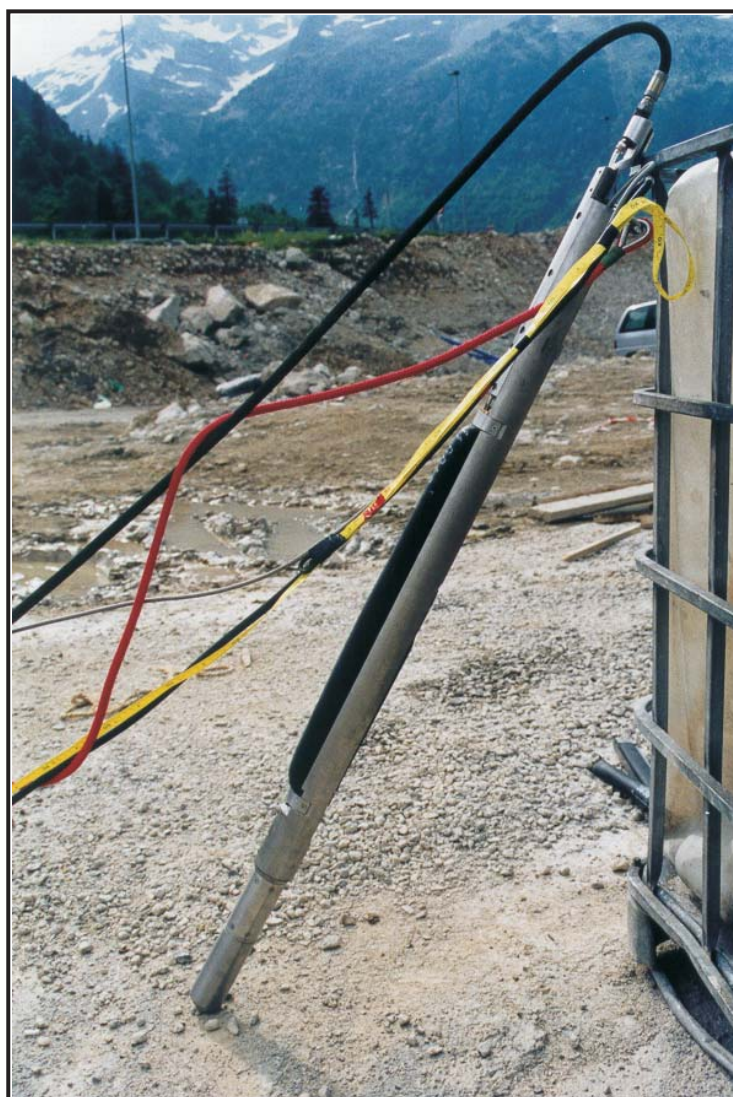


CURSO DE GEOTECNIA PARA INFRAESTRUCTURAS

Comentarios sobre algunos métodos sísmicos aplicados al estudio del subsuelo en el ámbito de la geotecnia.

*Ángel Granda Sanz
Ingeniero de Minas
International Geophysical Technology, S.L.*



Organizan :



**Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A.
CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES**



**Colegio de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos
Andalucía**

CURSO DE GEOTECNIA PARA INFRAESTRUCTURAS

Comentarios sobre algunos métodos sísmicos aplicados al estudio del subsuelo en el ámbito de la geotecnia.

Ángel Granda Sanz
ingeniero de Minas
International Geophysical Technology, S.L.

Figura 1	Relación entre V_p y módulos dinámicos.
Figura 2	Posibles trayectorias seguidas por las ondas sísmicas.
Figura 3	Ejemplo de registro sísmico de 24 canales con indicación de las primeras llegadas de las ondas P.
Figura 4	Diferencias entre las dromocrónicas obtenidas en función del dispositivo de medida empleado.
Figura 5	Esquema de implantaciones sísmicas solapadas, con 24 geófonos y 7 tiros cada una.
Figura 6	Comparación de los resultados de un estudio sísmico de refracción, en función de la metodología de trabajo aplicada.
Figura 7	Ejemplo de detección de zonas karstificadas mediante Sísmica de refracción.
Figura 8	Aspecto general de las ondas S.
Figura 9	Secciones sísmicas de V_p y V_s obtenidas en un medio granítico.
Figura 10	Esquema de ejecución de las medidas en estudios de Tomografía sísmica <i>cross-hole</i> .
Figura 11	Explicación del procesado de los registros en el método de la Tomografía sísmica <i>cross-hole</i> .
Figura 12	Ejemplo de detección de una galería minera mediante Tomografía sísmica <i>cross-hole</i> .
Figura 13	Tomogramas sísmicos <i>cross-hole</i> obtenidos en las zonas de apoyo de las pilas de un viaducto.
Figura 14	Tomogramas sísmicos <i>cross-hole</i> obtenidos antes y después del tratamiento del terreno en una formación de calizas karstificadas.
Figura 15	Explicación de las trayectorias refractadas en las medidas sísmicas <i>cross-hole</i> .
Figura 16	Ejemplo de presentación de los resultados de un estudio sísmico <i>cross-hole</i> .
Figura 17	Ejemplo de registros sísmicos <i>cross-hole</i> convencional, obtenidos con un sistema avanzado (<i>sparker</i> direccional y geófono multicomponente).

Figura 18	Ejemplo de un registro sísmico <i>cross-hole</i> en el cual se observa una primera llegada de ondas S (refractadas) y una segunda llegada (directa).
Figura 19	Ejemplo de presentación de los resultados de un estudio sísmico <i>down-hole</i> .
Figura 20	Ejemplo de registros <i>down-hole</i> en los cuales se manifiestan las ondas tubo.
Figura 21	Registros sísmicos <i>down-hole</i> en los cuales se observa el efecto de la tubería metálica.

CURSO DE GEOTECNIA PARA INFRAESTRUCTURAS

Comentarios sobre algunos métodos sísmicos aplicados al estudio del subsuelo en el ámbito de la Geotecnia

Ángel Granda Sanz
Ingeniero de Minas
International Geophysical Technology, S.L. (IGT)

1. PRESENTACIÓN.

Dentro del abanico de métodos geofísicos aplicables al estudio del subsuelo en el ámbito de la Geotecnia, es evidente que las diversas variantes de los métodos basados en el estudio de las ondas sísmicas son las que han tenido y tienen un mayor protagonismo por la diversidad y por la naturaleza de los problemas que pueden resolver.

En este curso haremos una exposición con acusado carácter práctico respecto a la capacidad resolutive, campos de aplicación y limitaciones de los métodos sísmicos de empleo más frecuente en los estudios geotécnicos. Dentro de esta idea procuraremos apoyar los diversos conceptos que vayamos desarrollando con ejemplos de nuestra propia experiencia, obtenidos en aplicaciones realizadas en diversos proyectos recientes.

La relación general de los diversos métodos sísmicos de aplicación en estudios del subsuelo en ámbitos tan dispares como Geotecnia, Hidrogeología o Prospección de hidrocarburos podría ser la que se indica a continuación :

Método sísmico de refracción

Método sísmico de reflexión

Medidas sísmicas en sondeos

- . Tomografía sísmica *cross-hole*
- . Medidas *cross-hole*
- . Medidas *down-hole*

Análisis espectral de las ondas superficiales.

Sísmica pasiva

Es evidente que no todos los métodos enumerados tienen igual protagonismo en los estudios geotécnicos ni todos ellos están igualmente divulgados entre los profesionales de este sector de las Ciencias de la Tierra. En consecuencia hemos optado por centrar esta exposición en los métodos que podríamos llamar clásicos por ser los de uso, o mal uso, más frecuente en los estudios geotécnicos y porque consideramos que deben ser mejor conocidos para potenciar su empleo teniendo en cuenta su capacidad para proporcionar información del subsuelo de indudable interés en los estudios geotécnicos.

Siendo conscientes pues de que esta decisión deja fuera del tintero métodos no menos valiosos aunque sí menos empleados centramos este breve curso en los métodos siguientes:

Sísmica de refracción

Tomografía sísmica *cross-hole*

Medidas sísmicos *cross-hole* y *down-hole*

Insistimos en que la mayor parte de nuestros comentarios estarán avalados por ejemplos de casos reales de nuestra propia experiencia. Por razones de espacio no todos ellos quedarán recogidos en estas notas de modo que una importante parte de ellos será expuesta únicamente en la presentación oral.

2. ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS

La aplicación de un esfuerzo puntual mediante la liberación instantánea de energía en un macizo rocoso produce una deformación proporcional a tal esfuerzo, gobernada por la Ley de Hooke para esfuerzos relativamente pequeños que no sobrepasen el límite elástico del medio. A partir del instante en que se rompe el equilibrio entre esfuerzo y deformación, por ejemplo cuando cesa el esfuerzo aplicado, la deformación se propaga a través del medio rocoso como una onda elástica. Son varios los tipos de ondas que se generan y propagan a partir de ese momento. A efectos prospectivos cabe clasificarlos en dos grupos:

Ondas volumétricas que se transmiten a través del material pudiendo sufrir en su tránsito procesos de refracción y reflexión. Son las ondas de compresión (P) y las de cizalla (S).

Ondas superficiales, tipos Rayleigh y Love que se transmiten por la superficie con mínima penetración en el material. El estudio de estas ondas en términos prospectivos tiene menor interés que el de las ondas volumétricas aunque existen métodos específicos basados en su estudio como el del Análisis Espectral de las Ondas Superficiales.

Focalizaremos nuestra atención exclusivamente en las primeras cuyas características generales han sido descritas en multitud de referencias básicas que no vamos a reproducir aquí por considerarlo innecesario para nuestros fines (Mooney, H 1984).

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas P y S a través de los macizos rocosos depende de las propiedades elásticas y de la densidad del material, estando relacionados todos estos parámetros por las siguientes fórmulas básicas.

$$\text{Coeficiente de Poisson, } J = [(V_p/V_s)^2 - 2] / [2(V_p/V_s)^2 - 2]$$

$$\text{Módulo de rigidez, } G = dV_s^2 \text{ ; } d \text{ es la densidad}$$

$$\text{Módulo de Young, } E = 2G(1+J)$$

$$\text{Módulo volumétrico, } K = E / [3(1-2J)]$$

Omitimos detallar aquí el desarrollo matemático completo de estas fórmulas que puede consultarse en las siguientes referencias: (ASTM-STP 654 1977, Sjorgren, B 1984). Parodiando a J. Eslava Galán en su **Historia de España contada para escépticos** cabe suponer que más de un esforzado geofísico haya malgastado algunas vigiliadas en la comprobación de las expresiones anteriores olvidando tal vez sus deberes conyugales.

Las referidas fórmulas ofrecen la posibilidad de calcular los módulos dinámicos del macizo rocoso *in situ*, siempre que se disponga de las

herramientas adecuadas para la correcta determinación de la velocidad de propagación de las ondas de compresión (V_p) y de cizalla (V_s) a través del mismo. Esta es la misión de los métodos sísmicos.

Cada una de las ondas elásticas provoca en su propagación un ligero desplazamiento del terreno, medible de forma indirecta mediante los adecuados sensores (geófonos). El registro obtenido en un pequeño intervalo de tiempo muestra una serie de picos relevantes que corresponden a las primeras llegadas de las ondas P, y otras posteriores producidas por las ondas S y por las ondas superficiales así como a otras llegadas de las mismas ondas refractadas o reflejadas una o varias veces en las interfases del subsuelo que representan contrastes en las propiedades elásticas del mismo.

Identificar en los registros los picos correspondientes a cada tipo de onda no es tarea fácil si bien en las aplicaciones para caracterización de macizos rocosos se opera mayoritariamente con las primeras llegadas que corresponden a las ondas P y son los por tanto relativamente fáciles de reconocer. La identificación de las ondas S es un problema más complejo al que dedicaremos los oportunos comentarios en otros apartados de estos apuntes.

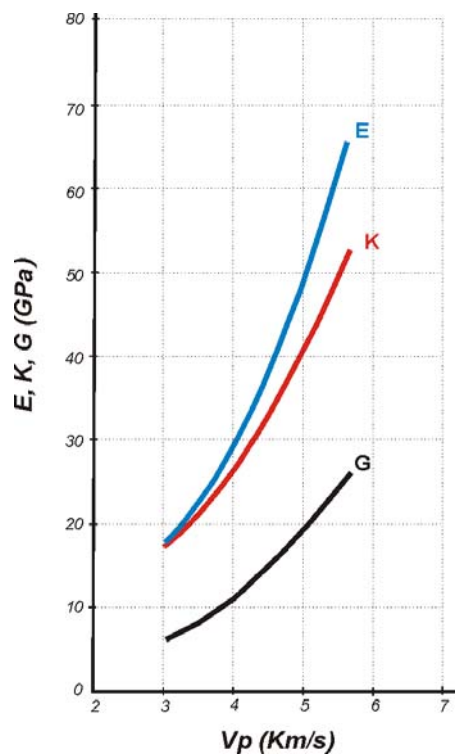


Figura 1.- Relación entre V_p y módulos dinámicos.

