

3. CONOCIMIENTO PREVIO DEL MATERIAL ESTUDIADO

3.1. Características generales de las limolitas Wealdenses

El material presente en la cerrada de la presa de Castrovido (en Burgos) corresponde a una serie de materiales wealdenses, del Cretácico inferior, que se disponen por encima de materiales jurásicos. Estos materiales corresponden a la margen occidental de la gran cuenca de sedimentación continental llamada Cuenca de Cameros. A grandes rasgos son formaciones detrítico-carbonáticas con predominio de la serie detrítica, que tienen origen paleogeográfico en un sistema fluvial de tipo deltaico.

Estas formaciones constituyen el sustrato rocoso de la zona de la cerrada, formado por capas alternadas de limolitas y areniscas, siguiendo una disposición típica de depósitos asociados a abanicos aluviales. El contacto entre arenisca y limolita se efectúa de forma abrupta, presentándose un contacto erosivo en la base. Existen numerosos cambios de facies en la vertical y en la horizontal, presentándose acuñaciones que proporcionan al conjunto una gran complejidad estructural.

Las limolitas wealdenses presentan una coloración rojiza, debido a la presencia de partículas finas de hematites. La cementación está constituida por carbonato cálcico. Presentan laminación oblícua, ocasionalmente paralela. El material de arcilla predominante es la illita. Por otro lado, las areniscas son silíceas, de grano fino a medio, de subangulosos a subredondeados. En este caso la cementación también procede del carbonato cálcico presente. Mantienen una cierta porosidad primaria, pero su porosidad eficaz es nula. La arenisca se presenta en cuerpos con extensiones laterales pequeñas.

La estructura de estas formaciones se basa en una disposición de los estratos con rumbo EW y buzamiento de alrededor de los 10°. El régimen de sedimentación es cíclico, comenzando el ciclo con la deposición de lentejones de arenisca en un ambiente de energía máxima dentro del canal fluvial. El último episodio se finaliza la sedimentación cuando se produce el desbordamiento del canal y decrece instantáneamente la energía de las aguas dando paso a la sedimentación de las limolitas y arcillas en la llanura de inundación, que son por tanto de mayor continuidad lateral. No presentan una red de fracturación marcada, pero se observan diaclasas con o sin relleno, fracturas con estrías de fricción y brechificaciones debidas a cataclasis.

3.2. Características y problemáticas de la presa de Castrovido

El emplazamiento de la futura presa de Castrovido se encuentra en el término municipal de Salas de los Infantes, en la provincia de Burgos. El embalse de Castrovido se ubica en el río Arlanza, afluente del Pisuerga, que a su vez lo es del río Duero. En la Figura 8 se muestra la situación de la presa dentro de la cuenca hidrográfica del Duero:

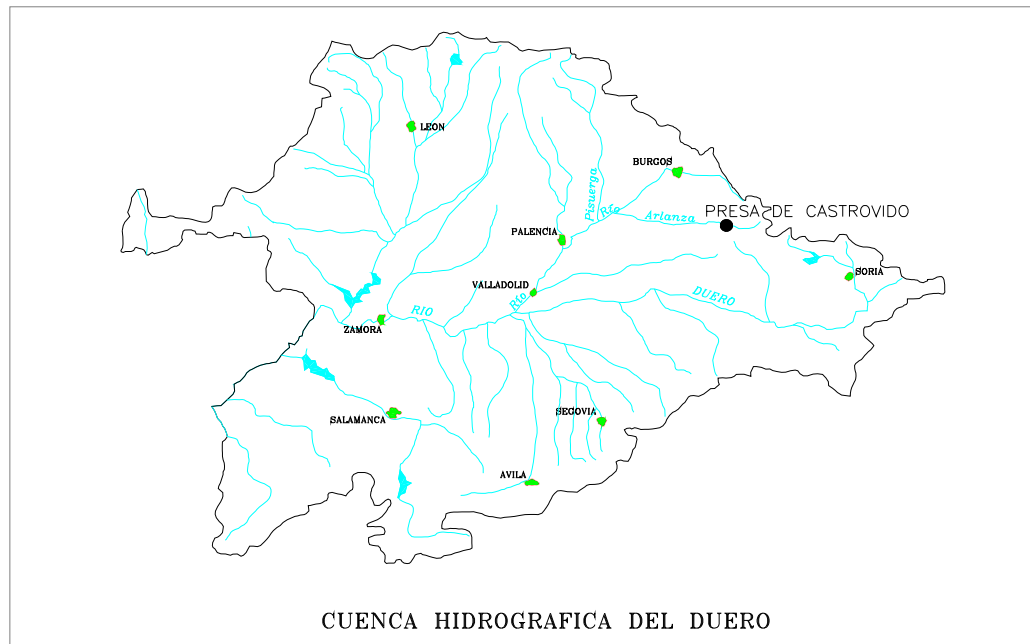


Figura 8: Localización de la presa de Castrovido dentro de la cuenca hidrográfica del Duero.

En el proyecto constructivo, se define el tipo de presa como presa de gravedad, de planta recta, construida con fábrica de hormigón convencional vibrado. La presa alcanza una altura sobre cimientos de 91 metros y una longitud de coronación de 527.5 metros. El volumen de hormigón correspondiente, teniendo en cuenta las pendientes de los taludes aguas arriba y aguas abajo, es de 616.341 m³.

La excavación de los estribos de la presa se inició en 2003. Sin embargo, estas obras fueron paralizadas una vez se había realizado parte de la excavación, alcanzando profundidades de 10 m en algunos puntos. Esta excavación se realizó con explosivos. En 2007 se retomaron las obras de construcción de la presa. Sin embargo, estas obras no se han podido continuar debido a los problemas geotécnicos que se detectaron. En los estudios geotécnicos y de geofísica realizados en 2007 se ha observado una reducción de las propiedades resistivas de los materiales en relación con los valores que se tuvieron en cuenta en el proyecto de construcción de la presa en 2003-2004. Se ha detectado que el material situado a cotas poco profundas desde la cota de excavación realizada en 2004 presenta una menor resistencia y rigidez, así como una mayor presencia de humedad. Además, se ha observado fenómenos de inestabilidad en los desmontes que limitan la excavación.

