

Capítulo IV

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE LAS VIBRACIONES ORIGINADAS POR LA CIRCULACIÓN DEL FC METROPOLITANO DE BARCELONA EN LA UBICACIÓN DEL NUEVO HOSPITAL DE SANT PAU.

4.1 Antecedentes.

La proximidad entre la línea 4 del ferrocarril metropolitano de Barcelona y la parcela donde se ha construido el nuevo edificio del Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, hace necesario conocer los niveles y la composición frecuencial de las vibraciones que pueden darse en el solar.

Los niveles vibracionales medidos se utilizaron en la elaboración del *Projecte del Nou Hospital de la Santa Creu i Sant Pau*, realizado por los arquitectos de Robert Brufau i Associats, S.A., determinando las medidas paliativas necesarias para que cualquier vibración generada por la circulación del ferrocarril metropolitano no afecte negativamente, tanto a los ocupantes como a los equipos médicos existentes, en la instalación hospitalaria.

Por este motivo, la Fundació Privada Hospital de la Santa Creu i Sant Pau solicitó al Servicio de Geofísica Aplicada de la Universidad Politécnica de Cataluña (Clapés, 2000) la realización de un registro y análisis de los niveles de vibración presentes en el solar, que ha sido usado en esta Tesina para comparar con los resultados obtenidos en el laboratorio.

4.2 Métodos sísmicos de prospección.

4.2.1 Introducción.

La *Prospección Geofísica* se define como la aplicación de las ciencias físicas en la búsqueda de recursos minerales útiles para el hombre, así como encaminados a resolver problemas puramente geológicos en la parte más superficial de la corteza terrestre.

En los trabajos de ingeniería civil, túneles, carretera, edificaciones, etc., juega un papel muy importante la Prospección Geofísica con la determinación de la profundidad de la roca adecuada que sirva de cimiento a las obras, o como en este caso, la determinación de las vibraciones que debe soportar una nueva construcción debido al paso del ferrocarril a muy poca distancia de la nueva edificación.

En general, los métodos geofísicos estudian el reparto en profundidad de alguna determinada propiedad físico-química de las capas del subsuelo, o de alguna característica relacionada con dichas propiedades. En esencia la prospección geofísica consiste en determinar las variaciones de dicha propiedad sobre la zona a explorar. Las divergencias o anomalías del valor normal que sería de esperar en la zona investigada respecto del valor real encontrado, indican, en general la presencia en profundidad de estructuras o acumulaciones minerales que pueden ser de interés.

El método sísmico detecta los tiempos de llegada de las ondas producidas, una vez reflejadas o refractadas en las distintas formaciones geológicas y se puede llegar a una imagen muy aproximada de las discontinuidades sísmicas. Estas discontinuidades sísmicas coinciden, generalmente, con las discontinuidades estratigráficas.

En este caso el objetivo es registrar las vibraciones que se producen al paso del ferrocarril metropolitano en diferentes puntos del solar donde se ubica el nuevo Hospital y comprobar así su influencia sobre el nuevo edificio y las repercusiones que puede tener sobre éste, así como sobre los ocupantes del recinto hospitalario.

4.2.2 Nociones básicas.

La sismología forma la base de los métodos sísmicos de prospección. Es conveniente, por tanto, hacer un repaso de las ideas generales sobre dicha ciencia.

- *Terremoto o sismo*: es un movimiento o una serie de movimientos transitorios y repentinos del terreno, originados en una región limitada de la corteza terrestre, que se propagan desde su origen en todas direcciones.
- *Microsismo*: movimientos de la corteza mucho más débiles que los terremotos causados por el tráfico de automóviles, trenes, oleaje, caída de lluvia o por el viento.
- *Sismógrafo*: instrumento que sirve para medir las vibraciones debidas a los terremotos. Llamado *sismómetro* o *geófono* en prospección sísmica.
- *Sismograma*: es un sismómetro equipado con un sistema de registro capaz de registrar variaciones proporcionales al desplazamiento, a la velocidad o a la aceleración del terreno, según sus características constructivas.
- *Sismograma*: es el registro hecho por el sismógrafo.