Los problemas más relevantes que en el ámbito de los estudios geotécnicos se pueden resolver mediante la aplicación correcta de los diversos métodos sísmicos son los siguientes:

- < Determinación del espesor y distribución de los materiales no consolidados que forman el recubrimiento así como sus valores de V_p y de V_s . (Rfr).
- < Determinación del espesor y características (V_p , V_s) de la zona meteorizada de las formaciones subyacentes (Rfr).
- < Caracterización (V_p , V_s) de la roca sana, determinando la profundidad a que se localiza y la morfología de su contacto con la zona meteorizada o con el recubrimiento (Rfr).
- < Clasificación de cada una de las capas anteriores en términos de ripabilidad (Rfr, M d-h).
- < Identificación de elementos singulares del subsuelo tales como fallas o contactos entre unidades litológicas con diferentes características geomecánicas, definiendo la morfología de estos contactos y la profundidad a que se localizan (Rfr, Rfx).
- < Determinación *in situ* de los módulos dinámicos característicos de cada una de las unidades rocosas (M c-h, M d-h, Rfr).
- < Detección de accidentes puntuales del terreno como por ejemplo huecos o zonas karstificadas (TSc-h, Rfr).

Al lado de cada uno de los apartados anteriores indicamos mediante siglas el método o métodos a emplear en cada caso para la resolución de esos objetivos.

Rfr — Sísmica de refracción ;
 TSc-h — Tomografía sísmica *cross-hole*
 Rfx — Sísmica de reflexión ;
 M c-h — Medidas sísmicas *cross-hole*
 M d-h — Medidas sísmicas *down-hole*.

3. EL MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN.

Una de las formas de caracterización de los materiales del subsuelo mediante medidas realizadas en la superficie del terreno es la determinación de la velocidad de transmisión de una onda de compresión a través de los macizos rocosos. Esta velocidad (V_p) depende directamente del grado de compacidad e integridad de los materiales a través de los que se produce la propagación de la señal y por lo tanto es considerada como un indicador geomecánico.

El método sísmico de refracción constituye la técnica geofísica más ampliamente utilizada para determinar la velocidad V_p característica de las diferentes capas del subsuelo y también el espesor de cada una de ellas hasta el rango de profundidad investigado en cada caso. Sus condiciones ideales de aplicación requieren en principio que la velocidad V_p de las diferentes capas del terreno aumente con la profundidad, al objeto de que puedan resolverse todas las capas significativas. No obstante, determinadas técnicas interpretativas permiten la caracterización de niveles con valores de V_p inferiores a los de los materiales situados a su techo, cuando la continuidad lateral de estos últimos es limitada.

Pese a ser una técnica de amplio uso en estudios geotécnicos y por lo tanto relativamente divulgada consideramos conveniente dar aquí una breve explicación de sus rasgos más significativos, de sus limitaciones y de los factores a considerar en su planteamiento y ejecución. Es importante tenerlos en cuenta para la correcta planificación de su empleo y para una mejor valoración de sus resultados.

La ejecución de un estudio mediante sísmica de refracción consiste en su primera fase en medir los tiempos invertidos por una onda de compresión en llegar a través del subsuelo a una serie de sensores (geófonos) situados alineados en la superficie del terreno. Esta onda de compresión se produce por medios mecánicos liberando instantáneamente una cierta cantidad de energía en un punto determinado de la superficie del terreno, alineado con el perfil definido por los sensores (geófonos).

En su transmisión a través del terreno estas ondas pueden seguir diversos caminos que resumimos representándolos por sus trayectorias en la **Figura 2**. Dependiendo de la distancia entre el punto donde se produce la señal sísmica y los sensores así como de la distribución de los valores de V_p del terreno las primeras llegadas de las ondas P pueden corresponder a llegadas directas, para los geófonos más próximos o a llegadas refractadas a partir de cierta distancia.

Pese a que el conocimiento de estos mecanismos de transmisión de las ondas de compresión no es un aspecto relevante en el contexto general de nuestro relato conviene tener en cuenta alguna idea básica al respecto porque ayudará posteriormente a comprender algunos aspectos puntuales como por

ejemplo la pérdida de información que inevitablemente se produce en los extremos de los perfiles sísmicos de refracción, o también el problema relativo a las llegadas de ondas refractadas en las medidas *cross-hole*.

La toma de datos en un perfil o en una implantación exige la repetición de las medidas para una serie de diferentes emplazamientos del punto donde se produce la señal (punto de tiro), sin variar la posición de los geófonos. Se define como **implantación** al conjunto de geófonos que se mantienen en una posición fija para el registro de los tiempos de llegada correspondientes a una serie de señales producidas en diversos puntos distribuidos a lo largo de la línea definida por los geófonos.

El posterior procesado de los registros sísmicos constituye la segunda fase en la aplicación del método e incluye una serie de etapas básicas, comunes a cualquiera de los posibles métodos de cálculo utilizables. Se realizan normalmente con el apoyo de medios informáticos a partir de los datos digitales obtenidos en campo y son las siguientes:

- a) Determinación del tiempo invertido por la primera llegada de la onda compresional a cada geófono y para cada punto de señal o de tiro.
- b) Construcción de un gráfico (dromocrónica) tiempo-distancia llevando en abscisas las distancias desde el punto de tiro a los geófonos y en ordenadas los tiempos de llegada de la onda de compresión a cada uno de ellos. En cada implantación habrá pues tantas dromocrónicas como puntos de tiro.

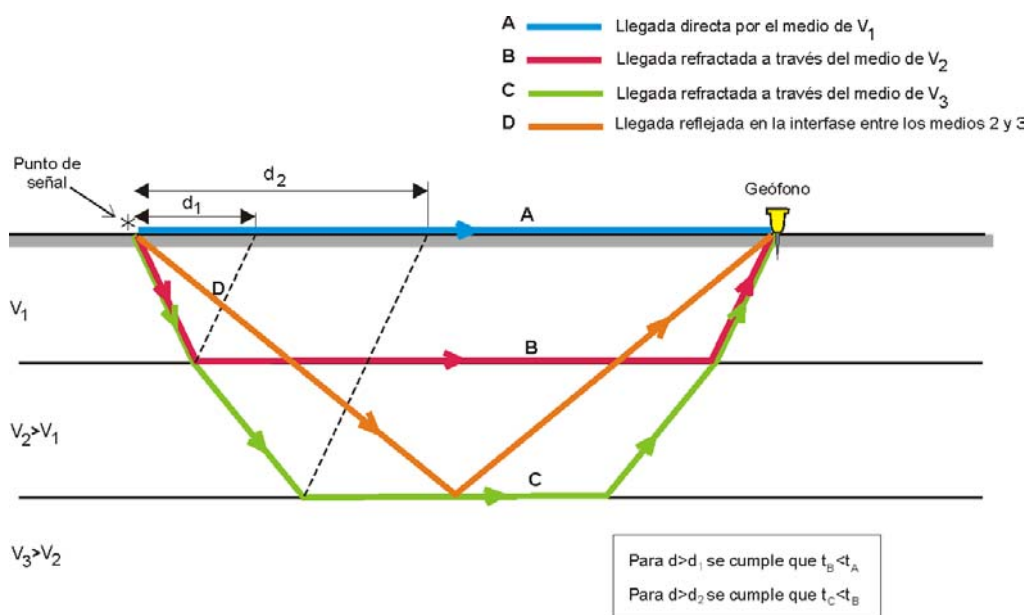


Figura 2.- Posibles trayectorias seguidas por las ondas sísmicas.

- c) Análisis cualitativo de las características de la sección sísmica correspondiente a cada implantación, identificando su número de capas en función de la morfología de cada dromocrónica y de las relaciones entre ellas.
- d) Interpretación cuantitativa de las dromocrónicas determinando la distribución de los valores de V_p de la sección sísmica. Para ello existen diversos métodos tales como el del Tiempo Intersectado en el Origen, el Método Recíproco Generalizado o el método Delta t-V entre los más conocidos.

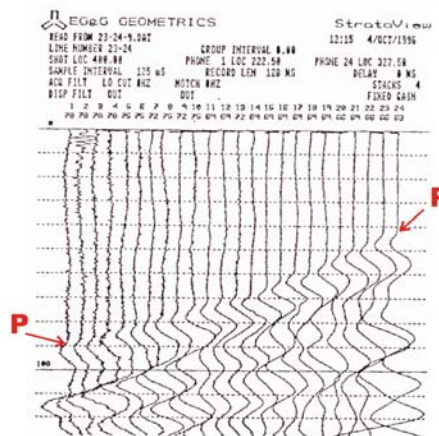


Figura 3.- Ejemplo de registro sísmico de 24 canales, con indicación de las primeras llegadas de las ondas P.

3.1. Aspectos relativos a la planificación y ejecución de las medidas.

Los factores más significativos a tener en cuenta para la planificación de una campaña mediante sísmica de refracción y durante la obtención de los registros en campo son los siguientes:

- Espaciado entre los geófonos de la implantación.
- Número de geófonos por implantación y longitud de éstas.
- Número de puntos de tiro por implantación y su distribución.
- Fuente de energía y modalidad de medida.

Se da por sentado que los registros se efectúan en forma digital en todo caso, porque la precisión con que ha de medirse el tiempo de las primeras llegadas de las ondas de compresión a cada geófono desaconseja la obtención de registros analógicos como documento básico del estudio.

El mínimo número de geófonos por implantación que actualmente se considera admisible es 12, aunque puede ser escaso si se pretende alcanzar una **profundidad de investigación** de algunas decenas de metros. Al respecto debe tenerse en cuenta que la información obtenida aumenta su

representatividad y fiabilidad en relación directa con el número de geófonos del dispositivo de medida, al margen de otros aspectos que oportunamente se comentarán.

La experiencia demuestra que la información proporcionada por una implantación de 24 geófonos por ejemplo es muy superior a la obtenida mediante dos implantaciones contiguas de 12 geófonos cada una (**Figura 4**).

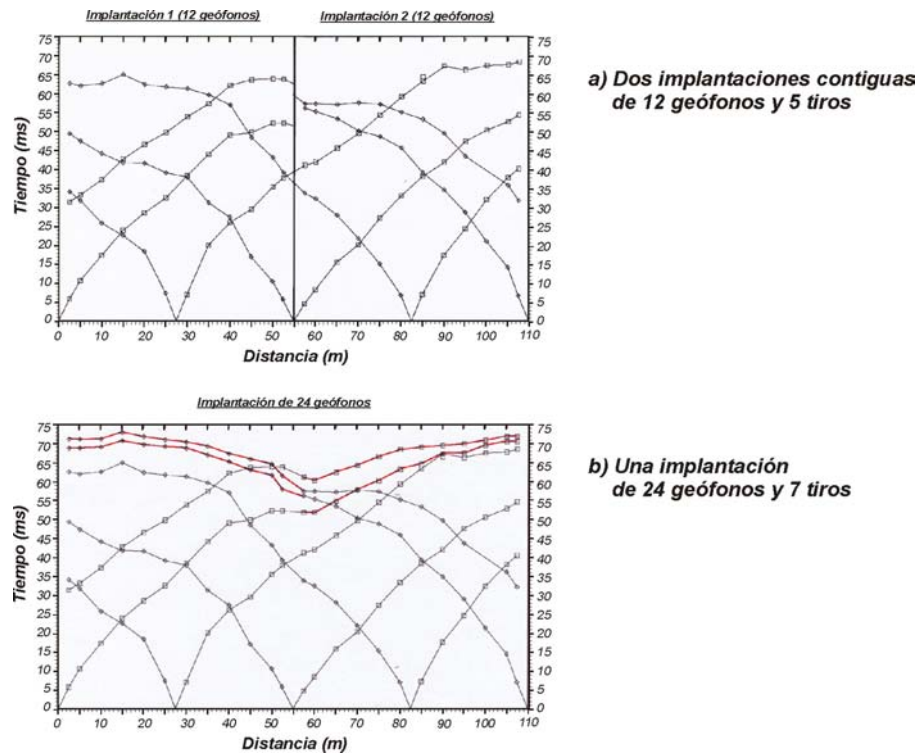


Figura 4.- Diferencias entre las dromocrónicas obtenidas en función del dispositivo de medida empleado.