Estos aspectos están relacionados con una degradación sufrida por las limolitas Wealdenses, que se degradan cuando están expuestas a la acción atmosférica. Sin embargo, el corto período de tiempo transcurrido entre estos dos episodios y la fuerte degradación observada, hace que sea de especial estudio el comportamiento sufrido por este material, a modo de comprender los procesos sufridos.

Por otro lado, la orientación de la presa (E/NE a W/SW) y la marcada horizontalidad de los planos de sedimentación implican que los esfuerzos de corte sobre el plano de la cimentación se dirijan a favor de los planos de cimentación. Este

aspecto hace también de especial importancia el estudio de las propiedades del material.

3.3. Datos de reconocimiento en campo: Geofísica

Para un conocimiento más detallado del material estudiado, previamente al desarrollo concreto de la tesina, se han analizado los resultados obtenidos en el reconocimiento en campo del material de cimentación de la Presa de Castrovido. Se dispone del Reconocimiento Geofísico y Geotécnico realizado por la empresa IN SITU TESTING, S.L., del cual se han extraído los resultados más relevantes en el contexto de la tesina. Para ello, se analizan a continuación los datos disponibles de litología y de geofísica obtenidos de los sondeos realizados en dicho reconocimiento.

En concreto, en el estudio propio de la tesina, el material que se empleará es el correspondiente a uno de los sondeos realizados para este reconocimiento. El sondeo, que corresponde a la referencia SN1, está ubicado en las inmediaciones de la base de cimentación de la Presa de Castrovido. En concreto, corresponde a un sondeo vertical realizado en el futuro emplazamiento del estribo derecho. Este sondeo se encuentra situado en la zona superior de dicho estribo, a 50 m de altura con respecto a la cota de fondo de la presa. El sondeo alcanza una profundidad de 20.20m y tiene un diámetro de 101mm. En la Figura 9 se detalla la localización del conjunto de sondeos y catas realizados en la cerrada de la presa, marcando en concreto la posición del sondeo SN1.

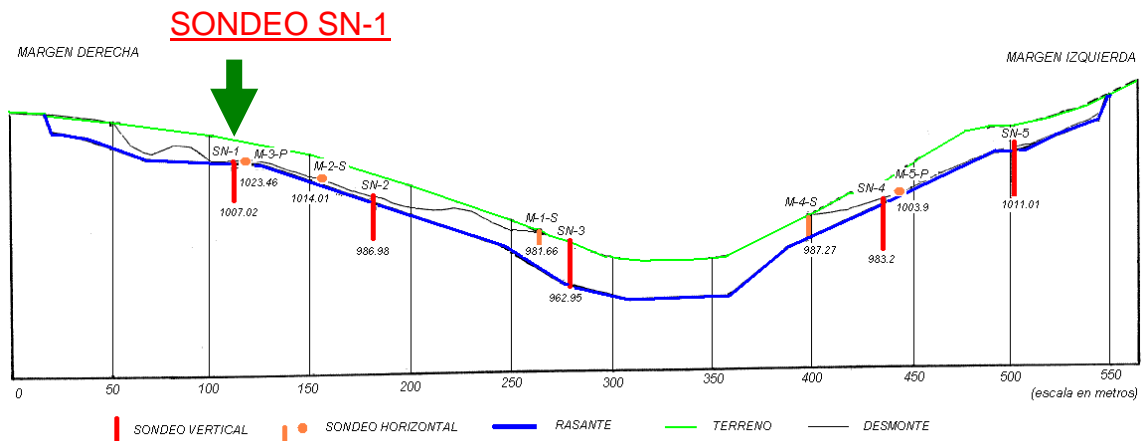


Figura 9: Perfil de la cerrada de la presa, indicando la posición de los sondeos y catas realizados. Se remarca la situación del sondeo SN1, cuyas muestras son las empleadas en el estudio de esta tesina.

