico es el gradiente de un potencial, escalar, cuya expresión es $E = -\nabla V$ III.1.3

$$\nabla \text{ es el operador Nabla } = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k.$$

Sustituyendo III-1.3 en III-1.2 obtenemos $J = -\sigma \cdot \nabla V$

III.1.4, siempre y cuando la carga se conserve, es decir, sin pérdidas dentro de un volumen determinado. El número neto de líneas de fuerza que atraviesan la superficie A , es cero, si no hay carga dentro de la superficie cerrada, es decir:

$$\int_A J \cdot dA = 0 \quad \text{III.1.5}$$

El teorema de Gauss especifica, que la integral de volumen de la

divergencia de la corriente que atraviesa toda una región, es igual a la carga total encerrada, o sea:

$$\int_V \nabla \cdot J \, dV = 0 \quad \text{III.1.6}$$

y por lo tanto: $\nabla^2 V = 0$ III.1.7 que es la ecuación de Laplace, válida en todo semiespacio conductor a excepción de los puntos donde hay discontinuidad en la resistividad, o sea en los puntos correspondientes a los electrodos.

La importancia y significado de la ecuación de Laplace se puede expresar como sigue: "Cuando una corriente continua circula a través de un conductor, se comporta igual que un fluido incompresible, es decir, la corriente total que penetra a través de una superficie cerrada dentro del conductor, es igual a la corriente que abandona dicha superficie". Este fenómeno matemáticamente está gobernado por la ecuación de Laplace.

Cualquiera que sea la forma del medio a través del cual circula una corriente continua, o cualquiera que sea la condición particular del problema, el potencial V que se establece entre los electrodos de medida o potencial, debe satisfacer la ecuación de Laplace. Lo anterior es cierto, en cualquier punto del medio, excepto en los puntos donde hay una fuente o recepción de corriente.

La ecuación de Laplace no determina la solución de cualquier problema particular, sino que expresa solamente una de las condiciones, que el

potencial V debe satisfacer; además la ecuación es cierta o válida sólo para corrientes continuas, que circulan en medios homogéneos e isótropos.

En cualquier problema particular, deben ser satisfechas dos condiciones de frontera, a saber:

1ª.- En cualquier contacto que separa dos medios de resistividades diferentes, debe cumplirse: $V_1 = V_2$

Siendo los potenciales en ambos medios V_1 y V_2

2ª.- Las componentes de la densidad de corriente, normales al contacto en ambos lados, deben ser iguales, es decir: $i_n = \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial V_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial V_2}{\partial n}$

cualquier solución de la ecuación de Laplace, que satisface las condiciones de frontera descritas, constituye la solución única del problema planteado en Geofísica Eléctrica.

Analícemos el caso general que se presenta en la práctica, el cual consiste en ubicar los dos electrodos de corriente, lo más distante posible. Si se traza alrededor del electrodo A, estando B en el infinito, y dentro del semiespacio inferior, una superficie semiesférica, en cualquier punto de ella, por simetría, la densidad de corriente J , tendrá el mismo valor y estará dirigida radialmente. Fig. III.1.2.

La expresión de J , con respecto a la superficie semiesférica, estará dada por la siguiente fórmula:

$$J = 2\pi r^2 \mathcal{J} \quad \text{III.1.8}$$

siendo r el radio

$$\text{pero } \sigma \cdot E = \mathcal{J} = \frac{1}{2\pi r^2} \quad \text{III.1.9}$$

$$\therefore |E| = \frac{J}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{J \cdot \rho}{2\pi r^2} \quad \text{III.1.10}$$

Es decir, para el caso de un electrodo puntual, el campo eléctrico E es inversamente proporcional, al cuadrado de la distancia.

Si consideramos V como un volumen infinitesimal encerrando un punto dado, tendremos para ese punto que:

$$\nabla \cdot \mathcal{J} = 0 \quad \text{III.1.11}$$

sustituyendo III.1.4 en III.1.11

$$-\nabla \cdot \nabla (\sigma \cdot V) = 0 \quad \text{III.1.12}$$

desarrollando:

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad \text{III.1.13}$$

Como σ es una constante por tratarse de un medio homogéneo e isotrópico, el primer término desaparece, ya que la conductividad es uniforme, por lo que

$$\text{La ecuación } \mathcal{J} = -\sigma \nabla \cdot V \quad \text{III.1.14}$$

Es la ecuación básica en prospección eléctrica.

III.2. DIFERENTES DISPOSITIVOS ENTRE ELECTRODOS

Con el objeto de uniformizar y respetar la nomenclatura empleada en forma generalizada por todos los especialistas en la materia, hagamos referencia a la Fig. III.2.1 en la cual A y B son los electrodos primarios o de corriente; M y N son los electrodos de medida o potencial.

Para determinar el valor del potencial entre M y N, partimos de la fórmula general:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad \text{III.2.1}$$

en la cual: $r_1 = AM$; $r_2 = MB$; $r_3 = AN$; $r_4 = NB$

sustituyendo estos valores en la ecuación anterior, resulta:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right] \quad \text{III.2.2}$$

Para determinar la resistividad del terreno, se emplean varios dispositivos entre los electrodos, siendo los más comunes los que se describen a continuación:

Arreglo Simétrico.- Fig. III.2.1. (a)

En este caso los puntos A, M, N y B, se sitúan sobre una recta de manera que los puntos M y N, resultan simétricos, con respecto al centro del arreglo. Aplicando la ecuación III.2.2 y partiendo de las

siguientes consideraciones: $AM = \frac{L}{2} - \frac{C}{2}$; $AN = \frac{L}{2} + \frac{C}{2}$; $MB = \frac{L}{2} + \frac{C}{2}$; $NB = \frac{L}{2} - \frac{C}{2}$

se obtiene.- $\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{L}{L^2 - C^2} \right)$

resultando finalmente: $\rho = \frac{\pi}{I} \left(\frac{L^2 - C^2}{L} \right) \frac{\Delta V}{I} \quad \text{III.2.3}$

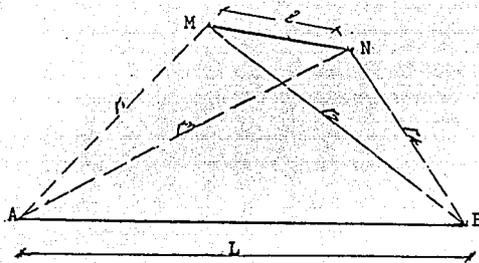


Figura III.2.1.-Caso general que permite determinar el potencial entre los electrodos de medida M y N.

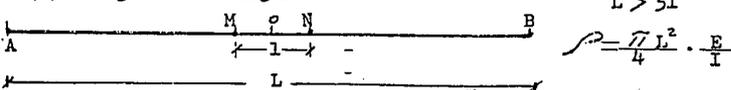
(a).-Arreglo simétrico.



(b).-Arreglo Wenner.



(c) Arreglo Schlumberger.



FACULTAD DE INGENIERIA.

U N A M	TESIS PROFESIONAL	
	DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMI-CO Y ELECTRICO.	
	CARLOS RENDON G.	MEXICO, D.F.

que es la expresión general, a partir de la cual, analizaremos los dispositivos más empleados en la práctica, que son los que a continuación se describen.

Dispositivo Wenner.- (Fig. III.2.1. b)

En este arreglo $L = 3 \ell$, por convención de los autores de este dispositivo; ℓ se denomina a, con lo cual sustituyendo valores en la ecuación III-2.3 y desarrollando se obtienen:

$$\rho = 2\pi a \cdot \frac{V}{I} \quad \text{III.2.4}$$

Arreglo Schlumberger.- (Fig. III.2.1. c)

En este caso: $L \geq 5 \ell$ por lo tanto podemos considerar $L^2 - \ell^2 = L^2$ cometiendo un error menor al 4%, sustituyendo en la ecuación general resulta:

$$\rho = \frac{\pi L^2}{4} \cdot \frac{E}{I}$$

donde $E = \frac{\Delta V}{\ell}$ es la intensidad del campo eléctrico E, en el punto central o, debido a esto, el arreglo se conoce como "dispositivo del gradiente", en cambio el de Wenner, se conoce como "arreglo del potencial".

Existen otros dispositivos poco empleados en la práctica como son el dipolo-dipolo, en sus variantes más conocidas axial, ecuatorial, etc., sin embargo, estos dispositivos no fueron muy aplicados en proyectos de Ingeniería, aunque su uso está restringido a estudios a gran profundidad, para localizar yacimientos petroleros, fuentes geotérmicas, etc., por otra parte su empleo requiere grandes fuentes de poder, aparatos más sensibles y brigadas de operación especializadas, ya

que las brigadas que operan la fuente de poder y el equipo receptor, deben estar separadas, por lo que se requiere inclusive el empleo de transmisores y receptores portátiles de radio, para llevar un control efectivo de las operaciones de campo.

III.3. INSTRUMENTACION

III.3.1 Principios de medición

En el método de resistividad, se requieren equipos que permitan determinar la diferencia de potencial establecida, entre los electrodos de medida M y N, así como la corriente enviada al terreno a través de los electrodos primarios A y B.

Existen equipos que permiten medir el potencial V y la corriente I, en forma independiente, otros equipos se han diseñado para medir la relación V/I directamente y los más modernos, incluyen dispositivos capaces de medir directamente la cantidad $\frac{V}{I}$, lo que simplifica los cálculos de la resistividad aparente.