El **espaciado** entre geófonos es el factor que condiciona la **resolución** lateral y vertical de los resultados finales del estudio. La regla aplicable al respecto es que cuanto menor sea el espaciado entre geófonos mayor será la resolución del dispositivo de medida, aunque el empleo de espaciados reducidos también implica un menor rendimiento en la toma de datos y una menor profundidad de investigación. Este último punto debe enunciarse con ciertas reservas porque también depende de la distancia entre los puntos de tiro y los geófonos, según una relación directa.

El mínimo **número de puntos de tiro** que cabe registrar por implantación es dos, situados en los extremos de la misma. Hace años se especificaban como tiros de “ida y vuelta” según denominación actualmente en desuso. En este caso la determinación de espesores y velocidades de las capas solo puede hacerse en la vertical de los dos puntos de tiro lo cual es

claramente insuficiente para el grado de detalle requerido en la mayoría de las aplicaciones actuales.

Cuando se pretende obtener información detallada de la sección sísmica a lo largo de toda la línea de geófonos es preciso realizar registros para algunos tiros adicionales. De forma general puede afirmarse que un estudio de detalle requiere registrar del orden de cinco o más tiros por implantación, en el caso de implantaciones de 12 geófonos, o bien un mínimo de **siete tiros para implantaciones de 24 geófonos**, combinado con el adecuado espaciado entre ellos. Es muy importante si se opera con implantaciones cortas, el registro de tiros exteriores para la mejor caracterización de los niveles más profundos que puedan investigarse con cada dispositivo de medida.

En los casos en que un perfil sísmico esté formado por diversas implantaciones contiguas es recomendable solapar el menos los dos últimos geófonos de la implantación (**n**) con los dos primeros de la implantación (**n+1**) (**Figura 5**). De este modo se salva en gran medida la pérdida de información relativa a los niveles más profundos que inevitablemente se produce en los extremos de las implantaciones. La Ley de Snell explica perfectamente por qué.

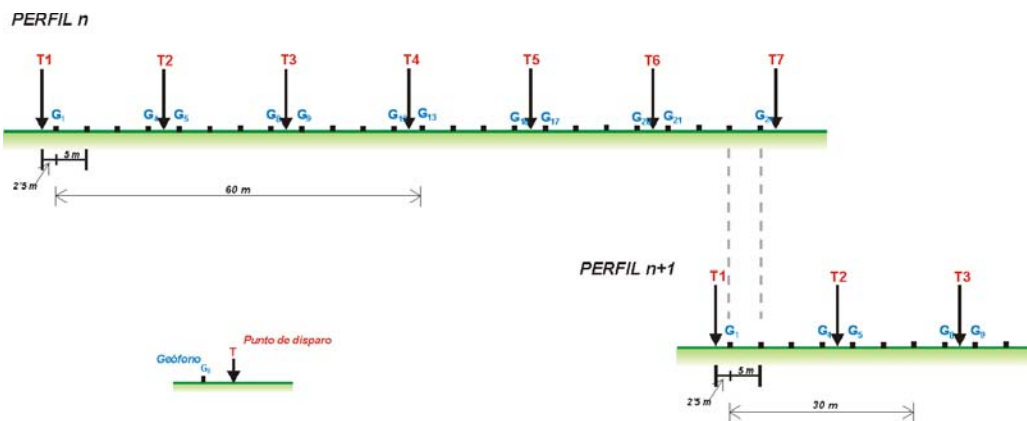


Figura 5.- Esquema de implantaciones sísmicas solapadas, con 24 geófonos y 7 tiros.

La **fuerza de energía** habitualmente utilizada para la generación de la onda de compresión es el impacto de un martillo metálico de 6-8 Kg sobre una placa metálica situada sobre el terreno, aunque lo deseable es poder utilizar fuentes de energía más potentes como por ejemplo explosivos, al objeto de maximizar la relación señal/ruido para lo cual la energía liberada al generar la onda compresional debe ser la mayor posible. También contribuye en este sentido la operación sumando en cada registro la señal de varios golpes producidos en el mismo punto, lo que se define como operación por «*stacking*».

3.2. Métodos de procesado para la obtención de las secciones sísmicas. Algunos comentarios.

Por el carácter práctico de este Curso no vamos a entrar aquí en el análisis y explicación de los diversos métodos de procesado que permiten la obtención de las secciones sísmicas a partir de las dromocrónicas. Para ello nos remitimos a cualquiera de las referencias que damos al final de este documento y especialmente a las números 6 y 11.

Hasta fechas muy recientes los resultados de un estudio sísmico se presentaban mediante secciones sísmicas conformadas por “capas” caracterizadas por sus valores de V_p y con límites concretos y definidos únicamente en la vertical de los puntos de tiro, por ejemplo si la interpretación se hacía por el método del Tiempo Intersectado en el Origen, o bien en la vertical de cada geófono cuando el procesado se hacía según métodos más complejos como por ejemplo el Método Recíproco Generalizado (GRM).

Estas secciones sísmicas con discontinuidades bruscas en la distribución de los valores de V_p discrepan de forma evidente de la realidad en un considerable número de situaciones geológicas. Por ejemplo la zona meteorizada de los macizos rocosos se caracteriza por una reducción progresiva del grado de alteración con la profundidad y paralelamente por una transición gradual de los valores de V_p , crecientes con la profundidad. Normalmente no existe una discontinuidad que permita definir un contacto neto entre roca meteorizada y roca sana.

Los métodos actuales más avanzados para el procesado y la interpretación de los datos sísmicos de refracción operan con técnicas y algoritmos de **tipo tomográfico** y proporcionan como resultado final **secciones sísmicas con la distribución continua de los valores de V_p** . Representadas estas secciones mediante campos de color o mediante isolíneas convenientemente seleccionadas constituyen una imagen muy detallada e inmediata relativa a ciertas características geotécnicas del subsuelo.

En este tipo de secciones resulta muy sencilla la identificación de accidentes puntuales tales como fallas o zonas karstificadas y también la observación de las características principales (espesor y grado de alteración) de posibles recubrimientos o rellenos y de la zona meteorizada de los macizos rocosos. Estos objetivos eran inabordables con este grado de detalle mediante el método sísmico de refracción hace tan solo cuatro o cinco años.

La aplicación de estos métodos avanzados de procesado como por ejemplo el Delta-t-V requiere el cumplimiento de ciertas **condiciones** durante la toma de datos como por ejemplo el **registro de tiros múltiples** para cada implantación y que éstas tengan un **número de geófonos relativamente alto**. Por contra los resultados obtenidos no son comparables en modo alguno con los que proporcionan técnicas obsoletas (“implantaciones de 50 m con tiros de ida y vuelta”) como las que desgraciadamente se siguen especificando en un

considerable número de proyectos por parte de diversos organismos técnicos de las Administraciones públicas.

3.3. Determinación de la excavabilidad de los terrenos.

Es un hecho incuestionable que el método sísmico de refracción es la variante más utilizada en Geotecnia para determinar la distribución de los valores de V_p del subsuelo y casi con el exclusivo fin de evaluar la excavabilidad de los terrenos, por ejemplo en zonas de desmonte de obras lineales. Por ello consideramos procedente hacer aquí algún comentario al respecto.

Habitualmente se suelen correlacionar los valores de V_p de los macizos rocosos con su facilidad/dificultad de excavación mediante tablas empíricas que, en términos generales, establecen los límites siguientes:

- < Como “tierras” o **material excavable** se clasifican los materiales con **valores de V_p inferiores a 1.000 m/s**. En este término se agrupan normalmente los recubrimientos, los rellenos y los materiales con un alto grado de meteorización.
- < En la categoría de **material ripable** se incluyen los niveles con **valores de V_p que oscilan entre los 1.000 m/s y los 1.750-1.800 m/s** si bien este límite superior puede ser objeto de discusión.
- < Finalmente, las zonas con valores de V_p superiores a 1.800-2.000 m/s se consideran como material que requiere la **ayuda de explosivos** para su arranque.

Conviene aclarar en este punto que la **ripabilidad** de los macizos rocosos no es un parámetro que pueda cuantificarse en términos absolutos porque depende de varios factores. Entre ellos los más relevantes son los siguientes:

- Grado de compacidad e integridad del macizo rocoso
- Estratificación y esquistosidad
- Geometría de la excavación
- Tipo de tractor empleado para la excavación

De todos los factores citados el más determinante es el primero, que a su vez está directamente relacionado con la velocidad de transmisión de las ondas de compresión (V_p) a través del medio rocoso. Por ello es habitual la utilización de las referidas tablas empíricas que establecen la correlación entre los valores de V_p y la ripabilidad.

Una de las tablas de uso más frecuente es la de **Caterpillar** para un tractor tipo D9. Existen otras clasificaciones más complejas y detalladas que establecen límites de ripabilidad más conservadores y en nuestra opinión más

acorde con la realidad que los de la tabla anterior. Por ejemplo la clasificación de Weaver

Sea cual sea la tabla empleada el aspecto crítico para su utilización es **la fiabilidad de los valores de V_p** , característicos de cada unidad rocosa. Este es precisamente el papel que juega en este asunto el **método Sísmico de refracción**.

3.4. Algunos ejemplos singulares.

Para ilustrar las diferencias entre los resultados obtenidos en función de las técnicas empleadas para las medidas y para el procesado de los registros sísmicos presentamos en la **Figura 6** las secciones sísmicas obtenidas en un mismo perfil de la zona de Requena (L.A.V. a Levante) mediante un método deficiente (dos implantaciones contiguas de 55 m con registro de un tiro en cada extremo) y mediante un método más avanzado: Implantación de 115 m formada por 24 geófonos, con registro de siete puntos de tiro y procesando los datos por un método de tipo tomográfico. Es evidente que el detalle de los resultados obtenidos mediante el segundo método es muy superior al obtenido por el primer procedimiento.

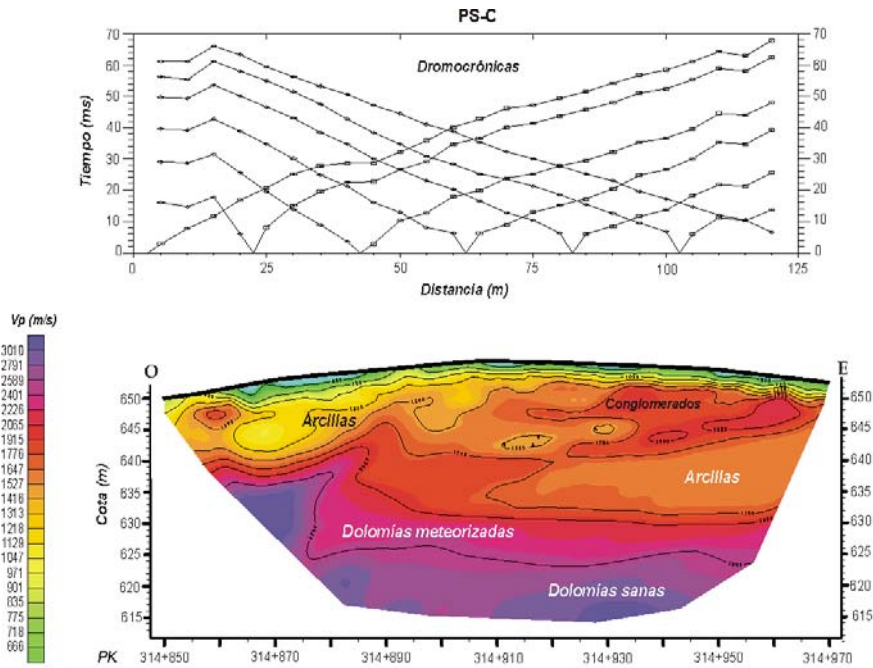
Son multitud los ejemplos que podrían presentarse para demostrar el alto grado de resolución lateral y vertical de la información que puede obtenerse mediante el método sísmico de refracción convenientemente aplicado. Por tratarse de una aplicación atípica incluimos aquí la sección sísmica de la **Figura 7** obtenida en una zona del trazado próxima a Aguilar de Campoo de la Autovía Cantabria-Meseta. En este caso el objetivo a resolver era la detección de posibles zonas karstificadas en un sustrato de calizas. La existencia de tales zonas representa un fuerte contraste lateral en la distribución de los valores de V_p perfectamente puesta de manifiesto en la referida sección sísmica.

