



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEOLÓGICA
Curso 2022-2023**

Aplicación de técnicas geofísicas y ensayos *in situ* para determinar la efectividad de una inyección de resinas expansivas en la cimentación de un edificio histórico

Application of geophysical techniques and in situ tests to determine the effectiveness of expansive resin injection in the foundation of a historic building

MANUEL CABELLO DE LA HOZ

TUTOR: ENRIQUE ARACIL ÁVILA



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEOLÓGICA

Curso 2022-2023

Aplicación de técnicas geofísicas y ensayos *in situ* para determinar la efectividad una inyección de resinas expansivas en la cimentación de un edificio histórico

MANUEL CABELLO DE LA HOZ

TUTOR: ENRIQUE ARACIL ÁVILA

Fdo.: Manuel Cabello De La Hoz

Fdo.: Enrique Aracil Ávila



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

D./ Manuel Cabello de la Hoz, con NIF 53810078Z, estudiante del Máster Universitario en Ingeniería Geológica en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2022-2023, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado “Aplicación de técnicas geofísicas y ensayos in situ para determinar la efectividad una inyección de resinas expansivas en la cimentación de un edificio histórico” y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo tutor es: Enrique Aracil Ávila

DECLARO QUE:

El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en las referencias bibliográficas. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 25 de Mayo de 2023

Fdo.: Manuel Cabello De La Hoz

AGRADECIMIENTOS

Para empezar, me gustaría dar las gracias a mi tutor Enrique Aracil Ávila, por ser un gran profesor y un excelente tutor, y a CECTECO RCC, ya que, sin ellos, este trabajo no sería posible.

Al equipo de Análisis y Gestión del Subsuelo, que me acogieron y me enseñaron muchísimo, y harán que recuerde siempre con cariño mi primera experiencia laboral.

A mis padres, porque no podría haber llegado hasta aquí sin sus consejos, su confianza y su apoyo. Nunca podré agradecerles lo suficiente todo lo que han hecho por mí.

A mi pareja, por estar siempre a mi lado para celebrar los momentos buenos y para ayudarme a superar los malos, y por motivarme a aprender y a ser mejor persona.

A mis amigos, por el apoyo y por los buenos momentos tanto dentro como fuera de la facultad.

A los profesores de la facultad, por transmitirnos sus experiencias y conocimientos y por toda la ayuda que nos han brindado a lo largo de estos años.

Muchas gracias a todos por haber hecho esto posible.

ÍNDICE

1. RESUMEN	2
2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
3. LOCALIZACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO.....	4
4. METODOLOGÍA.....	5
4.1 Geo-rádar (GPR)	5
4.2 Sísmica MASW	6
4.3 Penetración dinámica mediana (DPM).....	8
4.4 Inyección de resinas expansivas.....	9
4.4.1 Propiedades mecánicas de la resina	11
4.4.2 Propiedades químicas de la resina.....	12
4.4.3 Metodología de la actuación.....	12
5. TRABAJOS REALIZADOS	14
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
6.1 Resultados Geo-rádar.....	17
6.2 Resultados sísmica MASW	23
6.3 Resultados penetrómetros	29
6.3.1 Valores DPM	29
6.3.2 Obtención NB y NSPT	32
6.4 Resultados de los ensayos en resinas.....	34
6.4.1 Resultados de las propiedades mecánicas.....	34
6.4.2 Resultados de las propiedades químicas	36
6.5 Integración de técnicas	37
7. CONCLUSIONES.....	43
8. BIBLIOGRAFÍA	45
9. ANEXOS	46
9.1 Radargramas	46

1. RESUMEN

Se ha realizado una campaña de inyección de resinas expansivas en la cimentación de un edificio histórico para mejorar las características del terreno y frenar el desarrollo de patologías existentes como grietas y asentamientos. Dada la incertidumbre y dificultad de los procesos de inyección, se ha estudiado el terreno mediante distintas técnicas tanto antes como después de la inyección para determinar si la inyección ha cumplido su propósito.

Las técnicas utilizadas para el control son Geo-rádar (GPR), Sísmica MASW y Ensayos de penetración dinámica mediana (DPM). Son técnicas que difieren mucho en sus principios, metodologías y resultados, pero en este estudio se ha podido comprobar la efectividad de la inyección con cada una de las tres técnicas, con resultados positivos en los tres casos:

- Geo-rádar: Se han detectado cambios en la morfología de los reflectores, lo que indica que ha cambiado la disposición de los materiales del subsuelo. De forma general en todos los perfiles, los reflectores pierden reflectividad, indicando que el terreno es más homogéneo que antes de la inyección. Estos cambios se pueden observar en los perfiles hasta profundidades entre 1,80 y 2,0 m.
- Sísmica MASW: Los registros de velocidad de ondas de corte muestran un claro aumento de velocidad tras la inyección, indicando una mayor compactación y rigidez del terreno. Esta mejora se produce hasta profundidades entre 1,80 y 3,10 m dependiendo del ensayo y, por debajo de esas profundidades, no hay diferencias significativas de velocidad entre fases. Por otro lado, en dos puntos de medida realizados a un metro de distancia de las inyecciones no se detectan cambios significativos en los registros de velocidad por lo que se considera que la resina no ha sido perjudicial para el terreno próximo a la actuación.
- Penetrómetros: Los registros de golpeo presentan claras mejoras tras la inyección lo que significa que ha aumentado la resistencia del terreno. Los golpes de la fase II registran nº de golpeo muy superiores a los de la fase I hasta profundidades de hasta 2,50 m. Por debajo, y hasta 3,50 m, la mejora es moderada y disminuye con la profundidad. Desde 3,50 m hasta el final del ensayo no se observan diferencias en el golpeo entre las dos fases del estudio.

Se concluye, por tanto, que las inyecciones han cumplido su objetivo de mejora del terreno, y que lo han hecho sin producir roturas o alterar los materiales circundantes o inferiores. Las técnicas geofísicas y ensayos *in situ* utilizadas en el estudio se han complementado mutuamente, permitiendo conocer diferentes características del terreno a la vez que se contrastan los resultados y se mejora la calidad del análisis.

2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En un edificio histórico situado en la Comunidad de Madrid (por motivos de confidencialidad, no se precisa su localización) se han realizado unos ensayos de consolidación del terreno para mejorar las características del terreno y detener el incremento de patologías que se estaban produciendo en su estructura (grietas, asentos, etc.). Para confirmar que estos trabajos de consolidación del terreno fuesen eficaces se aplicó un conjunto de técnicas muy variadas cuyos resultados permitieran concluir si se había producido mejora o no.

El objetivo de este trabajo ha consistido, por tanto, en aplicar un conjunto de técnicas para comprobar la efectividad de dicha actuación de mejora del terreno mediante inyecciones de resinas expansivas. Para ello, se han analizado y comparado los resultados obtenidos por los siguientes métodos geofísicos y ensayos *in situ*: Geo-rádar (GPR), Sísmica MASW y Ensayos de penetración dinámica mediana (DPM).

Cada uno de estos ensayos genera unos resultados diferentes debido a que utilizan metodologías muy distintas. Los métodos geofísicos empleados tienen en común que no destruyen el terreno y proporcionan información indirecta, pero la sísmica MASW y el Geo-rádar difieren bastante, tanto en su metodología como en los parámetros que miden: la sísmica obtiene un perfil vertical de velocidad de ondas sísmicas en un punto, mientras que el Geo-rádar toma medidas continuas para crear un perfil bidimensional con los ecos electromagnéticos reflejados en el subsuelo. Por otro lado, los ensayos de penetración obtienen información directa sobre la resistencia de los materiales que atraviesan. Al tener informaciones de fuentes tan distintas, se analizarán los resultados de cada una por separado, pero también de forma conjunta (y ahí está parte de lo novedoso del tema abordado en el TFM) para determinar si la información obtenida es coherente entre los métodos. Además, si esto ocurre, dará más robustez a las conclusiones ya que, precisamente, alcanzar esas conclusiones a partir de técnicas muy distintas consolida dichas valoraciones.

La campaña se ha planteado en dos fases, una antes y otra después de la consolidación, con el fin de comprobar la efectividad de dicha actuación:

- Fase I (inicial): Realizada el 30 de mayo de 2022, previa a las inyecciones en el terreno.
- Fase II (final): Realizada el 2 de junio (DPM) y 8 de junio (GPR y MASW), de 2022, posterior a las inyecciones del terreno.

De esta forma, se determinaron las propiedades del terreno antes y después de la actuación para comprobar si las inyecciones han cumplido su propósito. Por otro lado, se analizó el terreno en algunas zonas alejadas de la inyección para conocer si la presión generada por las inyecciones afecta negativamente a los materiales próximos a la cimentación.

3. LOCALIZACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

Por motivos de confidencialidad no se indica la localización exacta del edificio del cual se está haciendo el estudio, así como tampoco se indica la actividad que en él se desarrolla.

Sí se puede mencionar que la zona de estudio se encuentra al Este de la Comunidad de Madrid, próxima al límite con Castilla la Mancha. Geológicamente se encuadra en la zona central de la Cuenca del Tajo (Figura 1).

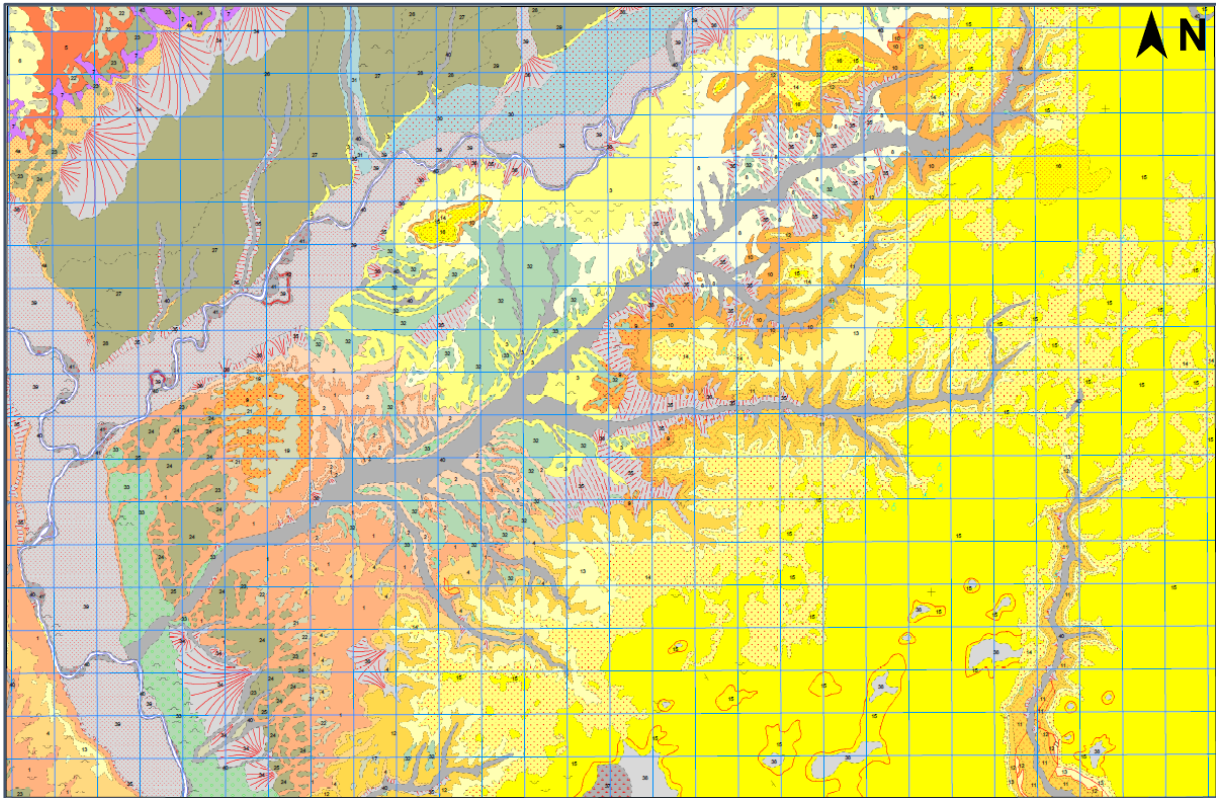


Figura 1: Cartografía geológica MAGNA de la zona en la que se encuentra el edificio, escala 1:50.000.

Aunque, como ya se ha indicado, no se puede precisar la zona de estudio sí se puede resumir que los materiales geológicos que se localizan en la zona de estudio son, de manera mayoritaria, arcillas, margas yesíferas y arcosas (Figura 2).

CUATERNARIO		HOLOCENO			
TERCIARIO	NEÓGENO	MIOCENO	SUPERIOR		Gravas y cantos poligénicos, arenas y arenas limo-arcillosas (fondos de valle y lechos de canales)
			MEDIO		Calizas y costras laminares
					Conglomerados cuarcíticos, arcosas, arcillas y calizas limolítico-arenosas
					Calizas dolomíticas con pseudomorfos de yeso. Sílex
					Arcillas, margas, calizas margosas y calizas dolomíticas
					Arcillas y margas yesíferas. Yesos
					Arcillas y margas yesíferas, yesos. Litoarcosas
	Litoarcosas, fangos, arcillas. Paleocanales carbonatados				

Figura 2: Leyenda de las unidades presentes en el mapa geológico MAGNA 1:50.000.

4. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología de los trabajos realizados mediante los métodos geofísicos de Geo-rádar y Sísmica de ondas superficiales MASW, así como los penetrómetros y las inyecciones de resina.

4.1 Geo-rádar (GPR)

La geofísica mediante Geo-rádar (*Ground Penetrating Radar - GPR -*) emplea un dispositivo formado por una antena radioemisora y una antena receptora. La primera emite una señal de radio que penetra el subsuelo y se refleja de diferente modo en función de las propiedades eléctricas de los materiales que atraviesa, mientras que la segunda recibe esas ondas reflejadas y calcula el tiempo de llegada (Figura 3).

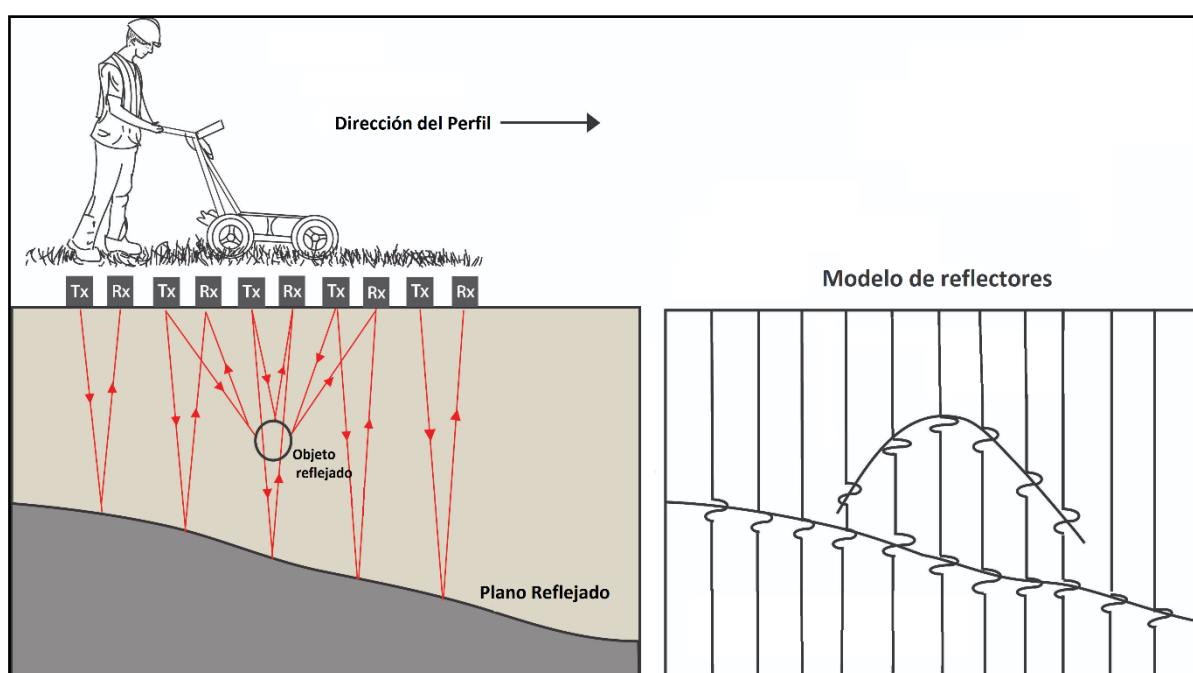


Figura 3: Esquema de reflexión de las ondas emitidas durante el avance de la antena y reflexiones obtenidas.

El equipo genera una imagen denominada radargrama, construida a partir de las reflexiones de los distintos materiales del subsuelo que el radar detecta mientras avanza por la superficie. El tiempo de llegada de esas reflexiones se reduce conforme el radar se aproxima a un cuerpo, y aumentan progresivamente cuando se aleja de este, permitiendo así interpretar la ubicación y la profundidad de los objetos enterrados.

El equipo utilizado en la adquisición de datos ha sido un Geo-rádar multifrecuencia, marca PROCEQ SCREENING EAGLE (Suiza), modelo GS 8000, con las siguientes características (Tabla 1):

Características GPR	
Rango de frecuencia modulada	40 - 3.440 MHz ²
Ancho de banda efectivo	3.200 MHz ²
Tamaño mínimo del objetivo detectable	1 cm
Máxima profundidad de penetración en condiciones óptimas	10 m
Velocidad máxima de adquisición	80 km/h
Receptor GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite)	GPS multibanda con precisión 3D entre 1-5 cm
Autonomía de las baterías	8 horas

Tabla 1: Características radar GS 8000, marca PROCEQ SCREENING EAGLE.