Normalmente, los potenciales medidos varían desde algunas milésimas de volt hasta 1 V, aunque estas últimas lecturas son muy raras,

solamente se presentan para espaciamientos muy pequeños entre los electrodos. De acuerdo con lo anterior, un Potenciómetro con un rango de medida de .001 a 10 volts, resulta suficiente para fines prácticos.

Las corrientes oscilan entre valores más amplios, dependiendo de las condiciones geológicas y de la clase de fuente de poder que se utilice, en terrenos muy conductores, normalmente ocurren o se obtienen corrientes hasta de 1 Ampere o más; sin embargo, si la fuente de poder es del tipo regulado, es posible controlar la corriente I , a un cierto valor y de este modo conservarla constante a lo largo de las medidas, esto es recomendable, cuando se emplean baterías, con el objeto de aumentar su vida útil. Cuando se opera en terrenos que son malos conductores, es más recomendable el empleo de fuentes de poder, a base de generadores y unidades de control, con el fin de poder transformar la C.A. en C.C.

Un miliamperímetro de rango múltiple, con escalas de 0-10, 0-100 y 0-1000 miliamperios resulta práctico y más que suficiente para operar en cualquier condición que se presente normalmente en la práctica.

El error relativo de medición del potencial V , así como la intensidad de corriente I , debe ser cuando mucho de 1 a 2%, lo que permite determinar las resistividades, con un error no mayor del 5%.

El procedimiento normal para medir el potencial V , es el de balance

a cero, aunque existen aparatos que emplean otra técnica conocida como el método de comparación.

La Fig. III.3.1. muestra un diagrama simplificado, que explica claramente el procedimiento para medir el potencial entre los electrodos de medida M, N o primarios, CD es una resistencia con contacto móvil o deslizable, a través de la cual se hace pasar una corriente i , proveniente de la batería E, lo cual permite accionar el Potenciómetro. El punto m, está conectado a través del Galvanómetro G, con el electrodo M y el punto n, se conecta directamente al electrodo N. Al cerrarse el circuito entre M y N, actúan dos diferencias de potencial, que son:

1º. ΔV_{MN} provocada al cerrar el circuito emisor de corriente, a través de los electrodos A y B.

2º.- ΔV_{mn} originada por la caída de tensión, de la pila de 1.5 V, intercalada en el circuito del Potenciómetro. Al ocurrir lo anterior, el galvanómetro se desbalancea marcando una deflexión; de acuerdo con la Ley de Ohm, la corriente i en el circuito M y N, será igual a la suma de las diferencias de potencial, dividida por la resistencia total del circuito.

Operando el potenciómetro, hasta lograr que: $\Delta V_{MN} = \Delta V_{mn}$
o sea, en el instante en que la aguja del G no marca deflexión

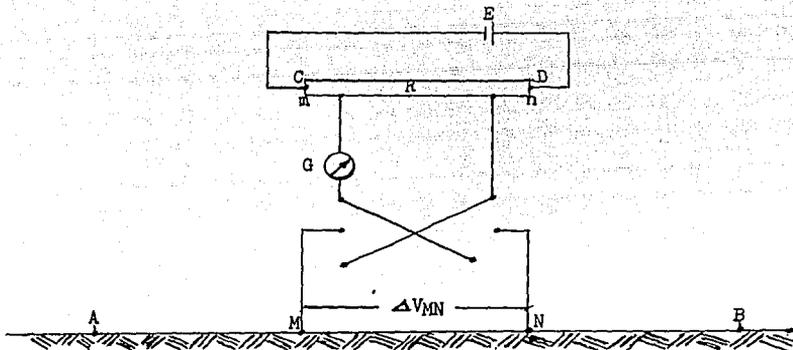


Figura III.3.1.-Diagrama simplificado que ilustra la técnica para medir el potencial entre los electrodos M y N.

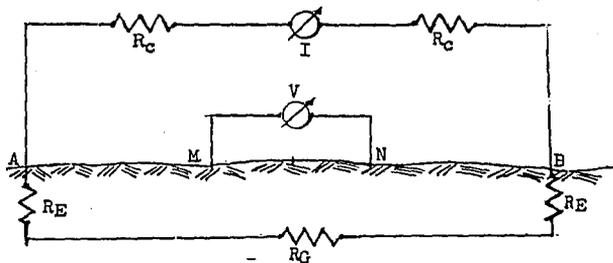


Figura II.32.1.-Mostrando el acoplamiento entre los circuitos de corriente y potencial a través del terreno, así como los diferentes tipos de resistencias.

FACULTAD DE INGENIERIA.

U
N
A
M

TESIS PROFESIONAL

DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMICO Y ELECTRICO.

CARLOS RENDON G. | MEXICO, D.F.

alguna, se ha logrado balancear el potencial entre M y N, con el establecido en el potenciómetro, quedando así determinada: ΔV_{MN} que es el parámetro que se está midiendo, en resumen si en el circuito no hay circulación de corriente, entonces:

$$\Delta V_{MN} = -\Delta V_{MO}$$

III.3.2. Factores que afectan las medidas

Los factores que pueden distorsionar las lecturas y la forma de eliminarlos, se describen a continuación:

a). Resistencias de contacto

Para un sistema de 4 electrodos, el acoplamiento entre los circuitos de corriente y potencial, se verifica a través de la resistencia del terreno, R_G como se muestra en la Fig. III.3.2.1. Normalmente, la resistencia interna del instrumento, es tan pequeña que no se toma en cuenta.

b). Respecto a la resistencia R_C de los cables conductores, también resulta mínima, siendo del orden de 2.5 ohms/100 m de cable, con hilos de cobre, o sea que sólo las resistencias de contacto R_E entre los electrodos A y B y el terreno, son las que deben reducirse al mínimo, con el objeto de disponer de la mayor cantidad de corriente.

En la fórmula:

$$I = \frac{V}{R_C + 2R_E + R_G}$$

R_C , es la resistencia de los cables

R_E resistencia de contacto entre los electrodos de corriente y el terreno

R_G resistencia del terreno

Siendo R_C mínima y controlable, queda por reducir solamente R_E . Lo cual se logra en el terreno fácilmente, excavando previamente agujeros y llenándolos con electrolito a base de cloruro de sodio (sal) al conectar los electrodos, las resistencias de contacto se han reducido a su mínima expresión.

La única incógnita que queda en la fórmula es R_G , que es lo que se va a determinar. Por otra parte, normalmente el potencial medido, disminuye al aumentar la separación entre A y B, por lo que siempre resulta conveniente incrementar I que se envía al terreno, o bien, aumentar la separación entre los electrodos M y N, con lo cual se aumenta la relación señal-ruido.

En el circuito de medida, la resistencia total vale: $R_T = R_I + 2R_E$

R_I es la resistencia interna del instrumento y $2R_E$, es la resistencia de contacto entre los electrodos M y N. Al potencial medido V, creado al cerrar el circuito emisor, se le suman en la práctica, ruidos, como son la polarización de los electrodos, corrientes que provienen de líneas de transmisión, potenciales naturales, etc., por lo que el instrumento, da una lectura menor que la real.

Como no es posible eliminar completamente las resistencias R_E resulta

mas práctico hacer que $R_1 > 2 R_E$ razón que justifica el porque los instrumentos se construyen, con impedancias de entrada muy grandes, 2 megohms o más.

c). Polarización de los electrodos

Cuando se opera con C.D. se origina en los electrodos el fenómeno de polarización, lo cual distorsiona las medidas del potencial, esto se debe a que siendo metálicos los electrodos, al hacer contacto con el terreno, se comportan como semielementos de una pila eléctrica. Si designamos como interfase, a la parte del electrodo en contacto con el terreno, el fenómeno se explica como sigue: al hacer pasar una corriente, a través de la interfase metal-electrolito, el potencial se altera, al grado de cambio cuando la corriente es pequeña y existe un potencial para una condición de corriente nula, se conoce como sobrepotencial o exceso de voltaje del electrodo.

Este exceso de voltaje, representa una energía potencial adicional capaz de provocar un proceso electroquímico. Este potencial se debe fundamentalmente a una reacción del tipo oxidación-reducción.

Lógicamente, este exceso de voltaje es mayor en la interfase, donde la actividad química desarrollada es mayor, además donde cambia el tipo de conducción iónica, en el electrolito, a electrónica en el electrodo. El hecho más relevante, es que este exceso de voltaje, puede diferir o variar, dependiendo de que la corriente penetre o abandone al electrodo, lo cual como ya se explicó, se debe a las

reacciones químicas de oxidación en un interfase y reducción en la otra, de este modo, el exceso de voltaje se incrementa al sumarse los dos efectos de la reacción, lo anterior permite establecer la siguiente definición: "Una desviación del potencial de equilibrio en un electrodo, se conoce como polarización". En la práctica, para eliminar este fenómeno, se puede recurrir a cualquiera de las dos soluciones siguientes:

- 1o. Emplear C.A. de baja frecuencia
 - 2o. Emplear C.D. conmutada, que equivale al proceso anterior.
- Si se opera sólo con C.D. se presentan dos alternativas, a saber:

- a) Usar electrodos no polarizables
- b) La fuente de poder debe disponer de un dispositivo, para invertir el sentido de circulación de la corriente, tomando dos lecturas en cada posición de electrodos y operando con el valor promedio.

El ruido telúrico, los acoplamientos electromagnéticos, las corrientes creadas por líneas de alta tensión, etc., representan interferencias que limitan la precisión de las lecturas tomadas en el campo.

El ruido telúrico en especial, es un problema que se presenta sobre todo en voltímetros de C.D. acoplados directamente. La corriente telúrica se origina por pequeñas variaciones del campo magnético terrestre. Las ondas electromagnéticas se propagan desde el espacio,

penetrando al interior de la corteza terrestre, siendo las ondas de menor frecuencia las que penetran a mayor profundidad.