3.5. Estudios sísmicos de refracción de ondas S.

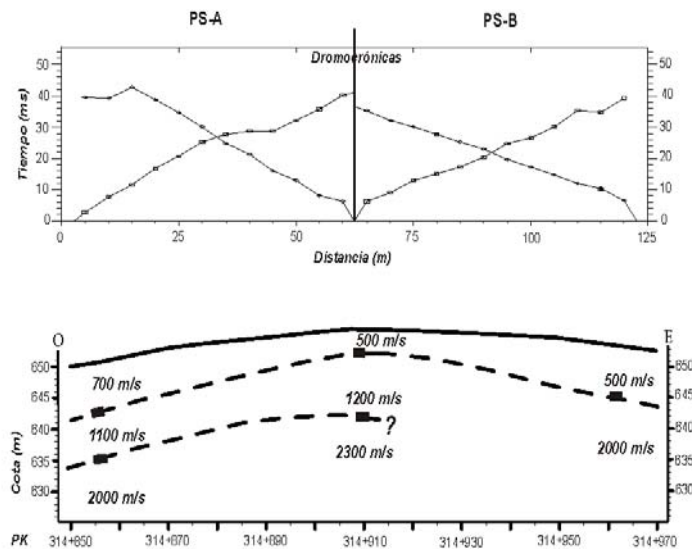
Todos los conceptos e ideas expuestas respecto al método sísmico de refracción de las ondas de compresión también son aplicables si el análisis se hace sobre las primeras llegadas de las ondas S. De hecho aunque es menos habitual que el método convencional para determinar la distribución de V_p cada vez es mayor el número de estudios que se efectúan mediante sísmica de refracción para obtener las correspondientes secciones sísmicas con los valores de V_s . Este es un dato necesario para el cálculo de las interacciones suelo-estructura en el emplazamiento de ciertas instalaciones industriales como por ejemplo Centrales Térmicas de Ciclo Combinado.

Básicamente los procedimientos de toma de datos son semejantes a los de los estudios sísmicos de refracción convencionales pero con algunas particularidades de fundamental importancia que radican en la dificultad de

identificar fiablemente las primeras llegadas de las ondas S en los sismogramas ya que viene enmascaradas en un tren de ondas en el que el primer evento corresponde a la llegada de las ondas P.



Resultados obtenidos con implantaciones largas (24 geófonos) y registro de siete tiros. Interpretación con el método delta - t - V.



Resultados obtenidos con implantaciones cortas (12 geófonos) y registro de dos tiros (ida y vuelta). Interpretación con el método del tiempo intersectado en el origen.

Figura 6.- Comparación de los resultados de un estudio sísmico de refracción en función de la metodología de trabajo aplicada.

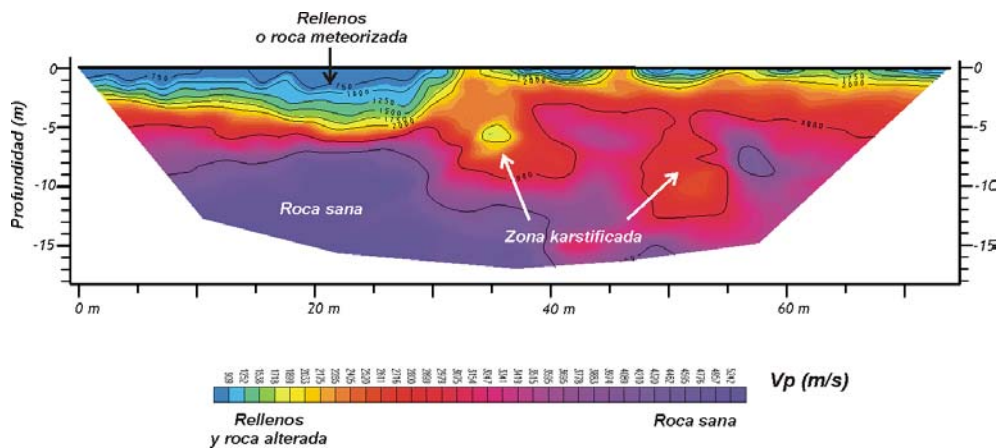


Figura 7.- Ejemplo de detección de zonas karstificadas mediante Sísmica de refracción.

Así pues la precaución esencial en este tipo de estudios es la modalidad de operación que permita la **generación y el registro fiables e inequívocos de las ondas de cizalla**. Estos procedimientos requieren el empleo de sensores convenientemente orientados, de fuentes de energía direccionales y la ejecución de registros dobles para impactos de sentidos contrarios. El carácter polarizado de las ondas S hace que su manifestación en los sismogramas cambie de sentido en función de la dirección en que se produzca el impacto que las genera. (ver **Figura 8**).

Me permito hacer un comentario respecto a este tema: Este tipo de estudios no es fácil porque requiere instrumentación especial que en algunos de sus componentes no existe en el mercado. También exige la intervención de técnicos experimentados que tengan muy claros los conceptos relativos a las características y a la transmisión de las ondas sísmicas por el subsuelo. Aún cumpliendo estos requisitos y haciendo las cosas bien, la ejecución de este tipo de estudios produce casi siempre dolores de cabeza.

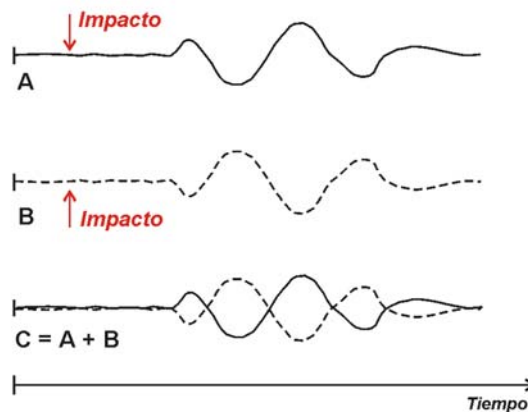


Figura 8.- Polaridad de las ondas S.

Por lo demás el aspecto de las secciones sísmicas de V_s es semejante al de las secciones de V_p , aunque lógicamente con valores más bajos. El ejemplo que presentamos en la **Figura 9** corresponde a un estudio realizado en la Sierra de Guadarrama en el emplazamiento de una futura antena de la NASA. Normalmente los estudios sísmicos de refracción de ondas S se realizaron combinadamente con los de las ondas P sobre los mismos perfiles.

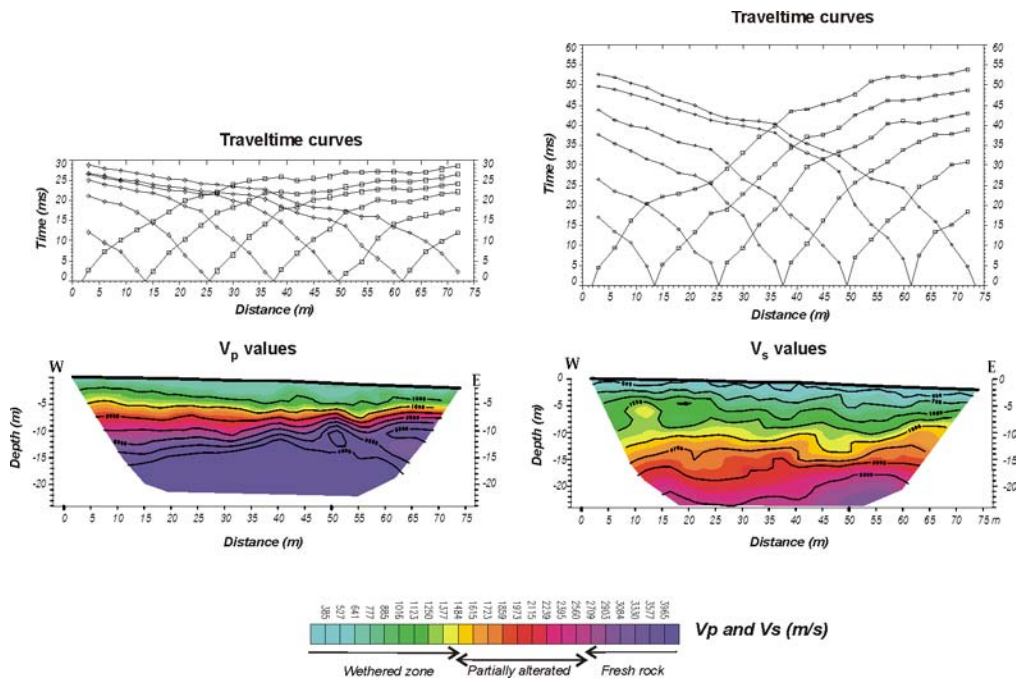


Figura 9.- Secciones sísmicas de V_p y V_s obtenidas en un medio granítico.

4. TOMOGRAFÍA SÍSMICA *CROSS-HOLE*.

En algunas situaciones especiales el desarrollo de proyectos de obras públicas requiere determinar con todo detalle la localización de accidentes puntuales del subsuelo, especialmente aquellos tales como huecos, rellenos o zonas de falla que puedan tener una influencia decisiva en la construcción y en la estabilidad de las estructuras. Es frecuente que para tales objetivos la información puntual que proporcionan los sondeos mecánicos sea insuficiente y en tales casos los estudios geofísicos mediante **tomografía entre sondeos** constituyen el único procedimiento capaz de aportar la información al nivel de detalle requerido.

En su sentido más amplio un estudio tomográfico *cross-hole* consiste en determinar de forma detallada la distribución de un determinado parámetro del terreno en el espacio comprendido entre dos sondeos situados relativamente próximos entre sí. Repetidamente hemos venido comentando que entre los diversos parámetros físicos del terreno uno de los más significativos en el ámbito de las aplicaciones geotécnicas es la velocidad de transmisión de las ondas de compresión (V_p) a través del mismo.

Las posibles heterogeneidades puntuales del terreno tales como zonas de falla, rellenos, cavidades y contactos entre unidades litológicas representan contrastes notables en la distribución de los valores de V_p del medio rocoso y por lo tanto son susceptibles de detección y caracterización a partir de las medidas de V_p convenientemente realizadas entre sondeos o entre éstos y la superficie del terreno.

4.1. Ejecución de las medidas sobre el terreno.

Para la ejecución de un estudio mediante Tomografía sísmica *cross-hole* se requiere un mínimo de dos sondeos si bien para el reconocimiento detallado de un determinado espacio rocoso es conveniente utilizar diversas parejas de sondeos que definan secciones en las direcciones de mayor interés para cada caso.

En esencia la ejecución de estas medidas requiere emplazar en uno de los sondeos una serie de sensores (hidrófonos) regularmente espaciados y cubriendo en exceso toda la sección a reconocer. Con estos sensores se registra la señal sísmica producida en un determinado punto del segundo sondeo mediante sistemas capaces de generar específicamente ondas de compresión.

Una vez registrada la señal sísmica para una determinada posición de los sensores y del punto de señal, éste se desplaza a lo largo del sondeo hasta una nueva posición, y se repite el proceso de registro con todos los sensores que permanecen en la misma posición, hasta recorrer completamente el sondeo donde se produce la señal.

Dependiendo del grado de resolución requerido en cada caso se establece el espaciado entre los sensores y entre los puntos de señal sísmica. Este espaciado suele ser el mismo en ambos sondeos, del orden de un metro o a veces inferior dependiendo de la resolución requerida.

De la simple observación de los esquemas relativos a esta forma de realizar las medidas que presentamos en la **Figura 10**, se deducen dos aspectos básicos de este método geofísico :

- < La multiplicidad de las posibles trayectorias definidas por las diversas combinaciones punto de tiro-sensor que atraviesan cada elemento puntual del espacio comprendido entre los dos sondeos hace que el muestreo de tal espacio sea exhaustivo.
- < La reducción de la cobertura de datos hacia los extremos superior e inferior de la sección definida por los dos sondeos aconseja que éstos se perforen hasta una profundidad que sobrepase claramente la zona de estudio propiamente dicha.

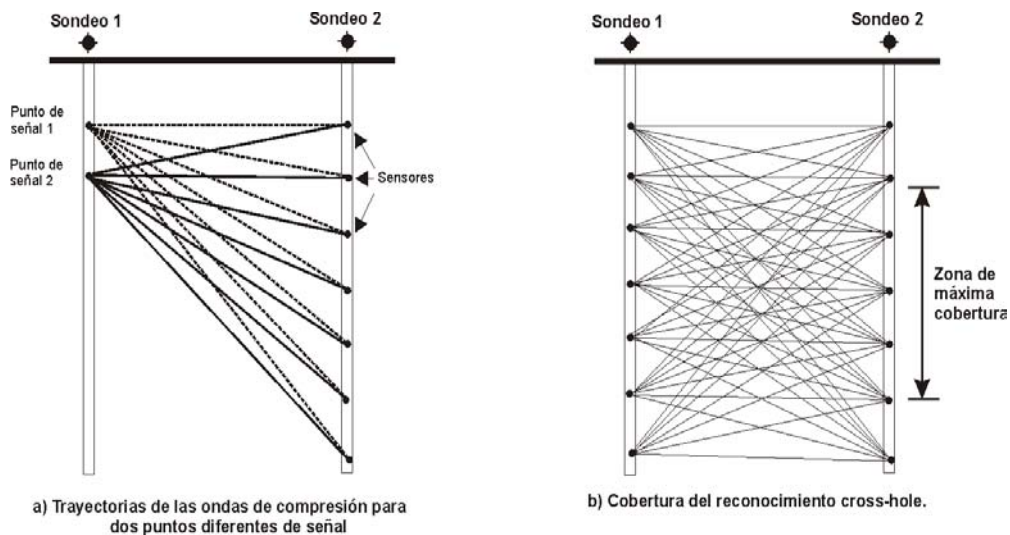


Figura 10.- Esquema de ejecución de las medidas en estudios de Tomografía sísmica cross-hole.