Cuando se produce un sismo o microsismo ocurre un movimiento rápido del terreno. Las ondas producidas se transmiten desde el foco, a través de la tierra, a velocidades que dependen de la naturaleza de los materiales que atraviesan y según trayectorias que producen el tiempo mínimo.

Las ondas directas se propagan del foco al observatorio de tres maneras diferentes:

- 1) Ondas longitudinales (de compresión) u ondas P (primarias).
- 2) Ondas transversales (de cizallamiento) u ondas S (secundarias).
- 3) Ondas superficiales u ondas L (de largo periodo).

4.2.3 Fundamentos físicos.

Las ondas sísmicas producidas en la tierra dependen de la elasticidad de los materiales a través de los que se propagan. La velocidad de las ondas depende de las constantes elásticas de estos materiales.

Las ondas elásticas se clasifican en ondas internas y ondas superficiales.

a) Las ondas internas son aquellas que viajan a través del interior de un medio elástico. Pueden diferenciarse los siguientes tipos:

- 1) *Ondas longitudinales*. El movimiento de vibración de las partículas se produce en la misma dirección de propagación o formando un ángulo de 180° con ella. Estas ondas también se llaman de compresión y dilatación o de condensación y rarefacción. En sismología se llaman ondas primarias u ondas P; son las primeras en registrarse en el punto de observación y tienen una amplitud relativamente pequeña y periodo corto.
- 2) *Ondas transversales*. El movimiento de vibración de la partícula se produce normalmente a la dirección de propagación. Estas ondas se llaman también ondas de cizallamiento. En sismología se designa con la letra S; son registradas con posterioridad a las ondas P e indican un movimiento de amplitud algo mayor y periodo semejante o algo superior al de aquellas ondas.

La velocidad de propagación de estas ondas es función de las constantes elásticas de los medios en que se propagan:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4.1)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (4.2)$$

siendo:

E el módulo de Young (la variable más importante en el control de las velocidades sísmicas)

ν el coeficiente de Poisson

ρ la densidad

V_L y V_T las velocidades de las ondas longitudinal y transversal, respectivamente.

$$\frac{V_L}{V_T} = \sqrt{\frac{1-\nu}{0,5-\nu}} \quad (4.3)$$

Un valor típico de ν es 0,25 lo que da lugar a que las ondas longitudinales se propagan a una velocidad casi el doble que las ondas transversales.

Conocida la densidad del terreno o estimada dentro de ciertos límites, la determinación de las velocidades de las ondas P y S conduce a la determinación de todas las constantes elásticas por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G : \text{módulo de corte} \quad (4.4)$$

$$k = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (4.5)$$

$$\nu = \frac{0,5 \left| \frac{V_L}{V_T} \right|^2 - 1}{\left(\frac{V_L}{V_T} \right)^2 - 1} \quad (4.6)$$

$$\left(\frac{V_L}{V_T} \right)^2 = \frac{\nu-1}{\nu-0,5} \quad 0 < \nu < \frac{1}{2} \quad (4.7)$$

Estas ecuaciones muestran que las ondas transversales no pueden existir en un medio que tenga rigidez $\mu = 0$, ya que $V_T = 0$, lo que ocurre en la mayor parte de los fluidos.

b) Las ondas superficiales son aquellas que existen únicamente en la superficie libre de un medio elástico. Entre ellas se encuentran las ondas Rayleigh y ondas Love; son las últimas en registrarse en el punto de observación y presentan amplitudes y periodos relativamente grandes (por esto se les conoce como ondas largas).

Las ondas registradas son mucho más complejas ya que éstas pueden reflejarse y refractarse varias veces de manera que pueden cambiar de tipo de onda (de longitudinal a transversal), de manera que la complejidad de un registro sismológico puede ser muy grande.

4.3 Campaña de medición de vibraciones.

Esta campaña de medición de vibraciones fue realizada por el Servicio de Geofísica Aplicada de la Universidad Politécnica de Cataluña (Clapés, 2000).

4.3.1 Planteamiento de las mediciones, equipo y resultados.

Las mediciones se realizaron el día 10 de Diciembre de 1999.