Existe una banda de frecuencia de radiación electromagnética que inciden en la superficie terrestre.

Existen otros tipos de ruidos provocados artificialmente por las líneas de alta tensión, ferrocarriles eléctricos, los cuales se eliminan, mediante filtros especiales, incorporados al SISTEMA de medida.

Por otra parte, aún cuando el terreno no se haya energizado, el potenciómetro puede registrar una lectura, que representa el potencial natural, el cual se debe a una condición eléctrica activa del terreno y el medio circundante, es decir, la existencia de cuerpos conductores, originándose un efecto similar al de una batería, o sea que se desarrollan reacciones electroquímicas, que dan lugar a potenciales naturales. Este tipo de ruido se considera de naturaleza errática, en lo que respecta a frecuencias y cambios de fase. El mejor método para eliminar estos ruidos, es reduciendo las resistencias de contacto, mediante filtros especiales, para nulificar las frecuencias mayores a las que se está operando.

En resumen, el potencial natural, es un potencial eléctrico que varía lentamente o bien, opera como una C.D. es decir, en una sola dirección y se debe principalmente a la presencia de cuerpos

mineralizados o bien a corrientes telúricas y raras veces es mayor de 1 volt.

III.3.3 Instrumentos de medición

Un equipo normal para operar por el método de resistividad, consiste de las siguientes partes:

Fuente de poder.

Instrumento de medida. La mayoría de los equipos incluyen en un sólo estuche la fuente y el dispositivo de medida.

Electrodos de corriente y de medida

Carretes para almacenar el cable

Accesorios que comprenden altímetro, brújula, analizador, etc.

Las fuentes del poder pueden consistir de baterías en número suficiente para proporcionar los voltajes adecuados, en función de las profundidades de investigación; para profundidades hasta de 100 m, es recomendable el empleo de fuentes a base de baterías. Cuando se trate de estudios a mayor profundidad, es más conveniente el empleo de fuentes a base de generadores, cuya potencia está en función de la profundidad de investigación; otro tipo de fuentes de poder, consiste en osciladores transistorizados, con un transformador de poder, conectado a los electrodos de corriente; el oscilador es operado con C.D. normalmente de 12 a 15 volts, estos osciladores generan ondas cuadradas de baja frecuencia, del orden de 4 a 5 Hertz.

Los instrumentos de medición, pueden ser potenciómetros ó

voltímetros, existiendo una gran variedad de aparatos que emplean el mismo principio de medición variando sólo en la calidad, costo, precisión, y facilidad de manejo. Otra diferencia fundamental, consiste en que algunos equipos operan con C.D., otros con C.A. a baja frecuencia y otros con C.D. conmutada, aunque este último sistema a la fecha ha sido discontinuado.

Cualquiera que sea el equipo debe satisfacer una serie de especificaciones, entre las que sobresalen las que se enumeran a continuación:

Sensibilidad: desde 0.01 a 1000 milivolts

Rango de medida: desde 1 a 20,000 ohms de resistividad aparente

Precisión en las medidas: más o menos del 1% para resistividades hasta de 1 ohm-m

Filtros: Debe disponer de filtros para eliminar las interferencias, debidas a líneas de alta tensión.

Portátiles: De poco peso y fácil manejo, para su traslado por caminos de difícil acceso (brechas).

Construcción Sólida: De preferencia que no incluyan partes móviles en los circuitos, con el fin de que puedan soportar su traslado por caminos difíciles.

Calibración: Es preferible que dispongan de un sistema de calibración, ya sea incorporado al circuito de medida o bien, mediante resistencias patrón, con el objeto de comprobar

en cualquier momento que el aparato esté funcionando bien, sobre todo antes de salir a trabajar al campo.

El instrumento tipo Gish-Rooney emplea C.D., la cual mediante un sistema de doble conmutación, es invertida en forma sincronizada, es decir, ambos circuitos los de potencial y corriente, son invertidos en forma sincronizada: La C.D. que proviene de la fuente, se hace pasar a través de un miliamperímetro y de ahí un conmutador, el cual invierte la polaridad de la C.D. periódicamente, con una frecuencia que depende, de la velocidad de rotación del conmutador, el instrumento dispone de un dispositivo (reóstato) especial que permite controlar la velocidad de rotación, desde 0 hasta 15 vueltas por segundo, o sea que la frecuencia varía desde 0 hasta 15 Hertz. La onda de salida es cuadrada plana. Un segundo conmutador, cambia el potencial alterno creado por la corriente energizante conmutada, a un potencial unidireccional pulsante, el cual se mide con un potenciómetro de C.D.

El doble sistema de conmutación, elimina las corrientes telúricas, potenciales naturales, etc., en virtud de que cualquier diferencia en un potencial unidireccional, que existe entre los electrodos de medida prácticamente es nulificado por las inversiones del conmutador.

La potencia de salida si se usan baterías (300 volts) es del orden de 80 watts máximo, con lo cual la capacidad de penetración del

instrumento queda limitada a unos 300 m., en cambio, mediante el empleo de una fuente a base de un generador, la potencia disponible puede ser hasta de 400 watts, o más, lo que aumenta prácticamente la capacidad de investigación hasta en un 100%.

El equipo permite operar con los arreglos Schulumberger, Wenner y con algunas modificaciones, puede operarse con el método de las R.C.P.

Un equipo muy práctico es el Potenciómetro R-60 de la firma Soiltest, en el cual la fuente de poder y el instrumento de medición operan por separado, lo cual permite operar prácticamente con todos los arreglos conocidos, incluyendo los dipolo-dipolo ecuatoriales, axiales, etc. El equipo opera con C.D. exclusivamente y dependiendo de la fuente de poder, requiere el empleo de 4 electrodos no polarizables.

Un equipo pequeño, ideal para proyectos de Ingeniería Civil; opera con C.A. a 50 Hertz y la fuente de poder es a base de un oscilador transistorizado, que genera onda cuadrada en la salida; la capacidad máxima de penetración del equipo es de 60 a 70 m. lo que lo hace ideal para su aplicación en cimentaciones de presas, túneles, edificios, etc., normalmente se aplica simultáneamente con el sismógrafo de refracción. El equipo se conoce con el nombre de Stratascout.

III.4. OPERACION.

III.4.1 Metodología de Campo

La aplicación del método de resistividad eléctrica, se puede hacer en el campo mediante dos variantes ó modalidades, que son:

- a). Sondeo Vertical (S.V.)
- b). Sección Horizontal (S.H.)

El S.V. consiste en una serie de medidas en el campo, las cuales se hacen conservando fijo el punto de investigación y aumentando progresivamente la separación entre los electrodos A y B, en el arreglo Schlumberger, manteniendo fijos los electrodos de medida M y N: en el arreglo Wenner se mueven simultáneamente los electrodos de corriente y los de medida.

La finalidad del S.V. es determinar la distribución vertical de las resistividades, bajo el punto en estudio, lo cual se logra en virtud de que al aumentar la abertura entre A y B, se incrementa la profundidad de investigación.

La sección transversal, permite determinar las variaciones de la resistividad en sentido horizontal, por lo que en el campo una vez fijada la línea por estudiar, ésta se recorre con el dispositivo seleccionado, manteniendo fija la separación entre el sistema de electrodos, con lo que se conserva constante la profundidad investigada; el conjunto se va desplazando a lo largo de la línea, cada 10, 20, 30

m. etc., de acuerdo con el grado de detalle que se requiera. En la práctica, las secciones se repasa a dos o tres profundidades diferentes, con el objeto de obtener mayor información.

Esta técnica, permite localizar contactos verticales o muy inclinados como diques, fallas, cuerpos mineralizados, cauces sepultados, etc.

Penetración

El volumen de terreno afectado por la corriente del circuito emisor AB, se considera por algunos autores, como un paralelepípedo de dimensiones determinadas, por la distancia entre los electrodos A y B; otros consideran que el volumen medido, es un semicilindro cuyo radio es la distancia $AB/2$, tratándose del arreglo Schlumberger el cual corresponde a la profundidad de investigación; en el caso del arreglo Wenner, se considera que la profundidad explorada, equivale a un tercio de la distancia entre los electrodos de corriente. Estas conclusiones, se han demostrado prácticamente, o sea que en la realidad, en la mayoría de los casos se satisfacen los postulados anteriores.

Por otra parte, lo anterior se demuestra matemáticamente, estudiando la variación de la densidad de corriente J , en función de la profundidad Z , a lo largo de una recta normal a la superficie del terreno, a partir del centro del sistema de medida.

En realidad el concepto de penetración en un S.V., depende de varios factores, principalmente de la resistividad de las formaciones y sus espesores, puede suceder incluso, que la penetración no aumente con la distancia AB a partir de cierto valor, lo cual resulta explicable, cuando a cierta profundidad, exista una capa aislante (mala conductora) o un cuerpo muy buen conductor (arcillas, aguas salinas, etc.) ya que en tal caso, la corriente no podrá pasar por debajo de dicha capa, por mucho que se aumente AB.

Sin embargo, la regla general ya establecida, en el sentido de que la penetración AB/2 y AB/3, para los arreglos Schlumberger y Wenner respectivamente, se ha comprobado plenamente en la práctica.