La generación de las señales sísmicas se puede realizar por diversos medios tales como sistemas mecánicos, explosivos o descargas eléctricas. Según nuestra experiencias el más operativo y eficaz es el sistema de intensas descargas eléctricas (*sparker*) que producen la generación instantánea de una burbuja de vapor de agua que se expande a alta presión, similar a una pequeña explosión convencional.

Como sensores sísmicos se utilizan hidrófonos instalados en una cadena a intervalos regulares. El empleo de hidrófonos es más rápido y sencillo que el

uso de geófonos convencionales con mecanismo de anclaje al sondeo, si bien estos últimos no requieren que el sondeo esté lleno de agua.

Cuando se utilizan hidrófonos los sondeos deben mantenerse llenos de agua durante la ejecución de las medidas cuya correcta ejecución exige que los sondeos se preparen adecuadamente porque en caso contrario la operación puede ser inviable o los registros obtenidos pueden estar afectadas por errores importantes. Si la zona de estudio se localiza por debajo del nivel freático basta con entubar los sondeos con tubería de PVC con el fin de mantenerlos abiertos. En caso contrario la tubería de PVC debe estar cerrada en el fondo y lo que es más importante debe cementarse con lechada fluida de cemento de modo que no quede ningún hueco entre la tubería y la pared del sondeo. Advertimos que pocas empresas de sondeos realizan correctamente esta operación que debe hacerse inyectando de abajo a arriba hasta que la lechada fluya por el emboquille del sondeo.

4.2. Procesado de los datos.

El procesado de los datos se ilustra de forma esquemática mediante la **Figura 11**. La primera parte del proceso consiste en la identificación en los registros sísmicos de las primeras llegadas de las ondas de compresión a cada sensor y para cada punto de señal, determinando el tiempo invertido en cada caso.

Para el cálculo de las velocidades de transmisión de la señal sísmica a partir de estos tiempos hay que determinar también de forma precisa la posición y la distancia entre cada punto de señal y cada sensor. La precisión de estos datos geométricos es un factor importante que requiere, cuando los sondeos son de cierta longitud, la realización previa de **medidas de verticalidad y de desviación** en cada uno de ellos.

Téngase en cuenta que habitualmente las distancias entre sondeos son relativamente pequeñas y cualquier error en la determinación de las distancias entre los puntos de señal y los sensores puede llevar a errores en los valores medios de V_p calculados a partir de estos datos y en los valores puntuales resultantes del subsiguiente proceso de inversión.

Una vez cubierta la etapa de identificación de las primeras llegadas de las ondas P determinando los tiempos y las distancias entre cada punto de tiro y cada sensor la fase fundamental del proceso es la **inversión** de estos datos para determinar el valor de V_p en cada celdilla de la sección del terreno comprendida entre los dos sondeos. Se trata de un proceso complejo en términos matemáticos que consideramos innecesario describir aquí. No obstante dejamos constancia de la oportuna referencia bibliográfica en el correspondiente apartado al final de estas notas.

El resultado final del estudio es una sección definida entre los dos sondeos empleados para las medidas o un conjunto de secciones cuando se

hacen medidas entre varias parejas de sondeos y los datos se invierten teniendo en cuenta todas ellas; con la distribución detallada de los valores de V_p . En estas secciones resulta inmediata la identificación de accidentes puntuales del terreno o de contactos entre capas por el contraste que representan en la distribución de los valores de V_p del medio estudiado.

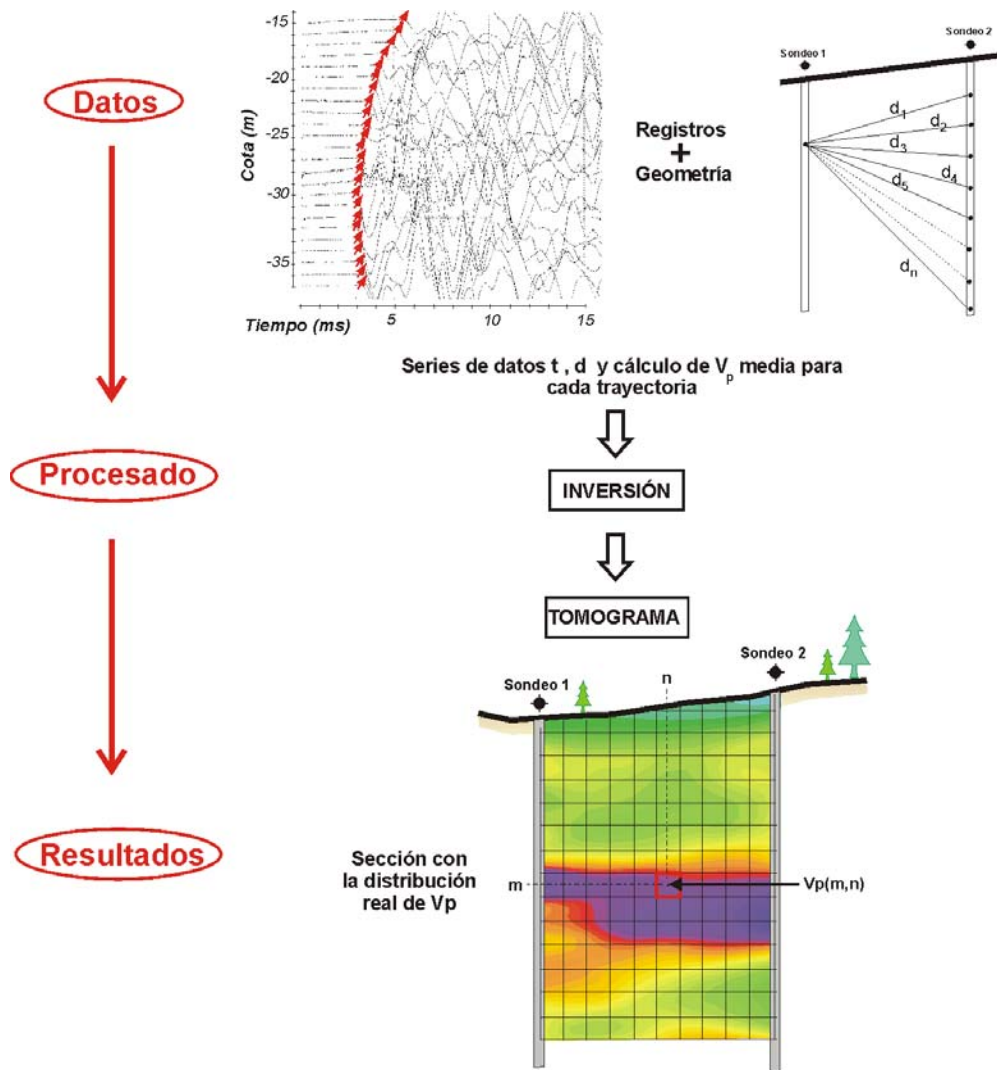


Figura 11.- Explicación del procesado de los registros en el método de la Tomografía sísmica cross-hole.

4.3. Algunos ejemplos representativos.

Los tomogramas con la distribución de los valores de V_p del subsuelo obtenidos por este método son documentos de fácil interpretación en los que de forma directa se pueden observar las heterogeneidades relevantes del terreno. Los dos ejemplos que presentamos con estas notas ilustran suficientemente lo comentado.

El primero de ellos (**Figura 12**) corresponde a un estudio realizado en la zona donde se construyen las nuevas pistas del Aeropuerto de Barajas. En la zona en cuestión existen algunas galerías mineras de unas antiguas explotaciones de sepiolita cuya posición no se conocía con precisión. Una campaña de sondeos perforados con el fin de localizarlas proporcionó resultados incompletos y por ello se decidió aplicar el método de la Tomografía sísmica *cross-hole* entre diversas parejas de sondeos.

Los resultados obtenidos cubrieron los objetivos del estudio al identificar ciertas anomalías puntuales con bajos valores relativos de V_p (1.500 m/s que son los correspondientes al agua que rellena las galerías). En la referida **Figura 12** se puede observar una de estas anomalías a una profundidad entre 25 y 28 metros, que posteriormente se comprobó mediante un sondeo. Efectivamente correspondía a una galería.

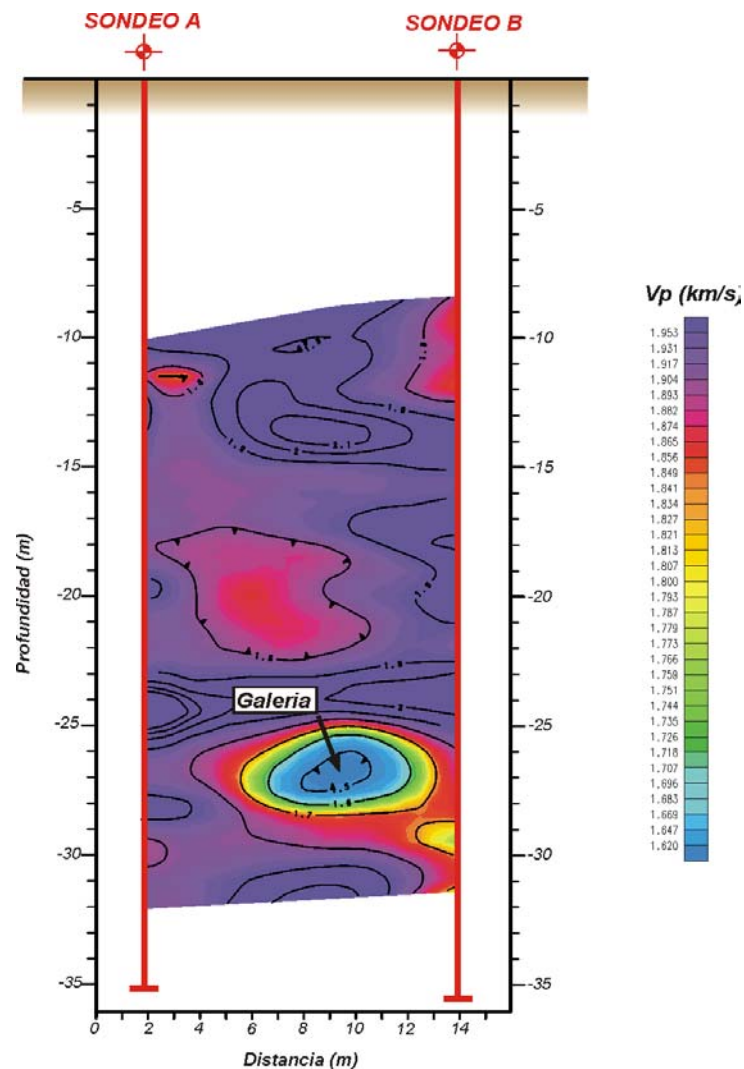


Figura 12.- Ejemplo de detección de una galería minera mediante Tomografía sísmica *cross-hole*.

Como segundo ejemplo presentamos en la **Figura 13** una imagen 3D de los tomogramas obtenidos en la zona de apoyo de una de las pilas de un viaducto de doble tablero construido sobre el Río Arade (Portugal). El problema surgió en este caso al encontrarse durante la perforación para la construcción de los pilotes con la existencia de importantes cavidades de origen kárstico en un sustrato calizo sobre el que se había proyectado apoyar la estructura.