El equipo utilizado en la realización del estudio de las vibraciones es el siguiente:

- 9 acelerómetros Bruel & Kjaer modelo 4370 con banda pasante, en modo aceleración, entre los 0,1 Hz a 5 KHz, con cables de bajo ruido triboeléctrico y sistemas de fijación al terreno.
- 9 acondicionadores de señal Bruel & Kjaer modelo 2635 con banda pasante seleccionada, en modo aceleración, entre los 0,2 Hz a 1 KHz, equipados con cables coaxiales de baja capacidad para la transmisión de la señal hasta el sistema de registro.
- 1 registrador TEAC modelo RD-145T en soporte DAT, con capacidad hasta 16 canales y banda pasante de 0 Hz a 2,5 KHz.
- 1 analizador de vibraciones Bruel & Kjaer modelo 2515. Seleccionable en modo de filtros digitales a 1/3 de octava o en FFT de 256 líneas de resolución.
- 1 analizador de señales Bruel & Kjaer modelo 2034 en modo FFT con promediado de picos con 800 líneas de resolución.
- 1 tarjeta digitalizadora Data Translation modelo PCMCIA DT 7102.
- 1 Software de análisis de señales Hewlett Packard modelo DTVEE.
- PC's como soporte informático e impresoras de color como salida gráfica.

La ubicación de los sensores instalados puede consultarse en el plano de un sector de la planta de la edificación (ver anejo 1).

Se obtuvieron unos registros temporales de la circulación de 8 unidades de ferrocarril. Estos registros permitieron seleccionar la circulación que ha generado los máximos niveles de vibración. A los registros temporales, del ferrocarril seleccionado, se les efectuaron dos tipos de análisis en el dominio de las frecuencias: a) aplicación de filtros de 1/3 de octava y b) aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Puede verse en la figura 4.1 el registro temporal obtenido en los tres primeros canales, correspondiente a la unidad seleccionada.

A los registros temporales obtenidos se les ha aplicado un análisis frecuencial mediante filtros digitales en bandas de 1/3 de octava, tal como viene especificado en la Norma ISO 2631-2 (figura 4.2).

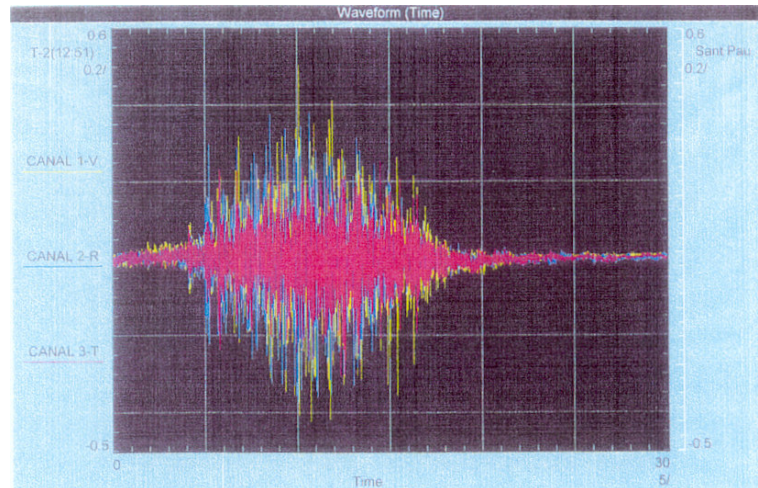


Figura 4.1: Registro temporal obtenido por tres canales. (Clapés, 2000)

Las amplitudes de las bandas espectrales vienen dadas en valores eficaces (RMS) y unidades m/s^2 . La frecuencia de las bandas espectrales se mide en hercios (Hz).