III.4.2. Graficado

Con las lecturas tomadas en el campo, se calculan y dibujan los valores de la resistividad aparente, en función de las profundidades, obteniéndose una curva o perfil eléctrico que en última instancia, representa la mayor o menor oposición que presentan las formaciones al paso de la corriente eléctrica; es aconsejable, tratándose de S.V., tomar cuando menos 6 lecturas por ciclo logarítmico igualmente espaciadas, lo cual permitirá procesar la curva de campo, por cualquiera de los programas de computación, de que se dispone. Aún cuando las gráficas pueden presentarse en papel milimétrico, resulta más conveniente hacerlo en papel logarítmico, con módulo de 62.5 mm.,

por ser el más comercial y además, por adaptarse a las curvas patrón, que en su mayoría se han publicado en papel de igual tamaño.

La fórmula general para el cálculo de la resistividad aparente, es: $\rho = K \cdot \frac{V}{I}$

donde K, depende del tipo de arreglo empleado

Para el arreglo Wenner $K = 2\pi \cdot a$

a, es la equidistancia entre electrodos

Para el dispositivo Schlumberger; $K = \pi MN \left[\frac{L^2}{MN} - \frac{1}{4} \right]$

III.5 Interpretación

Las curvas de campo, ya sea que se trate de sondeos individuales, en grupos o gráficas de secciones horizontales a profundidad constante, deberán interpretarse tomando como premisa, el conocimiento de la geología regional. En última instancia, lo que se pretende es conocer la estructura del subsuelo, para lo cual se procede a determinar la distribución vertical u horizontal, de la resistividad de las rocas incluidas en las medidas.

Una buena interpretación se logra cuando los resultados obtenidos son compatibles con las condiciones geológicas esperadas.

En proyectos de Ingeniería, las interpretaciones normalmente se simplifican por tratarse de estudios someros, a menos de 100 de

profundidad, con excepción de los estudios relacionados con la búsqueda de aguas subterráneas, en cuyo caso se requiere explorar el subsuelo, a profundidades del orden de 200 y 300 m., en casos excepcionales hasta 1000 m. de profundidad.

La bibliografía relacionada con la Geofísica Eléctrica, consigna una gran variedad de métodos de interpretación, todos ellos valiosos, sobre todo en manos de un Geofísico con criterio y experiencia.

Los hay analíticos, gráficos, empíricos y científicos.

De los métodos analíticos sobresale el método de Tagg, el cual se aplica con bastante ventaja para problemas de dos capas, principalmente cuando se trata de conocer el espesor del relleno superficial, descansando sobre un estrato firme y resistente. Este método resulta muy útil.

La interpretación se hace mediante una curva auxiliar calculada por el autor, con lo cual es posible determinar el espesor de la segunda capa en forma rápida y precisa, utilizando el valor de la abscisa del punto de intersección, de la conductancia longitudinal total (línea S) con la curva auxiliar.

Los métodos empíricos son más numerosos y resultan también muy

útiles para conocer las condiciones geológicas de un lugar, sobre todo en el mismo lugar de trabajo y en forma rápida; esta técnica permite resolver problemas geohidrológicos y localizar sitios favorables para el alumbramiento de aguas subterráneas.

Fué Wenner, quien abrió el cambio de la exploración eléctrica, al idear un método para determinar la resistividad, el cual a la fecha persiste.

En 1925 los Drs. Gish y Rooney, observaron que el graficar las resistividades en función de la abertura entre electrodos, se obtenía una curva, que mostraba cambios muy notables, que coincidían con las profundidades de los cambios de litología.

La aplicación de este método se difundió rápidamente y puede decirse que en gran variedad de casos se justifica y resulta muy aproximada y cerca de la realidad.

En esencia, el método consiste en aprovechar los máximos y mínimos de la curva, ya que según se ha demostrado en la práctica, estos puntos corresponden a los cambios litológicos en el subsuelo.

Otro método muy útil sobre todo en proyectos de vías terrestres, aeropuertos, etc., donde se requiere clasificar los materiales en función

de su granulometría o de localizar bancos de grava y arena, es el método de Barnes, utilizado por él.

Silvain J. Pirson, en 1935 ideó un método para interpretar curvas de 3 capas, el cual es bastante accesible, sobre todo para su aplicación en el campo.

Consiste en analizar la primera rama de la curva, mediante las curvas patrón, para dos capas, determinando automáticamente por superposición: P_1 , h_1 y P_2 .

El siguiente paso consiste en encontrar h_2 , o sea la profundidad al segundo contacto, para lo cual se hace uso del punto de inflexión de la última rama de la curva, aplicando el criterio de Lancaster Jones, o sea que h_2 corresponde a los 2/3 de la abscisa correspondiente al punto de inflexión.

De los métodos científicos mas usados actualmente, sobresale el de superposición de las curvas de campo con las curvas teóricas, que en realidad representan modelos matemáticos para resolver problemas de 2, 3, 4 y hasta 5 capas.

Desde un punto de vista físico-matemático, el fundamento de estos métodos, es la distribución del potencial eléctrico en un medio contínuo, compuesto de medios parciales homogéneos e isotropos de

extensión lateral indefinida, limitados verticalmente por planos paralelos.

Maxwell, aborda el problema al estudiar la propagación de la corriente eléctrica a través de medios continuos, aplicando el método de las imágenes eléctricas para su solución, obteniendo una expresión en forma de serie. Posteriormente fué J. N. Hummel, quien utilizó la solución de Maxwell, calculando las curvas teóricas para el caso de dos capas, haciendo variar la relación entre las resistividades de ambos medios. Simultáneamente Irwin Roman, publicó resultados análogos.

En los años de 1933 a 1936, una compañía privada francesa, logró calcular una colección de curvas teóricas fundamentales de 3 capas, que se publicaron hasta 20 años después.

Maillet, demuestra posteriormente que la distribución del potencial eléctrico en la superficie lfmite del medio estratificado (contacto), que constituye la única magnitud observable, queda determinada por dos parámetros, a saber: R ó resistencia transversal unitaria y S ó conductancia longitudinal unitaria.

"En general las profundidades obtenidas por superposición de las curvas de campo con las teóricas, puede no corresponder a la realidad, por dos razones, que son la presencia de capas anisotrópicas y el efecto

del principio de equivalencia. Dicho principio, afirma que cuando una capa tiene una R (o una C) grande en comparación con las correspondientes a las capas que están debajo o encima, la curva del sondeo eléctrico, viene influida sólomente por el valor de R o de C y no independientemente por los valores ρ_i, h_i de la capa correspondiente. Por esta razón, al interpretar una curva experimental, podremos encontrar capas para las que sólo es posible determinar el producto: $R_i = \rho_i h_i$ o bien $C = \frac{h_i}{\rho_i}$ pero no cada uno de los factores.

En la práctica sólo es posible vencer estas indeterminaciones si se dispone de sondeos paramétricos, en combinación con sondeos mecánicos, lo que permite calcular las resistividades ρ_i y aplicar los valores obtenidos a los demás sondeos efectuados en la zona. También, se puede recurrir a las resistividades obtenidas a partir de Registros Eléctricos.

Fundamentalmente, las curvas teóricas permiten disponer de un método científico de interpretación, basado en la comparación de las curvas de campo con las teóricas. La comparación se logra por superposición directa, determinándose los valores absolutos de las resistividades y profundidades. Las curvas se desplazan manteniendo los ejes paralelos hasta que se logre el ajuste o coincidencia de la curva de campo con una teórica.

Para aplicar este método, es necesario disponer de un catálogo o

colección de curvas teóricas; actualmente existen varios disponibles, entre los cuales sobresalen las siguientes:

El juego de curvas de dos capas corresponde a los siguientes casos:

1o.- $\frac{\rho_z}{\rho} > 1$ ó sea el tipo ascendente

los valores computados para este caso son:

$$\frac{\rho_z}{\rho} = \frac{11}{9}, \frac{3}{2}, \frac{13}{7}, 2, \frac{7}{3}, 3, 4,5, \frac{17}{3}, 7, 19, 39, 99, \infty$$

2o.- $\frac{\rho_z}{\rho} < 1$ tipo descendente

Los valores disponibles para la relación $\frac{\rho_z}{\rho}$, son los recíprocos del caso anterior.

Las gráficas vienen dibujadas en papel Log-Log, con módulo de 62.5 mm. que es el más comercial; sin embargo, Wetzel y Mooney, publicaron una colección con módulo de 127 mm., la cual es de las más completas no obstante, sólo es aplicable para sondeos hechos con la variante Wenner.

Curvas básicas para la interpretación de curvas de campo de 3 capas:

Para conveniencia en la selección del método de interpretación, las

curvas se clasifican en función de su morfología, a saber: Curva tipo H, es la que muestra un mínimo en la porción media, e indica la presencia de una secuencia de 3 capas, cuyas resistividades varían de acuerdo con la siguiente relación: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

La denominación H, está asociado con el nombre de Hummel.

Curva Tipo K

En este caso la curva muestra un máximo, o sea: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

Curva tipo A

Es aquella que exhibe un incremento uniforme en la resistividad, es decir: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

La letra A, está asociada con el factor anisotropía.

Curva Q .

Es la que muestra un descenso de la resistividad, es decir: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

Se conoce también como curva DA que significa anisotropía desplazada ó modificada.

Tipo Q o DH

Doble descendente con : $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

que significa Hummel desplazada o modificada.