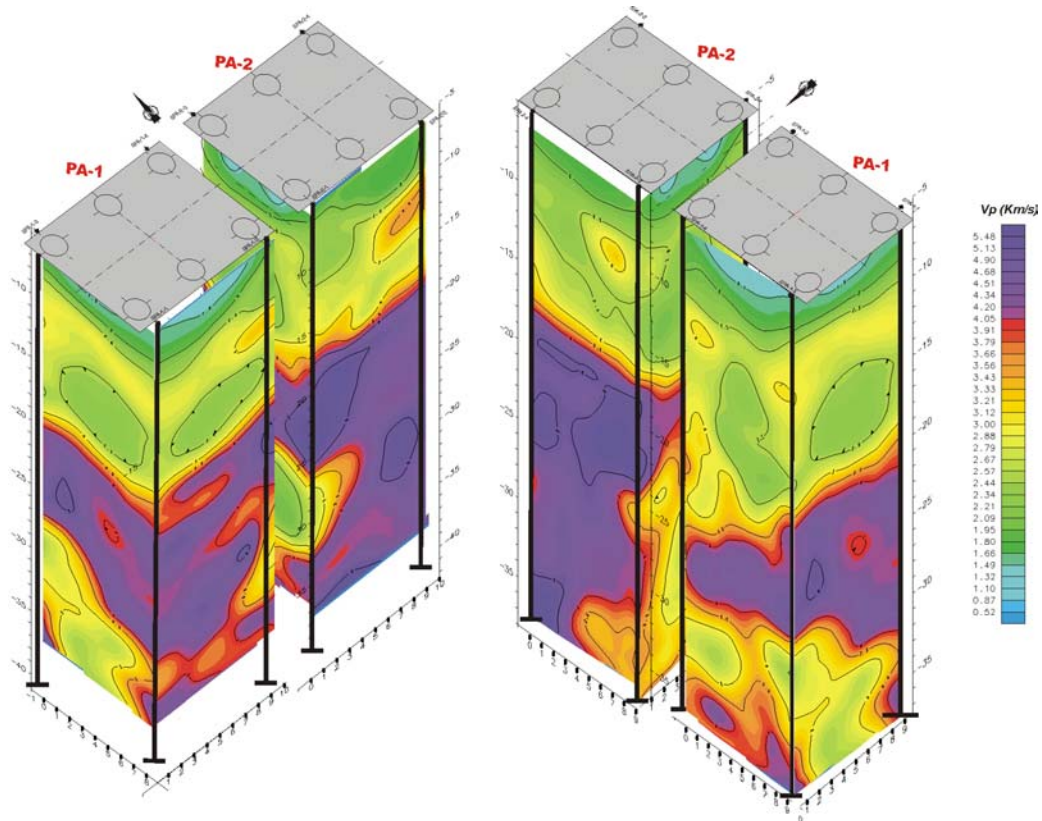


Figura 13.- Tomogramas sísmicos cross-hole obtenidos en las zonas de apoyo de las pilas de un viaducto.

En este caso se llevó a cabo un estudio exhaustivo sobre las zonas de apoyo de seis pilas midiendo todas las secciones posibles entre los cuatro sondeos perforados en los vértices del rectángulo en que se inscriben los seis pilotes de cada pila. Este conjunto de datos se invirtió conjuntamente para obtener resultados en forma tridimensional.

En base a los resultados de este estudio se programó y se llevó a cabo una campaña de mejora del terreno mediante inyección de mortero. La eficacia de esta campaña se contrastó repitiendo las medidas sísmicas en los mismos sondeos después del tratamiento. La comparación de resultados (ver **Figura 14**) puso de manifiesto de forma evidente como efectivamente las cavidades kársticas fueron suficientemente rellenadas por el mortero.

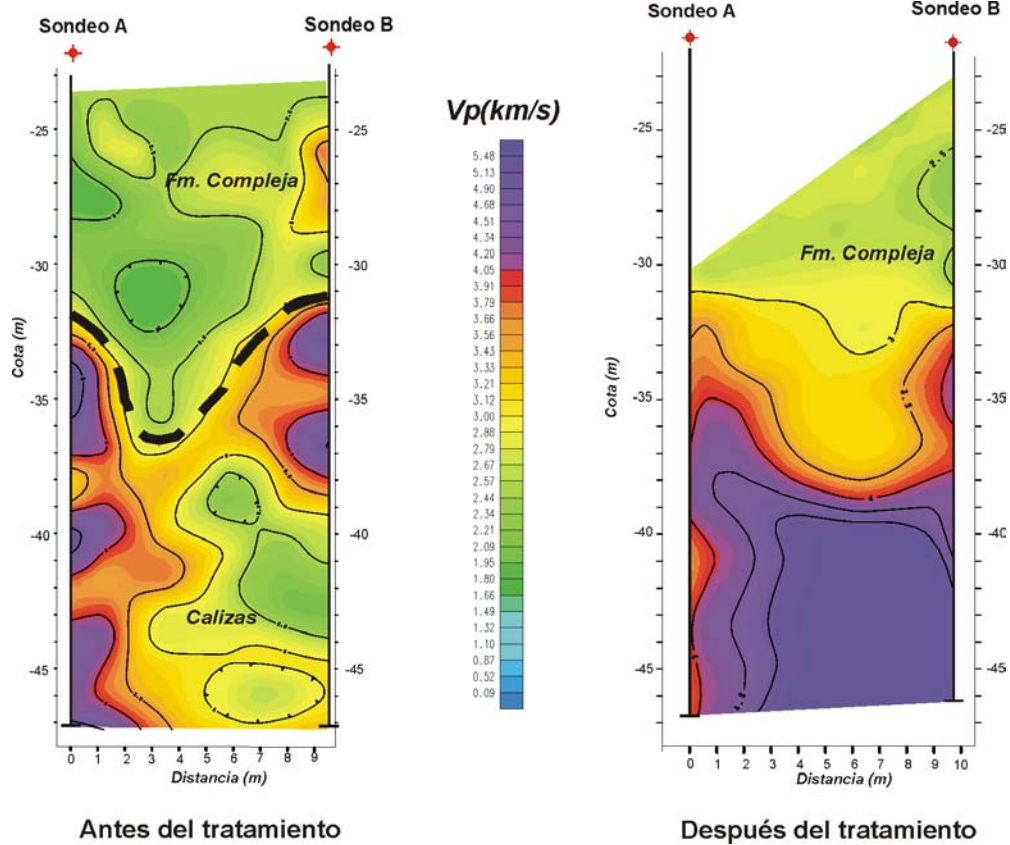


Figura 14.- Tomogramas sísmicos cross-hole obtenidos antes y después del tratamiento del terreno en una formación de calizas karstificadas.

5. MEDIDAS SÍSMICAS *CROSS-HOLE* Y *DOWN-HOLE*.

5.1. Algunos comentarios respecto a las ondas de cizalla.

En las especificaciones de los estudios geotécnicos para cimentaciones de edificios y estructuras de cierta importancia se incorporan cada vez con mayor frecuencia los estudios para la determinación de los valores de V_s del terreno mediante técnicas geofísicas por su capacidad para caracterizar *in situ* y de forma global a los macizos rocosos. Estos valores de V_s obtenidos por métodos geofísicos constituyen datos de fundamental importancia para los cálculos de las interacciones entre el terreno y las estructuras y también para evaluar la respuesta del terreno frente a los seísmos.

Además a partir de los valores de V_p y de V_s y los de densidad de los materiales es factible el cálculo de los módulos dinámicos (E,G y K) y el Coeficiente de Poisson según las fórmulas indicadas en el apartado 2 de estas notas.

Siendo V_s un parámetro de tanto interés en los estudios geofísicos surge de inmediato la pregunta: ¿Cómo determinar estos valores de forma precisa?. La respuesta más simple es que estas medidas se efectúen por procedimientos enteramente análogos a los empleados para los estudios de V_p que consisten en generar la señal sísmica en un punto del terreno y registrar las correspondientes ondas elásticas en diversos puntos mediante los adecuados sensores.

Sin embargo existe un problema importante: Las ondas S viajan por el subsuelo a una velocidad inferior a la de las ondas P y por lo tanto sus primeras llegadas aparecen enmascaradas en un tren de ondas complejo. En consecuencia su identificación puede ser muy problemática o prácticamente imposible en un registro sísmico de refracción convencional.

La solución a este problema implica por una parte la generación de señales sísmicas en las que predominen las ondas de cizalla y por otro lado el empleo de sensores específicos para el registro efectivo de estas señales. Un registro sísmico obtenido con un solo sensor en estas condiciones tendría la apariencia que presentamos en la Figura 8 ya comentada. Repitiendo el registro cambiando el sentido del impacto que genera la señal sísmica cambia también el signo de las deflexiones en el sismograma debido al carácter polarizado de las ondas de cizalla. Esta particularidad constituye un criterio inequívoco para la correcta identificación de las primeras llegadas de las ondas S para cualquiera de los métodos que se empleen para su estudio.

Los valores de V_s pueden determinarse mediante medidas realizadas en superficie (sísmica de refracción) pero es más frecuente y sencillo aunque también más costoso hacerlo mediante medidas en sondeos para lo cual existen dos métodos: Medidas *cross-hole* y medidas *down-hole*. Dejamos constancia de que también el método del Análisis Espectral de las Ondas

Superficiales es una herramienta específica para la determinación de los valores de V_s si bien por su complejidad no incluimos este método en este curso.

5.2. Medidas sísmicas *cross-hole*.

El método de las medidas sísmicas *cross-hole* consiste en su versión más sencilla, en provocar una señal sísmica en un sondeo y en registrarla mediante el adecuado receptor localizado en otro sondeo próximo, de modo que el punto donde se produce la señal y el receptor se encuentren a la misma cota. El proceso se repite desplazando ambos a pequeños intervalos a lo largo de los sondeos hasta recorrerlos en su totalidad. Son aspectos esenciales de este método los siguientes:

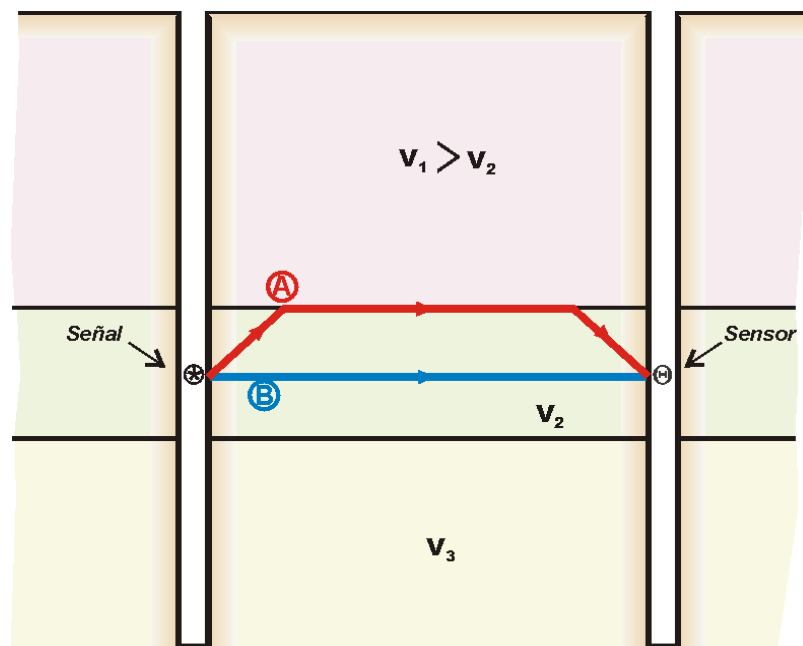
- < Se asume que la transmisión de la señal sísmica desde el emisor situado en el sondeo 1 hasta el receptor localizado en el sondeo 2 es directa, sin sufrir refracciones o reflexiones.
- < La señal sísmica debe generar ondas P y ondas S con la particularidad de que estas últimas puedan controlarse cambiando su polaridad a voluntad del operador.
- < La correcta identificación de las primeras llegadas de las ondas S en los sismogramas exige hacer al menos dos registros independientes para cada posición del sensor, con diferente sentido del impacto que produce las señales o bien el empleo de sensores especiales orientados diametralmente en sentidos opuestos.

La primera condición no siempre se cumple. Por ejemplo en medios estratificados con presencia de alternancias de niveles con diferentes valores de V_p y de V_s es muy probable si la distancia entre sondeos es mayor de 4-5 metros, que las primeras llegadas de las ondas sísmicas correspondan a señales refractadas a través de los niveles con mayores valores de V_p y de V_s (ver **Figura 15**). En tal caso el error consiste en que los valores calculados para los niveles menos competentes son superiores a los valores reales.

La ausencia de sistemas capaces de generar de forma efectiva ondas de cizalla en los sondeos ha sido el gran handicap que ha limitado durante muchos años la divulgación y el empleo sistemático del método *cross-hole*. El martillo Bison ha sido la referencia al respecto durante mucho años pese a sus manifiestas carencias según nuestra propia experiencia. En fecha muy reciente la sociedad Geotomographie ha desarrollado un sistema "sparker" reversible y orientable que combinado con un geófono multicomponente resulta de extraordinaria efectividad.