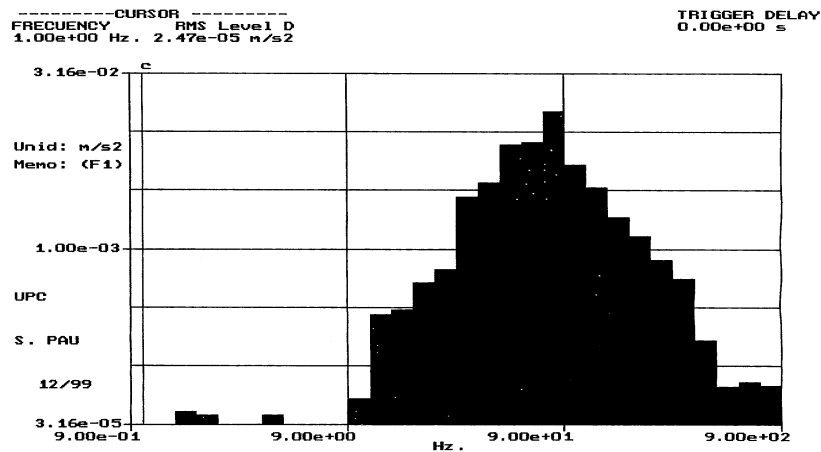


Figura 4.2: Análisis en bandas de 1/3 de octava del registro del tren seleccionado (aceleración-frecuencia). (Clapés, 2000)

En la figura 4.3 se muestra el análisis efectuado en el dominio de frecuencias aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) a los registros temporales de la unidad de ferrocarril seleccionada.

Se estudió el posible efecto de los niveles de vibración determinados en el solar (a una cota de -4.4 metros de referencia respecto a la cota de la calle Mas Casanovas) sobre los ocupantes del recinto hospitalario. Los resultados obtenidos se compararon con los niveles que proporciona la Norma ISO 2631-2. Esta Norma Internacional es la que más ampliamente se utiliza para abordar problemáticas similares a la referida en este caso.

Se analizó también la afectación, debida a los niveles de vibración determinados, sobre los posibles equipos médicos a instalar en el hospital. Los resultados se compararon con los niveles de vibración requeridos para un sistema RMN.

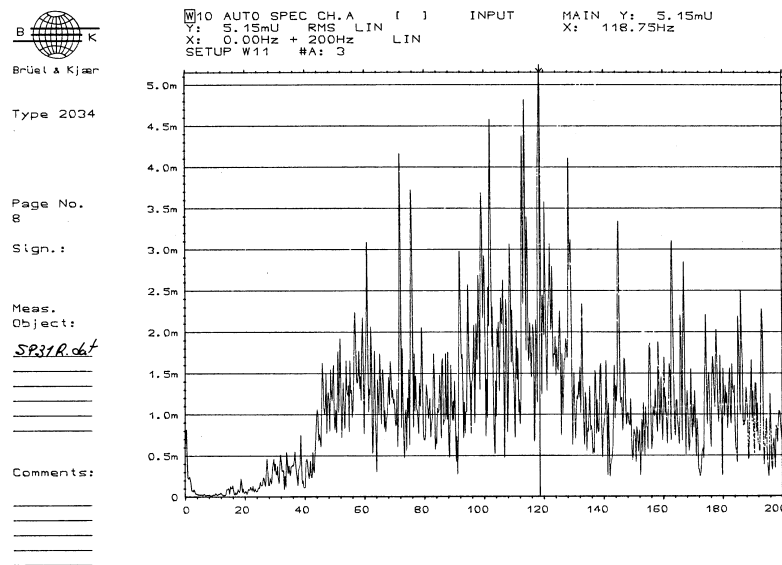


Figura 4.3: Análisis FFT de la señal del registro del ferrocarril seleccionado (aceleración-frecuencia). (Clapés, 2000)

Estos equipos de diagnóstico por imagen, son uno de los sistemas más sensibles a las vibraciones.

Los niveles de vibración obtenidos por la circulación del ferrocarril estudiado superan los niveles correspondientes a la vibración transitoria establecida por el fabricante para el correcto funcionamiento de los equipos RMN.

4.3.2 Conclusiones y recomendaciones.

Según el estudio realizado por el Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC (Clapés, 2000) se determinan las siguientes conclusiones.

