

SÍSMICA DE REFRACCIÓN

METODOLOGIA

Las ondas P o longitudinales (ver Figura 1) tienen la ventaja de que son las que se propagan con mayor velocidad siendo, por lo tanto, las de mayor interés cuando se utilizan métodos que, como el de la sísmica de refracción, están basados en la obtención de las primeras llegadas de las ondas a los sensores.

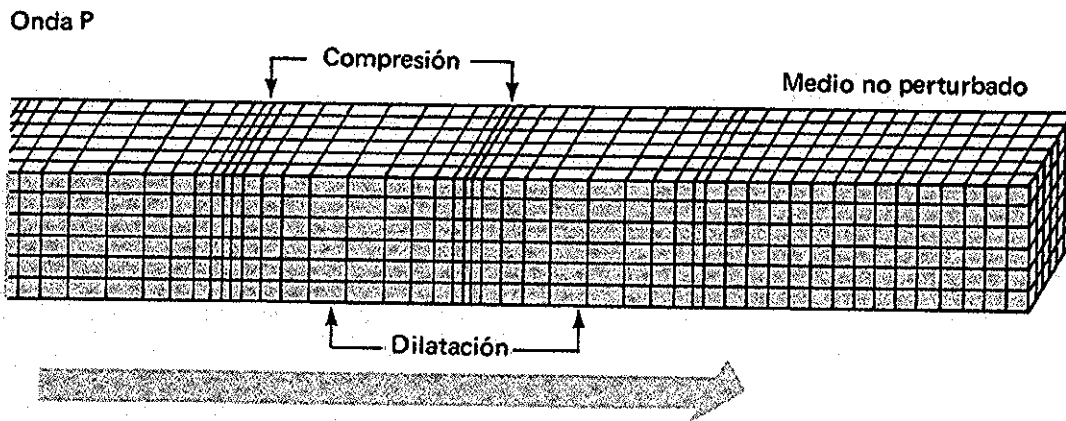


Figura 1: Onda Longitudinal o P

La Figura 2 muestra, para un modelo bicapa, las posiciones sucesivas del frente de ondas longitudinales generado mediante impacto o explosión en la superficie del terreno cuando la velocidad de propagación es mayor en el estrato inferior que en el superior. El rayo directo viaja horizontalmente por la parte superior de la primera capa a una velocidad V_1 y el rayo refractado sigue la trayectoria AB CD definida por el ángulo de refracción crítica $\theta_c = \text{arc sen } V_1/V_2$. De esta fórmula se desprende que es necesario que sea $V_2 > V_1$ para que exista dicho ángulo, se pueda producir el fenómeno de refracción crítica y las primeras llegadas detectadas en la superficie del terreno contengan información sobre las características y profundidad a las que se encuentra el segundo estrato. Esta es una de las mayores limitaciones que presenta esta técnica a la hora de caracterizar un sistema multicapa, pues exige que aumente continuamente la rigidez de los estratos con la profundidad. No obstante, en muchos casos en los que se trata de determinar el espesor de zonas alteradas de un macizo rocoso o la profundidad a la que se encuentra la roca por debajo de un relleno cuaternario, puede constituir la técnica ideal para ser utilizada. También puede proporcionar óptimos resultados a la hora de determinar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático en el terreno ya que dicho nivel constituye un refractor muy característico con velocidad de propagación de 1500 m/s (velocidad de propagación del sonido en el agua). En tales casos, el grado de error en la estimación de profundidades puede llegar a ser incluso inferior al 10% de los realmente existentes.