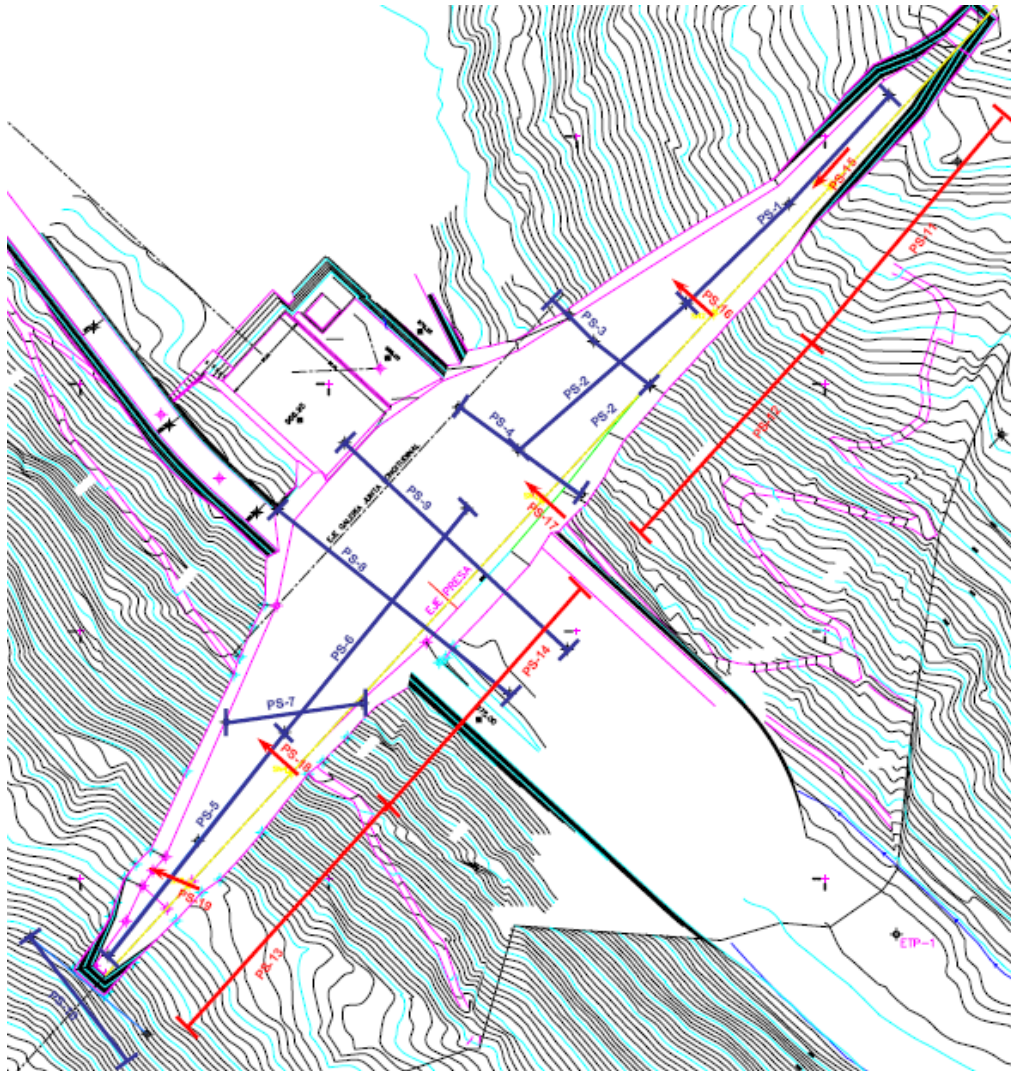


Figura 10: Planta de la presa, indicando los perfiles de tomografía sísmica realizados.

3.3.1. Velocidad de ondas P y S

Uno de los parámetros que se determinaron in situ fue la velocidad de onda, tanto de ondas de compresión (ondas P) como de corte (ondas S). Estos resultados, obtenidos de forma continua, permiten conocer las velocidades de onda para las diferentes profundidades que son características de cada material. Esta información proporciona el coeficiente de Poisson y permite calcular, conocida la densidad de los materiales ensayados, el módulo de elasticidad (E) y el módulo de corte (G) del terreno. La técnica geofísica que se ha utilizado es la testificación con *registro sísmico de onda completa*.

Los valores del coeficiente de Poisson y de los módulos elásticos y de corte se determinan a partir de las siguientes fórmulas:

$$\nu = \frac{(V_p / V_s)^2 - 2}{2(V_p / V_s)^2 - 2}$$

$$G = \gamma V_s^2$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

donde ν es el coeficiente de Poisson, V_p la velocidad de las ondas de compresión, V_s la velocidad de las ondas de corte, G el módulo de corte, γ la densidad del material y E el módulo elástico de Young.

En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos del ensayo completo para todos los sondeos realizados. Los resultados obtenidos para el sondeo SN1bis fueron determinados para profundidades de 8,00 a 19,50 m y, tal y como se observa, corresponden a valores de velocidad de onda de compresión y de corte bajos en relación con el resto de sondeos. En la tabla de la Figura 12 se muestran los resultados de velocidades medias obtenidos y los coeficientes de Poisson correspondientes para el sondeo SN1bis.

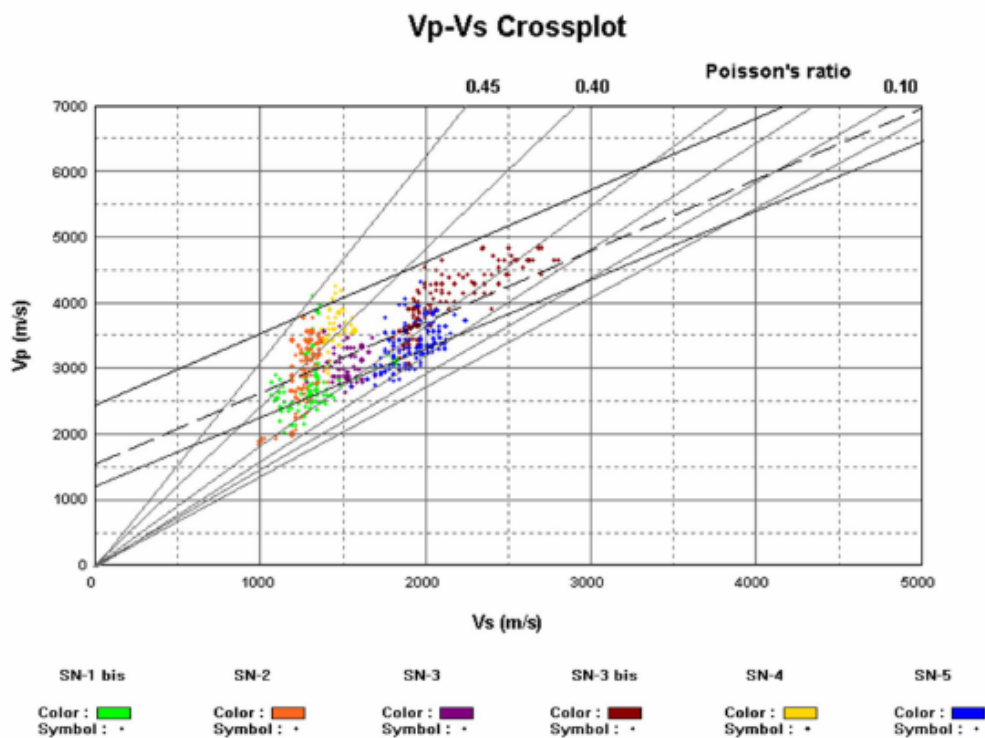


Figura 11: Velocidades de onda de compresión obtenidas en todos los sondeos realizados.