En la Fig. III.5.1. a, b, c y d, se muestran respectivamente las curvas

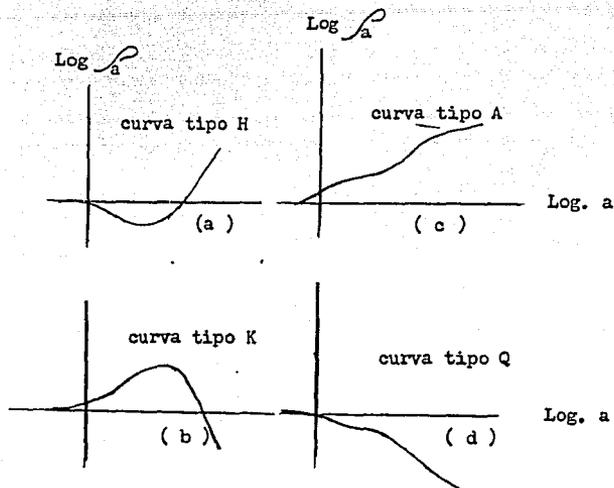


Figura III.5.1.-Curvas básicas empleadas en la interpretación de los S.E.V.-Para facilidad en la selección del método de interpretación, las curvas se clasifican en función de su morfología como se ilustra.

FACULTAD DE INGENIERIA.	
UNAM	TESIS PROFESIONAL
	DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMICO Y ELECTRICO.
	CARLOS RENDON G. MEXICO, D.F.

tipo H, K, A y Q

La "Compagnie Generale de Geophysiqué" (1955-1963), publicó una colección que contiene 48 juegos de curvas, cada juego incluye 10 gráficas, que dan un total de 480 curvas individuales.

Combinando las curvas H, A, K y Q, se obtienen 8 tipos de curvas de 4 capas, las cuales se designan como sigue:

HA, HK, AA, AK, KH, KQ, QH, y QQ

La interpretación de curvas de mas de 3 ó 4 capas, se puede simplificar, reduciendo el caso a otro menor número de capas. Fue Hummel quien supuso que el efecto de dos capas contiguas era equivalente al de una sola, cuyo espesor fuese igual al espesor de las dos capas juntas y con una resistividad de ambas capas, cuya conductancia longitudinal fuese la suma de la correspondiente a cada uno de los estratos. Sin embargo, el investigador alemán Ebert, analizando una colección de curvas de 3 capas, llegó a resultados más exactos y útiles.

El método al que llegó finalmente Ebert, se conoce como método del punto auxiliar y requiere para su aplicación solamente de un juego de curvas de dos capas y las curvas auxiliares tipo A, H, K y Q.

Para una curva de 3 capas, se procede como sigue:

La primera rama de la curva se interpreta con las curvas teóricas de dos capas, entonces estas dos capas se sustituyen por una sola capa de resistividad ficticia ρ_f y h_f espesor ficticio: esta capa se usa en lugar de las dos capas superficiales, para interpretar el resto de la curva.

En esta primera etapa, se determina: ρ_1, h_1, ρ_2 .

Para encontrar la capa ficticia que sustituya a las dos capas superficiales, se recurre a la curva auxiliar correspondiente al caso; dos condiciones deben ser satisfechas:

- 1o.- La porción final de la curva de campo se interpreta de nuevo con las curvas de dos capas.
- 2o.- El origen de las curvas teóricas, debe caer sobre la curva auxiliar.

Para lograr lo anterior, la familia de curvas teóricas, se sobrepone sobre la curva de campo, desplazándose siempre conservando el paralelismo de los ejes, hasta lograr que una de las curvas coincida con la porción derecha de la curva de campo, manteniendo el origen de las curvas teóricas, sobre la curva auxiliar. En esta etapa se obtienen: h_f, ρ_f, h_3 .

Para aplicar este procedimiento, las curvas auxiliares, deben estar dibujadas a la misma escala que las curvas de campo, con el objeto de que el origen de la familia de dichas curvas, se pueda colocar en el primer punto P_1 correspondiente al origen de las curvas de dos capas, aplicadas en la primera etapa.

Este método se puede hacer extensivo a problemas de 4 y 5 capas, aplicando el criterio descrito.

Este sistema es rápido y efectivo, tiene la ventaja de que no requiere más que el uso de las curvas teóricas de dos capas.

De los métodos gráficos destaca el método de ADEL R. ZOHDY, para la interpretación de curvas tipo A y H. La interpretación correcta de estos dos tipos de curvas, depende de la determinación de la resistividad de la segunda capa, la cual puede conocerse cuando se dispone de otros datos, por ejemplo: registros eléctricos o bien mediante un sondeo paramétrico efectuado cerca de un pozo cuya litología se conoce; se puede usar también las curvas tipo de dos capas.

Todos los métodos descritos, son muy útiles para interpretar curvas de campo, sin embargo, el especialista debe decidir la aplicación de cada técnica de acuerdo con la naturaleza del problema a resolver.

Los métodos empíricos son recomendables para hacer interpretaciones preliminares en el campo, lo que permite modificar y afinar los programas exploratorios, ya sea que se requiera profundizar más en las medidas, desplazar algunos sitios de sondeo, incrementar la densidad de puntos de observación, etc.

Cuando se obtienen curvas que se adaptan a las teóricas, la interpretación resulta automática, ya que por simple superposición se obtienen los parámetros requeridos, que son las resistividades y espesores de las formaciones incluidas en las medidas.

Tratándose de proyectos de Ingeniería en que los estudios son someros normalmente las interpretaciones son sencillas.

A favor del método científico que requiere el empleo de curvas patrón, puede decirse que cuando se obtienen curvas que se adaptan a las teóricas, la interpretación es bastante aceptable.

En contra del método, puede afirmarse que las condiciones de homogeneidad e isotropía, que supone la teoría para desarrollar las fórmulas matemáticas, nunca se satisfacen en la práctica, razón por la cual en el 75 ú 80% de los casos; las curvas de campo nunca se ajustan exactamente a las teóricas.

Con respecto a los métodos empíricos y gráficos, éstos son el resultado de una serie de experiencias, durante muchos años, razón por la cual han sobrevivido a las críticas de muchos investigadores. En contra de ellos, puede argumentarse que no especifican claramente los principios o leyes físicas en que se basan, por lo que sólo un geofísico experimentado puede saber cuando se aplican.

En general, las profundidades obtenidas por el método de superposición de curvas teóricas, pueden no corresponder a la realidad por un motivo principal que es la anisotropía de las formaciones.

"Interpretación mediante programación a base de computadoras"

El procesamiento de los datos de campo, mediante programas resulta de utilidad práctica, cuando el problema a resolver lo justifica tanto desde el punto de vista económico como de la naturaleza del problema.

Existen varios tipos de programas elaborados para diferentes dispositivos de electrodos, Wenner, Schlumberger, bipolo-dipolo, axial, etc.

En general, la entrada del programa consiste de parámetros de un modelo estratificado, el cual considera el número de capas E , las resistividades R y espesores H . La salida del programa proporciona resistividades aparentes en función de espaciamentos de electrodos,

calculados en 6 puntos de muestreo por década de espaciamentos e igualmente espaciados a lo largo de la escala logarítmica.

El número de espaciamentos debe ser suficiente, para definir la curva en su totalidad.

"Interpretación de secciones Transversales"

Los métodos descritos para la interpretación de curvas de resistividad de sondeos verticales, se basan en una supuesta uniformidad lateral de las capas atravesadas. Esta suposición sin embargo, no se cumple siempre en la realidad, ya que comunmente existen algunas variaciones laterales, dignas de tomarse en cuenta.

Cuando los cambios laterales son graduales, no provocan serias modificaciones en la interpretación de las curvas.

Sin embargo, tratándose de cambios bruscos, por ejemplo: en diques, fallas, etc; es conveniente la aplicación de otra técnica para detectar dichos cambios. La técnica operativa consiste en desplazar el conjunto de electrodos junto con el instrumento, manteniendo el mismo espaciamiento; el sistema se desplaza a lo largo de una línea previamente seleccionada, donde se supone la existencia de contactos verticales como diques, fallas u otra estructura similar.

Generalmente, las secciones transversales se aplican a modo de reconocimientos preliminares, para la localización de diques, fallas, cauces sepultados, zonas mineralizadas, etc.

Se pueden usar cualesquiera de los arreglos utilizando en sondeos verticales, sin embargo, los datos obtenidos con cierto tipo de arreglos, son más fácilmente interpretados.

Generalmente, entre menor sea el número de electrodos móviles, serán mejores los datos obtenidos. Por ejemplo: si uno o dos de los electrodos se colocan muy distantes del resto, lo que equivale a considerarlos en el infinito, la complejidad de los datos de resistividad obtenidos disminuye y además se requiere menos personal.

Normalmente se usan los arreglos Schlumberger y Wenner o también los conocidos como semi-Schlumberger, que consiste en colocar un electrodo de corriente muy alejado del sistema de medición, arreglo similar al empleado en el método de "relaciones de caídas de potencial", en el arreglo semi-Wenner un electrodo de corriente y uno de medida, se colocan muy distantes de la línea que se estudia.

La interpretación de las gráficas obtenidas con este procedimiento es de carácter cualitativo; los cambios estructurales se manifiestan en las gráficas como cambios en las resistividades; en pocos casos se

requiere determinar cuantitativamente las resistividades. Es importante, sin embargo, conocer la respuesta de los diversos arreglos a los diversos tipos de estructuras.

En general se puede recurrir a dos procedimientos para la interpretación de los perfiles eléctricos obtenidos, a saber:

1o.- Mediante contornos de isoresistividades correspondientes a diferentes profundidades. El análisis de estas curvas permite delimitar zonas de baja, media y alta resistividad que corresponden a diferentes condiciones geológicas y a diferentes profundidades.

2o.- Pórfiles teóricos de resistividad. Los contactos verticales o inclinados que se buscan, pueden ser localizados con el auxilio de perfiles teóricos calculados para diferentes modelos geológico-estructurales, por ejemplo: diques, fallas, etc., cuya resistividad contrasta notablemente con el medio encajonante.