Este equipo permite la visualización de los datos en 2D y 3D en tiempo real en la pantalla de un Ipad Pro (Apple), así como la posibilidad de exportar y enviar en tiempo real la posición de los servicios detectados en distintos formatos georreferenciados (KML y DXF) (Figura 4).



Figura 4: Equipo GPR marca PROCEQ modelo GS8000.

4.2 Sísmica MASW

La sísmica de ondas superficiales MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*) utiliza un equipo formado por un sismógrafo multicanal conectado a una línea de geófonos separados una distancia determinada, que permite registrar la distribución de velocidades de cizalla en profundidad, obteniendo las velocidades V_s de los materiales del subsuelo.

Estas ondas se generan de forma activa, es decir, son producidas intencionadamente por el operador con una maza o el golpeo de un penetrómetro. Según la fuente de energía y la configuración de los geófonos (frecuencia, número, separación) el equipo puede alcanzar profundidades de investigación muy variadas pero que suelen ser frecuentes en el rango de 30 - 40 metros (Figura 5).

Estas ondas presentan un fenómeno de dispersión, definido por la variación de la velocidad en función del tiempo (T) o de la frecuencia (f); esta propiedad se manifiesta en medios con heterogeneidad vertical, en los que las ondas con menor longitud de onda se atenúan rápidamente, mientras que las ondas que tienen grandes longitudes de onda se propagan a mayores profundidades (Ivanov et al. 2001).

La velocidad de fase de estas ondas se analiza para diferentes frecuencias en base a la diferencia del tiempo de llegada de las ondas superficiales a cada uno de los geófonos.

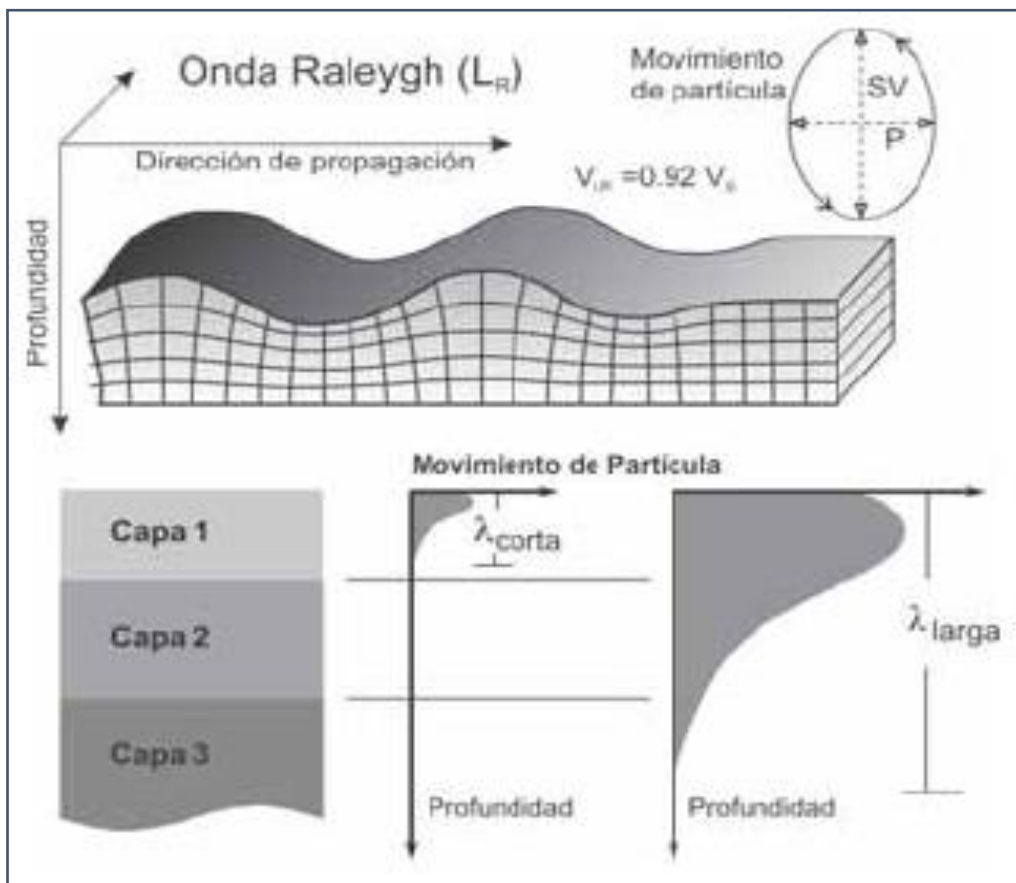


Figura 5: Modo de propagación de las ondas Raleigh, cuya principal característica es su carácter dispersivo.

En el caso de este trabajo, se han realizado estaciones sísmicas de medida con perfiles de 24 geófonos de 4.5 Hz de frecuencia, separados 1 metro entre sí, obteniendo así perfiles unitarios lineales de 23 metros (Figura 6).

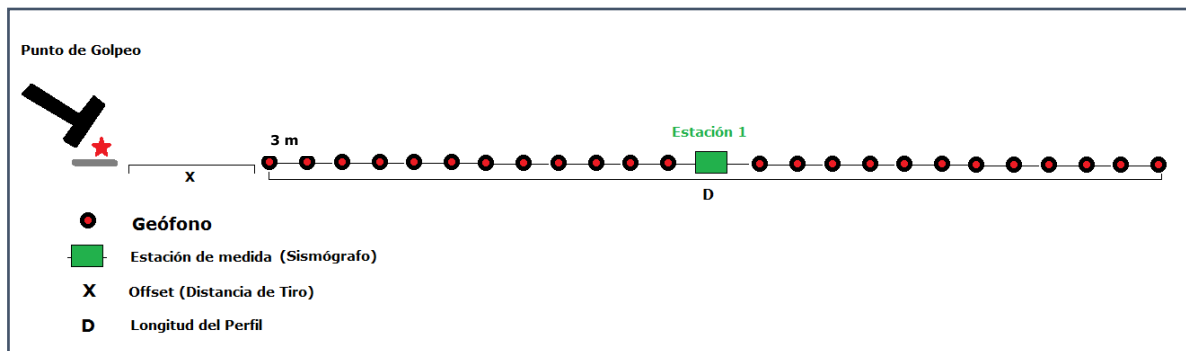


Figura 6: Esquema de perfil sísmico MASW. La distancia entre geófonos de los perfiles MASW realizados en el estudio es de 1 m aunque en la figura indique 3 m).

En los perfiles MASW se realizan distintas adquisiciones de datos utilizando distancias de tiro (*offsets*) y registros de tiempo variables, y se hace un procesado *in situ* en el acto para obtener una curva de dispersión que abarque el mayor rango de frecuencias y amplitudes posibles.

El equipo utilizado ha sido un sismógrafo marca PASI, modelo GEA24, 24 geófonos de 4.5 Hz, y como fuente de energía un martillo de 8 kg, realizando el golpeo sobre una placa metálica.

El procesado de datos se ha realizado con el programa SURFSEIS (Versión 4.0.2.5), desarrollado por Kansas Geological Survey (EEUU), y se ha dividido, de forma resumida, en tres etapas:

1. Adquisición de datos.
2. Generación de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh mediante algoritmos matemáticos según una secuencia lógica de procesamiento de los datos sísmicos, obteniendo así el diagrama espectral Velocidad de Fase-Frecuencia.
3. Realización, en dicho diagrama, del picado de las ondas de máxima amplitud, y así obtener el modelo final de la velocidad de cizalla (V_s) a partir de la ejecución de algoritmos matemáticos para llevar a cabo la inversión de las curvas de dispersión.

4.3 Penetración dinámica mediana (DPM)

El ensayo *in situ* de penetración dinámica mediana (Dynamic Penetration Median o DPM) consiste en la hincada de una puntaza de hierro en el terreno para determinar la resistencia del suelo. La puntaza se coloca al final de una varilla que tiene menor diámetro que la puntaza para que no roce el terreno, y el conjunto es golpeado por una maza en caída libre, consiguiendo así la hincada en el sustrato.

La resistencia del terreno a la penetración queda expresada por el n° de golpes necesarios para que la varilla penetre 10 cm en dicho terreno; este valor, denominado N_{10} , permite dar

información sobre las características geotécnicas del terreno, así como calcular varios parámetros a partir de correlaciones (carga admisible, resistencia dinámica en punta, etc...).

Se ha empleado un equipo PENETROMETER DPM 30, GASOLINE ENGINE 4 HP ROD Ø 20 MM, de marca Pagani Geotechnical Equipment, siguiendo para los ensayos la norma **UNE-EN ISO 22476-2**: "Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de campo. Parte 2: Ensayo de penetración dinámica".

Las características del equipo utilizado en las pruebas son las siguientes (Tabla 2):

Características DPM	
Masa de la maza	30 kg
Altura de caída	20 cm
Relación longitud/diámetro de la maza	$1 \geq y \leq 2$
Longitud de la varilla	1 m
Diámetro exterior de la varilla	20 mm
Masa máxima de la varilla	2,4 kg
Desviación máxima en primeros 5 m	1%
Desviación máxima a partir de 5 m	2%
Sección de la puntaza	cónica
Área de la puntaza	6,6 cm ²
Ángulo de la puntaza	60°
Conteo de golpes cada N	10 cm

Tabla 2: Características equipo PENETROMETER DPM 30.

4.4 Inyección de resinas expansivas

La consolidación del terreno sobre el que asienta el edificio se ha planteado mediante la utilización de la resina de consolidación de CECTECO RCC, con la que se pretenden alcanzar los siguientes objetivos:

- Consolidación y aumento de la capacidad portante del terreno en la zona afectada por el bulbo de presiones de la cimentación.
- Formación de un estrato resistente en la zona de afección de la cimentación.
- Regeneración del contacto entre el terreno y la cimentación para una distribución de cargas uniforme.
- Relleno de huecos existentes.
- Entrada en tensión de la cimentación.

La zona intervenida dependerá de las dimensiones de la cimentación y del perfil del terreno, dando lugar a un bulbo de presiones que varía con la profundidad (Figura 7):

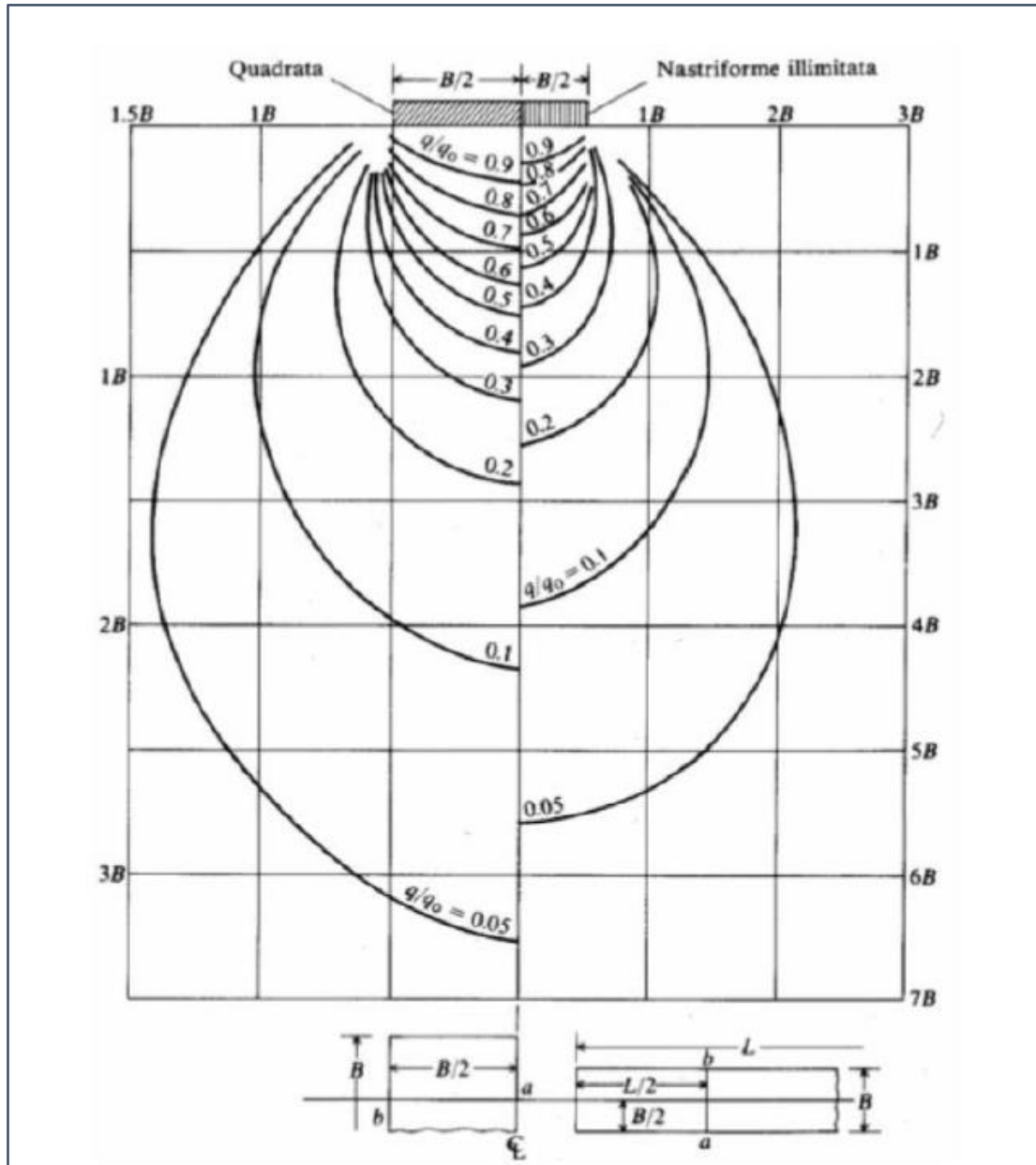


Figura 7: Ejemplo de los bulbos de presiones de dos zapatas con el mismo ancho de base, siendo una de base cuadrada (izquierda) y la otra es una zapata corrida (derecha). La escala en la parte izquierda es la mitad que la derecha, por lo que se aprecia que la zapata corrida tiene un bulbo de presiones que alcanza cerca del doble de la profundidad que la zapata cuadrada.

Durante la expansión de la resina se da una elevada presión de hinchamiento que será mayor cuanto mayor sea el confinamiento del material durante la inyección; por ello, el grado de consolidación aumentará cuanto más elevadas sean las presiones de contraste del terreno.

El modelo teórico de inyección asume las siguientes hipótesis, formuladas a partir de la teoría de la expansión de una cavidad esférica/cilíndrica propuesta por Yu y Houlsby (1991):

- Medio tridimensional ilimitado, formado por un terreno homogéneo, isótropo, dilatante, elástico-perfectamente plástico.
- El terreno contiene una única cavidad cilíndrica o esférica.
- El radio inicial de la cavidad corresponde a a_0 y la cavidad está sujeta a la presión hidrostática inicial de p_0 .
- La presión p en el interior de la cavidad es incrementada gradualmente para minimizar los posibles efectos dinámicos.
- La expansión de la cavidad se realiza sumando los aportes que deriven de un análisis de grandes deformaciones en la zona plastificada y de una solución de pequeñas deformaciones en la zona elástica.

El proceso de inyección se detiene inmediatamente cuando una de las siguientes hipótesis tiene lugar:

- Se produce el inicio del levantamiento de la estructura
- El terreno alcanza la presión determinada para el proyecto

La consolidación del terreno mediante inyecciones requiere una primera fase de perforaciones que atraviesen la cimentación y permitan que la resina penetre en el terreno. La inyección se va a realizar en dos niveles, a 1,0 y 1,5 m de profundidad.

4.4.1 Propiedades mecánicas de la resina

A continuación, se enuncian los distintos ensayos y pruebas realizados por CECTECO sobre las resinas para garantizar sus propiedades mecánicas; los resultados de dichos ensayos se mostrarán en el apartado 6.4.1 Resultados de las propiedades mecánicas.

Los ensayos propios de la resina siguen la normativa para resinas de poliuretano, con expansión libre a temperaturas entre 20 y 25°C:

- Ensayo de resistencia a compresión: siguiendo la norma **UNE-EN ISO 844:2015**: “Materiales plásticos celulares rígidos. Determinación de las características de compresión”.
- Ensayo de resistencia a tracción: siguiendo la norma **UNE-EN ISO 527-2:2012**: “Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión”.
- Ensayo de transmisión de vapor de agua: siguiendo la norma **UNE-EN 12086:1998**: “Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de las propiedades de transmisión del vapor de agua”.

Para caracterizar mejor las propiedades del material, se han realizado los siguientes ensayos:

- Presión de hinchamiento en edómetro: se ha determinado siguiendo las normas **UNE 103602:1996**: “Ensayo para calcular la presión de hinchamiento en edómetro” y **ASTM D 3877/80**: “*Test Method for one-dimensional expansion, shrinkage and uplift pressure of soil-line mixture*”.
- Módulo de elasticidad inicial para deformación axial de 1%: se utiliza el método de ensayo MIC – 7713
- Potencial de aumento de volumen al aire libre: se mide la expansión libre con diferentes temperaturas y porcentajes de la mezcla Polioliol – Isocionato; el método de ensayo es MIC – 7741
- Resistencia a la compresión vertical: se ensaya la resistencia de la resina siguiendo la norma **UNE 103400:1993**: “Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo”.

4.4.2 Propiedades químicas de la resina

A continuación, se enuncian los distintos ensayos y pruebas realizados por CECTECO sobre las resinas para garantizar sus propiedades químicas; los resultados de dichos ensayos se mostrarán en el apartado 6.4.2 Resultados de las propiedades químicas.