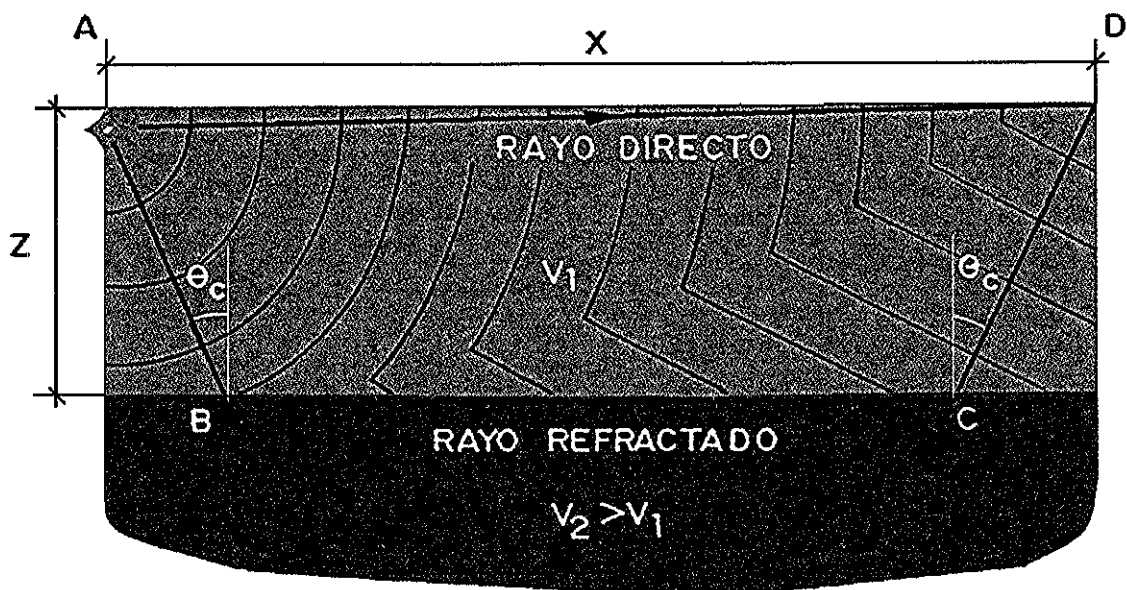


Figura 2: Angulo crítico de refracción

Existen diferentes técnicas de interpretación. En general todas ellas pasan por representar en un diagrama tiempo-distancia de los sensores a la fuente de energía, el instante de la primera llegada del tren de ondas generado a cada uno de los sensores utilizados. Los resultados de la interpretación deben dar lugar a un perfil del terreno donde se indique la profundidad de los distintos refractores y la velocidad de propagación asociada a cada uno de ellos. En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX al aplicar el método del "plus-minus" para interpretar dos perfiles yuxtapuestos de sismica de refracción realizados mediante extendimientos de 12 geófonos separados 5 m entre sí. El objetivo era estudiar la estabilidad de las laderas de un embalse.