Cook y Van Nostrand desarrollaron un catálogo de perfiles para cavidades semiesféricas en calizas.

**CAPITULO IV. EJEMPLOS PRACTICOS DE APLICACION, CON
LAS INDICACIONES PARA CADA UNO DE:**

IV.1. ESTUDIO DEL SUBSUELO PARA DETECCION DE CAVERNAS

IV.2. ESTUDIO PARA LA CIMENTACION DE UN PUENTE

**IV.3. ESTUDIO PARA LA LOCALIZACION DE AGUAS
SUBTERRANEAS**

EJEMPLOS DE APLICACION PRACTICA

IV.1. Estudio de Geotecnia para la localización de cavernas

Proyecto	Construcción de la Escuela No. 117
Constructor	Asociación Mexicana de Distribuidores Ford, A.C.

Localización del proyecto. El terreno donde se sitúa la escuela, se localiza en el Fraccionamiento Lomas Verdes, Estado de México.

Descripción del área: La zona donde se ubica el terreno, corresponde a la porción occidental de la Cuenca del Valle de México, cuyo aspecto fisiográfico es el de una serie de lomerios; el hecho mas sobresaliente en la zona es la existencia de gran cantidad de cavernas y zonas alteradas, originadas por antiguas explotaciones de minas de arena.

Estas zonas minadas, abundan en Tecamachalco, La Herradura, Lomas Verdes, Satélite, Villa Alvaro Obregón, Santa Fé, etc. En todos estos lugares existen fraccionamientos construidos sobre los lomerios citados, los cuales se formaron debido a una potente acumulación de productos piroclásticos, que se depositaron al pié de focos volcánicos, formando un depósito conocido como formación Tarango; esta formación está constituida principalmente por arenas, materiales piroclásticos, cenizas, sedimentos fluviales, brechas, tobas, pómez, etc.

Específicamente en el sitio del proyecto, el depósito superficial, consiste de productos piroclásticos empacados en arenas.

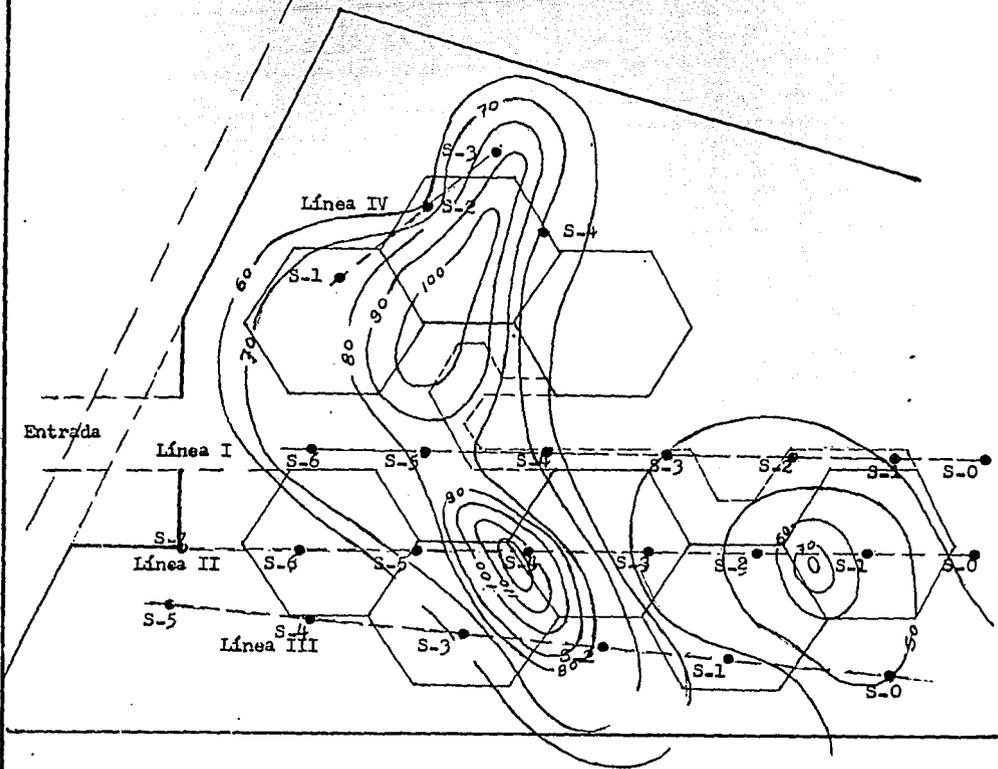
Planteamiento del problema y metodología empleada: Al iniciarse las excavaciones para desplantar la cimentación de la escuela, se encontró una pequeña oquedad, que pudiera representar el inicio de una caverna, encontrándose el material completamente suelto, lo que hizo pensar en la existencia de más cavernas en el resto del terreno.

De acuerdo con lo anterior, se programó una serie de sondeos geoelectricos, localizados a lo largo de 4 secciones; sobre las líneas I, II y III, se hicieron 21 sondeos, ya que es la zona donde se sitúa la planta de la cimentación; los sondeos se hicieron a 15 m de profundidad, tomando lecturas a 1, 2, 5 y 10 m; el dispositivo empleado fué el Schlumberger.

En previsión de que la zona estuviera muy alterada, simultáneamente se estudió el terreno adyacente, como una segunda alternativa con los resultados que a continuación se describen:

Las láminas IV.1.1 y IV.1.2, muestran las plantas con los contornos de isorresistividades, a una profundidad de 2 m; correspondientes a las alternativas 1a. y 2a.

Las láminas IV.1.3 y IV.1.4, muestran los perfiles isorresistivos a 10



Escala 1:250

• S.E.V.



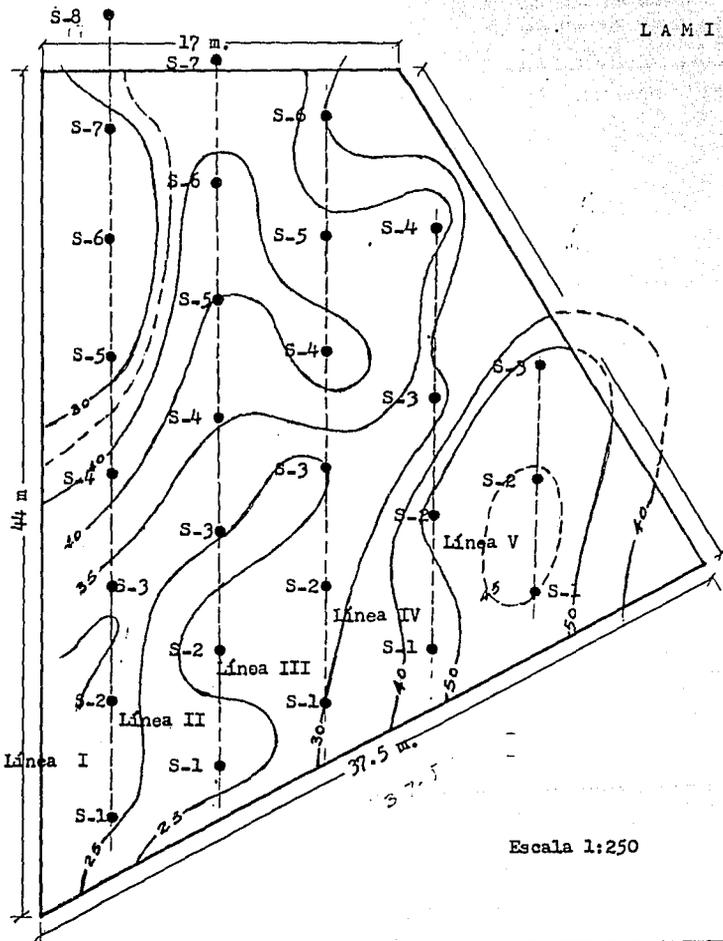
Contornos isoresistivos.

FACULTAD DE INGENIERIA.

U N A M	T E S I S P R O F E S I O N A L	
	D E T E R M I N A C I O N D E L A S C A R A C T E R I S T I C A S D E L S U B S U E L O , P A R A L A C I M E N T A C I O N D E E S T R U C T U R A S , P O R M E T O D O S G E O F I S I C O S S I M I C O Y E L E C T R I C O .	
	C A R L O S R E N D O N G .	M E X I C O , D . F .

PLANTA DE LOCALIZACION DE LA SEGUNDA ALTERNATIVA.

L A M I N A IV-1.2



Escala 1:250

● S.E.V.