La resina empleada cumple las siguientes normativas medioambientales:

- Directivas europeas 2011/65 UE y 2002/96/CE: restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas.
- Reglamento REACH de la UE: lista de posibles sustancias extremadamente preocupantes (SEP) que podrían estar sujetas a autorización (ECHA, última fecha de inclusión: 18 de junio de 2012).
- Reglamento (CE) Nº 1005/2009: sustancias que agotan la capa de ozono.

4.4.3 Metodología de la actuación

Se han realizado 190 puntos de inyección en total, separados entre sí una distancia entre 0,5-1,5 m, y separando los ejes a distinto nivel una distancia de 1-1,5 m.

El proceso de inyección consiste en una primera fase de perforación y una segunda fase de inyección.

En la fase de perforación se utiliza un taladro eléctrico con brocas helicoidales y cabeza de dientes de wydia, que funciona a rotopercusión; las características son las siguientes (Tabla 3) y permiten perforar el suelo sin transmitir vibraciones potencialmente peligrosas para las estructuras o cimentaciones existentes:

Características de la perforación	
Energía del impacto	< 12 Julios
Frecuencia de golpeo	1500 - 2500 golpes/min
Diámetro de las perforaciones	25 mm
Separación entre perforaciones	0,5 - 1,5 m

Tabla 3: Características de las perforaciones por las que se inyectará resina al terreno.

En las perforaciones se introducen tubos de acero hasta alcanzar las profundidades de cada nivel de inyección. Este sistema no es viable para cimentaciones cuya base esté a profundidades mayores a 3 metros, en cuyo caso se perforará a rotación con una corona de diamante refrigerada con agua y el diámetro de la perforación será de 50 mm. En cualquier caso, el método de perforación, la baja energía y la alta frecuencia de golpeo generan vibraciones de muy baja intensidad que no afectan a la cimentación ni a las estructuras.

Después, en la fase de inyección se hincan varillas de 10 – 12 mm de diámetro por las perforaciones hasta alcanzar a profundidad de los niveles de inyección. A estas varillas va acoplada la pistola de inyección, donde se produce la mezcla de los diferentes componentes para luego inyectarla por las varillas. La pistola recibe la resina desde los depósitos mediante un sistema de bombeo neumático que forma un circuito primario en el que se aplica la presión y temperatura apropiadas. En este caso, se ha decidido inyectar primero el nivel más somero (N_1) y después el más profundo (N_2).

5. TRABAJOS REALIZADOS

A continuación, se presenta el total de ensayos realizados en la campaña (Tabla 4) y el plano del edificio con la ubicación de las prospecciones realizadas (Figura 8):

Trabajos primera fase	Trabajos segunda fase
130 m.l. GPR	130 m.l. GPR
5 estaciones MASW	5 estaciones MASW
9 ensayos DPM	7 ensayos DPM
Inyecciones realizadas	
190 puntos de inyección	
Dos niveles de inyección a 1,0 y 1,5 m	

Tabla 4: Número de ensayos realizados en la campaña.

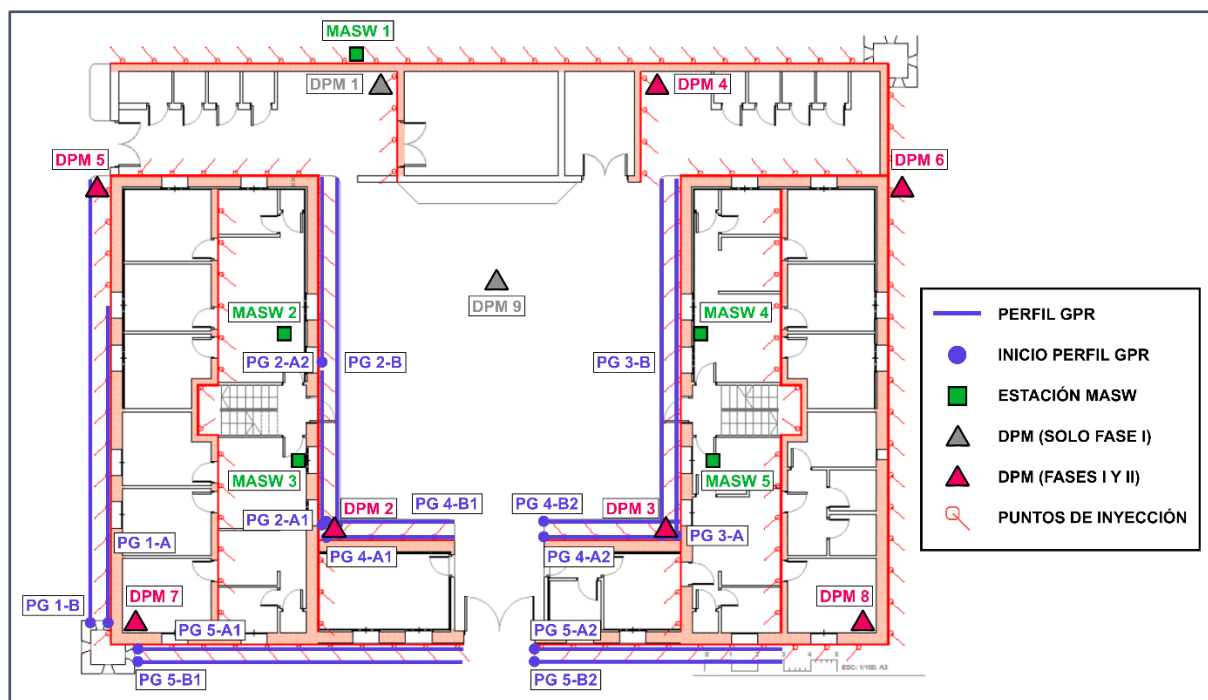


Figura 8: Plano del edificio con la localización de los ensayos in situ, prospecciones geofísicas e inyecciones realizadas.

En primer lugar, la empresa CECTECO ha planteado una campaña de inyecciones que ha ejecutado una vez se ha llevado a cabo la primera fase de ensayos en todo el perímetro del edificio, además de varios muros interiores, tal y como se ve en el plano de la Figura 8. Los puntos de inyección tienen una separación de 1 metro.

Los ensayos de penetración también han sido obra de CECTECO y se han ubicado mayoritariamente en esquinas, tanto dentro como fuera del edificio, salvo el DPM 9, situado en el centro del patio y alejado de las actuaciones (ver Figura 8). Como indica la Tabla 4, se han realizado 9 penetrómetros previos a las inyecciones, pero solo se han repetido los 7

ensayos más significativos y valiosos; estos mantienen la ubicación de sus correspondientes ensayos previos.

Por otro lado, la campaña geofísica ha sido planteada y llevada a cabo por AGS, siendo los ensayos realizados en la primera y segunda fase del proyecto los mismos, manteniendo la ubicación exacta y la misma configuración de perfiles de GPR y estaciones MASW para que los resultados sean comparables. La distribución de los ensayos se ha hecho de forma que se obtenga la mayor densidad de datos relevantes posibles, pero siempre depende de las características del terreno ya que estas pueden condicionar el funcionamiento de los equipos:

- **GPR**: se han realizado 130 m.l. repartidos en 15 perfiles, distribuidos por los muros exteriores del edificio, a excepción de los muros en los sectores Norte y Este, donde hay una capa de vegetación que impide que el radar arrastre por una superficie plana. Se han hecho perfiles adyacentes a los muros inyectados, denominados PG X-A, y paralelos a estos separados unos 0,5 m, denominados PG X-B (Figura 9). Además, los perfiles 2-A, 5-A y 5-B se han dividido en dos tramos para salvar bordillos y otros elementos que impedían realizar medidas continuas.



Figura 9: Toma de medidas del perfil de georádar PG 3-B antes de la actuación. En la base del muro, se puede apreciar un marcado amarillo fosforito, que indica los puntos a perforar para inyectar la resina.

- **MASW**: Las estaciones denominadas MASW 2 a 5 se han realizado en el interior del edificio, con la particularidad de que las estaciones MASW 2 y 5 están separadas 1 m de las estaciones 3 y 4, respectivamente (Figura 10). Esto permitirá determinar cuál es el efecto de las inyecciones a cierta distancia del punto de inyección. Por otro lado,

MASW 1 se ha realizado en la parcela Norte, ya que la vegetación en ese sector no impide obtener buenos resultados a la sísmica (como sí ocurre con el GPR), pero la parcela Este sigue siendo impracticable.



Figura 10: Ubicación de los perfiles de sísmica MASW 2 y MASW 3 previos a la inyección. Se puede apreciar que los geófonos del MASW 2 están separados unos 50 cm del muro en el que se van a realizar las inyecciones.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos en los distintos ensayos, y se discutirá sobre el significado de estos en relación con las cualidades del terreno.

6.1 Resultados Geo-rádar

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con la prospección mediante GPR, que consisten en secciones 2D en las que se representa la profundidad (eje Y) frente a la longitud del perfil (eje X). Las secciones se denominan radargramas, y presentan la distribución de los ecos recogidos por el radar al enviar pulsaciones al terreno, que aparecen en el radargrama como reflectores de tendencia más o menos horizontal.

Dado que los reflectores representan la disposición de los materiales en el subsuelo, es de esperar que la entrada de un fluido a presión y su posterior solidificación modifique la disposición de los materiales del subsuelo, alterando la morfología y disposición de los reflectores. Los tres tipos de morfologías de reflectores (rádar-facies) analizados son los siguientes (Figura 11):

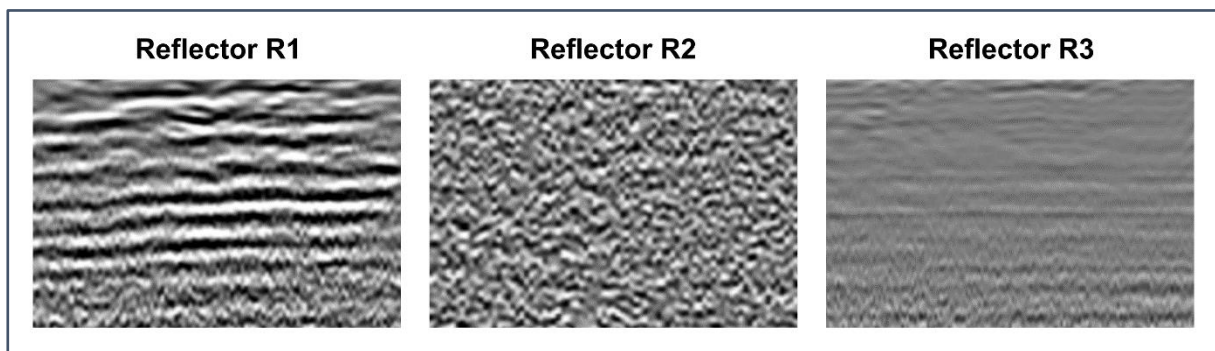


Figura 11: detalle de los tres tipos de reflectores o rádar-facies encontrados en los perfiles, tomados con la misma escala vertical.

- Reflectores R1: tienen una marcada morfología horizontal, que puede asociarse con capas muy horizontales como laminaciones o estratificaciones de los materiales.
- Reflectores R2: presentan una morfología caótica que no permite distinguir ningún tipo de tendencia horizontal, son típicos de terrenos removidos o con gravas.
- Reflectores R3: su morfología es generalmente horizontal, como los R1, pero son reflectores mucho más difusos, es decir, menos reflectivos, por lo que las discontinuidades entre esas capas serán muy sutiles.

Los perfiles denominados “B” se realizaron a una distancia de unos 50 cm de los perfiles “A”, que son los adyacentes a los muros. Los perfiles B no se describen de forma individualizada ya que sus radargramas son similares los del perfil A equivalente, pero se incluirán en el Anexo X; también se incluirán en el anexo los perfiles 2-A2, 4-A2 y 5-A2.

El perfil PG 1-A tiene una longitud de unos 9 m y se ha realizado en el exterior del edificio, en su lado W. A continuación, se comparan los radargramas de las fases I y II (Figura 12):

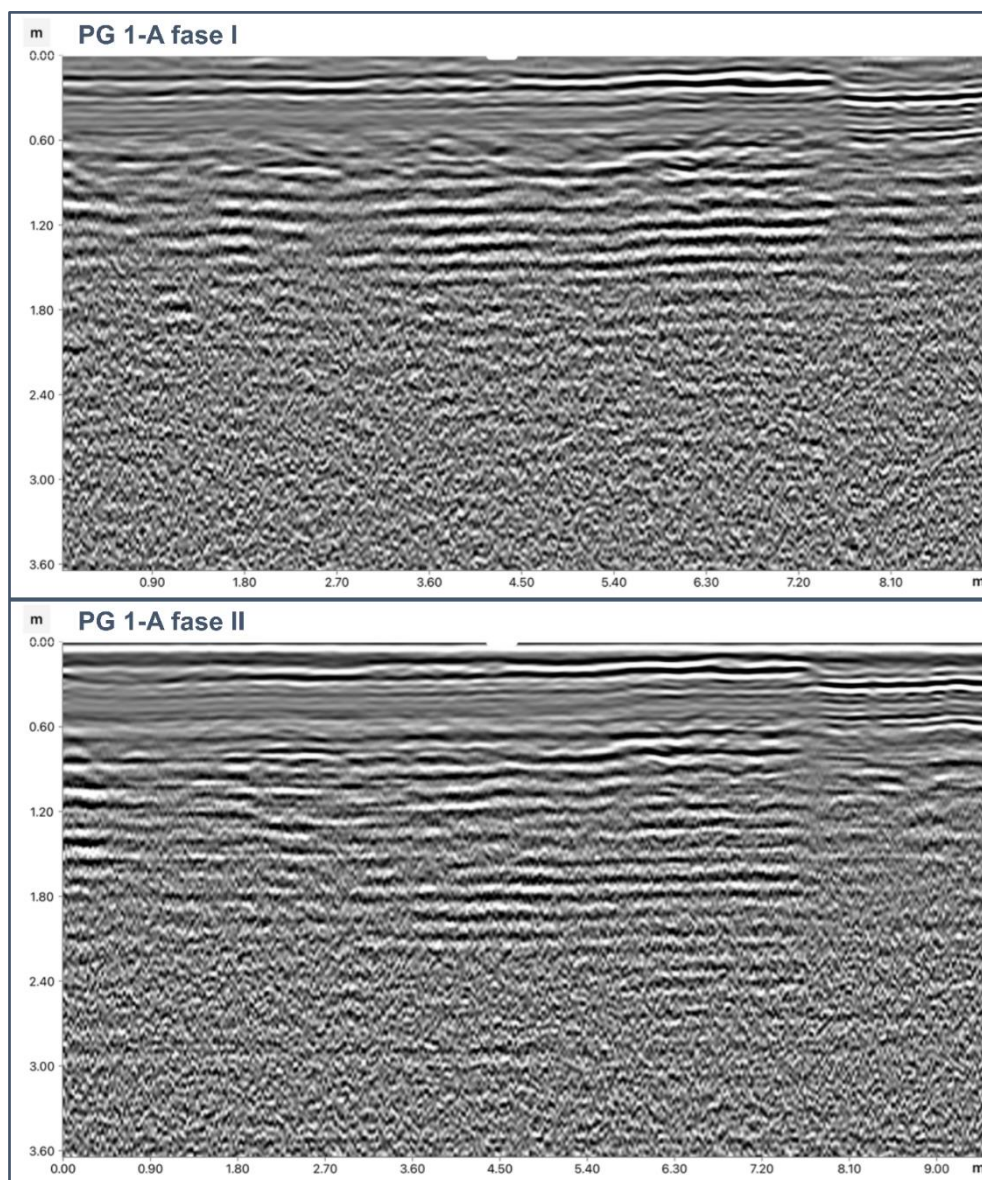


Figura 12: Radargramas del perfil PG1-A en las fases I (arriba) y II (abajo), extraídos del software de toma de datos.

En los primeros 0,60 m se aprecia una tendencia horizontal sin cambios significativos entre fases, aunque sí se aprecian los reflectores más marcados en los primeros 0,30 m; estos son reflectores R1, y los reflectores más borrosos podrían implicar un paso de reflectores R1 a R3. Desde 0,60 hasta 1,50 m hay reflectores R1 cuya continuidad lateral está interrumpida por tramos de reflectores de tipo R2. El cambio más significativo en la fase II ocurre en torno a los 1,50 - 1,90 m con el cambio de reflectores R2 a reflectores R1 entre los 3,60 – 7,20 m de perfil. A partir de ese punto solo se observan reflectores R2 tanto en la fase I como en la fase II, con cambios poco significativos en la morfología de los reflectores.