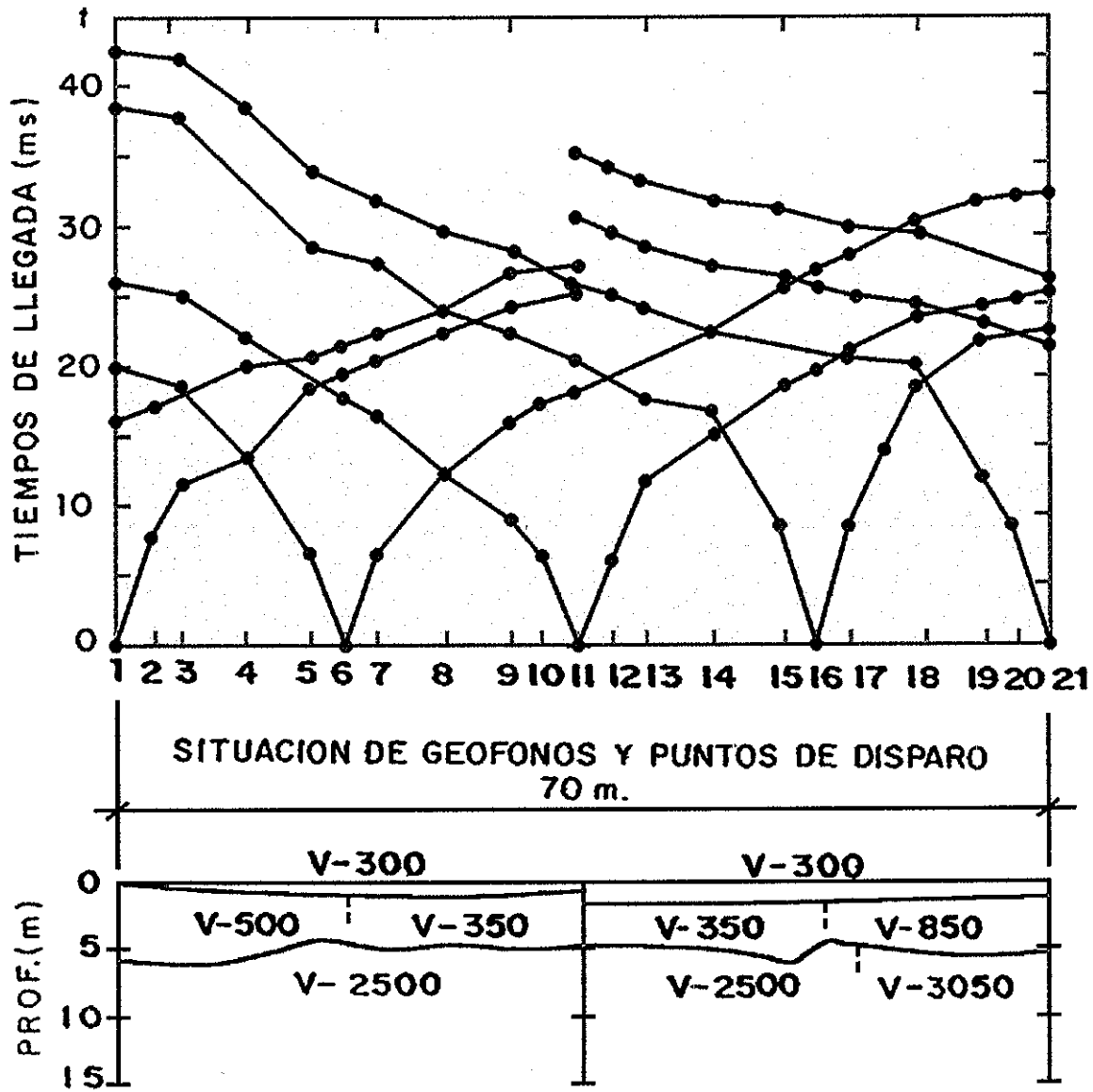


Figura 3: Perfil de velocidades

Además de proporcionar información sobre la naturaleza del sustrato rocoso y sus cambios laterales, la sísmica de refracción permite estimar aproximadamente el módulo de elasticidad de las formaciones investigadas, el grado de fracturación de la roca y su ripabilidad.

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

$$E = v_p^2 \rho [(1 + \nu)(1 - 2\nu)] / (1 - \nu)$$

siendo ρ la densidad del material.

CROSS-HOLE Y DOWN-HOLE

METODOLOGIA

Ambas técnicas se han desarrollado fundamentalmente con el fin de determinar la velocidad de propagación de las ondas tangenciales o S (ver Figura 1).