Profundidad (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Coef. Poisson
8,00 – 19,50	2025 – 4100	1100 – 1900	0,22 – 0,44

Figura 12: Valores de velocidad de ondas de compresión (V_p), velocidad de ondas de corte (V_s) y coeficiente de Poisson, determinados en el reconocimiento geofísico para el sondeo SN1bis.

Los valores de velocidad de ondas más elevados corresponden a los tramos atravesados correspondientes a las capas de arenisca, mientras que los valores menores corresponden a las limolitas. Se observa un aumento de la velocidad de onda en las limolitas creciente en profundidad.

Por otra parte, se realizaron ensayos de tomografía sísmica de superficie en los que se determinaron las velocidades de onda de compresión es correspondientes a los primeros 8 metros de profundidad. La tomografía sísmica realizada en las proximidades del sondeo SN1 (indicada con la referencia PS-15 en la Figura 10) se realizó a lo largo de una longitud de 20 m, realizando 3 tiros cada 10m. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 13.

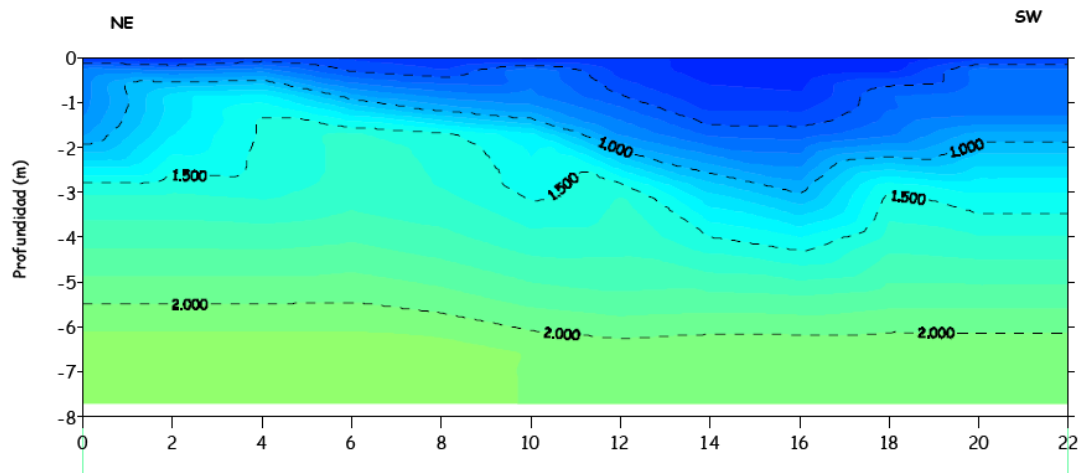


Figura 13: Velocidades de onda de compresión obtenidas en todos los sondeos realizados.

Según los resultados de tomografía sísmica, los valores de velocidad de onda de compresión en los primeros 8m de profundidad están en torno de los 500m/s a los 2500m/s. Esta gran variación en la velocidad de onda se concentra principalmente en la franja de 1m a 3m de profundidad. A esta profundidad es cuando se produce el mayor salto cuantitativo en la velocidad. Esta fuerte variación indica una menor calidad del material situado hasta los 2-3 m de profundidad, aspecto asociado a la degradación presente en el material. Por tanto, la tomografía sísmica permite observar y determinar la profundidad hasta la cual el material está afectado por la degradación.

3.3.2. Resistencia monoelectrónica, Gamma natural y potencial espontáneo.

Se realizó la medida de tres parámetros mediante testificación geofísica: la resistencia monoelectrónica, la gamma natural y el potencial espontáneo.

La medida de la resistencia monoelectrónica y del potencial espontáneo se realiza haciendo circular corriente alterna entre un electrodo de superficie y un electrodo situado en una sonda que va descendiendo a lo largo del sondeo. El equipo de registro rectifica la corriente alterna entre estos dos electrodos y, utilizando la ley de Ohm, calcula la resistencia entre ellos (resistencia monoelectrónica). El registro obtenido proporciona información de tipo *cualitativo*, ya que la resistencia medida es la suma de

la resistencia del cable de testificación, la resistencia de los materiales atravesados y el diámetro del sondeo. La respuesta de la medida de resistencia es útil para la identificación litológica. Además, a partir de las medidas de diferencias de potencial que dan lugar a corrientes eléctricas de origen natural debidas a desequilibrios iónicos entre materiales de diferentes permeabilidades, se puede medir el potencial espontáneo. La medida del potencial espontáneo permite detectar posibles capas permeables y situar sus límites. Asimismo se puede utilizar para identificación litológica, para correlacionar niveles entre sondeo, y para determinar valores de la resistividad del agua de formación.



Figura 14: Sonda utilizada en los ensayos de Gamma natural.

Los rayos gamma son ondas de energía electromagnética emitidas espontáneamente por los elementos radiactivos. La medida de esta radiactividad natural se realiza mediante un detector de centelleo formado por un cristal de ioduro de sodio que emite pulsos de tipo luminoso cuando sobre él inciden rayos gamma emitidos de forma natural por las formaciones geológicas. Estos pulsos de luz son amplificados por un foto-multiplicador y, posteriormente, convertidos en una señal de corriente eléctrica que se transmite a la unidad central de registro en la superficie a través del cable con el que se desciende la sonda. La medida de este registro geofísico permite entre otras aplicaciones, la identificación de tramos de arcilla y la correlación entre sondeos.

Las medidas determinadas “in situ” de estos tres parámetros en función de la profundidad del sondeo SN1 se presentan en la Figura 15.