El perfil PG 2-A1 tiene una longitud de unos 3,80 m y se ha realizado en el sector W del patio interior. A continuación, se comparan los radargramas de las fases I y II (Figura 13):

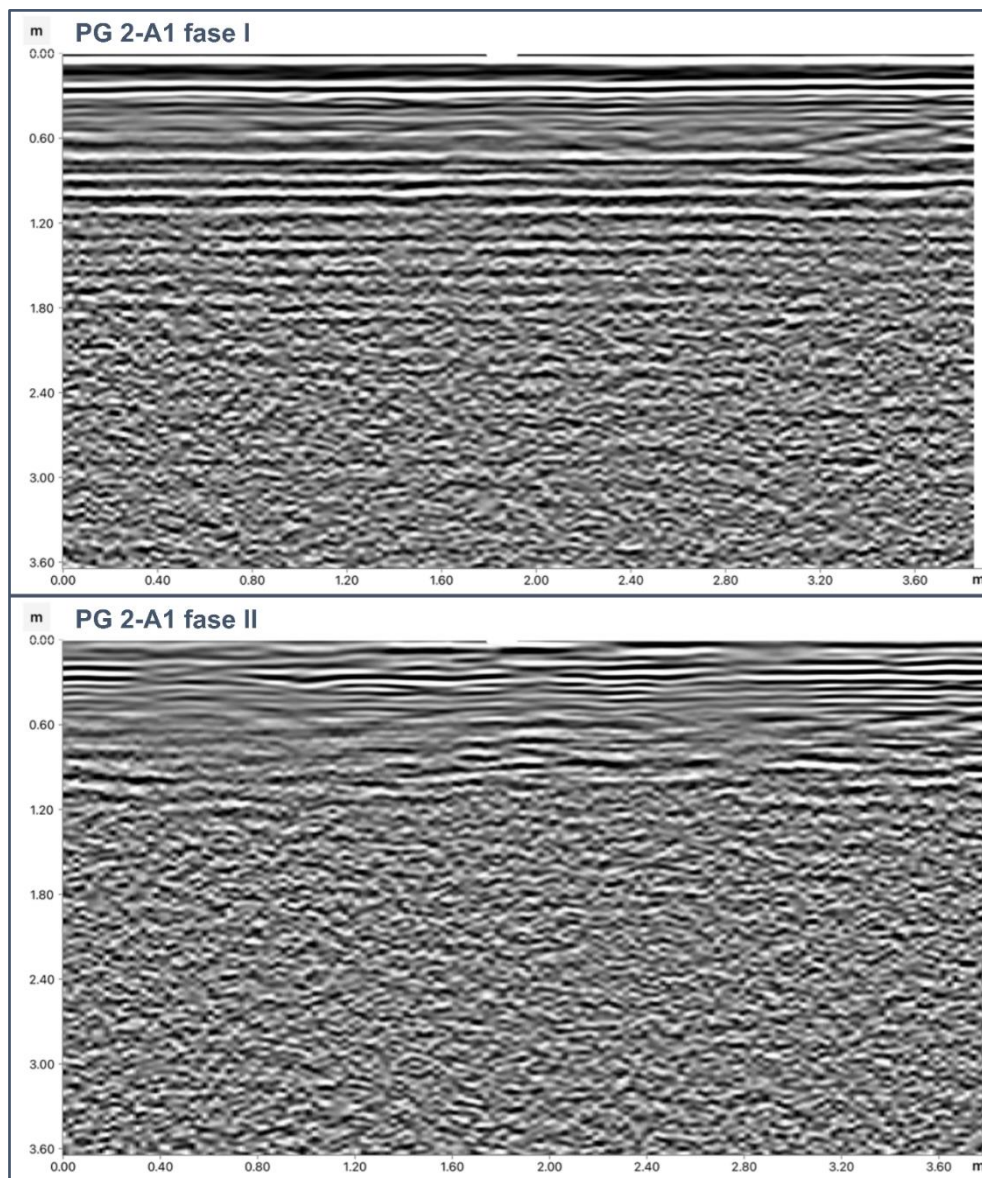


Figura 13: Radargramas del perfil PG2-A1 en las fases I (arriba) y II (abajo), extraídos del software de toma de datos.

Los primeros 0,90 m de profundidad presenta unos reflectores tipo R1 que en la fase II se difuminan considerablemente, indicando un posible proceso de transición de reflectores R1 a R3. Después, en la fase I, los reflectores son R2 con restos de reflectores horizontales bastante atenuados que se aprecian hasta 1,60 m; mientras que en la fase II se pierde esa horizontalidad, predominando el carácter más caótico de los R2. No se distinguen cambios entre fases a profundidades mayores de 1,80 m; los reflectores son siempre de tipo R2.

El perfil PG 3-A tiene una longitud de unos 13 m y se ha realizado en el sector E del patio interior. A continuación, se comparan los radargramas de las fases I y II (Figura 14):

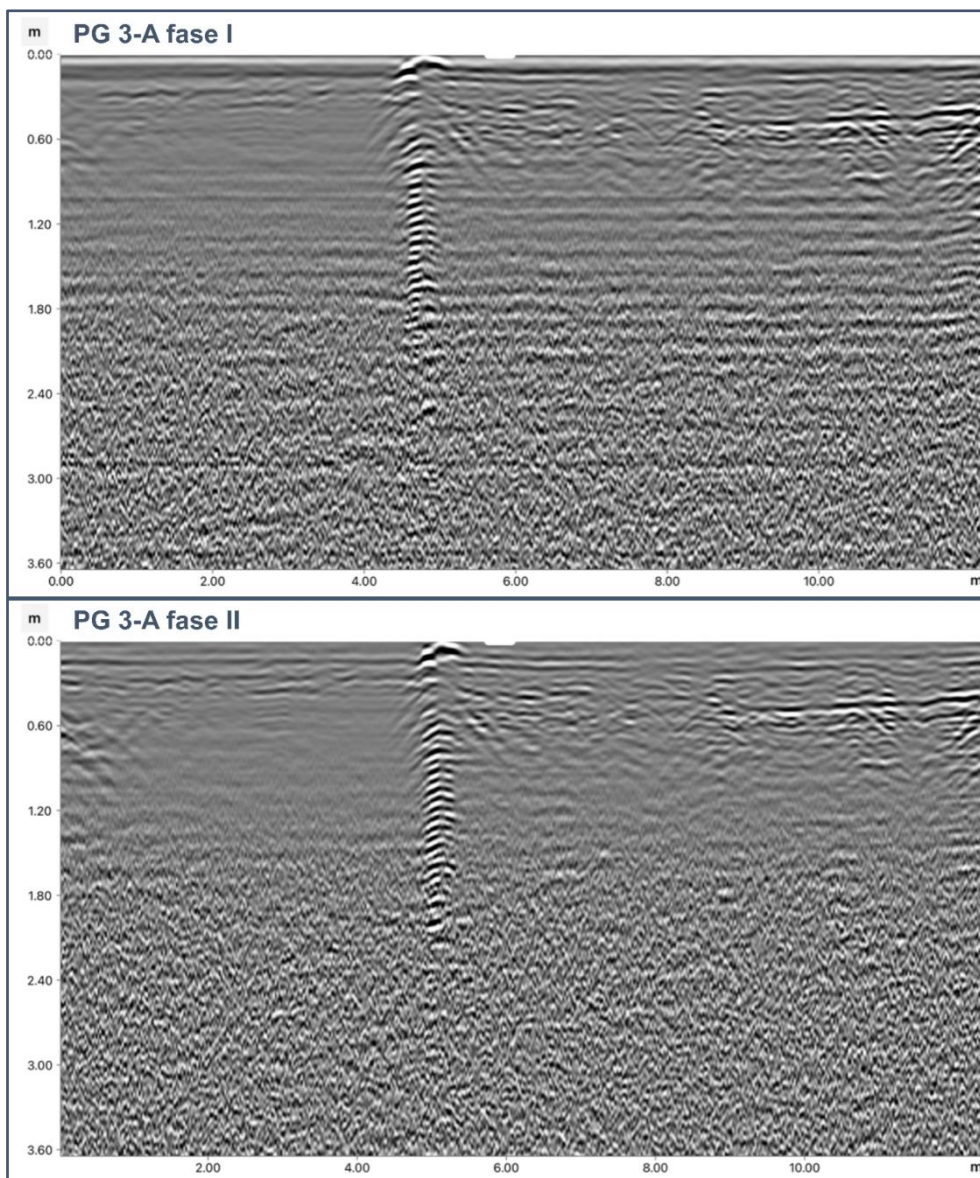


Figura 14: Radargramas del perfil PG3-A en las fases I (arriba) y II (abajo), extraídos del software de toma de datos.

Hasta 0,20 m de profundidad se aprecian unos reflectores horizontales difuminados que están a medio camino entre reflectores R1 y R3; a partir de esa profundidad, y hasta la profundidad de 1,60 – 1,80 m aproximadamente, la morfología de reflectores predominante es R3, pues se puede intuir una laminación o estratificación horizontal, pero la nitidez de los reflectores es muy reducida en comparación con los reflectores R1 que aparecían en los anteriores radargramas. En la fase II es más complicado identificar la horizontalidad de esos reflectores, especialmente en profundidades por debajo de 1,0 m. Por debajo de 2,0 m la morfología de reflector predominante es R2, y no se aprecian cambios relevantes entre fases. Cabe destacar también la columna de reflectores marcados que aparece entre 5,0 y 6,0 m de perfil, que son característicos de cuerpos conductores, como tuberías metálicas o arquetas.

El perfil PG 4-A1 tiene una longitud de unos 3,80 m y se ha realizado en el sector E del patio interior. A continuación, se comparan los radargramas de las fases I y II (Figura 15):

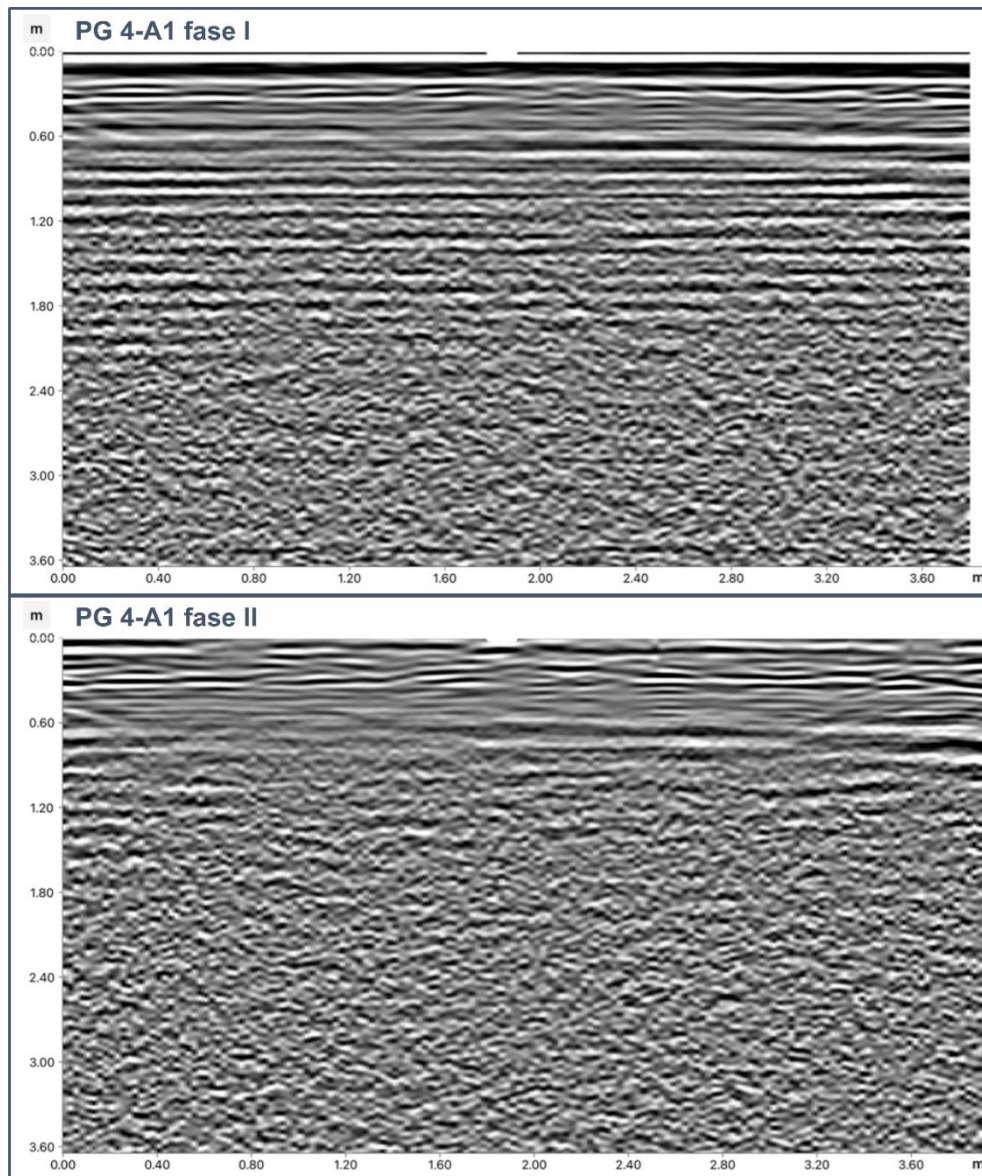


Figura 15: Radargramas del perfil PG4-A1 en las fases I (arriba) y II (abajo), extraídos del software de toma de datos.

Este perfil comienza con un sector de unos 0,60 m con reflectores horizontales muy juntos, con un carácter R1 – R3 que en la fase II se aproxima más a R3, ya que la nitidez de los reflectores es menor. Entre 0,60 y 1,80 m de profundidad coexisten reflectores R2 con bandas de reflectores R1 no muy marcadas; en la fase II, estos reflectores R1 se han difuminado casi por completo, por lo que la morfología sería exclusivamente R2. En ambas fases, por debajo de 1,80 m solo se distinguen reflectores de tipo R2.

El perfil PG 5-A1 tiene una longitud de unos 12 m y se ha realizado en el exterior del edificio, en su lado S. A continuación, se comparan los radargramas de las fases I y II (Figura 16):

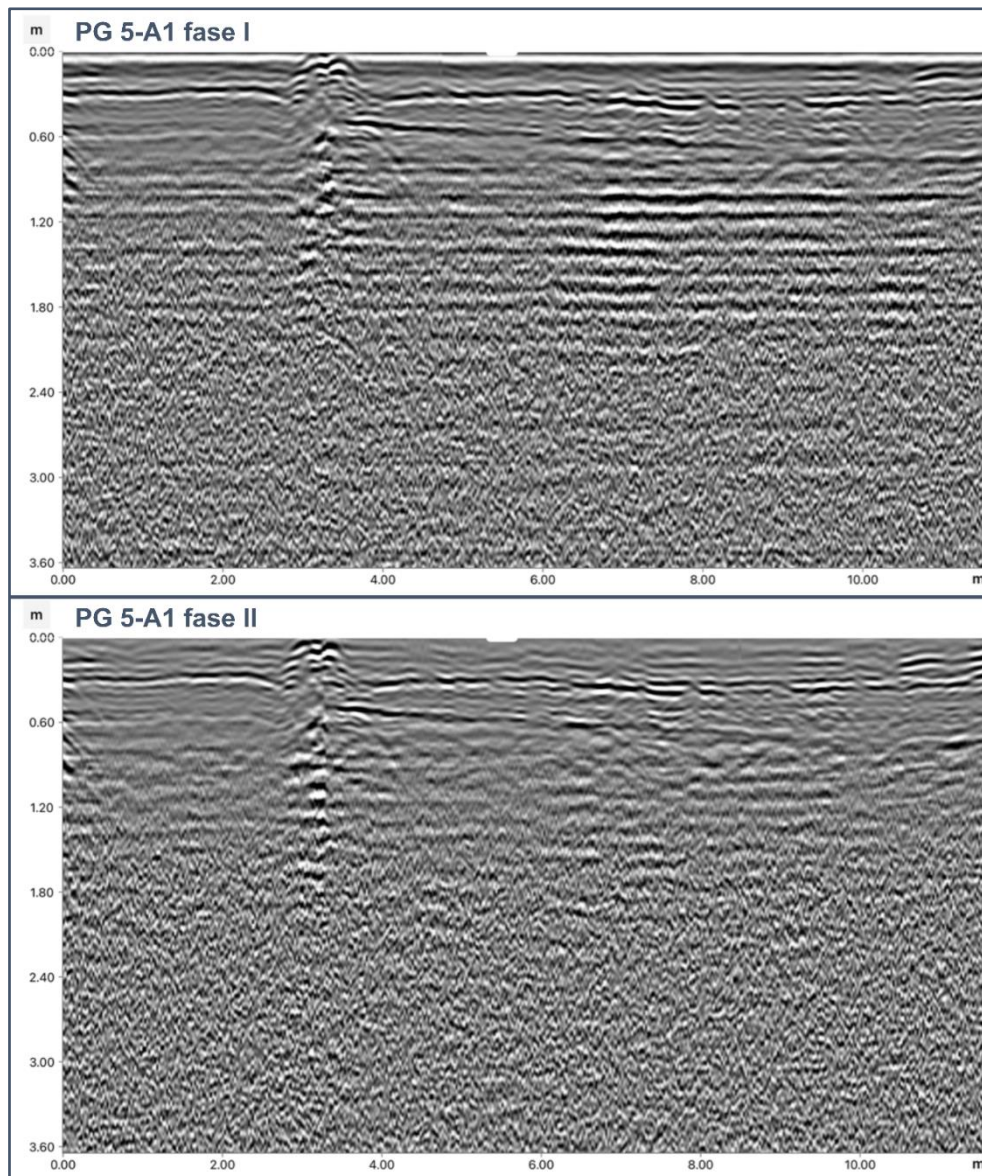


Figura 16: Radargramas del perfil PG5-A1 en las fases I (arriba) y II (abajo), extraídos del software de toma de datos.

En el quinto perfil se aprecia un primer tramo, hasta 0,90 m aproximadamente, con reflectores horizontales difuminados, a medio camino entre R1 y R3. Desde 0,90 hasta 1,80 m se observan reflectores más caóticos, pero todavía borrosos, que indican cambio de R3 a R2; sin embargo, en la mitad derecha del perfil aparecen unos marcados reflectores R1. Por debajo de 1,80 m y hasta el fin del ensayo los reflectores son de tipo R2. En la fase II, el primer tramo de reflectores R1 – R3 está mucho más difuminado, y salvo algún reflector que permanece más marcado, predomina la tipología R3. En el siguiente tramo esos reflectores R1 que aparecían en la mitad derecha desaparecen casi por completo, manteniéndose la transición de R3 a R2. Por último, hasta el final de la investigación predominan los reflectores R2. A 3,0 m desde el inicio del perfil aparece una columna de reflectores similar a la del tercer

perfil, pero en este caso es más irregular, lo que podría significar que el cuerpo que ha producido ese eco es menos reflector.