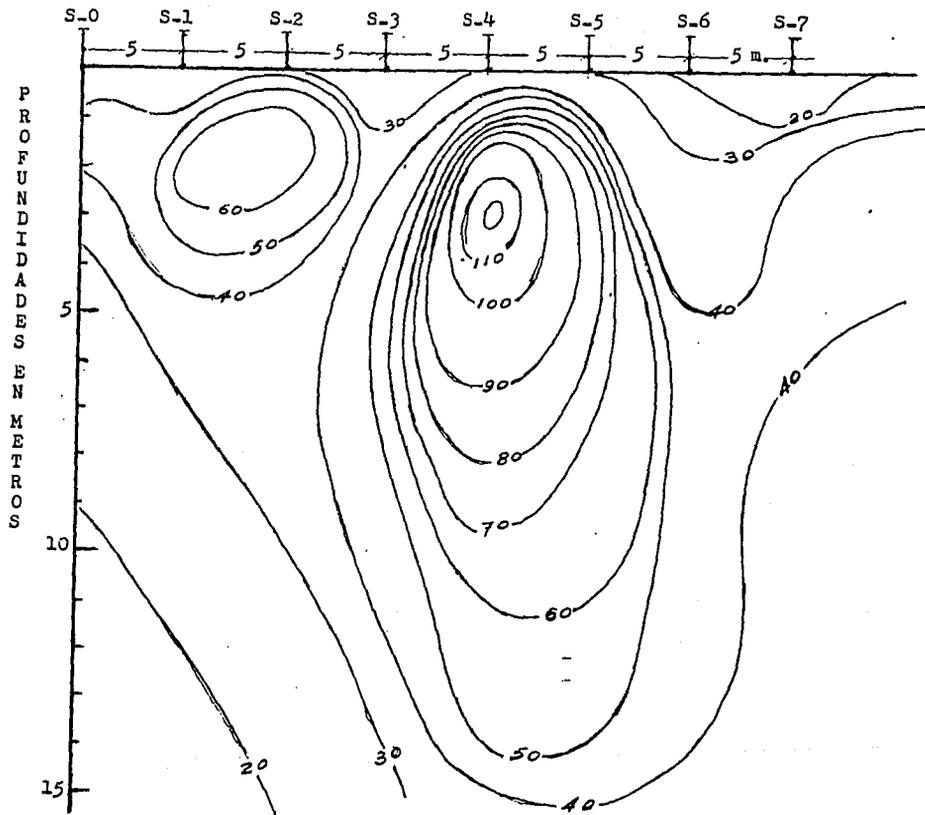
Contornos isoresistivos en ohm-m.

FACULTAD DE INGENIERIA.

U TESIS PROFESIONAL

N DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMICO Y ELECTRICO.

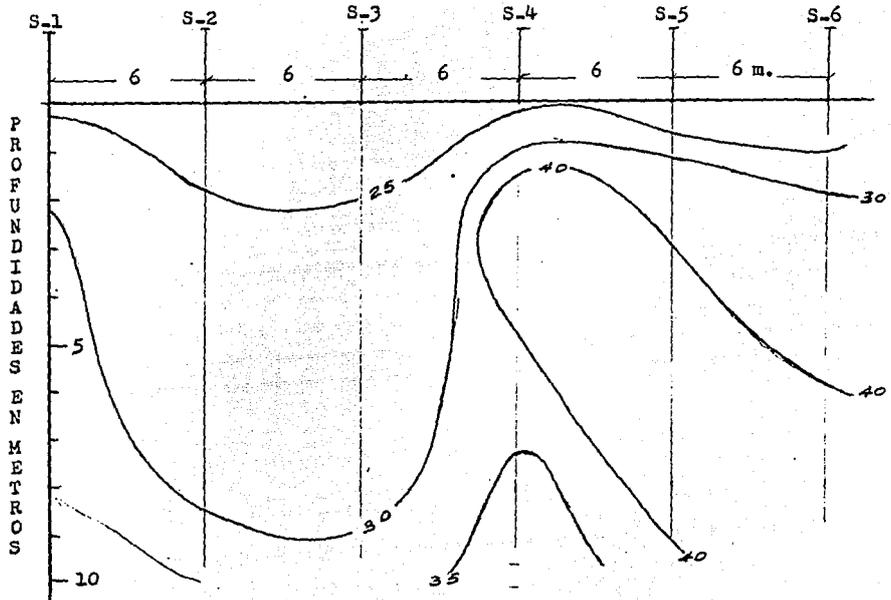
M CARLOS RENDON G. MEXICO, D.F.



Contornos isoresistivos en ohms/m.

FACULTAD DE INGENIERIA.	
U N A M	TESIS PROFESIONAL
	DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMICO Y ELECTRICO.
	CARLOS RENDON G. MEXICO, D.F.

SEGUNDA ALTERNATIVA. SECCION A LO LARGO DE LA LINEA III.
 INTERVALO ENTRE CONTORNOS ISORESISTIVOS. - 5 ohms/m.



FACULTAD DE INGENIERIA.	
U N A M	TESIS PROFESIONAL
	DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUESUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMICO Y ELECTRICO.
	CARLOS RENDON G. MEXICO, D.F.

m. de profundidad.

Los resultados se aprecian claramente, en el perfil de isorresistividades (Lámina IV.1.3), en el cual se manifiesta la zona más alterada debajo del S-4 a una profundidad máxima de 3 m; las resistividades varían en este perfil de 30 a más de 110 ohms-m. En cambio, en el perfil de la Lámina IV.1.4 (2a. alternativa), puede apreciarse la diferencia, ya que en este caso no se pone de manifiesto ninguna anomalía.

Estas mismas conclusiones se obtienen después de analizar las plantas (Lámina IV.1.1 y IV.1.2), que muestran los contornos de isorresistividades; en el caso de la alternativa, se aprecia claramente la zona más perturbada, coincidiendo con el S-4; a la altura de los S-1 y S-2 de la línea II, así como en la línea IV, se aprecian pequeñas anomalías, sin embargo, es importante aclarar que estas zonas quedan fuera de la planta de cimentación.

Con base en estos resultados, se recomendó cambiar el proyecto al terreno adyacente (2a. alternativa), en virtud de que prácticamente no presenta ningún peligro para la estabilidad de la estructura que se pretende desplantar o sea la escuela.

IV.2. Estudios de Geotecnia

Proyecto: Construcción de puente sobre el arroyo Cuautla, Mor.

Localización del proyecto. Cruce del arroyo Cuautla, ubicado en el Km. 0+740 del libramiento que tiene como origen el entronque Cuautla; en este lugar se ha proyectado la construcción de un puente, para salvar un claro de 70 ms.

Objetivo del estudio: Se desea conocer el espesor del colchón de sedimentos aluviales, depositados en el cauce del arroyo, con el fin de determinar la profundidad a la que deberán desplantarse las pilas centrales del puente en proyecto.

Descripción geológica del área: El área donde se ubica el sitio del proyecto, se encuentra cubierta por una formación conglomerado, que descansa sobre rocas ígneas principalmente clásticos de naturaleza basáltica y basaltos entrelazados con productos piroclásticos.

El cauce del arroyo ha sido labrado principalmente en el conglomerado, poniendo al descubierto los clásticos y la roca basáltica.

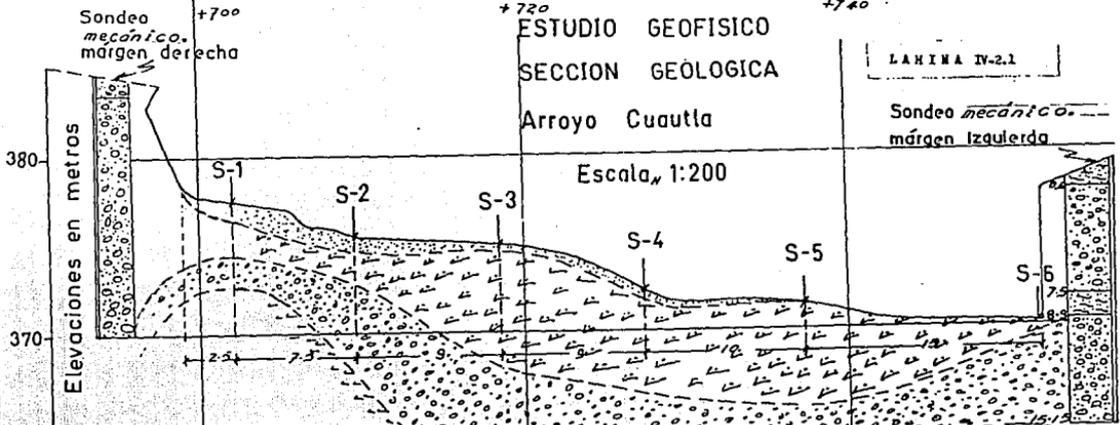
Para resolver el problema inicialmente se programó una sección sísmica de refracción, sin embargo, este método sólo sirvió para conocer el espesor de los sedimentos aluviales, que resultó ser muy delgado; a mayor profundidad el método no funcionó, por dos razones, a saber:

10. Falta de espacio, para incrementar la distancia entre la fuente de energía y el geófono.

ESTUDIO GEOFISICO
SECCION GEOLOGICA
Arroyo Cuautla

LAMINA IV-2.1

Sondeo *mecánico* -
márgen Izquierda



- Simbologia
- Aluviales
 - Limos
 - Conglomerado
 - Clásticos (empacados en arenas)
 - Estrato firme (basalto)

S-1, S-2 ... S-E-V

FACULTAD DE INGENIERIA	
U N A M	TESIS PROFESIONAL.
	DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, POR METODOS GEOFISICOS - SISMICO DE REFRACCION Y ELECTRICO - DE RESISTIVIDAD APARENTE.
	CARLOS RENDON G. MEXICO, D. F.

2o. No fué posible obtener lecturas claras en aquellos lugares donde afloran los clásticos.

Por las razones apuntadas, se optó por correr sondeos geoelectricos, a profundidades hasta de 20 m., utilizando para ello un equipo Stratascout, Modelo R-40 de la firma Soil-Test. Se usó el dispositivo Schlumberger entre electrodos.

Como resultado de los dos métodos aplicados, se obtuvo la sección geológica mostrada en la lámina IV.2.1. La cual se correlaciona muy bien con el perfil Litológico de las márgenes de la barranca; en ambos extremos del cauce se hicieron dos sondeos mecánicos; el perfil litológico señalado, se correlaciona muy bien con la sección geológica obtenida.