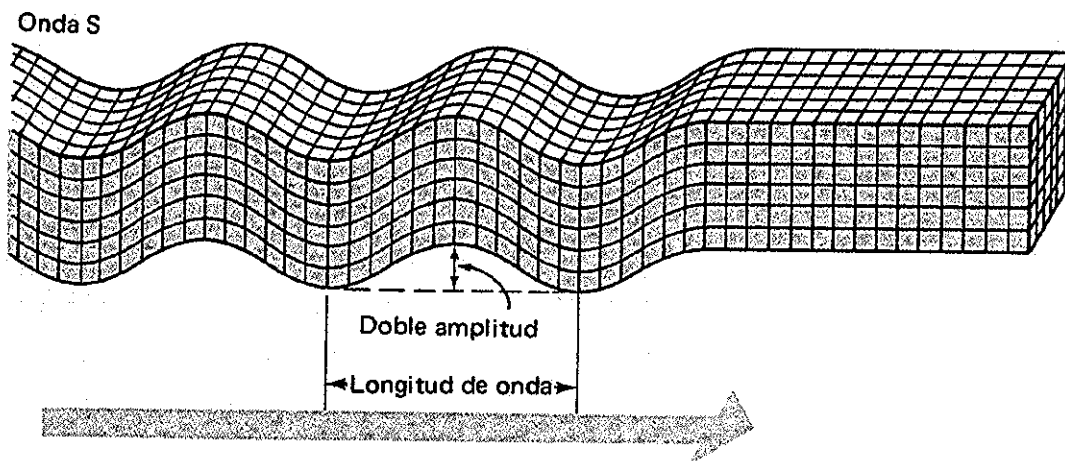


Figura 1: Onda Tangencial o S

El tipo de movimiento generado en el suelo por la propagación de este tipo de ondas afecta fundamentalmente a su esqueleto sólido y proporciona información de gran valor sobre su capacidad de deformación frente a los esfuerzos tangenciales.

Para el estudio del comportamiento de las cimentaciones de máquinas vibratoria se necesita conocer las constantes de muelle con que reacciona el terreno en los distintos modos de vibración de las bancadas. En todos los casos, dichas constantes incorporan en su definición el módulo elástico de deformación tangencial G del terreno:

$$G = \rho v_s^2$$

donde v_s es la velocidad de propagación de las ondas tangenciales y ρ la densidad del terreno incluyendo su contenido en agua. Pero no sólo en dichos casos tiene aplicaciones geotécnicas la determinación de la velocidad v_s . En la última versión del Parte 5 del Eurocódigo 8 para el diseño de estructuras se propone ese parámetro como índice básico para caracterizar un determinado emplazamiento y cada vez es mayor el número de correlaciones que aparece en la literatura técnica ligando la velocidad v_s con otros parámetros geotécnicos, tales como el índice N del SPT o la resistencia por punta q_c del penetrómetro estático.

El ensayo "cross-hole" tiene como objeto detectar los tiempos de transmisión de las ondas tangenciales SV (vibración de las partículas del terreno en la dirección vertical) a través de trayectorias horizontales directas entre un punto emisor situado en el interior del terreno y uno o más receptores situados a su misma cota a una cierta distancia. Para ello (ver Figura 2) se sitúa sucesivamente una fuente de ondas, que cizalle verticalmente el subsuelo, a distintas profundidades dentro de un sondeo emisor y se registra el instante de llegada de las ondas tangenciales así generadas a uno o más sondeos.

receptores, que, dependiendo de la rigidez del material a ensayar y de la precisión de los equipos de medida, se suelen situar alineados con el sondeo emisor a distancias comprendidas entre 3 y 10 m. Es fundamental cuidar al máximo la perforación y recuperación de testigos en los sondeos para poder así determinar con la mayor precisión posible el espesor y buzamiento de los distintos estratos y capas encontradas. La testificación geofísica de los sondeos así como la realización sistemática de ensayos SPT a lo largo de sus columnas, constituyen una ayuda valiosísima a la hora de interpretar los registros sísmicos. Otro aspecto de vital importancia que hay que tener en cuenta en el ensayo es el de asegurar el contacto íntimo entre la entubación definitiva de los sondeos, que alojará el equipo de medida, y el terreno mediante mortero o lechada de cemento. En la norma D4428 ASTM se proporcionan indicaciones de gran utilidad que contemplan estos aspectos.