Tras comparar los radargramas de ambas fases, es evidente que se han producido ciertos cambios en las morfologías de los reflectores que, a su vez, permiten verificar que la disposición de los materiales del subsuelo ha cambiado. Los métodos geofísicos son métodos indirectos, es decir, que el resultado de un ensayo puede tener diferentes causas, pero al haber pasado solo una semana entre la fase I y la fase II, es seguro asumir que los cambios en los reflectores y en el terreno tienen su origen en la inyección de resinas, ya que no se han dado condiciones o eventos naturales que puedan explicar estos cambios. El resultado esperado tras la consolidación del terreno mediante inyecciones es un subsuelo más compacto y resistente, con menos porosidad y discontinuidades.

La interpretación de radargramas no permite obtener parámetros geotécnicos, por lo que no hay valores numéricos que justifiquen esa compactación. Sin embargo, es posible deducir cómo ha evolucionado el terreno a partir de los cambios de morfología de reflectores entre fases. Se ha detectado un aumento de reflectores R3 en los radargramas de la fase II de forma más o menos generalizada, aunque no en todos los perfiles se da de la misma forma. Sin embargo, una mayor cantidad de reflectores R3 en el subsuelo es un cambio positivo, pues estos reflectores generalmente indican que los materiales están dispuestos de manera homogénea. Si se comparan los reflectores R3 con los R1 se observa que los R3 tienen una morfología horizontal bastante difuminada, mientras que en los R1 esa horizontalidad es muy marcada, es decir, tienen mayor reflectividad que los R3, y la reflectividad de los reflectores está asociada al contraste de propiedades entre materiales.

Una mayor reflectividad indica que el terreno es más heterogéneo, por lo que una reducción general de reflectividad implica que el terreno es más homogéneo en la fase II que en la fase I, por lo menos hasta una profundidad de entre 1,80 y 2,0 m, que es donde se pueden apreciar cambios en los radargramas; por debajo de los 2,0 m los reflectores siempre tienen una morfología tipo R2, que indican un subsuelo irregular o removido, y en ninguno de los radargramas aparecen cambios importantes en la disposición de los materiales por debajo de 2,0 m de profundidad. Esto puede significar dos cosas: o bien el efecto de la inyección se acaba en torno a 2,0 m de profundidad, o bien los cambios producidos en el terreno por debajo de ese punto no se han podido detectar con el Geo-rádar. Será necesario analizar los resultados del resto de técnicas para comprobar cuál de las dos afirmaciones es correcta.

6.2 Resultados sísmica MASW

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en las estaciones de sísmica MASW, que consisten en los valores de velocidad de las ondas de cizalla mientras se propagan en

profundidad, obtenidos en el centro de cada perfil realizado; dichos perfiles se han realizado con 12 geófonos separados un metro entre sí, dando lugar a perfiles de 11 m de longitud.

Para la estación MASW 1, los resultados son los siguientes (Figura 17):

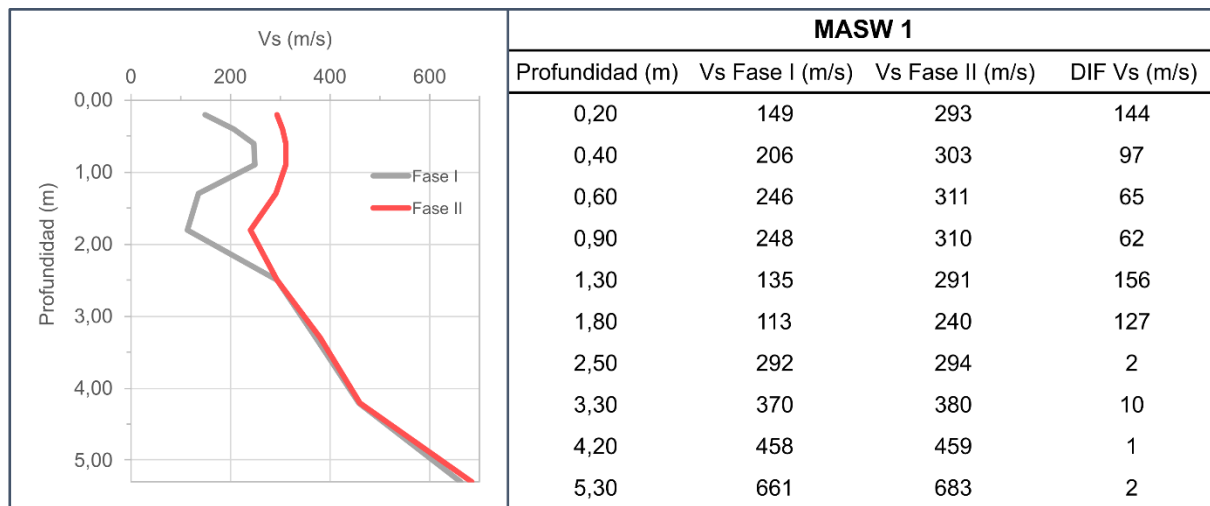


Figura 17: Presenta una gráfica Vs/Profundidad (eje X/eje Y) esquemática (Izda.) y la tabla de valores de Vs en profundidad obtenida por el software de procesado (Dcha.) para la estación MASW 1, con valores para las fases I y II y la diferencia de velocidades en la tabla.

En MASW 1, la Vs aumenta en la fase II hasta 2,40 m de profundidad, alcanzando diferencias superiores a 140 m/s a nivel superficial y entre 1,00 – 1,80 m de profundidad. Por debajo de ese punto, la diferencia de velocidad disminuye gradualmente hasta 2,50 m, donde se vuelve prácticamente 0 m/s. La velocidad tiene una evolución gradual hasta el final del ensayo, a 5,30 m de profundidad, salvo por un pico a 1,80 m donde se alcanzan los valores más bajos de todo el perfil. La velocidad (Vs) máxima alcanzada supera 660 m/s al final del ensayo.

Para la estación MASW 2, los resultados son los siguientes (Figura 18):

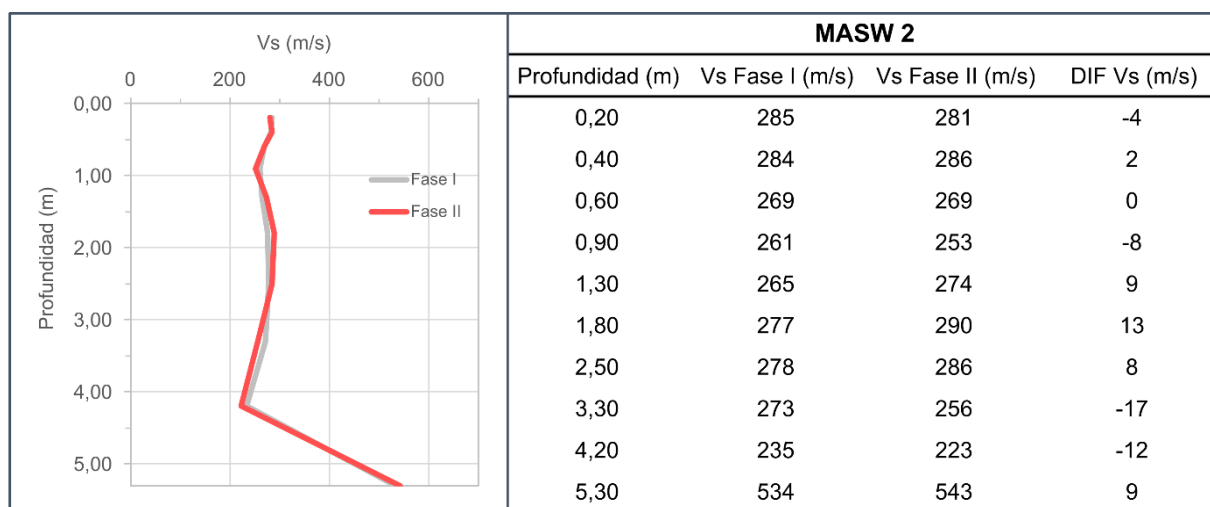


Figura 18: Presenta una gráfica Vs/Profundidad (eje X/eje Y) esquemática (Izda.) y la tabla de valores de Vs en profundidad obtenida por el software de procesado (Dcha.) para la estación MASW 2, con valores para las fases I y II y la diferencia de velocidades en la tabla.

En la segunda estación se han registrado unos valores de Vs que apenas varían entre fases, siendo la máxima diferencia de Vs = -17 m/s, es decir, a favor de la fase I. La velocidad es muy estable según se profundiza en el terreno, manteniéndose entre 250 y 290 m/s hasta 4,20 m de profundidad, donde alcanza un valor mínimo de Vs = 223 m/s para después aumentar hasta superar 530 m/s a una profundidad de 5,30 m, a la que termina el ensayo.

Para la estación MASW 3, los resultados son los siguientes (Figura 19):

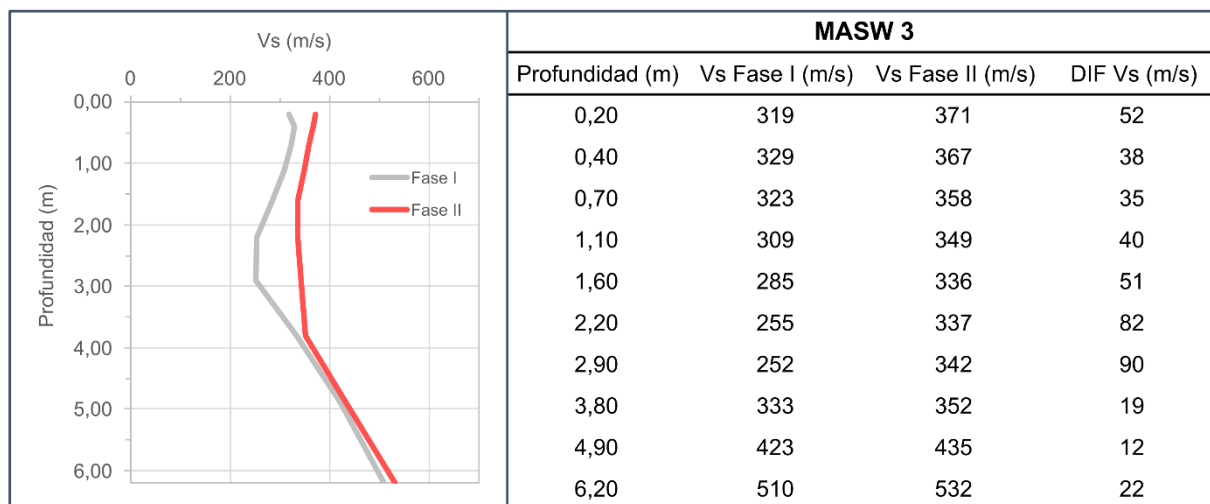


Figura 19: Presenta una gráfica Vs/Profundidad (eje X/eje Y) esquemática (Izda.) y la tabla de valores de Vs en profundidad obtenida por el software de procesado (Dcha.) para la estación MASW 3, con valores para las fases I y II y la diferencia de velocidades en la tabla.

La estación MASW 3 presenta una mejora generalizada de Vs en la fase II, siendo la diferencia máxima de Vs = 90 m/s a 2,90 m de profundidad; por debajo de ese punto, la diferencia de velocidades disminuye gradualmente hasta estabilizarse en unos 10 – 20 m/s por debajo de 3,80 m de profundidad. La velocidad evoluciona de manera gradual, sin picos o anomalías, manteniéndose con valores de Vs = 250 – 370 m/s, hasta 4,00 m. La velocidad registrada al final del ensayo, con profundidad de 6,20 m, supera 510 m/s.

Para la estación MASW 4, los resultados son los siguientes (Figura 20):

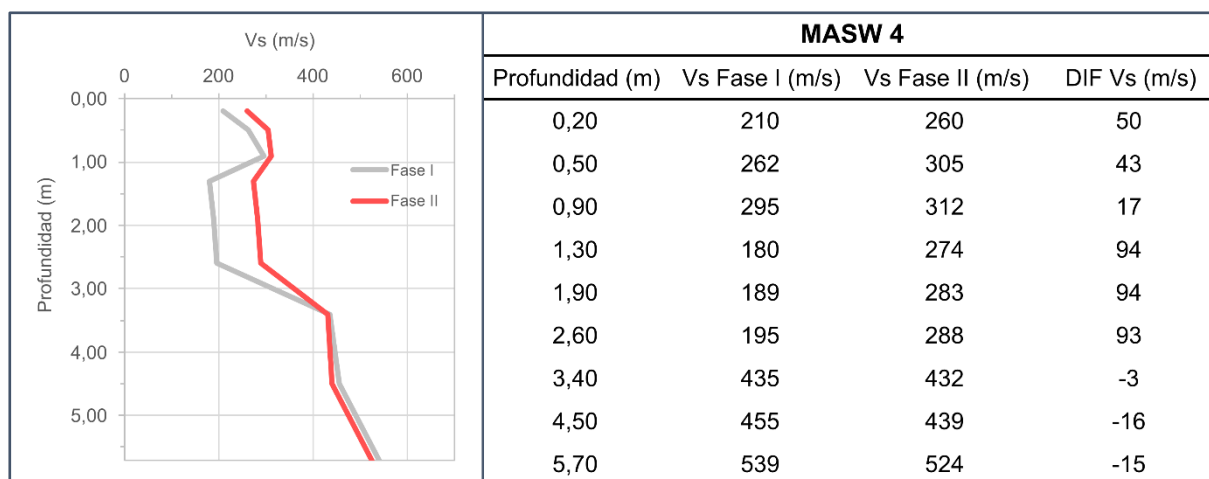


Figura 20: Presenta una gráfica Vs/Profundidad (eje X/eje Y) esquemática (Izda.) y la tabla de valores de Vs en profundidad obtenida por el software de procesado (Dcha.) para la estación MASW 4, con valores para las fases I y II y la diferencia de velocidades en la tabla.

Como ocurría en las estaciones 1 y 3, la estación MASW 4 también experimenta mejoras de Vs en la fase II, con una diferencia máxima superior a 90 m/s que se mantiene en un tramo desde 1,30 a 2,60 m de profundidad; a pesar de registrar las máximas diferencias, el tramo representa un escalón de menor velocidad que la zona más superficial y las más profundas. Por debajo de los 2,60 m, la velocidad aumenta gradualmente hasta superar 400 m/s a unos 3,30 m de profundidad, alcanzando valores superiores a 520 m/s al finalizar el ensayo, a 5,70 m de profundidad.

Para la estación MASW 5, los resultados son los siguientes (Figura 21):

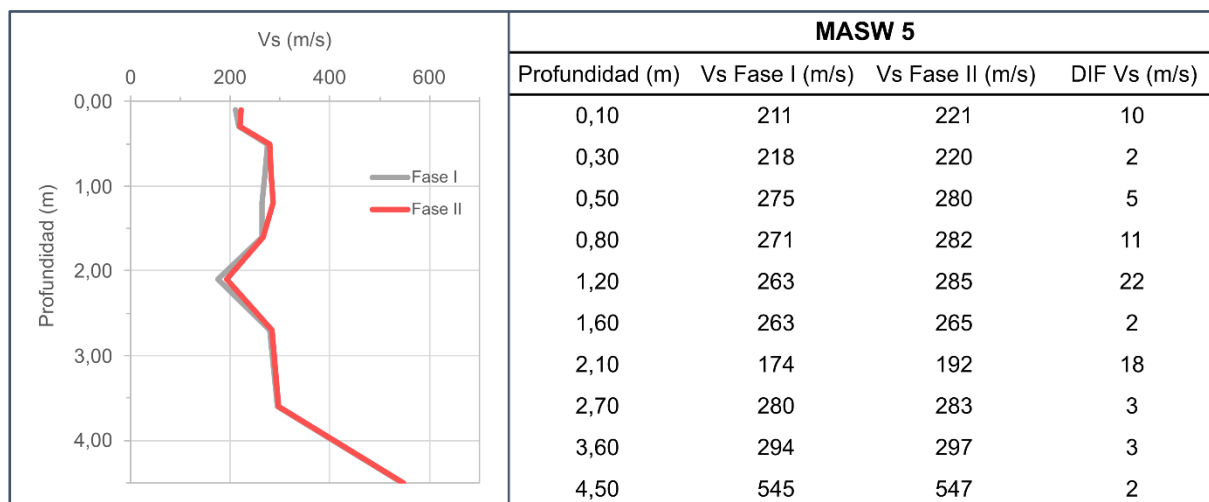


Figura 21: Presenta una gráfica Vs/Profundidad (eje X/eje Y) esquemática (Izda.) y la tabla de valores de Vs en profundidad obtenida por el software de procesado (Dcha.) para la estación MASW 5, con valores para las fases I y II y la diferencia de velocidades en la tabla.

Similar a la estación MASW 2, en MASW 5 apenas se producen diferencias de velocidades entre las fases, siendo la diferencia máxima de 22 m/s a los 1,20 m de profundidad. Los valores de velocidad se mantienen entre 220 – 300 m/s, con un pico inferior a 200 m/s en

torno a 2,20 m de profundidad. Por debajo de 3,6 m la velocidad comienza a aumentar, llegando a superar 500 m/s a 4,5 m, que es la máxima profundidad alcanzada en el ensayo.