Las medidas de vibraciones, correspondientes a la unidad de metro circulando a las 12:49 horas (la que ha alcanzado el mayor nivel), efectuadas en el solar donde se ubica el edificio del nuevo Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, no han superado los límites establecidos por la norma ISO 2631-2 para un movimiento combinado X-Y-Z. Se han superado, en cambio, los límites establecidos por el fabricante de los equipos RMN para episodios transitorios vibracionales. Por lo que respecta a la norma ISO 2631-2 no es inconveniente la cercanía de la línea de ferrocarril a las nuevas instalaciones, pero se supera el umbral marcado para el buen funcionamiento de los equipos RMN.

El análisis frecuencial de las señales registradas, muestran niveles espectrales importantes en las bandas de alta frecuencia (20 Hz a 200 Hz). Estas señales se deben a la proximidad entre la circulación del metropolitano y el solar. Estas vibraciones pueden inducir vibración acústica en determinados componentes del edificio, pudiendo, consecuentemente, provocar ruidos en el espectro audible y, por lo tanto, originar molestias a los residentes del hospital.

4.4 Análisis de la señal.

La señal registrada por los geófonos o sismómetros, que son los instrumentos que detectan los pequeños movimientos del suelo debidos a las distintas llegadas de energía, se analiza mediante correlación cruzada.

La correlación cruzada muestra la similitud entre dos señales de tiempo $a(t)$ y $b(t)$ para diferentes periodos de tiempo entre las dos señales.

Se define como correlación cruzada:

$$T_{(ab)}(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a(t)b(t+\tau) dt \quad (4.8)$$

A partir de la correlación cruzada, conociendo la distancia entre los receptores, en nuestro caso los geófonos, puede determinarse el tiempo de llegada de las ondas P y S a cada uno de los geófonos y de este modo determinar los parámetros del terreno.

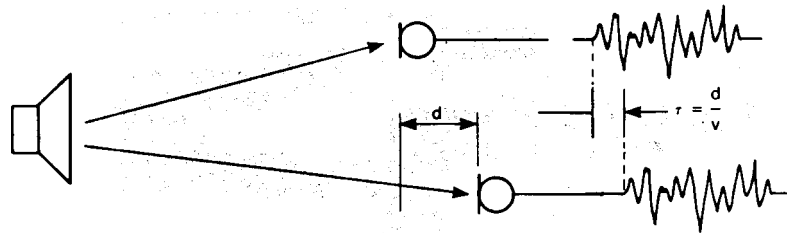


Figura 4.4: Correlación cruzada.

donde:

d es la distancia entre geófonos;

τ es el periodo;

v es la velocidad de propagación de las ondas.

La función correlación cruzada se puede también utilizar para definir la contribución en la medida de la salida de un sistema de varias fuentes independientes de la entrada de información.

Para la realización de este estudio se han tenido en cuenta únicamente los sensores P-2 y P-3 que se situaron en el solar del nuevo Hospital de la Santa Creu i Sant Pau. Puede verse la posición de estos sensores en el plano de situación de los mismos en el anejo 1.

La elección de trabajar únicamente con estos sensores se debe a que son los que se encuentran más cerca del foco de transmisión de ondas.

Para saber la distancia que separa a estos sensores del foco de ondas se mide sobre una sección transversal a la vía, ya que en esta zona puede considerarse la pared del solar sobre la que se colocaron los sensores y la vía aproximadamente paralelas. De

esas mismas secciones transversales también se dispone de información geológica a tener en cuenta para la obtención de los resultados.

La distancia entre geófonos es de 25 metros. La cota a la que se encuentra la vía del ferrocarril metropolitano es de 67,463 metros; la cota a la que se encuentra la calle es 79,268 metros y la cota del solar en el que se colocaron los geófonos es de 75,0 metros.

Se considera un ancho de vía de 1,5 metros para el cálculo y únicamente se tiene en cuenta la vía más cercana a la pared del solar como aquella que emite las ondas, cuya distancia al hastial del túnel es de un metro. El foco emisor se considera situado en el centro de dicha vía. El hastial más cercano a la pared del solar está separado de ésta 2,5 metros, de modo que el foco emisor se encuentra a una distancia de la pared del solar de 4,25 metros horizontalmente.

Trazando una línea recta entre el geófono -intersección de la pared que separa el solar y el plano horizontal del mismo- y el foco -centro de la vía- se obtienen las distancias directas entre éstos.