IV.3. Estudio geofísico para localización de aguas subterráneas

Objetivo y antecedentes: Se pretende captar aguas subterráneas, mediante la perforación de un pozo, existiendo el antecedente de una perforación dentro del predio, la cual se suspendió a 140 m. de profundidad, sin haber encontrado agua. Este lugar ya había sido estudiado por el Banco de México y la S.R.H., desechando completamente la posibilidad de encontrar agua.

La localización del pozo se había hecho por Radiestesia (varita) con los resultados apuntados.

El lugar se localiza al N-NE del poblado Ezequiel Montes Qro., a un lado de la carretera que va a Villa Progreso y Cadereyta; antes de llegar a Villa Progreso se toma una desviación a Boxasni, por un camino de terracería que termina en el predio.

El estudio consistió de un sondeo geoelectrico, utilizando un equipo Gish-Rooney que opera con corriente directa conmutada, el sondeo se corrió junto al pozo, a una profundidad de 370 m. utilizando el dispositivo Schlumberger.

La interpretación de la curva de campo pudo hacerse por el método de superposición, con la curva teórica K Q - 1 - P del catálogo Orellana - Mooney, con los resultados siguientes:

Relación de resistividades: 1:10:2.5

Relación de espesores: 1:5:10

Finalmente se obtuvo

<u>Resistividades</u>	<u>Profundidades a los contactos</u>
$R_1 = 60 \text{ Ohms-m}$	$H_1 = 19 \text{ M.}$
$R_2 = 600 \text{ Ohms-m}$	$H_2 = 95 \text{ M.}$
$R_3 = 150 \text{ Ohms-m}$	$H_3 = 190 \text{ M.*}$

- * Esta profundidad se determinó completando con el conocimiento de la Geohidrología Regional, en virtud de que la curva patrón no permite determinar la profundidad del agua que es de 190 m.

Ahora bien, el contacto que interesa en este caso es el último o sea 190m., que corresponde indudablemente a la presencia del agua, lo cual se manifiesta claramente en la curva, pues a esa profundidad empieza a declinar la resistividad en forma clara y sistemática.

Estos resultados son compatibles con el marco geohidrológico regional, si se toma como base la profundidad a la que se encuentra el agua en Ezequiel Montes, que es de 120 m.; siendo el desnivel entre ambos lugares es de 80 m.; por lo que de antemano era de esperarse, encontrar el agua aproximadamente a 200 m. de profundidad, que fue la idea que prevaleció antes de realizar el estudio.

Con base en estos resultados se recomendó aprovechar los 140 ms. que se tenían perforados y profundizar el pozo, lo cual se hizo con los resultados siguientes.

A 190 m., se encontró el contacto con la roca basáltica encontrándose el agua a 202 m.; sin embargo, al profundizar el pozo hasta 240 m., el nivel del agua se estabilizó a los 190 m., tal y como se había previsto. Indudablemente el agua se encuentra almacenada en el basalto, el cual por estar fracturado presenta una gran permeabilidad de tipo localizado.

En la gráfica IV.3.1, se resumen los resultados descritos.

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

ESTUDIO GEOFISICO

GRAFICA IV-30

Lugar.-Predio La Ján.
Municipio.-EZEQUIEL-MONTES, QRO.
Fecha.-Agosto 7 de 1975

Curva teórica KC-1-P.
Catálogo Crellana-Mooney.

Relacion de resistividades: 1:10:2.5 Espesores: 1:5:10

RESISTIVIDADES

PROFUNDIDADES A LOS CONTACTOS

R₁ 60 Ohm-M.
R₂ 600 Ohm-M.
R₃ 150 Ohm-M.

H₁ 19 M.
H₂ 95 M.
H₃ 190 M.

FACULTAD DE INGENIERIA.

U TESIS PROFESIONAL

DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO, PARA LA CIMENTACION DE ESTRUCTURAS, -- POR METODOS GEOFISICOS SISMICO Y ELECTRICO.

M CARLOS RENDON G. MEXICO, D.F.

Es importante observar, que en la gráfica del sondeo, el máximo, ocurre precisamente alrededor de los 180 m., por lo que el criterio de G-Roohey, resulta válido para encontrar el contacto al agua, obteniéndose un error del orden de 0.9%, lo cual resulta bastante aceptable, sobre todo si se tiene en cuenta que este método es empírico. Argumento que esgrime la Escuela Europea para rechazarlo, lo cual no se justifica.

Lo mismo puede decirse del método de Lancaster-Jones, con el cual se obtienen los mismos resultados, que con el método científico.

CAPITULO V CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES

Debido al enorme progreso de la tecnología electrónica, actualmente se dispone de instrumentos de medición ultrasensibles, con circuitos modulares de estado sólido contruidos a base de transistores, con los cuales es posible obtener en Geofísica eléctrica rangos de medida del orden de 0.00002 hasta 100 volts de potencial y resistividades desde 0.002 hasta 25'000 ohms-metro o más, con precisiones en las lecturas de 2%.

En Sismología de Refracción, las velocidades de transmisión de las ondas elásticas, se miden hasta en decimal de milésimos de segundo.

Una ventaja adicional de los instrumentos es que los circuitos no incluyen partes móviles, vienen bastante compactos y resistentes, por lo que resultan fácilmente transportables por caminos de terracería y brechas en malas condiciones de tránsito.

La característica más sobresaliente de los métodos descritos es que permiten controlar la profundidad de investigación, por lo que su poder de resolución es similar, además se complementan entre sí, por las razones ya apuntadas.

En estudios geohidrológicos de grandes cuencas, al nacer el concepto de geometría y características hidrodinámicas de los embalses

subterráneos, la geofísica aplicada se adaptó paralelamente a esta evolución, desempeñando a la fecha un papel determinante para delimitar la geometría de los acuíferos, su espesor, fronteras, etc., lo cual es posible realizar, mediante la correlación de sondeos mecánicos con sondeos piloto o paramétrico. Esto permite correlacionar las resistividades eléctricas de los diferentes estratos, así como los rangos de las velocidades de transmisión de las ondas sísmicas.

En Mecánica de Suelos, resulta todavía más práctica y económica la aplicación de los métodos descritos, como ya se explicó en el capítulo correspondiente.

Por otra parte, el aspecto económico que plantea todo estudio de carácter geofísico no se sale de los marcos comunes de cualquier programa de investigación, argumentándose muchas veces que la aplicación de la geofísica resulta costosa, lo cual no siempre es cierto, como ya se demostró con los ejemplos de aplicación, sobresaliendo el que se refiere a la perforación de pozos, en cuyo caso un estudio geofísico, prácticamente resulta indispensable, pues su costo es del 1 al 2% del valor que representa la inversión total.

En estudios de apoyo para proyectos de mayor envergadura, esta proporción se reduce más todavía, llegando a ser mínima en relación con los costos de las obras. Lo más importante, es el hecho de que el éxito de cualquier estudio está supeditado como ya se anotó a la confianza y diálogo mutuos entre el Ingeniero Civil y el Ingeniero

Geofísico, las relaciones entre ambos profesionistas deben apoyarse siempre con el objeto de conjugar puntos de vista divergentes.

La mayor satisfacción que puede recibir el Ingeniero Geofísico, durante el desempeño de su profesión es culminar con éxito sus investigaciones, como se demostró con los ejemplos de aplicación, presentados en el presente trabajo, los cuales resultaron compatibles con las condiciones encontradas al realizar las obras, objeto de los estudios realizados.

BIBLIOGRAFIA

1. Bison Instruments Inc.- "Nomograph for depth to first 2 interfaces for any system of units (feet, meter, etc) as used in seismic graph. Minneapolis Minn.-U.S.A.
2. Bison Instruments Inc., "Seismic depth determination method, used by Bureau of public roads".- Technical Memo. No. 101.-U.S.A.
3. Bison Instruments Inc., "Velocity computer for use with Enhancement Seismograph Model 1501 and 1570-C.-U.S.A.
4. Bhattacharya and Patra., "Direct current geoelectrical sounding". Principles and interpretation.-Elsevier Publishing Co.
5. Buffete de Geofísica Modular.- Varios estudios realizados en territorio Nacional.- Playa Caleta 431-Bis.- México 13 D.F.
6. Gerhard Dr. "Applied Geophysics". Edited by Henz Beckman.-John Wiley & Sons.
7. George V Keller and F.C. Frischknecht.- "Electrical Methods in Geophysical prospecting".- Pergamon Press.

8. Grant F.S. and West G.F.- "Interpretation Theory in applied geophysics".
Mc. Graw Hill Book Co.
9. Harold M. Mooney.- "Handbook of Engineering Geophysics", published by
Axel M Fritz.- Bison Instruments Inc.-U.S.A.
10. Howard E Barnes "Earth resistivity interpretation, for sand and gravel
prospecting".- Michigan State Highway Department.
11. J.J. Jakosky, Sc. D.- "Exploration Geophysics"- Trija Publishing Co. Los
Angeles, Ca., U.S.A.
12. Orellana-Mooney.- 2 Master curves for V.E.S.
13. R.E. Sheriff.- "Encyclopedic Dictionary for exploration geophysics" edited
and publishing by S.E.G.-Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
14. Raymond Maillet.- "The fundamental equations of electrical prospecting"
Geophysics, volume XII, No. 4.- October 1947
15. S.E.G.- "Seismic refraction prospecting" Edited by Albert M. Musgrave,
Mobil Oil Co.- U.S.A.

16. Soiltest Inc.- "Earth resistivity manual.- Evanston, Ill.- U.S.A.
17. Telford, Geldart and Keys "Applied Geophysics"-Cambridge University Press.- U.S.A.
18. William D. Cooper "Electronic Instrumentation and measurement techniques".- Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, N.Y.-U.S.A.