Los resultados obtenidos para las distintas estaciones muestran que los MASW 1, 3 y 4 han presentado mejoras en sus valores de Vs en la fase II con respecto a la fase I; en cambio, en los MASW 2 y 5 se han producido cambios poco significativos y que tampoco pueden denominarse mejora. El aumento de velocidad entre la fase I y la fase II tiene que estar relacionado con la inyección de resinas, ya que la velocidad de ondas aumenta cuanto más rígido o compacto es un material, y es poco probable que el suelo experimentase un aumento natural de velocidad de ondas pasando solo una semana entre cada fase del estudio.

Por ello, se puede afirmar que la inyección de resinas ha producido una mejora de rigidez del terreno. Sin embargo, este efecto no se puede apreciar en las estaciones 2 y 5, ya que las diferencias de velocidad entre las fases I y II son muy leves. Esta diferencia entre las estaciones que han experimentado una mejora (1, 3 y 4) y las que no (2 y 5) puede explicarse por la ubicación de las estaciones puesto que las estaciones MASW 2 y MASW 5 se han medido a una distancia de 1 m de la pared donde se han realizado las inyecciones, lo que significa que la inyección no ha producido cambios importantes a esa distancia de las inyecciones y, por tanto, tiene un área de efecto hacia los laterales inferior a un metro.

Esta circunstancia no es negativa, pues una mala dosificación de la presión al inyectar podría provocar una rotura en el terreno cercano a la inyección. Como en este caso el terreno sobre el que se han medido las estaciones 2 y 5 no ha experimentado cambios significativos, se puede concluir que la inyección no ha sido perjudicial para el terreno más allá de 1 m de distancia.

En los cinco casos se puede detectar una tendencia de evolución de la velocidad similar en la segunda fase, que puede definirse en tres sectores, que se han denominado Sector A, Sector B y Sector C, que abarcan, respectivamente (depende de cada estación MASW), el primer metro, entre 1 y 3 m de profundidad y por debajo de 3 m de profundidad.

Las profundidades exactas, así como las diferencias máximas de velocidad en cada sector para cada estación son las siguientes (Tabla 5):

Estación MASW		Sector A	Sector B	Sector C
MASW 1	Profundidad (m)	0,00 - 1,00	1,00 - 1,80	1,80 - 5,30
	Dif máx Vs (m/s)	144	156	10
MASW 2	Profundidad (m)	0,00 - 1,20	1,20 - 3,20	3,20 - 5,30
	Dif máx Vs (m/s)	-8	13	-17
MASW 3	Profundidad (m)	0,00 - 1,70	1,80 - 3,10	3,10 - 6,20
	Dif máx Vs (m/s)	52	90	22
MASW 4	Profundidad (m)	0,00 - 1,20	1,20 - 2,60	2,60 - 5,70
	Dif máx Vs (m/s)	50	94	-16
MASW 5	Profundidad (m)	0,00 - 1,10	1,10 - 2,60	2,60 - 4,50
	Dif máx Vs (m/s)	11	22	3

Tabla 5: Intervalos de profundidades y diferencias de velocidad máxima en cada uno de los sectores de las cinco estaciones MASW.

- **Sector A:** se da desde el nivel superficial hasta 1,10 – 1,70 m de profundidad, en función de la estación. Los MASW 2 y 5 experimentan cambios de pequeña magnitud, con diferencias de velocidad máximas de Vs = -8 y 11 m/s, respectivamente. MASW 3 y 4 tienen mejoras considerables de hasta Vs = 52 m/s, y MASW 1 tiene una mejora de Vs = 144 m/s, la más alta con diferencia.
- **Sector B:** se da desde el final del sector A hasta 2,60 – 3,20 m de profundidad, en función de la estación. MASW 2 y 5 aumentan su velocidad Vs = 8 y 13 m/s, respectivamente. MASW 3 y 4 alcanzan diferencias máximas de Vs = 90 y 94 m/s, mientras que MASW 1 vuelve a experimentar la mayor diferencia, de Vs = 156 m/s con respecto a la fase I.
- **Sector C:** se da desde el final del sector B hasta el fin del ensayo. En este tramo, las diferencias de velocidades entre fases son poco significativas en todos los ensayos.

Las mejoras importantes se concentran en los sectores A y B, siendo MASW 1 la estación que mayores incrementos de velocidad ha experimentado, y MASW 3 y 4 las otras estaciones que han mostrado mejoras, aunque no tan pronunciadas como las de MASW 1; además, MASW 1 es la estación con menor Vs en la fase I. Esto podría deberse a que la estación MASW 1 se ha realizado en el exterior, directamente sobre el terreno natural, mientras que MASW 3 y 4 están ubicados en terreno cimentado; el terreno natural donde se ha realizado MASW 1 tiene cierta vegetación, y al no haber sido compactado previamente como el terreno bajo MASW 3 y 4, es lógico que sea un terreno débil y muy heterogéneo, con porosidad y discontinuidades producidas por las raíces de la vegetación.

En MASW 2 y 5 los cambios son reducidos debido a que seguramente estén fuera del rango de efecto de la inyección, como se ha explicado anteriormente. En todos los casos, sin embargo, se percibe un menor incremento de velocidad en el sector A que en el sector B. El sector C destaca porque es el único en el que la inyección ha producido cambios poco significativos en todas las estaciones, pero a la vez es el sector en que se alcanzan las mayores velocidades en cada ensayo; esto una posible explicación es que la velocidad de ondas aumenta progresivamente en profundidad por el propio peso del terreno.

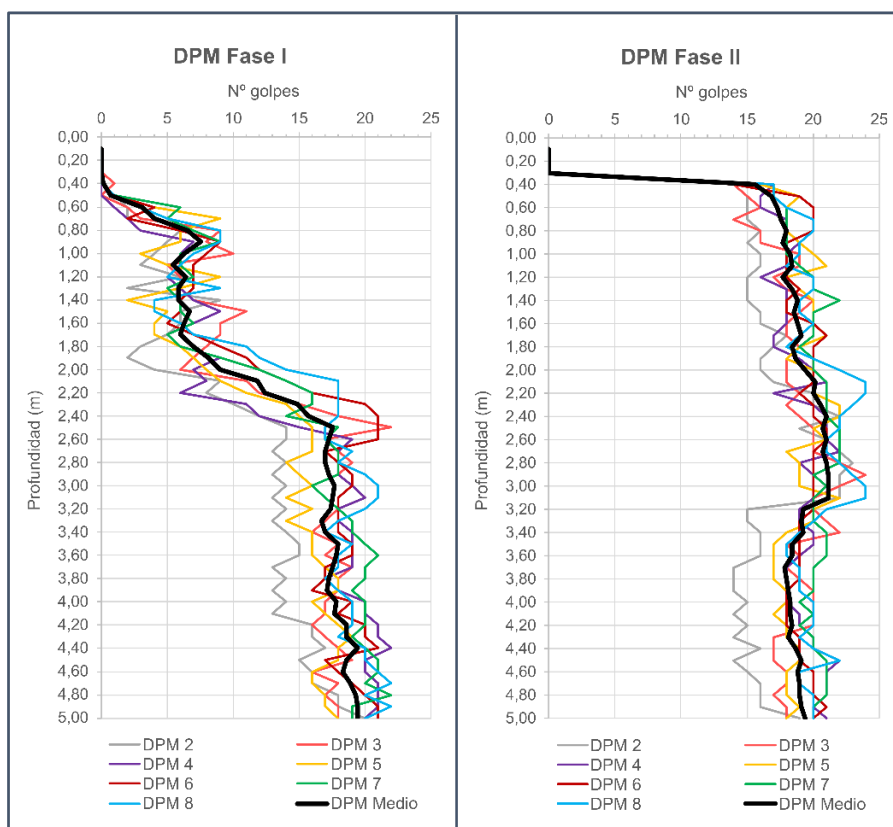
Las mejoras de velocidad en los sectores A y B indican que la inyección ha tenido efecto hasta el final del sector B para cada ensayo y que, a partir del sector C, la rigidez del terreno es muy similar a la que tenía originalmente. Por otro lado, la mejora en el terreno no es homogénea en toda la profundidad, si no que se diferencia la mejora de terreno en el sector A y la mejora del terreno en el sector B; esto puede estar relacionado con la metodología de la inyección en dos niveles. Al ser un fluido inyectado a presión, la resina rellena el subsuelo en todas las direcciones, por lo que en el primer nivel de inyección asciende desde 1 m de profundidad hasta la superficie, y en el segundo nivel, realizado a 1,50 m, profundiza a partir de esa primera aglomeración de resina, alcanzando mayores profundidades; esto es coherente con las profundidades a las que se han detectado los sectores de mejora. El sector A alcanza unas profundidades entre 1,10 y 1,70 m, dependiendo del ensayo, mientras que el sector B comprende desde el final del sector A hasta 1,80 – 3,20 m de profundidad, de forma que la primera inyección a 1 m es la responsable de la mejora del sector A, hasta una profundidad máxima entre 1,10 y 1,60 m, mientras que la segunda inyección a 1,50 m produce las mejoras de velocidad desde ese punto hasta profundidades entre 1,80 y 3,20 m.

6.3 Resultados penetrómetros

6.3.1 Valores DPM

Se presentan a continuación los registros de golpeo obtenidos para los siete penetrómetros realizados en ambas fases del estudio. Los ensayos profundizaron hasta 10 m en el terreno, obteniendo un dato de golpeo cada 10 cm; las gráficas muestran el registro de golpeo cada 20 cm hasta los 5 m de profundidad, ya que el golpeo deja de tener variaciones significativas por debajo de 4,5 m. Los primeros 30 – 40 cm de terreno muestran valores de golpeo de 0 ya que corresponden a la solera de cemento, y se perforan previamente para no dañar el equipo, pues este no está preparado para golpear materiales tan duros.

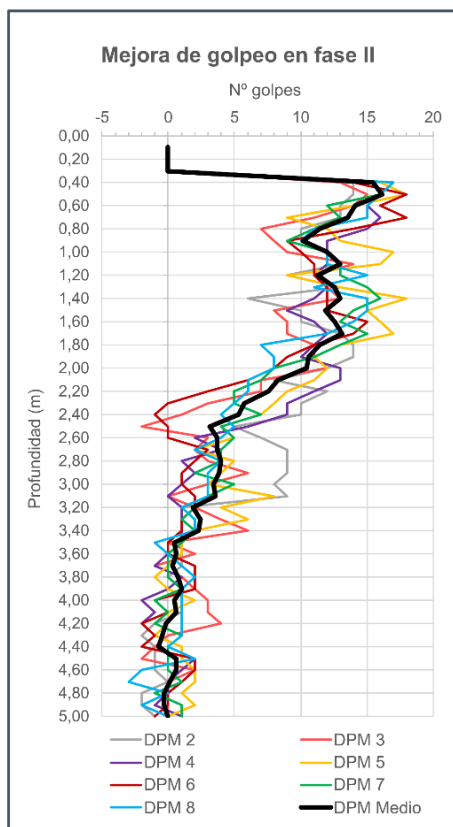
En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos para todos los penetrómetros tanto en la fase I como en la fase II, además del valor medio de cada fase (Gráficas 1 y 2):



Gráfica 1 (Izda.) y Gráfica 2 (Dcha.): Representan el registro de golpeo (eje X) frente a la profundidad hasta 5 m (eje Y). Se observan los 7 penetrómetros y la media de todos ellos, dibujados con el mismo color entre gráficas para poder comparar el registro de cada penetrómetro en ambas fases. Los registros son una modificación de los obtenidos por CECTECO.

- **Fase I:** se observan valores de golpeo bajos, con máximos y mínimos generalmente inferiores a 10 golpes hasta una profundidad de unos 1,70 – 2,00 m. A continuación, hay un tramo entre 2,00 y 2,50 m donde el golpeo aumenta considerablemente, llegando a alcanzar valores superiores a 20 golpes en algunos penetrómetros. Desde 2,50 m en adelante, el valor de golpeo se mantiene elevado, generalmente entre 15 y 20 golpes, hasta el fin del ensayo.
- **Fase II:** desde el inicio, el valor de golpeo supera los 15 golpes en casi todos los ensayos, y se mantienen estos valores hasta el final. Destacan algunos picos cercanos a 25 golpes en algunos penetrómetros, y la media de golpeo alcanza sus valores máximos entre 2,00 y 3,10 m de profundidad.

Al comparar el golpeo en las dos fases, se observa un aumento de golpeo considerable en la fase II para todos los penetrómetros, aunque el incremento no es homogéneo en toda la profundidad del ensayo. En la siguiente gráfica se presenta la diferencia de golpeo en la fase II para cada penetrómetro, además del valor medio (Gráfica X):



Gráfica 3: Representa la diferencia de golpeo entre la fase I y la fase II (eje X) frente a la profundidad hasta 5 m (eje Y), los valores positivos indican aumento de golpeo en la fase II y los negativos indican que el golpeo ha disminuido. Se han representado los 7 penetrómetros y la media de todos ellos.

Se observa que la diferencia de golpeo es muy elevada inicialmente, pero va descendiendo gradualmente según aumenta la profundidad, hasta un punto en el que la diferencia media oscila en torno a los 0 golpes. Aunque entre los distintos penetrómetros hay bastante variabilidad, se puede dividir el registro en tres tramos o sectores en función de la diferencia de golpeo:

- **Sector A:** se da desde el nivel superficial hasta una profundidad entre 2,0 y 2,50 m. En este sector, la mejora de golpeo es muy pronunciada, con diferencias máximas de hasta 15 golpes y mínimos mayores de 5.
- **Sector B:** se da desde el final del sector A hasta una profundidad máxima de unos 3,50 m. En este sector, la mejora de golpeo es moderada, con diferencias mucho menores a las del sector A; aunque hay picos de hasta 8 golpes, la media está entre 3 y 4 golpes, con algún pico de pérdida de golpeo con respecto a la fase I.
- **Sector C:** se da desde el final del sector B hasta el fin del ensayo. En este sector, la diferencia de golpeo entre fases es muy reducida, con valores máximos de 3 golpes, en ocasiones a favor de la fase I.

Tras analizar los golpes registrados en cada fase y la diferencia de golpeo entre estas, es evidente que tras la actuación se ha producido una mejora de resistencia del terreno,

cumpliéndose el objetivo de la inyección de resinas. Gracias a los datos que aparecen en los registros, se puede observar que el terreno se ha vuelto más resistente, especialmente en los primeros 2 m del terreno que, al ser los más superficiales, tienen mayor exposición a los agentes externos y mayor descompresión; por esto el sector A es el que percibe la mayor mejora de golpeo. Al aumentar la profundidad se entra en el sector B, donde sigue habiendo mejora con respecto a la fase I, pero esta es mucho menor a la del sector A.

En la gráfica X se observaba que el golpeo era más elevado que en los niveles superficiales antes de la inyección, por lo que el sector B es aquel en el que la compactación aumenta por el peso del terreno suprayacente. Al haber mayor compactación, penetra mucha menos resina, de ahí que la mejora de golpeo sea inferior a la del sector A.

Por último, al llegar al sector C la diferencia de golpeo es muy leve, oscilando entre 0 y 3 golpes, y se da tanto en positivo como en negativo, implicando que en algunos penetrómetros ha habido pequeñas pérdidas de golpeo. Lo más probable es que la inyección ya no haya producido ninguna mejora tras el inicio del sector C, de ahí que la diferencia media oscile en torno a 0 golpes. Las pequeñas diferencias pueden deberse a que la inyección aumenta el peso sobre esos puntos, provocando que unas zonas aumenten ligeramente su compactación y su golpeo y que otras se descompriman y pierdan un poco de resistencia, poco significativa teniendo en cuenta la magnitud de estas pérdidas.

6.3.2 Obtención NB y NSPT

Los valores de golpeo que se han obtenido con los penetrómetros medianos son útiles para determinar la variación de resistencia en el subsuelo y para comprobar si ha habido mejora en el terreno gracias a la inyección. Aunque el golpeo de un penetrómetro DPM no es el parámetro geotécnico más universal, conociendo las características de distintos equipos, se pueden correlacionar los valores de golpeo DPM obtenidos in situ con otros parámetros de golpeo más utilizados, como los del penetrómetro de Borros (NB). Este valor de golpeo se puede obtener utilizando la siguiente fórmula (*European Symposium on Penetration Testing, 1974*), que relaciona las propiedades físicas de dos penetrómetros diferentes:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{(W_1 \cdot H_1 \cdot A_2 \cdot e_2)}{(W_2 \cdot H_2 \cdot A_1 \cdot e_1)}$$

Siendo:

- N: nº de golpeo a una profundidad determinada
- W: masa de la maza (kg), propia del equipo
- H: altura de caída (cm), propia del equipo
- A: área de la puntaza (cm²), propia del equipo
- e: longitud de penetración en la que se registra cada valor de golpeo (cm)

Los valores N_1 , W_1 , H_1 , A_1 y e_1 son los valores de DPM, mientras que los de N_2 , W_2 , H_2 , A_2 y e_2 son los de NB; los parámetros de cada equipo son los siguientes (Tabla 6):

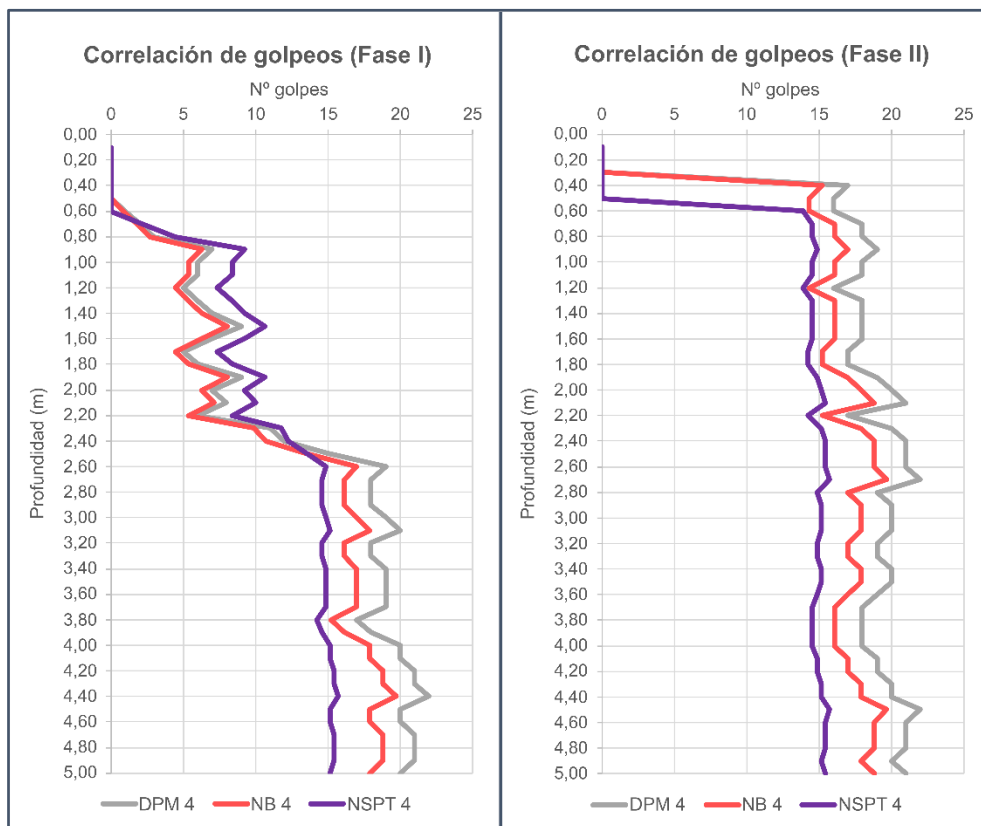
Ensayo	W (kg)	H (cm)	A (cm ²)	e (cm)
DPM	30	20	6,6	10
NB	65	50	16	20

Tabla 6: Propiedades físicas del equipo de penetración DPM usado en el estudio y las medidas típicas de un equipo de Borros.