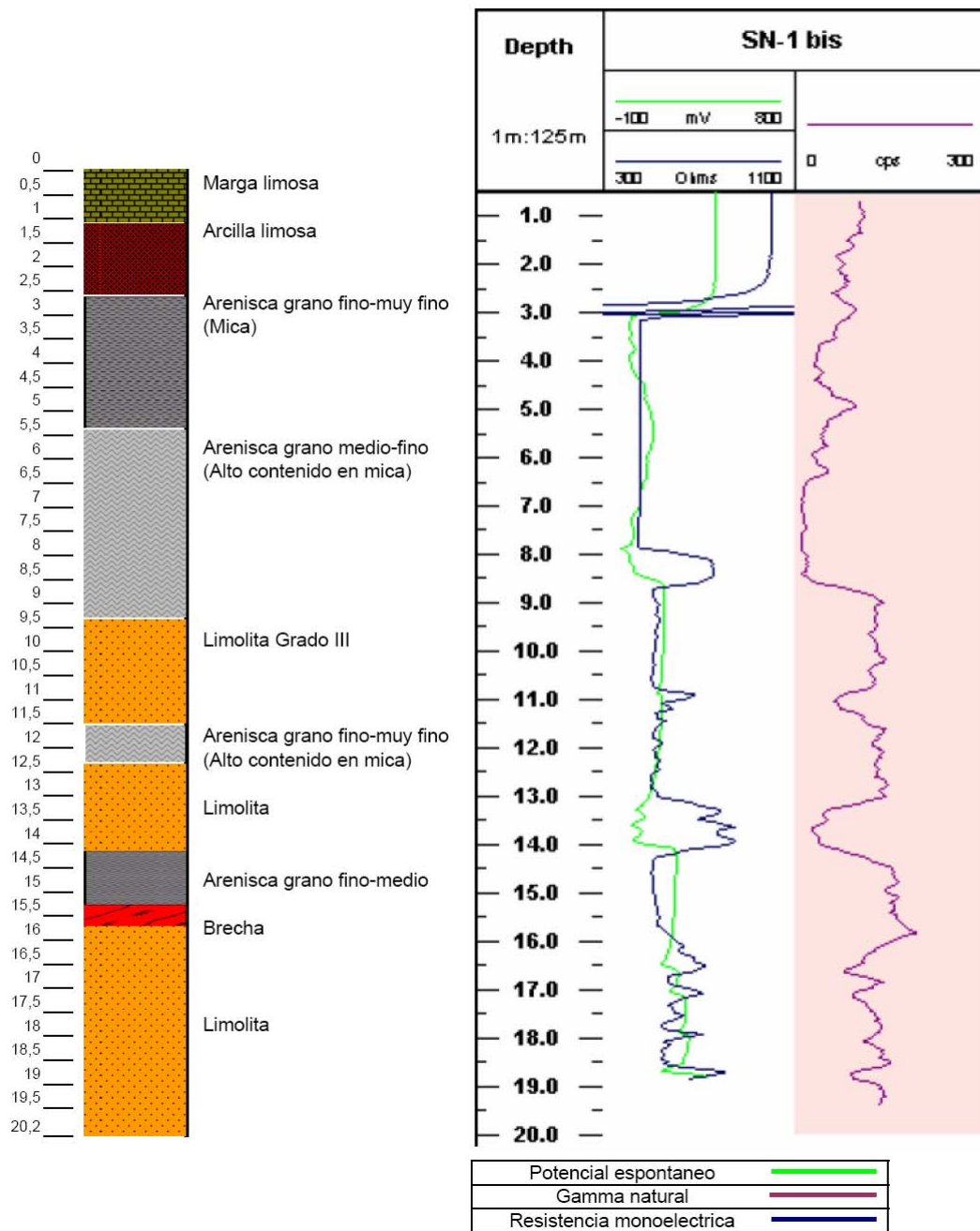


Figura 15: Sondeo SN1 y datos obtenidos del estudio geofísico

Como se observa, los tres parámetros permiten identificar los diferentes materiales atravesados. Se ha dispuesto, en la Figura 15, la litología determinada en el sondeo SN1. Se puede observar que los cambios bruscos en los valores de la gamma natural y la resistencia monoelectrica coinciden con cambios litológicos. En concreto, son muy marcados los cambios de limolita a arenisca.

A partir de los datos de la geofísica, junto con la testificación de los sondeos, se puede obtener un contexto general de los materiales presentes en la zona de la presa. Como ya se comentó, las litologías presentes en toda la base de cimentación de la

presa corresponden a limolitas, que presentan ciertas capas de arenisca. La limolita presenta una alteración a profundidades bajas muy destacada.

3.4. Datos de reconocimiento en el Laboratorio de Geotécnia de la UPC

Paralelamente a los ensayos de reconocimiento del material realizados en el contexto de la tesina, que se comentan en el apartado 4, el Laboratorio de Geotécnia de la UPC realizó un conjunto de ensayos de reconocimiento a las muestras procedentes del resto de sondeos realizados en la cerrada de la presa de Castrovido. Los sondeos analizados fueron el SN2, SN3, SN3bis, SN4 y SN5, donde los sondeos SN3 y SN3bis corresponden a la margen derecha de la cerrada, mientras que el resto pertenecen a la margen izquierda. A partir de las muestras de los sondeos, se obtuvieron un conjunto de perfiles en profundidad de humedad, densidad y velocidad de onda de compresión, que permitieron caracterizar el material.

En la Figura 16 se muestra el perfil de humedades gravimétricas. Las muestras correspondientes a la margen izquierda presentan poca variabilidad de la humedad en función de la profundidad, presentando una humedad límite del 6%. Sin embargo, las muestras correspondientes a la margen derecha presentan humedades muy elevadas, alcanzando valores de hasta el 20% a profundidades bajas. A partir de los 5-6 metros de profundidad, las humedades toman valores similares a los relativos a las muestras de la margen izquierda.