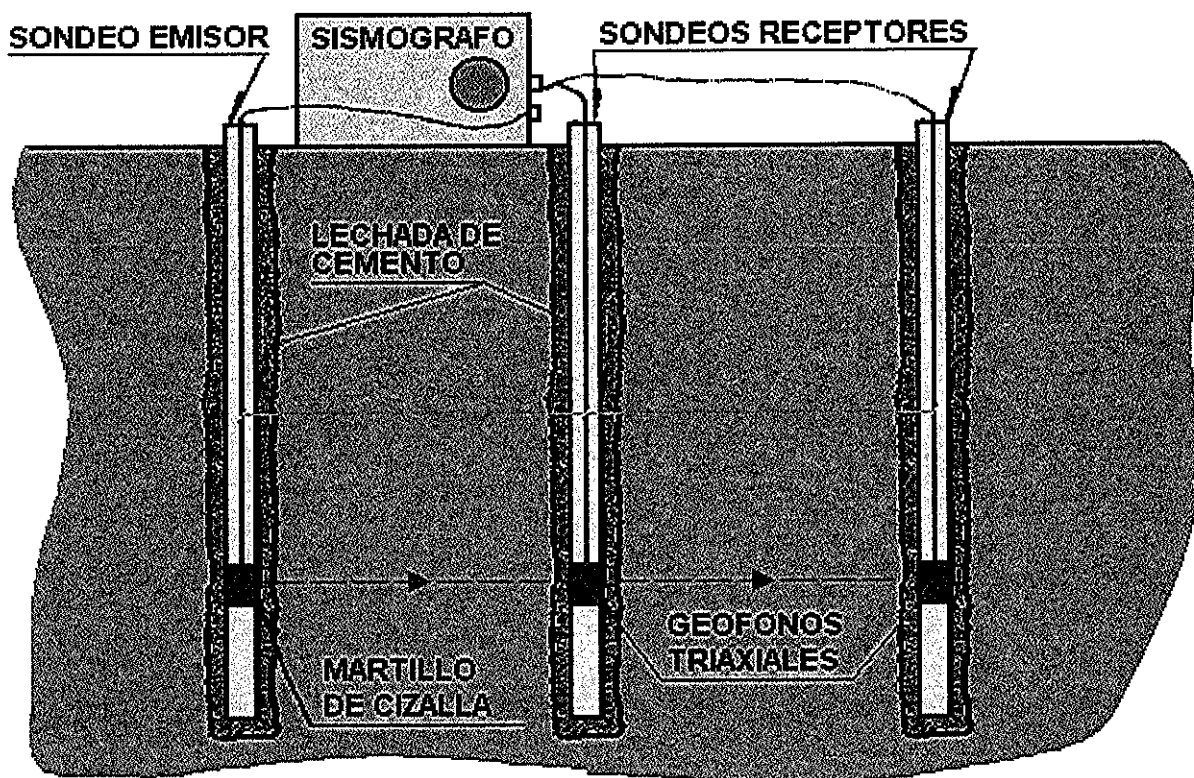


Figura 2: Ensayo Cross-Hole

El ensayo "down-hole" está enfocado fundamentalmente a detectar la velocidad de propagación de las ondas tangenciales SH (vibración de las partículas en la dirección horizontal) en su trayectoria vertical a través de una masa de suelo. El ensayo consiste en generar ondas tangenciales mediante una fuente de energía reversible que produzca un efecto de cizalla horizontal en la superficie del terreno, y en registrar la llegada del impacto a lo largo de un sondeo situado a una distancia comprendida entre 2 y 5 m del foco emisor (ver Figura 3). Al estar la fuente de energía cerca del sondeo receptor, las ondas que interesa detectar se propagarán en una dirección muy próxima a la vertical por lo que es lícito suponer una trayectoria directa desde el foco emisor a los receptores para calcular la velocidad de propagación de las ondas. Frente al ensayo cross-hole presenta la ventaja de que tan sólo exige la perforación de un sondeo para llevar a cabo los ensayos, y el inconveniente de que la energía sísmica que se puede generar mediante

el golpe de una maza o martillo se amortigua rápidamente en el terreno alcanzando una profundidad máxima de 15 a 20 m.