Además, el golpeo NB puede relacionarse con uno de los parámetros geotécnicos más universales, que es el Ensayo de penetración estándar o SPT que, a grandes rasgos, representa el nº de golpes que necesita un tomamuestras de unas características determinadas para penetrar 15 cm en el terreno, indicando así el nivel de resistencia de un suelo. La siguiente fórmula (Dapena et al., 2000) permite correlacionar el NB con el NSPT en terrenos cohesivos, que son los que componen el terreno:

$$NSPT = 13 \cdot \log (NB) - 1,13$$

A continuación, se presentan los resultados del penetrómetro 4 en DPM, NB y NSPT en ambas fases del estudio (Gráficas 4 y 5):



Gráfica 4 (Izda.) y Gráfica 5 (Dcha.): Representan el registro de golpeo (eje X) frente a la profundidad hasta 5 m (eje Y). Se observan los registros de golpeo para el penetrómetro 4 en términos de DPM y sus correlaciones con NB y NSPT. dibujados con el mismo color entre gráficas para poder comparar el registro de cada penetrómetro en ambas fases.

- Correlación entre DPM y NB: el registro de golpeo no cambia entre DPM y NB, la curva tiene la misma forma, pero la que representa el NB está desplazada hacia la izquierda, es decir, muestra un menor golpeo que la del DPM. Esto tiene sentido, ya que el NB es un equipo que genera más energía de impacto (mayor peso en la maza, mayor altura de caída) y necesitará menos golpes para penetrar el terreno que un DPM; ocurre lo mismo tanto en la fase I como en la II, misma forma de registro, con un golpeo un poco menor para el NB.
- Correlación entre NB y NSPT: el registro obtenido sí presenta cambios en relación con las curvas de DPM y NB, además de haber diferencia entre ambas fases. En la fase I, el valor de golpeo de NSPT supera al de las otras dos hasta los 2,50 m de profundidad, con un valor de unos 13 – 14 golpes; a partir de ese punto, el NSPT llega a alcanzar los 15 golpes, y se mantiene el valor de una forma muy estable, atenuando considerablemente los picos de golpeo que presentan DPM y NB. En la fase II el registro de NSPT alcanza, desde el inicio, valores de 15 – 14 golpes, y se mantiene en toda la profundidad; como en la fase I, solo algunos de los picos más pronunciados en los registros de DPM y NB se reflejan ligeramente en la curva del NSPT.

Analizando los resultados de las correlaciones, resulta satisfactoria la correlación entre DPM y NB, pues mantiene el registro de golpeo intacto, pero da un valor de golpeo menor al equipo más pesado, lo cual tiene sentido y es el efecto deseado de la correlación. En cambio, la correlación con NSPT ha distorsionado los valores obtenidos, posiblemente a causa de la fórmula utilizada, mayorando los valores por debajo de 13 – 14 golpes y minorando los superiores, de forma que no se han superado los 15 – 16 golpes; esto provoca que el registro obtenido para la fase II, que tiene valores de golpeo (DPM y NB) elevados desde el principio, sea demasiado homogéneo e impide identificar la variación natural en el terreno.

6.4 Resultados de los ensayos en resinas

6.4.1 Resultados de las propiedades mecánicas

A continuación, se presentan los ensayos realizados para determinar las propiedades de las resinas.

- Ensayo de resistencia a compresión: se han obtenido valores entre 400 y 500 KPa, con deformaciones menores al 5%.
- Ensayo de resistencia a la tracción: se han obtenido valores mayores a 500 KPa.
- Ensayo de transmisión de vapor de agua: se han obtenido valores entre 200 y 300 mg/m²·s

Los resultados del resto de ensayos realizados son los siguientes:

- Presión de hinchamiento en edómetro: los resultados son los siguientes (Tabla 7):

Resultados presión de hinchamiento en edómetro	
Presión máxima de expansión	11,2 MPa
Densidad en expansión libre	90 kg/m ³
Tiempo de reacción en semisolidificación	4 segundos
Tiempo de reacción en semisolidificación	50 segundos

Tabla 7: Resultados de los ensayos de presión de hinchamiento en edómetros.

- Módulo de elasticidad inicial para deformación axial de 1%: se aplica la Ley de Hooke para determinar el módulo elástico, utilizando la fórmula:

$$E = \frac{F \cdot L1}{A \cdot L2}$$

Donde:

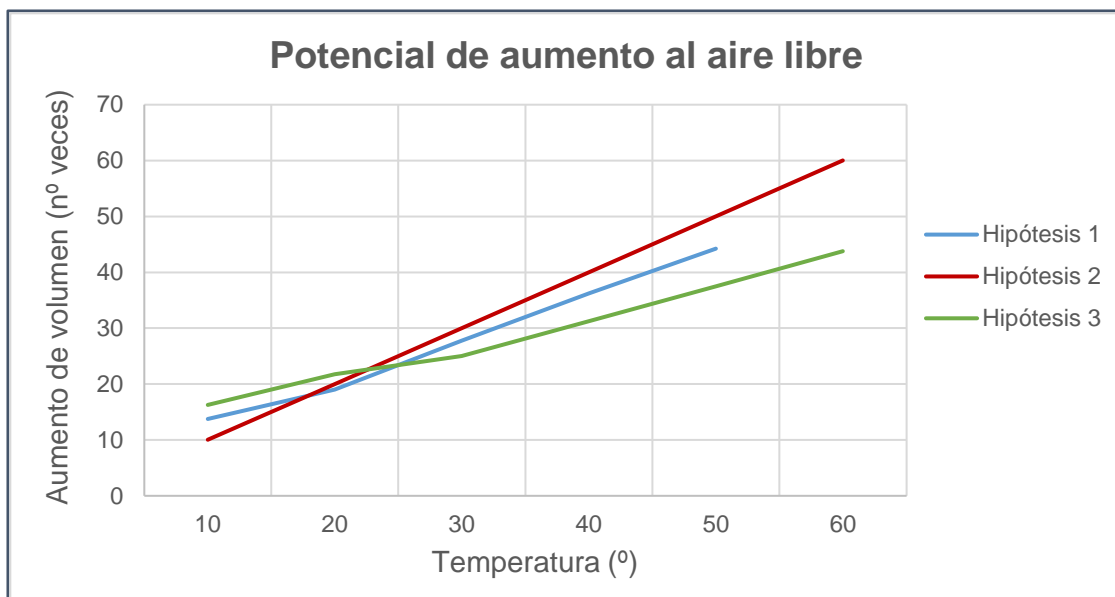
- E = módulo elástico (MPa)
- F = fuerza aplicada (KN)
- L1 = longitud inicial (mm)
- L2 = variación de longitud (mm)
- A = área sobre la que se aplica F (mm²)

Según la densidad de la resina, se obtienen diferentes módulos elásticos (Tabla 8):

Densidad (Kg/m³)	Módulo elástico E (MPa)
50	10,1
100	25,7
200	51,6
300	84,9

Tabla 8: Resultados del módulo elástico en MPa en resinas para probetas de distintas densidades en kg/m³.

- Potencial de aumento de volumen al aire libre: para este proyecto, se ha planteado la formulación que sigue la hipótesis dos de la siguiente gráfica (Gráfica 6):



Gráfica 6: Representa el aumento de volumen de la resina (eje X) frente a la temperatura en °C a la que se somete la muestra (eje Y). La resina utilizada en el estudio ha sido producida con la relación de aumento de volumen de la hipótesis 2.

- **Resistencia a la compresión vertical:** Los resultados se obtienen mediante el método gráfico de rectas inclinadas. Para las muestras, se talla una probeta si la densidad es inferior a 200 kg/m³ o se enmolda si es superior, y después se le da un diámetro a la probeta de 50 mm. En cualquier caso, la deformación máxima obtenida es del 15% o se alcanza la rotura; los resultados aparecen a continuación (Tabla 9):

Densidad (Kg/m ³)	Resistencia a compresión vertical (KPa)
50	412
100	1063
200	2412
330	6710

Tabla 9: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión en KPa en resinas para probetas de distintas densidades en kg/m³.

- **Permeabilidad:** la resina es casi impermeable y prácticamente estanca al agua.

6.4.2 Resultados de las propiedades químicas

La resina utilizada es un poliuretano rígido de celda cerrada y de rápida expansión, compuesta por Isocionato y Polioliol. La proporción de mezcla utilizada por CECTECO permite que la resina tenga las siguientes características:

- **Toxicidad:** no tienen un impacto tóxico en el medio ambiente.
- **Resistencia a la descomposición:** son resistentes a la acción de organismos descomponedores como hongos y bacterias.

- Resistencia a la agresión química: son corroídas al entrar en contacto con ácido nítrico concentrado y ácido sulfúrico concentrado. Sin embargo, estos compuestos son muy agresivos, y las resinas son resistentes frente al resto de compuestos químicos.

Además, dado que cumplen con la normativa medioambiental mencionada en el apartado 4.4.2 Propiedades químicas de la resina, las resinas son inocuas al terreno y no contaminan el medio ambiente. También se las ha sometido a ensayos de durabilidad y envejecimiento acelerado, en los que no han perdido propiedades ni han sufrido cambios significativos, por lo que se espera que su vida útil sea superior a 50 años.

Gracias a la mayor compactación del terreno inyectado, los cambios de humedad son considerablemente menores que los que sufría el terreno natural. Además, al haber menos espacio para almacenar agua, los procesos de retracción producidos por la evaporación también se reducen al inyectar. De la misma forma, limitar el espacio y las entradas y salidas de agua en el terreno hace que la inyección reduzca la permeabilidad de este, lo que es beneficioso dado que el agua es uno de los agentes más peligrosos de la geotecnia.

6.5 Integración de técnicas

Tras analizar las diferencias entre la fase I y la fase II, es seguro afirmar que se han producido cambios en el terreno y que estos son una consecuencia de la inyección de resinas, ya que en los tres ensayos realizados se han detectado cambios que son difíciles de justificar por medios naturales dado el escaso tiempo transcurrido entre ambas fases. Los métodos utilizados para investigar el terreno son muy diferentes entre sí, pues los penetrómetros obtienen información directa de la resistencia del terreno en forma de golpeo, mientras que la geofísica obtiene información indirecta sobre las características del terreno estudiando cómo interactúan distintos tipos de ondas con los materiales del subsuelo; de hecho, la información obtenida por el georradar es bastante diferente de la obtenida con la sísmica MASW, ya que el primero ofrece una información visual que requiere una interpretación, mientras que el segundo método sí que permite obtener valores numéricos del terreno.

Para comparar los resultados de las técnicas lo óptimo sería que la ubicación de los ensayos fuera la misma, de forma que el terreno investigado es común a las tres técnicas. Esto no siempre es posible, ya que las dificultades logísticas del entorno o la propia metodología de los ensayos condicionan la localización de los puntos de investigación. A continuación, se muestra la zona del estudio que contiene los tres tipos de investigaciones en un espacio de terreno en el que se asume que no va a haber cambios que impidan hacer la comparación correctamente (Figura 22):

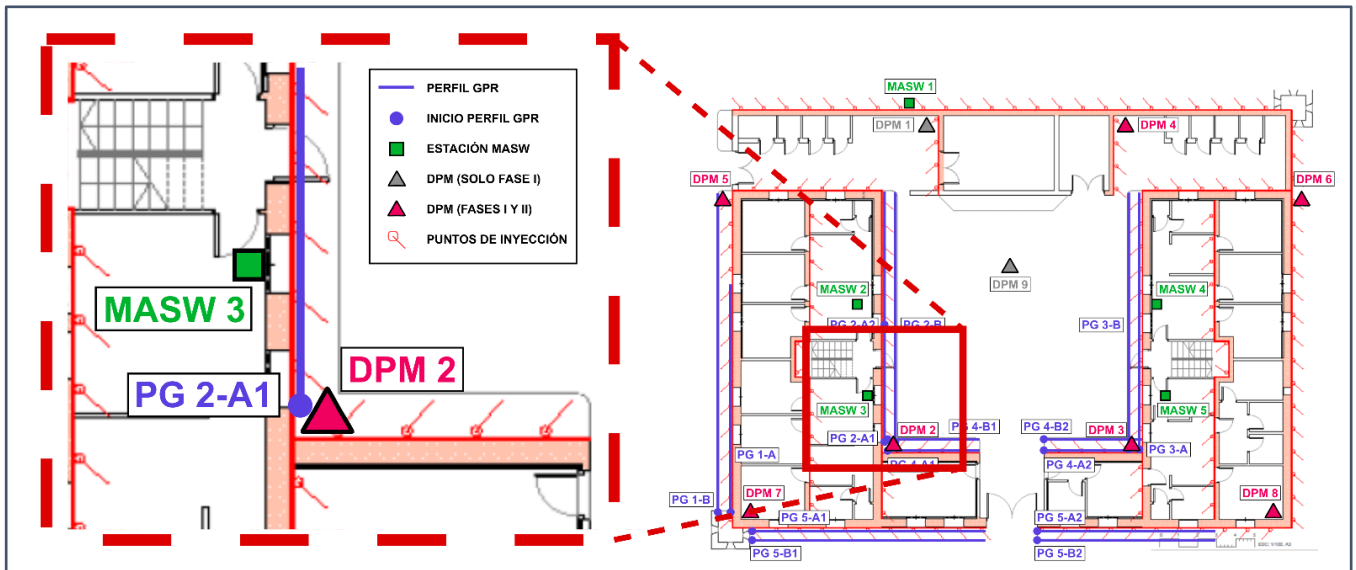


Figura 22: Detalle de la localización más adecuada para hacer la comparación entre técnicas, con el perfil de georradar PG 2-A1, la estación sísmica MASW 3 y el penetrómetro DPM 2. Aunque hay otros perfiles de georradar en la zona, se han eliminado ya que no serán objeto de la comparación.