La presencia de una humedad sensiblemente mayor a profundidades bajas es un indicio de una posible degradación del material más superficial. La degradación del material da lugar a la formación de fisuras, a través de las cuales el agua penetra con más facilidad, dando lugar a un material más sensible a cambios en la humedad del ambiente. El sondeo SN1, cuyo reconocimiento forma parte de la tesina y se detallará en el apartado 4, corresponde a un sondeo de la margen derecha, por lo que se espera obtener un comportamiento similar al obtenido para los sondeos SN3 y SN3bis, en los cuales se observa este fenómeno de degradación en la zona más superficial.

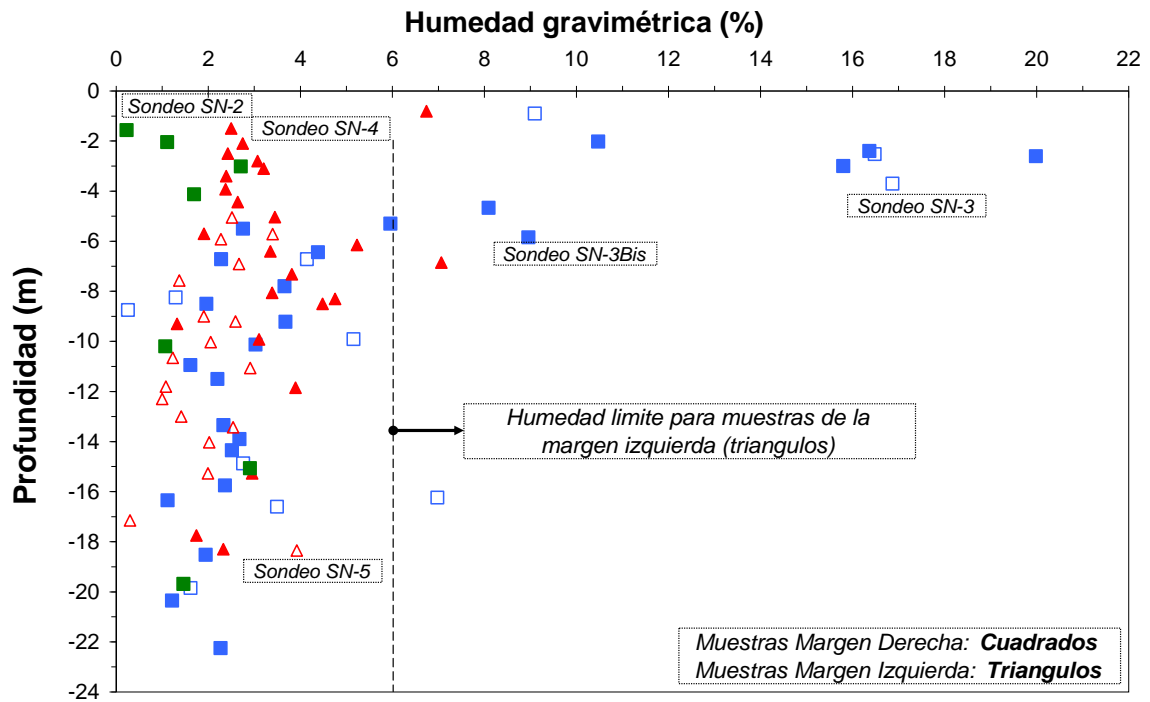


Figura 16: Perfil de humedad gravimétrica de los sondeos SN2, SN3, SN3bis, SN4 y SN5.

La Figura 17 representa el perfil de densidades naturales para los sondeos estudiados. Tal y como se puede observar, a partir de los 5m de profundidad las muestras analizadas toman valores de densidad natural entre los 2.3 y 2.6 g/cm³. Para todas las muestras, la variabilidad de la densidad no es muy significativa, aunque se puede observar un leve aumento de ésta con la profundidad. Por otro lado, para profundidades menores a los 5 metros, se puede observar que los sondeos SN3 y SN3bis (correspondientes a la margen derecha) presentan densidades naturales muy inferiores a los correspondientes al resto de sondeos. Este aspecto está relacionado con la degradación del material de la margen derecha a nivel superficial. Una menor densidad está relacionada con una mayor presencia de fracturas originada por la degradación sufrida como consecuencia de los cambios en la humedad ambiental.