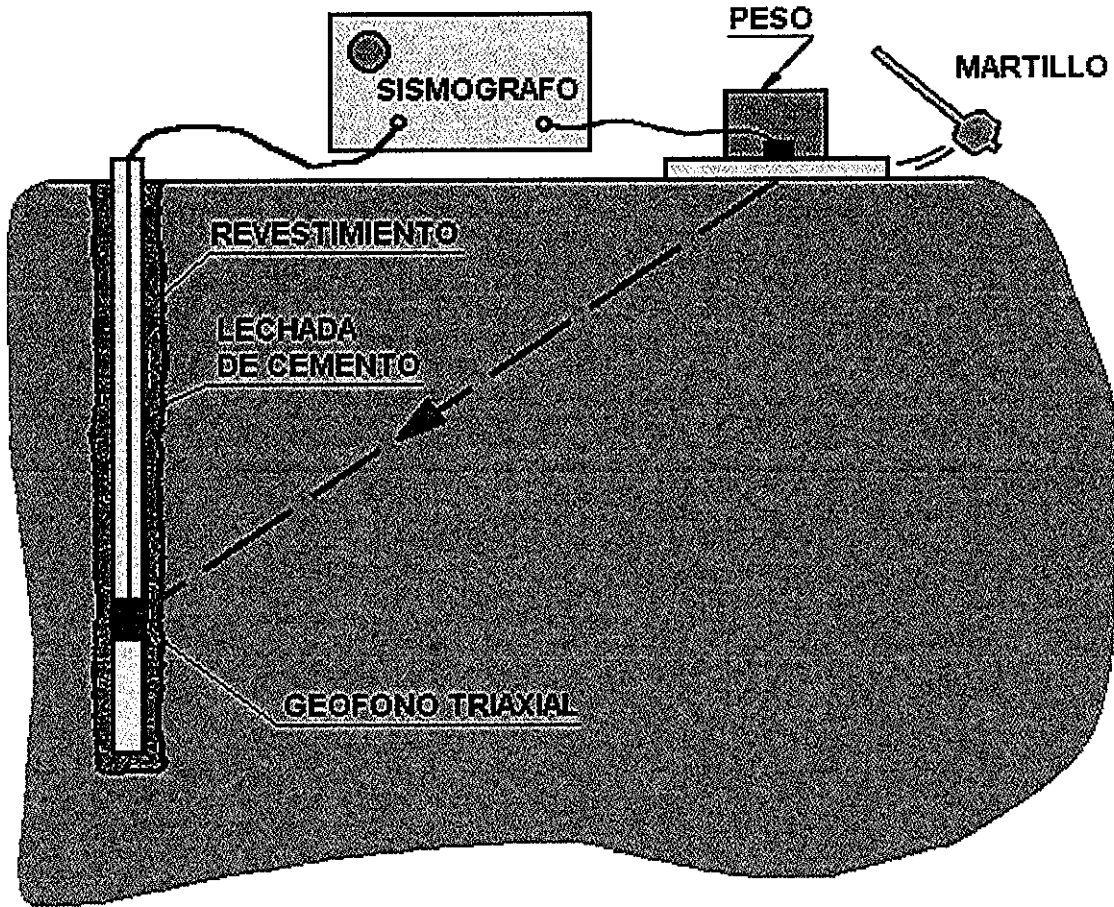


Figura 3: Ensayo Down-Hole

Ambas técnicas vienen siendo utilizadas de manera rutinaria durante los últimos veinte años por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para el estudio de cimentación de distintos emplazamientos y de la deformabilidad de terraplenes, diques de estériles y núcleos de presas de tierra.

RESISTIVIDAD ELECTRICA

METODOLOGIA

Todas las técnicas de resistividad eléctrica (sondeo eléctrico vertical, calicata eléctrica, método de bloques, mis-à-la-masse, etc) se basan en que la distribución del potencial eléctrico alrededor de un electrodo de corriente hincado en el suelo depende de la resistividad eléctrica del terreno que se encuentre a su alrededor. Dicha propiedad, representada por el símbolo " ρ " y expresada en ohmios-metro, es una característica intrínseca al medio en que se determina, de la misma manera que lo es su densidad o permeabilidad al agua.

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

$$\rho = \pi K V/I$$

donde K es un factor geométrico que depende de la manera en la que se dispongan los electrodos.

En la práctica, las medidas se realizan siempre en materiales heterogéneos, por lo que al emplear la fórmula antes descrita se calcula una "resistividad aparente", ρ_a , cuyas variaciones obtenidas a lo largo de un perfil determinado (modificando o manteniendo el valor de K) pueden utilizarse cualitativamente, como indicadores de variaciones existentes en la composición del terreno, o cuantitativamente una vez procesados e invertidos los datos obtenidos *in situ*, para obtener la resistividad real y el espesor de las distintas capas.

Las diferencias entre los distintos métodos de resistividad vienen dadas por la distinta disposición geométrica, entre un método y otro, de los electrodos.