Sirviendo de referencia el perfil de georradar PG 2-A1, cuya longitud es de 3,80 m, se puede utilizar su radargrama como perfil bidimensional del terreno y superponer el penetrómetro DPM 2 y la estación MASW 3 en el inicio y la mitad del perfil, respectivamente. A continuación, aparece representado el perfil de Geo-radar con los registros en su posición aproximada (Figura 23):

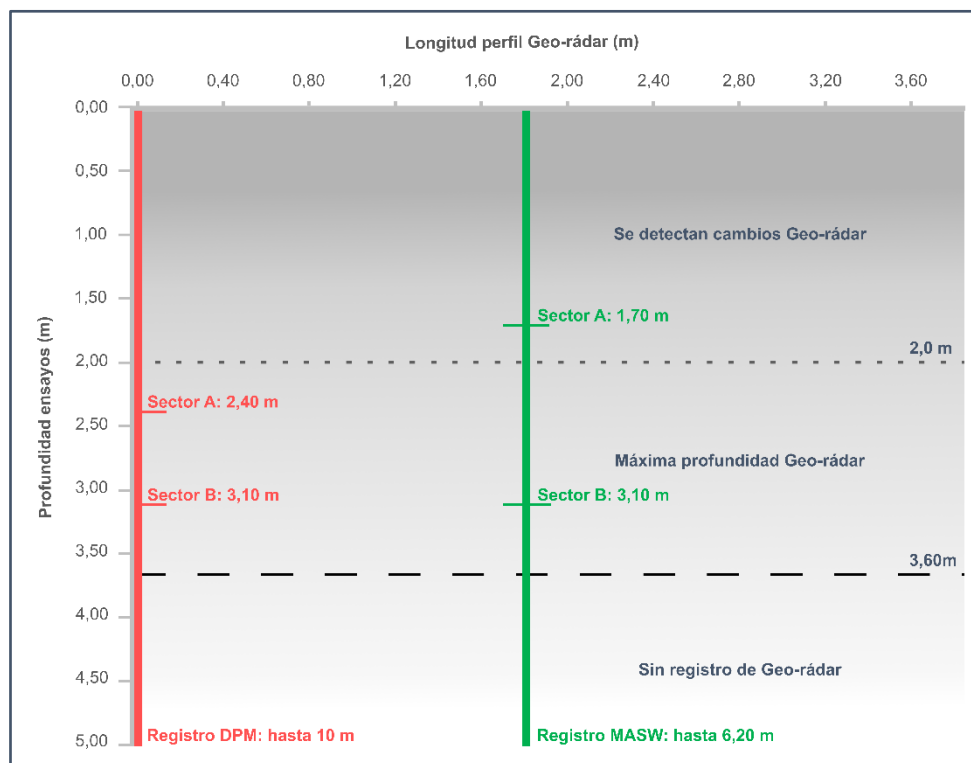


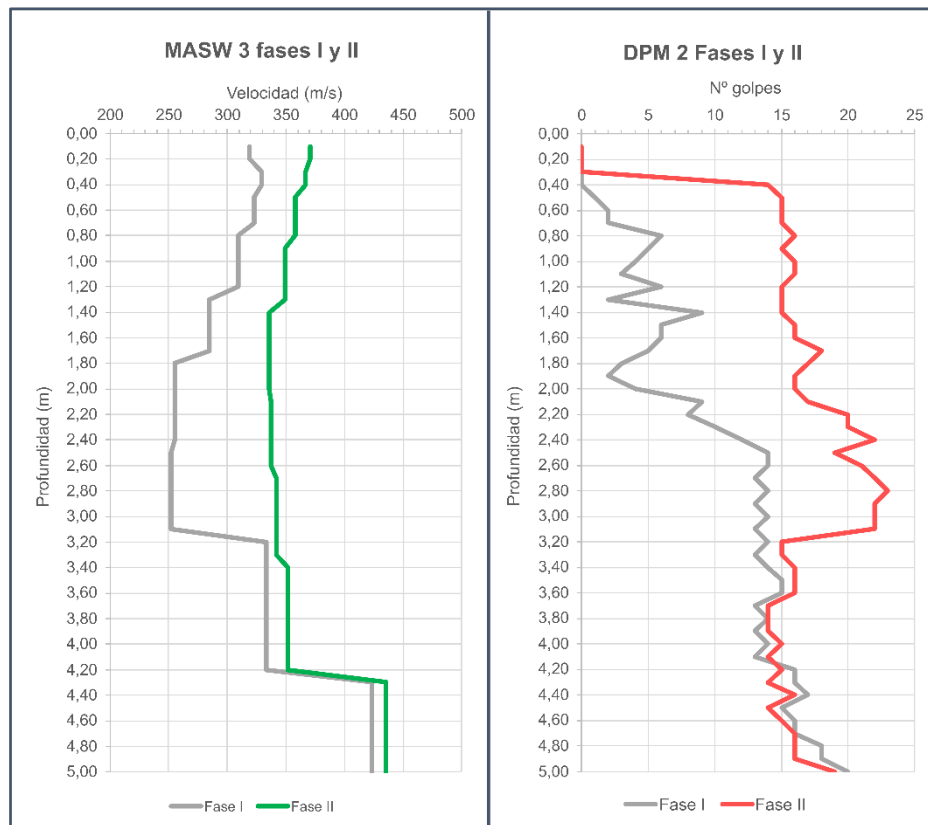
Figura 23: Esquema con las medidas del perfil PG 2-A1 con los registros para DPM 2 y MASW 3 superpuestos, indicando las profundidades a las que se dan cambios relevantes en los registros de cada ensayo.

Al comparar los tres tipos de ensayos en ambas fases, destaca la diferencia de profundidad alcanzada entre el geo-rádar y los otros ensayos, ya que el primero ha alcanzado 3,60 m de profundidad máxima en todos los perfiles, mientras que la sísmica y el penetrómetro superan claramente la profundidad de 5 m: la sísmica alcanzó profundidades hasta 6,20 m mientras que los penetrómetros han llegado a penetrar 10 m en el terreno.

En el caso del geo-rádar, la profundidad de investigación viene dada por la frecuencia de las ondas electromagnéticas emitidas por la antena y las características del terreno, por lo que su profundidad de investigación no puede ampliarse haciendo perfiles más largos como sí sucede en otros métodos geofísicos. Otro detalle es que, aunque la profundidad alcanzada sea 3,60 m, no se aprecian diferencias significativas entre las fases I y II a profundidades mayores de 2 m por lo que, haciendo únicamente la investigación con geo-rádar, podría no ser posible determinar si las inyecciones hubieran afectado al terreno por debajo de 2 m.

Dado que en las estaciones sísmicas y en los penetrómetros sí se detectan cambios importantes en las propiedades del terreno en profundidades mayores a 2 m, se puede afirmar que el geo-rádar no ha sido capaz de detectar estos cambios; la causa más probable es que la disposición de los materiales en el subsuelo es tan caótica y poco estructurada que no hay manera de distinguir ningún tipo de disposición o textura que se pueda comparar directamente entre las fases del estudio. Dadas las características de la actuación, con niveles de inyección a 1 y 1,5 m de profundidad, los tres ensayos han alcanzado una profundidad de investigación apropiada para registrar la evolución del terreno tras la inyección. Sin embargo, para una actuación similar con niveles de inyección planteados a mayores profundidades, el geo-rádar empleado de forma única previsiblemente sería de poca ayuda, y para ampliar el alcance de las estaciones MASW se debería aumentar la longitud de los perfiles colocando más geófonos por línea, por lo que los penetrómetros serían ensayos más apropiados para profundidades mayores.

A continuación, se presentan las gráficas para la estación MASW 3 (Gráfica 7) y el DPM 2 (Gráfica 8) en las fases I y II del estudio, con el fin de comparar los resultados obtenidos en ambas técnicas:



Gráfica 7 (Izda.) y Gráfica 8 (Dcha.): La gráfica 7 presenta el modelo de velocidad de ondas S para la estación MASW 3 (V_s en eje X y profundidad en eje Y) y la 8 el registro de golpeo para el penetrómetro DPM 2 (n° golpes en eje X y profundidad en eje Y), en ambos casos tanto antes como después de la inyección para poder comparar la evolución en la fase II entre los dos ensayos.

Al comparar los registros, se observa que en ambos casos hay un escalón abrupto en torno a 3,20 m de profundidad donde las diferencias de V_s y N entre la fase I y la fase II disminuyen considerablemente. Tal y como se describió en el apartado de resultados de cada ensayo, el sector C es aquel que indica el punto a partir del cual el efecto de la inyección es mínimo o inexistente, cuya profundidad variaba en cada ensayo, pero como MASW 3 y DPM 2 están relativamente cerca, tiene sentido que el sector C aparezca en ambos a una profundidad similar.

Cabe destacar que la forma en que el sector C se manifiesta en el registro es diferente en cada ensayo: en MASW 3 viene dado por un aumento abrupto de V_s en la fase I, mientras que en DPM 2 se da un descenso rápido del golpeo en la fase II. La explicación más probable es que, a las profundidades a las que se da el sector C, la resistencia o compactación natural del terreno es mayor y dificulta la entrada de resina, de ahí que el golpeo vea un descenso súbito al no haber podido penetrar más resina en el terreno; de hecho, el registro de V_s muestra muy pocos cambios en ese punto en la fase II, indicando que la entrada de resina es reducida a esas profundidades.

En cuanto a la magnitud de los valores obtenidos, aunque los valores de Vs oscilan entre 250 y 430 m/s y los de N entre 0 y 23 golpes, el incremento que experimenta el golpeo es proporcionalmente mayor. En la siguiente tabla aparecen los datos de diferencias máximas, así como la media en cada sector para ambos ensayos (Tabla 10):

Ensayo	Diferencia máxima		Sector A		Sector B		Sector C	
	Valor (m/s)		Mejora (m/s)		Mejora (m/s)		Mejora (m/s)	
MASW 3	Valor (m/s)	90	Mejora (m/s)	45	Mejora (m/s)	85	Mejora (m/s)	15
	Profundidad (m)	2,90	Profundidad (m)	0,00 - 1,70	Profundidad (m)	1,80 - 3,10	Profundidad (m)	3,20 - 5,00
DPM 2	Valor (nº golpes)	14	Mejora (nº golpes)	10	Mejora (nº golpes)	8	Mejora (nº golpes)	0
	Profundidad (m)	0,50	Profundidad (m)	0,00 - 2,40	Profundidad (m)	2,50 - 3,10	Profundidad (m)	3,20 - 5,00

Tabla 10: Valores medios y rango de profundidades de cada sector de mejora para la estación MASW 3 y el penetrómetro DPM 2.

Comparando las diferencias máximas entre fases en cada registro, en MASW 3 la máxima mejora de Vs se da a 2,90 m de profundidad y es de 90 m/s, pasando de 252 m/s en la fase I a 342 m/s en la fase II, mientras que la máxima mejora de golpeo es de 14 golpes, y se da a varias profundidades (entre 0,40 y 0,50, y entre 1,80 y 1,90 m, respectivamente), pero siempre se da en el sector A, mientras que la mejora máxima de MASW se da en el sector B. Comparando la mejora máxima de cada ensayo, los 90 m/s del MASW 3 suponen un incremento de Vs del 35,71% con respecto al valor de la fase I, mientras que esos 14 golpes de mejora en DPM 2 proporcionalmente son un incremento mucho mayor, pasando de 0 y 1 golpes a 14 y 15 para las profundidades de 0,40 y 0,50 m, o de 3 y 2 golpes a 17 y 16 para las profundidades de 1,80 y 1,90 m; el incremento es de varias veces el valor inicial de golpeo, llegando hasta una mejora de 1400% en el caso de 1 a 15 golpes.

La evolución de los parámetros en el sector C es diferente en ambos ensayos ya que, aunque la inyección termina su efecto de aumento de resistencia en dicho sector, en los registros de sismica la velocidad sigue aumentando en ambas fases a partir de ese punto y llegan a alcanzar valores bastante superiores que en la zona mejorada por la inyección. En MASW 3, la zona mejorada por la inyección alcanza velocidades máximas de 371 m/s, mientras que a los 4,90 m la velocidad en ambas fases es de unos 430 m/s, y sigue aumentando hasta los 520 m/s al final del ensayo, a 6,20 m de profundidad.

En los penetrómetros este efecto no ocurre y, una vez pasado el efecto de la inyección, el golpeo es similar en orden de magnitud al de la zona mejorada, con diferencias que rara vez alcanzan los 5 golpes entre la zona mejorada y la zona inafectada, además de no existir esa tendencia a que el golpeo mejore progresivamente en mayores profundidades, ya que en el registro hasta los 10 m los valores se mantienen en torno a 20 golpes, nunca superando los 23 golpes.

Este efecto se debe a que la compactación del terreno aumenta en profundidad por el propio peso del terreno, pero los materiales que componen el terreno son los mismos y, llegado el punto en el que el subsuelo es más compacto y resistente naturalmente, el golpeo se va a mantener estable hasta que las condiciones de compactación del suelo cambien considerablemente o haya un cambio de materiales en el subsuelo. En cambio, la velocidad de ondas sí es sensible a ese aumento de compactación o rigidez del subsuelo y, por esa razón, la velocidad V_s sigue aumentando en los registros en función de la profundidad a pesar de que el terreno ya no está influido por la inyección.

7. CONCLUSIONES

Tras analizar las distintas técnicas utilizadas para el estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La inyección de resinas ha producido cambios en el terreno que han sido detectados por las tres técnicas, cuya interpretación permite afirmar que se ha conseguido una mejora del terreno y que la actuación ha sido un éxito.
 - En perfiles de geo-rádar se han podido reconocer cambios en la morfología de los reflectores, indicando que la disposición de los materiales del subsuelo ha cambiado; la reflectividad de los reflectores tiende a bajar, por lo que se asume que el terreno ha aumentado su homogeneidad y su compactación. Se pueden distinguir variaciones hasta una profundidad entre 1,80 y 2,0 m.
 - En las estaciones de sísmica MASW se han medido valores de velocidad de ondas S mayores tras la inyección de resinas en las investigaciones MASW 1, 3 y 4, lo que indica que el terreno ha aumentado su rigidez y su compactación tras la actuación. Este aumento de velocidad entre fases se da hasta profundidades de 1,80, 3,10 y 2,60 m, respectivamente.
 - Los registros de golpeo de los penetrómetros presentan un aumento en el nº de golpes tras la actuación, lo que indica que se ha mejorado la resistencia del terreno. Esta mejora es bastante grande hasta una profundidad de 2,50 m, desde ese punto y hasta 3,50 m de profundidad la mejora persiste, pero no es tan acusada, y por debajo de 3,50 m se puede considerar que ya no hay mejoras en el golpeo.
 - Además, las resinas utilizadas por CECTECO tienen unas características muy valiosas, como una elevada durabilidad y resistencia tanto a la descomposición como a la mayoría de los agentes químicos presentes en el terreno natural. Por otro lado, cumplen varias normativas medioambientales de forma que no tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente. Por estos motivos, constituyen un material de relleno muy adecuado, pues tiene las propiedades necesarias para cumplir su objetivo de mejorar el terreno durante muchos años a la vez que mantiene el terreno natural libre de agentes contaminantes.

- La inyección no ha producido daños en las zonas de suelo próximas a los puntos de inyección, como muestran los perfiles de sísmica MASW. Las estaciones MASW 2 y 5 se han realizado separadas a 1 m de los muros inyectados y los resultados, para estas estaciones, muestran valores de Vs muy similares antes y después de la actuación, por lo que se puede asumir que la inyección solo ha afectado considerablemente al

terreno directamente bajo los muros, sin alterar significativamente los materiales próximos.

- Además, a partir de la profundidad en la que deja de hacer efecto la inyección, la diferencia en el registro entre la fase I y la fase II es muy pequeña, lo que indica que la inyección ha mejorado el terreno sin modificar negativamente las propiedades del terreno a mayor profundidad. Este fenómeno se da tanto en la sísmica como en los penetrómetros.

- Resulta muy útil la combinación de distintas técnicas para hacer un control de calidad del subsuelo tras una actuación. En este caso, se han combinado dos técnicas geofísicas, que obtienen información indirecta, con penetrómetros, que son ensayos *in situ* que obtienen información directa sobre la resistencia del terreno. Estas técnicas tienen mecanismos de medida muy diferentes y obtienen resultados muy diferentes y, precisamente por eso, es interesante su combinación. Todas las técnicas han podido detectar los cambios producidos por la inyección y la interpretación de sus registros permite conocer, en mayor o menor medida según el método, el alcance y la magnitud de los cambios. De esta forma, se reduce considerablemente la incertidumbre sobre el resultado de la actuación, porque la información obtenida en cada método sirve para complementar y calibrar la de los demás.

- En relación con el punto anterior, es muy importante plantear una buena campaña de ensayos y que estos se hayan seleccionado con buen criterio, de forma que el tipo de ensayo elegido y su localización permitan cumplir el propósito de la campaña. Así, se garantiza una buena toma de datos y una buena optimización de recursos. En este caso, la campaña de penetrómetros planteada por CECTECO permite la obtención de registros de golpeo en varios puntos, cubriendo las principales zonas de interés sin hacer demasiadas perforaciones que incrementarían mucho el coste de la campaña. Por otro lado, la campaña de investigaciones geofísicas planteadas por AGS complementa a la de penetrómetros aportando información en sectores no investigados.

8. BIBLIOGRAFÍA

Dapena, E.; Lacasa, J. García, A. (2000). "Relación entre los resultados de los ensayos de penetración dinámica Borros DPSH y el SPT en un suelo arcilloso". Actas del Simp. sobre geotecnia de las infraestructuras lineales. Soc. Española de Mec. del Suelo e Ing. Geotécnica.

Directivas europeas 2011/65 UE y 2002/96/CE: restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas.

European symposium on penetration testing, ESOPT. Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing ESOPT, Stockholm, June 5-7, 1974, Volumes 1, 2:1 & 2:2, National Swedish Building Research, 1975, 259 p.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1990). Mapa Geológico de España (serie MAGNA) escala 1/50.000 correspondiente a Alcalá de Henares, hoja nº 560.

Ivanov, J., Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Overton, R., (2001). *Modal separation before dispersion curve extraction by MASW method: Proceedings of the SAGEEP 2001*, Denver, Colorado, SSM-3, (IVA-01-01).

Norma ASTM D 3877/80: "Test Method for one-dimensional expansion, shrinkage and uplift pressure of soil-line mixture".

Norma UNE 103602:1996: "Ensayo para calcular la presión de hinchamiento en edómetro".

Norma UNE-EN 12086:1998: "Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de las propiedades de transmisión del vapor de agua".

Norma UNE-EN ISO 527-2:2012: "Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión".

Norma UNE-EN ISO 844:2015: "Materiales plásticos celulares rígidos. Determinación de las características de compresión".

Norma UNE-EN ISO 22476-2: "Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de campo. Parte 2: Ensayo de penetración dinámica".

Reglamento (CE) Nº 1005/2009: sustancias que agotan la capa de ozono (16 de septiembre de 2009).

Reglamento REACH de la UE: lista de posibles sustancias extremadamente preocupantes (SEP) que podrían estar sujetas a autorización (ECHA, última fecha de inclusión: 18 de junio de 2012).

Yu, H.S. Houlsby, G.T. (1991). *Finite cavity expansion in dilatant soils: loading análisis*. Géotechnique, 41(2), 173-183.

9. ANEXOS

9.1 Radargramas