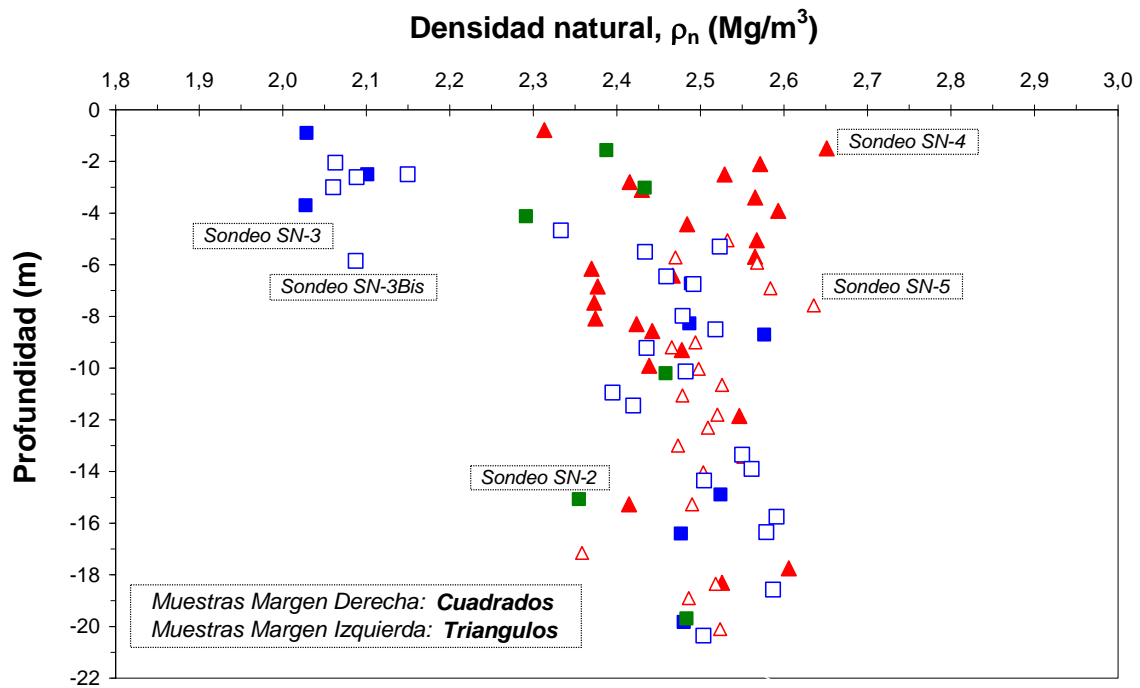


Figura 17: Perfil de densidad natural de los sondos SN2, SN3, SN3bis, SN4 y SN5.

En la Figura 18 se representa la relación entre la densidad seca y la humedad. Tal y como se puede observar, los valores de densidad seca disminuyen con la humedad presente, de modo que los ensayos son consistentes y demuestran la fuerte influencia de la humedad en la estructura del material.

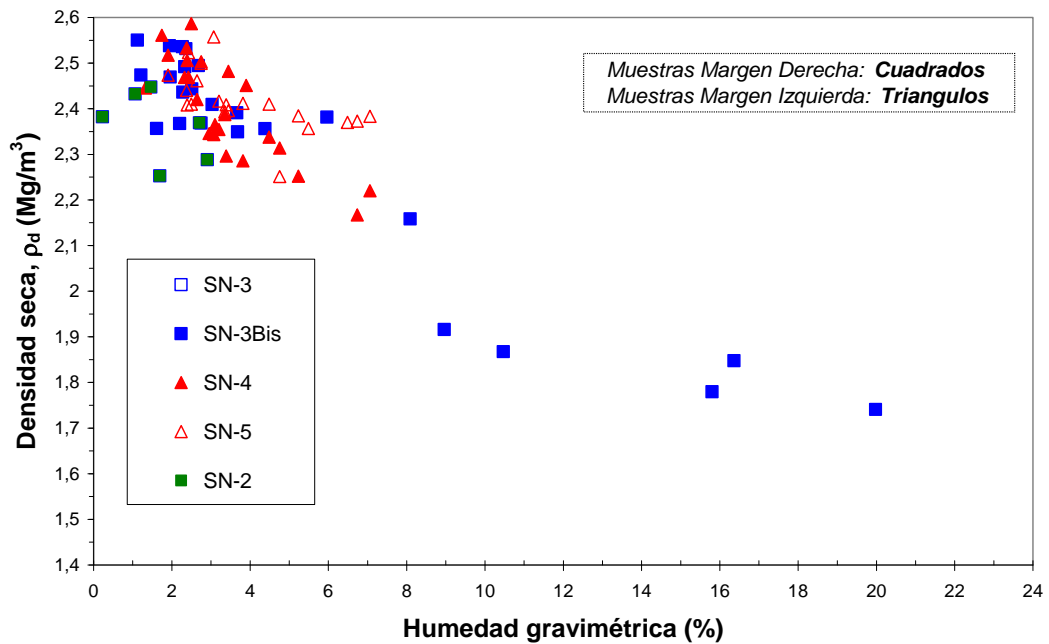


Figura 18: Correlación entre densidad seca y humedad gravimétrica para los sondos SN2, SN3, SN3bis, SN4 y SN5.

En la Figura 19 se muestran los resultados obtenidos por el Laboratorio de Geotécnica de densidad específica de sólidos para los sondeos SN3, SN3bis, SN4 y SN5. Se puede observar que los valores obtenidos se mueven entre los 2.70 y 2.76, a excepción de valores más profundos, en los cuales se obtienen valores menores.

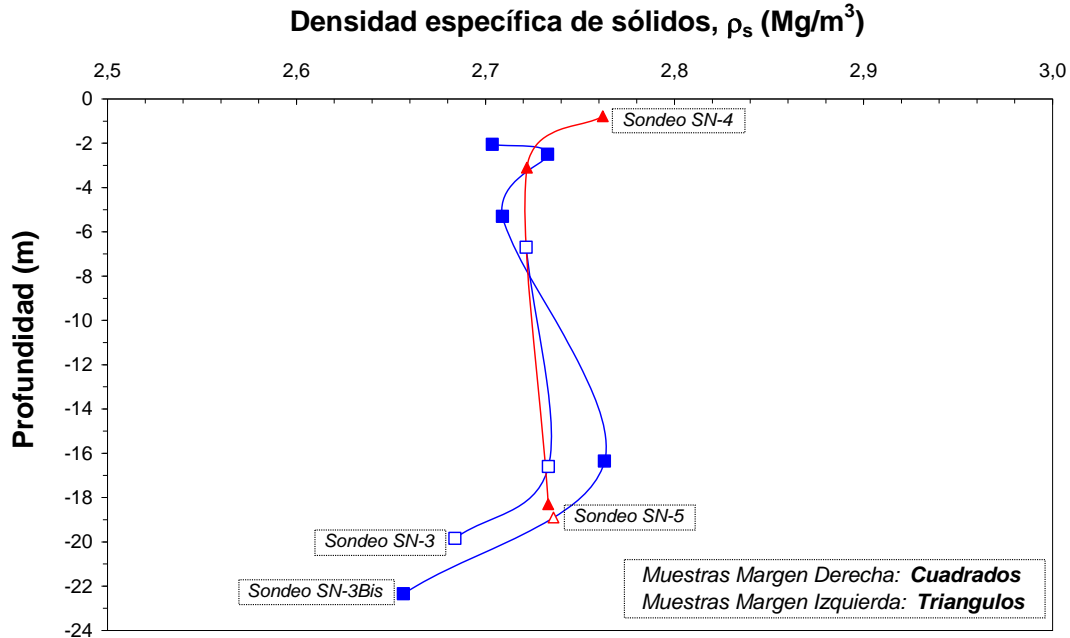


Figura 19: Perfil de densidad específica de sólidos para el sondeo SN4, SN5, SN3 y SN3bis.