En la Figura 1 se ilustra la disposición de electrodos en el método Dipolo-Dipolo utilizado frecuentemente por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para llevar a cabo calicatas eléctricas manteniendo fija la separación entre electrodos pero moviendo todo el conjunto sobre el área de interés para detectar los cambios laterales de resistividad que puedan existir en un espesor determinado de terreno. De esta manera se obtienen datos suficientes para poder dibujar una seudosección de resistividades aparentes del terreno, uniendo mediante líneas que formen 45° con la horizontal los puntos medios de los dipolos de cada posición. Este método de representación, proporciona únicamente una idea orientativa o cualitativa de cómo varía la resistividad aparente a lo largo del perfil elegido. Es por ello necesario recurrir a otros procedimientos de cálculo tales como el de los Elementos Finitos o Diferencias Finitas, que resolviendo la ecuación de Poisson que rige el fenómeno físico, permiten modificando paso a paso las resistividades reales del terreno, minimizar las diferencias entre resistividades aparentes observadas y calculadas.

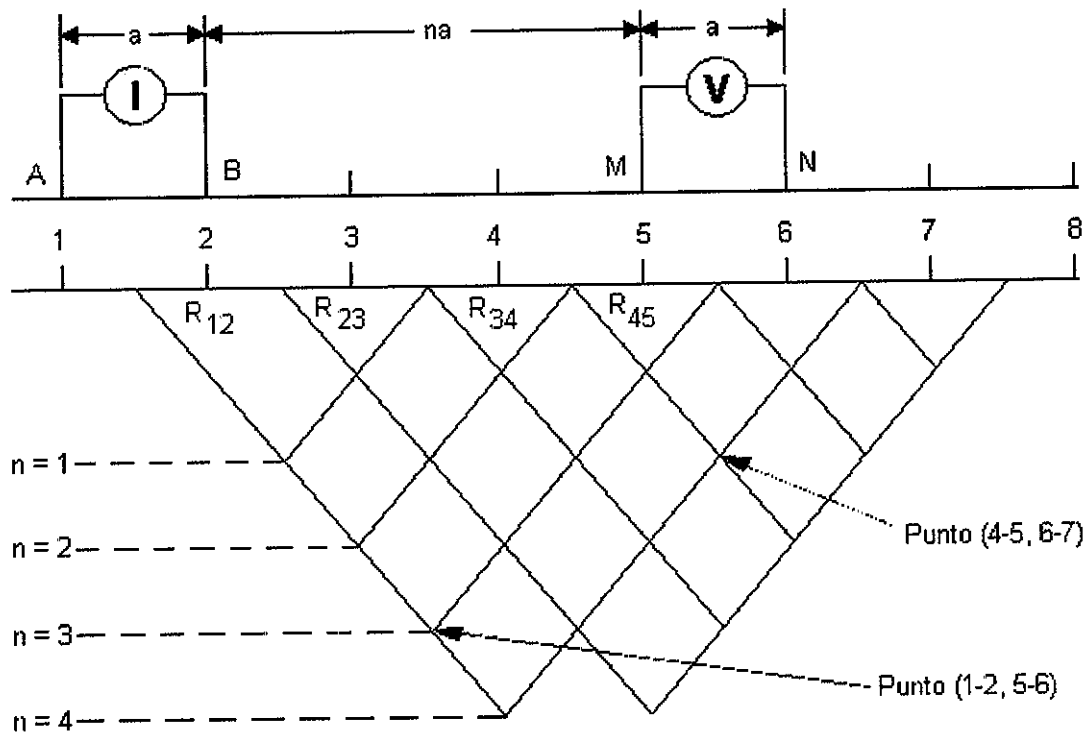


Figura 1: Disposición de electodos para la configuración Dipolo-Dipolo

El equipo utilizado está compuesto de un resistímetro de cinco canales desarrollado por la División de Técnicas Físicas del CEDEX, un conjunto de electodos y las bobinas de cable

Básicamente, el resistímetro del CEDEX es un equipo portátil alimentado por baterías recargables, que le proporcionan una autonomía mínima de ocho horas, constituido por una unidad central y una caja de conexiones.