Las ondas S son polarizadas y esa particularidad es una ventaja que contribuye a su identificación pero también es un inconveniente : dependiendo de la disposición espacial de su plano de polarización su registro puede ser

m u y
m u y
e n
l a
n de los



bueno o
deficiente
función de
orientación
sensores.

Si V_1 es sensiblemente mayor que V_2 , puede ocurrir que el tiempo invertido por la señal sísmica según la trayectoria refractada (A) sea menor que el tiempo invertido según la trayectoria directa (B).

Figura 15.- Explicación de las posibles trayectorias refractadas en las medidas sísmicas cross-hole.

En las referencias bibliográficas y hasta fechas muy recientes se empleaba como sensor para estas medidas un geófono de tres componentes ortogonales entre sí (una vertical y dos horizontales) cuyos registros no siempre permitían la correcta identificación de las primeras llegadas de las ondas de cizalla. Los sistemas más avanzados de reciente desarrollo utilizan geófonos multicomponentes. Por ejemplo el sensor BGK-7 de Geotomographie incluye un geófono vertical y seis geófonos horizontales montados en pares en sentidos opuestos y desfasados a intervalos de 60° .

Este sistema, junto con el sparker reversible permite la obtención de registros como el que presentamos en la **Figura 16**. A la vista de estos registros se pueden confirmar de forma práctica todas las características previamente enumeradas de las ondas de cizalla :

- Su cambio de polaridad en función del sentido del impacto que las genera.
- Su diferente frecuencia y amplitud respecto a las ondas de compresión.

Figura 16.- Ejemplo de presentación de los resultados de un estudio sísmico cross-hole.

5.2.1. Procesado de los registros.

Conocida la posición exacta del punto donde se genera la señal y la del receptor con el que se registra ésta, el procesado de los datos incluye los siguientes pasos:

- < Identificación de las primeras llegadas de las ondas P y S en los registros y determinación del tiempo invertido por cada una de estas ondas en recorrer la distancia existente entre el punto donde se genera la señal y el sensor.
- < Cálculo de V_p y de V_s como cocientes entre la distancia recorrida por las onda P y S y los tiempos determinados en el apartado anterior.
- < El paso final en este tipo de estudio es el cálculo de los módulos dinámicos y el coeficiente de Poisson del macizo rocoso mediante las expresiones:

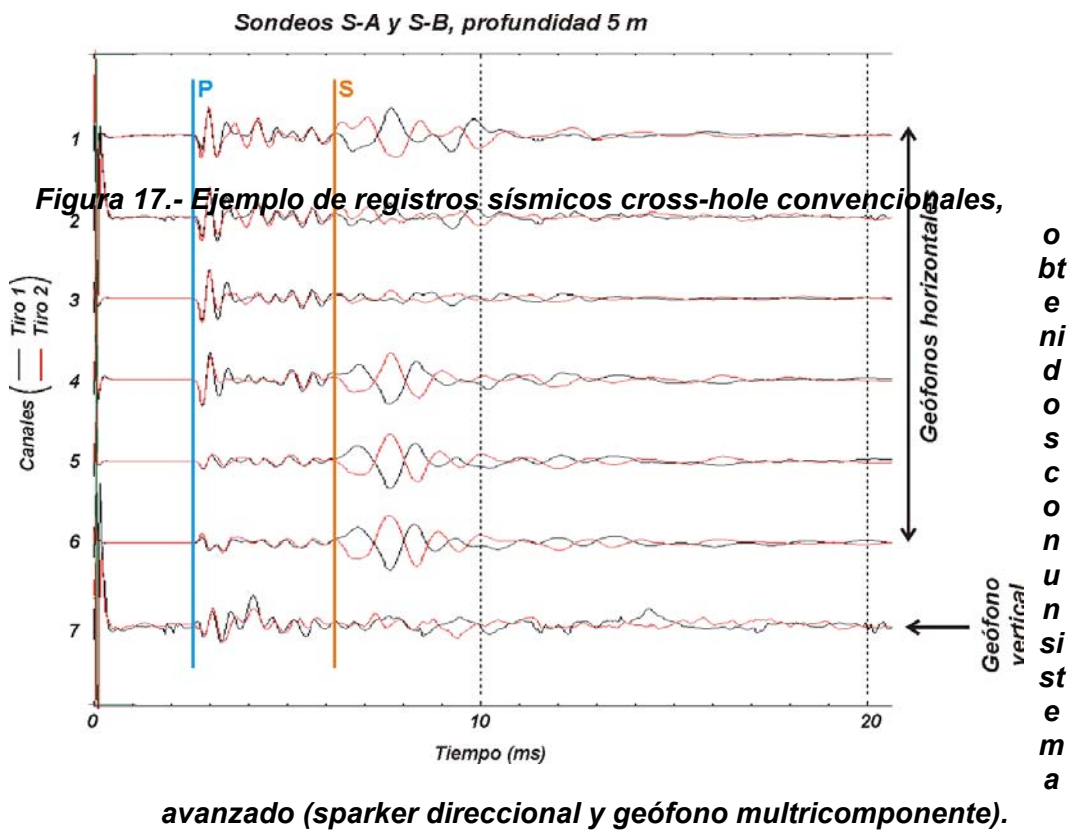
$$\text{Coeficiente de Poisson, } J = [(V_p/V_s)^2 - 2] / [2(V_p/V_s)^2 - 2]$$

$$\text{Módulo de rigidez, } G = dV_s^2 \text{ ; } d \text{ es la densidad}$$

$$\text{Módulo de Young, } E = 2G(1+J)$$

$$\text{Módulo volumétrico, } K = E / [3(1-2J)]$$

Los resultados de un estudio de este tipo se presentan normalmente en forma de gráficos y tablas con los valores de V_p y de V_s , los módulos dinámicos y el coeficiente de Poisson. Vease un ejemplo en la **Figura 17**. Se trata de datos numéricos que no requieren ningún comentario adicional.



5.2.2. Un ejemplo atípico.

Lo normal es que a partir de registros como los de la **Figura 16** en los que están perfectamente definidas las primeras llegadas de las ondas P y S se determinan los valores de V_p y de V_s de forma precisa y sencilla, calculándose a continuación los módulos dinámicos y el coeficiente de Poisson. Misión cumplida.

A veces las cosas no son tan fáciles y el siguiente ejemplo es en nuestra opinión un buen ejemplo de que aunque los registros sean fiables y su procesado riguroso, el geofísico debe pensar y analizar los resultados antes de entregarlos al geotécnico con quien debe contrastarlos. Para ello debe tener muy claros los conceptos básicos relativos a los mecanismos de propagación de las ondas sísmicas por el subsuelo y las particularidades geológicas de la zona de estudio.

Este ejemplo se ha tomado de un estudio realizado en el futuro emplazamiento de una CT de Ciclo Combinado localizado en Escombreras en una zona donde existe una alternancia de niveles consolidados (areniscas y conglomerados) y otros con muy bajo grado de consolidación (arenas, arcillas y limos) que se extiende hasta más de 30 metros de profundidad.

Pese a la buena calidad de los registros y con gran sorpresa por parte de todos los técnicos involucrados en el estudio comprobamos que los valores de V_s calculados a partir de los registros sísmicos *cross-hole* eran notablemente discrepantes con los resultados de ensayos geotécnicos (penetrómetros) y mucho más altos que los estimados a partir de éstos por el método de **Imai, Tsuneko et al.**

Las particularidades de la zona de estudio conforman un modelo sísmico muy especial ya que, por el pequeño espesor relativo de las capas y por las importantes diferencias entre sus valores de V_p y V_s , las primeras llegadas (tanto de las ondas P como de las ondas S) tiende a producirse de forma refractada a través de los niveles con mayores valores de V_p y V_s en las medidas sísmicas realizadas entre sondeos, cuando la distancia entre éstos es mayor de 2-3 metros. En este estudio la distancia media entre sondeos era de 10 metros.

En esta situación el principal problema en nuestra opinión se centra en la representatividad de los datos deducidos de las medidas sísmicas *cross-hole* convencionales y especialmente en lo que se refiere a los valores de V_s deducidos de las primeras llegadas de las ondas de cizalla.

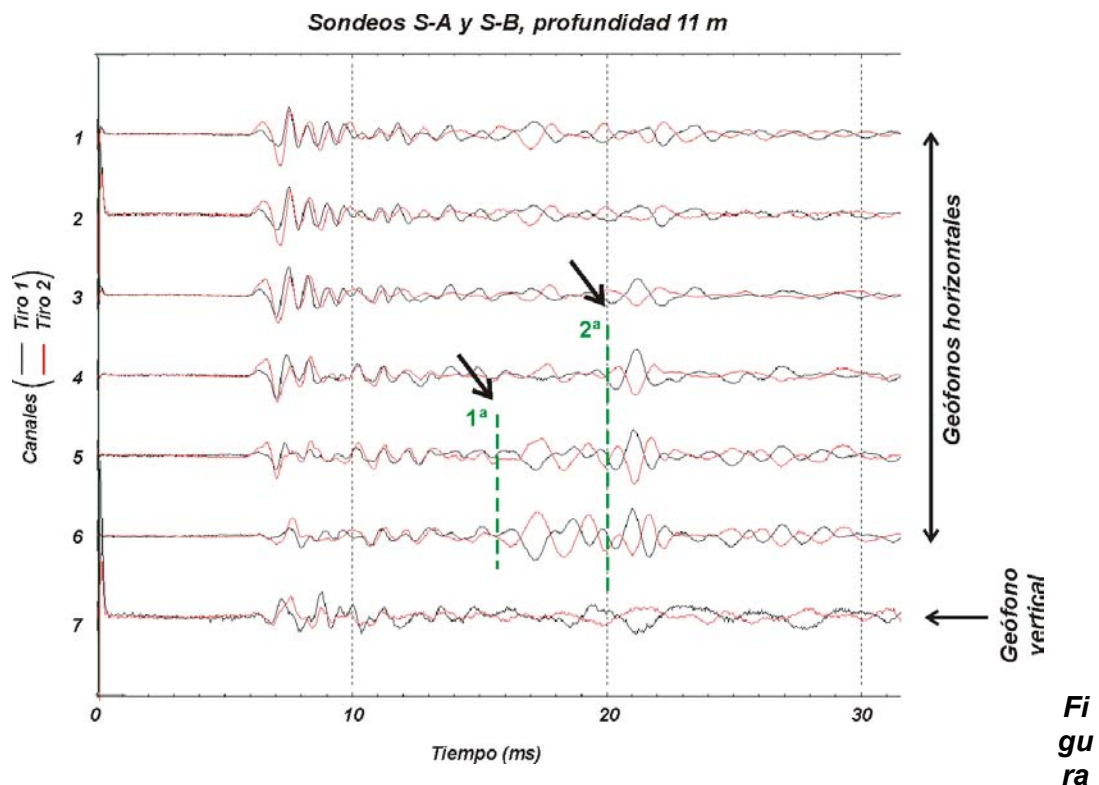
Las ondas P y S son ondas volumétricas y como tales se transmiten según un esquema 3D aunque por razones didácticas se idealizan en muchas ocasiones mediante sus trayectorias en modelos bidimensionales. En medios geológicos como el de este estudio donde se alternan capas de bajos valores de V_p y V_s con otras con valores sensiblemente más altos existe una alta probabilidad de que las primeras llegadas de las ondas P y S se produzcan mediante trayectorias refractadas a lo largo del medio con mayores valores de V_p y V_s .

Este hecho insalvable en lo que respecta a la ejecución de los registros sísmicos implica que los valores de V_p y de V_s calculados puede que no correspondan a llegadas directas tal como establece la teoría de las medidas sísmicas *cross-hole* y por lo tanto no caracterizan específicamente a los niveles del subsuelo frente a los que se sitúan el sensor y el punto de generación de

la señal sísmica cuando sus valores de V_p y de V_s son sensiblemente menores que los de las capas adyacentes. Los valores de V_p y de V_s así calculados son más altos que los de los niveles en cuestión.

Teniendo en cuenta estas ideas se trató de calcular valores de V_s puntuales de algunas capas más representativos considerando para ello no las primeras llegadas sino las correspondientes a un segundo tren de ondas de cizalla que presumiblemente tiene mayores posibilidades de haberse transmitido de forma directa a través de las capas de menor velocidad.

Para este análisis se seleccionaron una serie de puntos a partir de las secciones de V_p obtenidas previamente mediante tomografía sísmica *cross-hole*, considerando principalmente los que se sitúan en la parte central de las capas de bajo valores de V_p . Entendemos que en estos puntos hay mayor probabilidad de poder separar la señal refractada y la llegada directa.