Finalmente, se realizó la medida de la velocidad de onda de compresión para diferentes muestras en profundidad. En la Figura 20 se muestran los perfiles de velocidad para los sondeos SN4 y SN5. Ambos sondeos presentan una fuerte variabilidad de los valores de velocidad, que se encuentran entre 1500 y 3075m/s para el sondeo SN4 y entre 1700 y 3900m/s para el sondeo SN5. Estos valores son inferiores a los obtenidos in situ mediante geofísica, debido a la alteración de la muestra al hacer el sondeo. En la Figura 21 se muestra la comparación entre los resultados obtenidos con ambos métodos.

Los dos sondeos pertenecen a la margen izquierda de la cerrada de la presa, por lo que no se observa una reducción de la velocidad de onda para profundidades bajas. Por otro lado, sólo en el caso del sondeo SN4 se ha realizado una medida para profundidades menores a los 5 metros, donde se presentan estos fenómenos de degradación. Sin embargo, los valores de velocidad de onda obtenidos son altos.

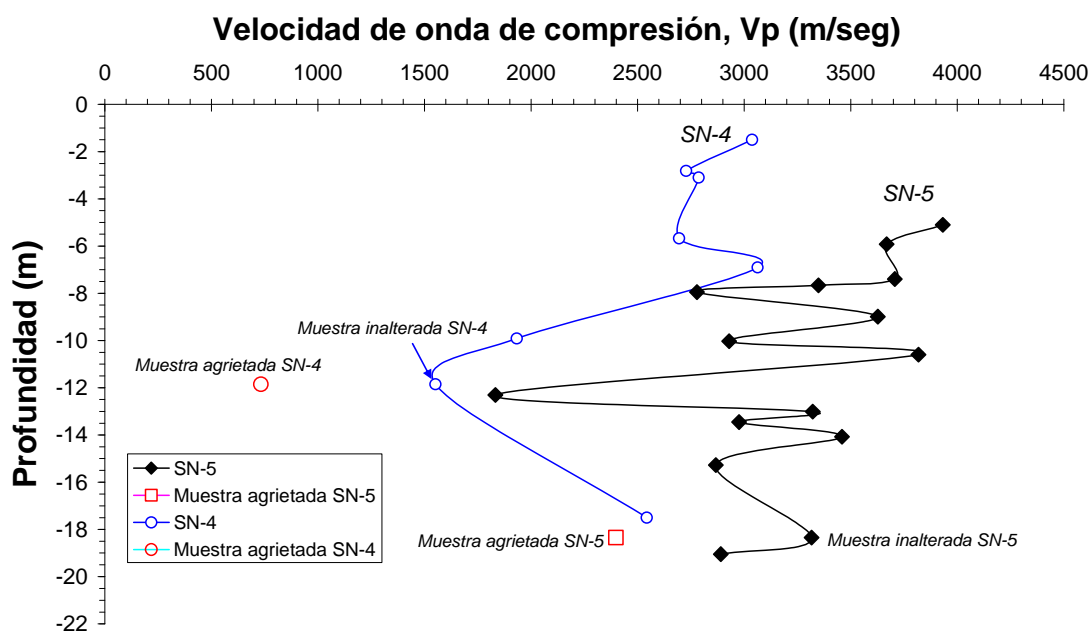


Figura 20: Perfil de velocidades de onda de compresión para los sondeos SN4 y SN5.

Sondeo	Tramo ensayo sónico de onda (m)	V_p sónico de onda continua (In-situ testing) (m/s)	Tramo ensayo Laboratorio UPC (m)	V_p laboratorio (m/s)
SN-4	16-20	2915-4250	1,20-18	1500-3075
SN-5	6-20,5	2725-4325	4,9-20	1700-3900

Figura 21: Velocidad de onda de compresión obtenidas in situ y en laboratorio para los sondeos SN4 y SN5.

3.5. Resumen de este capítulo

El material de estudio es una limolita Wealdense. Este material se encuentra en la zona de cimentación de la futura presa de Castrovido (en Burgos). El sustrato rocoso de la zona de la cerrada está formado por capas alternadas de limolitas y areniscas. Este material ha sufrido una fuerte degradación en los últimos tres años, desde que se paralizaron las obras de excavación hasta que se retomaron en 2007. Esta degradación ha sido detectada a partir de un reconocimiento geofísico-geotécnico realizado in situ y un reconocimiento llevado a cabo en laboratorio a partir de muestras procedentes de sondeos y catas realizados en la zona de la cerrada de la presa. En ambos estudios, se observa una degradación en el material más superficial, alcanzando profundidades de hasta 5 metros. Esta degradación viene caracterizada por una velocidad de propagación de ondas inferior, así como valores de humedad mayores y densidades menores.

3.6. Referencias bibliográficas de este capítulo

In situ testing, S.L. *Reconocimiento geofísico-geotécnico para el análisis de la cimentación de la presa de Castrovido*. 2007

Proyecto Modificado Nº1 del embalse de Catrovido en el río Arlanza (Burgos) (2005). Confederación Hidrográfica del Duero.

E.Alonso. Embalse de Castrovido. *Propuesta de estudio de la cimentación*. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, UPC. Confederación Hidrográfica del Duero.

J.A. Pineda. *Informe de los ensayos de Castrovido*. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, UPC. 2008