Las distancias obtenidas para los geófonos 3 y 2 (ver ubicación en el anejo 1) son de 8,5 y 30 metros respectivamente, con una separación entre los mismos de 25 metros.

Finalmente se obtiene la distancia d con la que se calcula mediante correlación cruzada los tiempos de llegada de las ondas. Esta distancia es $d = 30 - 8,5 = 21,5$ metros.

Los tiempos de llegada de las ondas obtenidos utilizando la correlación cruzada son: $t_p = 6,89$ milisegundos y $t_s = 11,09$ milisegundos.

Finalmente se obtiene la velocidad de las ondas sísmicas: $v = d/t$

$$\begin{aligned} V_P &= 21,5 / 6,89 = 3,121 & \rightarrow & 3,12 \text{ m/s} \\ V_S &= 21,5 / 11,09 = 1,939 & \rightarrow & 1,94 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Estas velocidades son algo elevadas comparadas con registros efectuados sobre terrenos de características semejantes, por lo que cabe suponer que la existencia del substrato de pizarras (ver capítulo III) desvirtúa la validez de los resultados obtenidos al transmitirse las ondas por el mismo. Los parámetros calculados en el siguiente apartado deben referirse al substrato rocoso más que al propio suelo.

4.5 Obtención de los parámetros resistentes del suelo.

Con todos los datos obtenidos a partir del análisis de las señales de la campaña de sísmica realizada, según se explicó en el apartado 4.2.3, puede relacionarse la velocidad de propagación de las ondas por el terreno con las constantes elásticas del mismo.

La velocidad de propagación de estas ondas es función de las constantes elásticas de los medios en que se propagan, de modo que, las ecuaciones que relacionan estas velocidades con las constantes elásticas del suelo son 4.1 y 4.2 definidas en el apartado 4.2.3.

La densidad del suelo se considera en este caso $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$. V_L y V_T , las velocidades de las ondas longitudinal y transversal, respectivamente, corresponden a V_P y V_S calculadas en el apartado anterior 4.4.

De la relación de ambas velocidades V_P y V_S se obtiene el coeficiente de Poisson como parámetro del suelo.

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{1-\nu}{0,5-\nu}} \quad (4.9)$$

$$\nu = \frac{0,5 \left| \frac{V_P}{V_S} \right|^2 - 1}{\left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1} = 0,1857 \rightarrow \nu \approx 0,2$$

Considerando únicamente la velocidad de las ondas longitudinales u ondas primarias (ondas P) se obtiene el módulo de Young (E).

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4.10)$$

$$E = \frac{\rho V_P^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} = 1,75E10N/m^2 \rightarrow \mathbf{E = 1,75E10 N/m^2}$$

Finalmente, considerando la velocidad de las ondas transversales, u ondas secundarias (ondas S) se obtiene el módulo de corte (G).

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.11)$$

$$G = \rho V_s^2 = 7,52E9 \text{ N/m}^2 \rightarrow \mathbf{G = 7,52E9 \text{ N/m}^2}$$

Los valores de los módulos calculados por medio de ensayos sísmicos se obtienen a pequeñas deformaciones, donde este valor es más alto que el obtenido para grandes deformaciones. El suelo casi no se deforma, además de pequeñas son rápidas y ésto también influye en aumentar el valor.

Todo esto se verifica al quedar demostrado que la rigidez del suelo disminuye con la deformación, debido a la no linealidad del comportamiento tenso-deformacional.

Véase capítulo 5.5 *Ensayo triaxial de columna resonante* para un análisis pormenorizado del valor del módulo de corte a pequeñas deformaciones.

4.6 Parámetros geotécnicos obtenidos de prospección geofísica.

IV- SÍSMICA				
V_P (m/s)	V_S (m/s)	E-módulo Young (N/m ²)	G-Módulo corte (N/m ²)	G-Módulo corte (Pa)
3,121	1,939	1,75E+10	7,52E+09	7,52E+09

Tabla 4.1: Parámetros geotécnicos obtenidos a partir de la campaña de prospección sísmica.