18.- Ejemplo de registro sísmico cross-hole en el cual se observa una primera llegada de ondas S (refractada) y una segunda llegada (directa).

Es interesante observar (ver **Figura 18**) en la mayor parte de los registros seleccionados como existe y es claramente visible la llegada de un primer tren de ondas de cizalla que es el considerado para nuestros primeros cálculos según el procedimiento habitual, pero también es factible identificar un

segundo tren de ondas de cizalla de menor amplitud pero cuyos tiempos de llegada proporcionan valores puntuales de V_s más coherentes con la información obtenida de otros ensayos geotécnicos. Operamos para ello en la hipótesis razonable de que este segundo tren de ondas corresponda principalmente a la llegada directa. Los valores de V_s y de los módulos dinámicos calculados por este procedimiento fueron coherentes con el resto de la ensayos geotécnicos.

5.3. Medidas sísmicas *down-hole*.

Este método además de ser más barato elimina parte de los problemas de las medidas *cross-hole*. Únicamente requiere la perforación de un sondeo y la señal sísmica se genera en la superficie de un punto próximo al emboquille lo cual reduce la instrumentación necesaria para las medidas porque es más fácil generar la señal sísmica en superficie que dentro de un sondeo. Su principal inconveniente es que si el sondeo es relativamente profundo la señal sísmica puede sufrir una fuerte atenuación y filtrado en su tránsito por el terreno.

El procedimiento de ejecución de estas medidas es sencillo: Una vez preparado convenientemente el sondeo de forma semejante a lo requerido para las medidas *cross-hole*, se emplaza el sensor en una determinada posición dentro del sondeo y se efectúan al menos tres registros independientes: Para un impacto vertical y para dos impactos tangenciales de sentidos contrarios. El estudio completo del sondeo se hace repitiendo el proceso anterior para diversos emplazamientos del sensor distribuidos normalmente a intervalos del orden de un metro.

De acuerdo con nuestra experiencia la generación más efectiva de las ondas de cizalla se produce mediante impactos tangenciales sobre un elemento rígido empotrado firmemente en el terreno en la proximidad inmediata al emboquille del sondeo. En lo que respecta al sensor, las recomendaciones son las mismas que para las medidas *cross-hole*. Como mínimo se requiere el empleo de un geófono de tres componentes ortogonales (dos horizontales y una vertical) pero el empleo de sensores multicomponente permite un mejor registro e identificación de las ondas S. De acuerdo con nuestra experiencia los sensores con geófonos horizontales montados diametralmente en pares, en sentidos opuestos son los más recomendable.

En el procedimiento que podríamos definir como clásico para el **procesado de los registros *down-hole***, las etapas seguidas para determinar a partir de los registros geofísicos los valores de V_p y V_s de las diferentes capas del subsuelo atravesadas por el sondeo son las siguientes:

- < Identificación en los sismogramas de las primeras llegadas de las ondas de compresión y de cizalla determinando el tiempo invertido por cada una de ellas en recorrer la distancia existente entre el punto donde se genera la señal y el geófono donde se registra ésta. Esta fase del

estudio es de fundamental importancia, especialmente en lo que se refiere a las ondas de cizalla que son las más difíciles de reconocer en los sismogramas.

< Construcción para cada sondeo de un gráfico (dromocrónica) llevando en abscisas la distancia existente entre el punto de señal y el geófono situado en el sondeo y en ordenadas los tiempos de las primeras llegadas determinados según el apartado anterior. Estos gráficos se construyen independientemente para las ondas P y para las ondas S aunque normalmente se representan de forma conjunta en el mismo gráfico.

A su vez las distancias mencionadas se han de calcular para cada posición del geófono en el sondeo, en función de la localización del punto donde se genera la señal en la proximidad del emboquille. Dicho en otros términos, para estos cálculos se opera con distancias reales y no con la profundidad del punto donde se sitúe el geófono en el sondeo, aunque luego en la representación gráfica se indiquen profundidades para la mejor comprensión de los resultados.

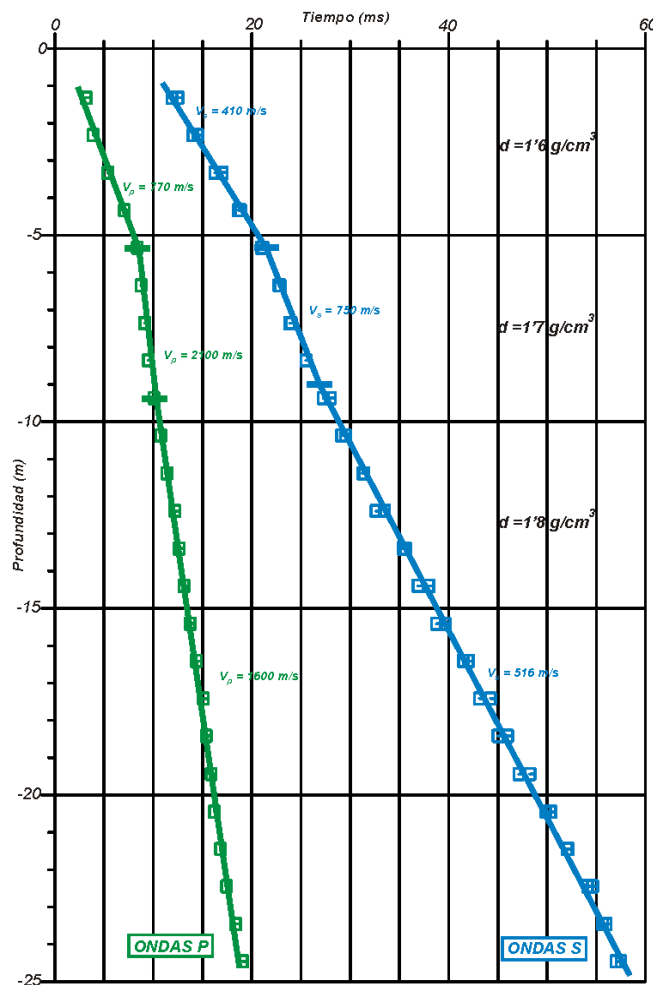


Figura 19.- Ejemplo de presentación de los resultados de un estudio sísmico down-hole.

- < Cálculo de los valores de V_p y V_s para cada una de las "capas" del subsuelo que se manifiestan de forma diferenciada en las dromocrónicas. En estos gráficos cada "capa" cuyos valores de V_p y V_s sean diferentes a los de las capas contiguas se manifiesta como un tramo de pendiente diferente. La inversa de tal pendiente determina la velocidad (V_p o V_s) de la "capa" en cuestión. Vease un ejemplo de este tipo de documentos en la **Figura 19**.

5.3.1. Algunos problemas y causas de error en las medidas down-hole.

El análisis de los registros de los estudios *down-hole* no es sencillo porque además de las primeras llegadas de las ondas P y S pueden incluir otros eventos que las enmascaran o que induzcan a errores. Citaremos aunque sea brevemente dos de las más comunes: Ondas tubo y ondas transmitidas a través de la tubería del sondeo, especialmente si es metálica.

Las primeras se transmiten a través del agua de los sondeos y pueden llegar a confundirse con ondas S. Para un geofísico experimentado resulta fácil reconocerlas por su linealidad, porque se inician en el nivel frático y porque la inversa de su pendientes es el valor de V_p del agua, 1.500 m/s. En el ejemplo de la **Figura 20** tomada de Doug Crice, 2003, se observan perfectamente estas ondas.

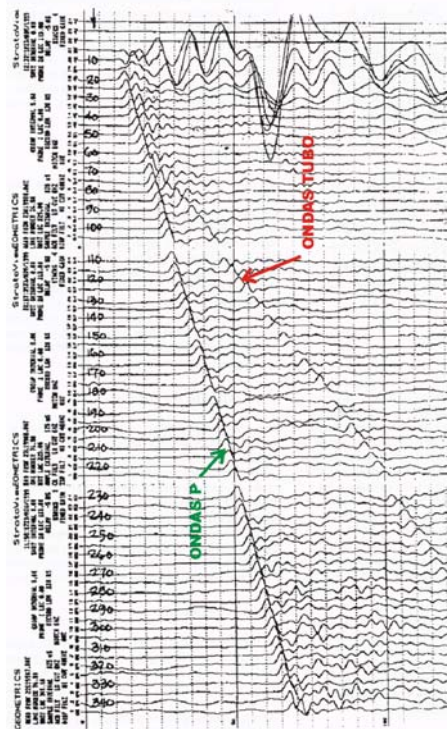
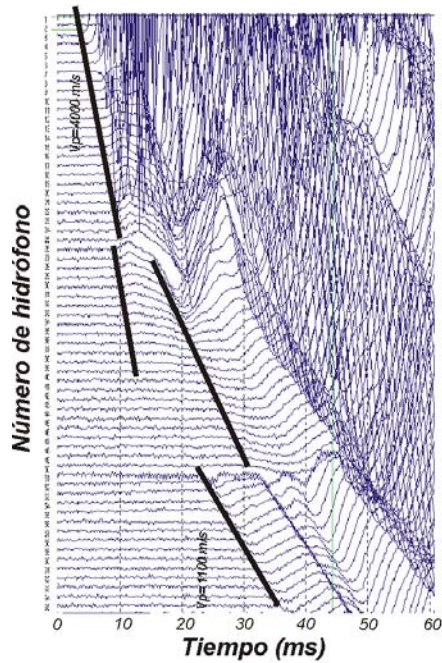
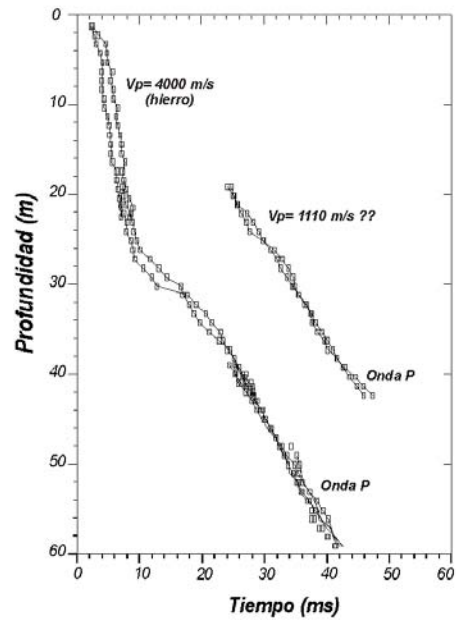


Figura 20.- Ejemplo de registros down-hole en los cuales se manifiestan las ondas tubo.

Más problemático es el efecto de las tuberías metálicas porque provocan una “canalización” de la señal sísmica a través de ellas de modo que las primeras llegadas de las ondas P a los sensores no se producen a través del terreno y los valores de V_p calculados no son representativos de éste. El ejemplo que presentamos en la **Figura 21** corresponde a un estudio realizado para el proyecto A-10 Nova Travessia do Tejo (Portugal) y en sus registros y en sus dromocrónicas se observa perfectamente el efecto de la tubería metálica del sondeo.



Registro down-hole del sondeo S28A



Dromocrónicas del sondeo S28A

Figura 21.- Registros sísmicos down-hole en los cuales se observa el efecto de la tubería metálica.

BIBLIOGRAFIA

- < ASTM. Dynamic Geotechnical Testing. STP. 654. 1977
- < Crice, D. 2003. Shear waves. Techniques and Systems. Geostuff.
- < M.B. Dobrin et al. 1988. Introduction to exploration geophysics. McGraw Hill.
- < Granda A et al. 1999. Caracterización de macizos rocosos mediante técnicas geofísicas. 1/ Parte. Algunas consideraciones respecto al método sísmico de refracción. INGEOPRESS.
- < Imai, Tsuneo et al. 1976. P and S-Wave Velocities in subsurface layers of ground. OYO Corporation.
- < B. Jögren 1984. Shallow Refraction Seismics. Chapman and Hall.
- < Kak A.C. and Slaney M (1988). Principles of Computerized Tomographic Imaging. IEEE Press New York.
- < R.W. Lankston. 1990. High resolution refraction seismic data acquisition and interpretation. Investigations in Geophysics nº 5. SEG
- < S.G. Lee et al. 1990. Field Testing in Engineering Geology. Geological Society. Engineering Geology. S.P. nº 6. 1990
- < H. Mooney 1984. Handbook of engineering geophysics. Vol. 1 Seismic. Bison Instruments.
- < D. Palmer. 1980. The generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation. S.E.G.
- < B.B. Redpath 1973. Seismic refraction exploration for engineering site investigations. Nat. Tech. Inf. Service.