

## 4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO DENTRO DEL CONTEXTO DE LA TESINA

Uno de los aspectos fundamentales en esta tesina recae en el conocimiento detallado del material utilizado para estudiar el fenómeno de degradación. Este aspecto determinará la línea de actuación y la metodología a aplicar para realizar los ensayos de inducción de la degradación sobre la muestra. En este apartado se comentan los resultados obtenidos en un conjunto de ensayos de laboratorio realizados con este fin en el marco de la tesina. A partir de ellos se obtienen los parámetros que permitirán conocer y clasificar el tipo de terreno.

### 4.1. Características generales de las muestras

El material empleado en este estudio corresponde a uno de los sondeos obtenidos en las inmediaciones de la base de cimentación de la presa de Castrovido, en Burgos. En concreto, las muestras provienen del sondeo vertical SN1, 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 cimentación de la presa. El sondeo alcanza una profundidad de 20.20m y tiene un diámetro de 101mm.

Con objeto de llevar a cabo los ensayos de laboratorio necesarios para caracterizar el terreno se realizó un muestreo que consistió en la toma de muestras inalteradas. En el sondeo SN1 se disponen de 8 muestras no continuas, 5 de ellas parafinadas y 3 inalteradas. Las muestras inalteradas se obtienen de tal forma que su estructura física y sus propiedades son prácticamente las mismas que las del suelo de donde se han tomado, empleándose para ello un tomamuestras de pared gruesa de 85 mm de diámetro, introducido por golpeo hasta 60 centímetros, si no se produce rechazo. Por otro lado, los testigos parafinados se obtienen de las muestras extraídas del sondeo con las baterías de perforación, una vez seleccionado el tramo por su litología, homogeneidad y buen estado. A continuación se detallan las profundidades de las muestras disponibles del sondeo SN1:

Profundidad (m)	
Muestra 1	0,60-1,20
Muestra 2	1,20-1,80
Muestra 3	1,80-2,40
Muestra 4	5,58-5,80
Muestra 5	6,60-6,87
Muestra 6	9,60-10,05
Muestra 7	15,05-15,35
Muestra 8	18,85-20,20

Figura 22: Tabla de valores de profundidad de los testigos del sondeo SN1

En la Figura 23 se muestra el perfil del sondeo junto con la descripción litológica proporcionada por el estudio geotécnico. En la segunda columna en gris se muestran los fragmentos del sondeo que se disponen, especificados en la tabla anterior:

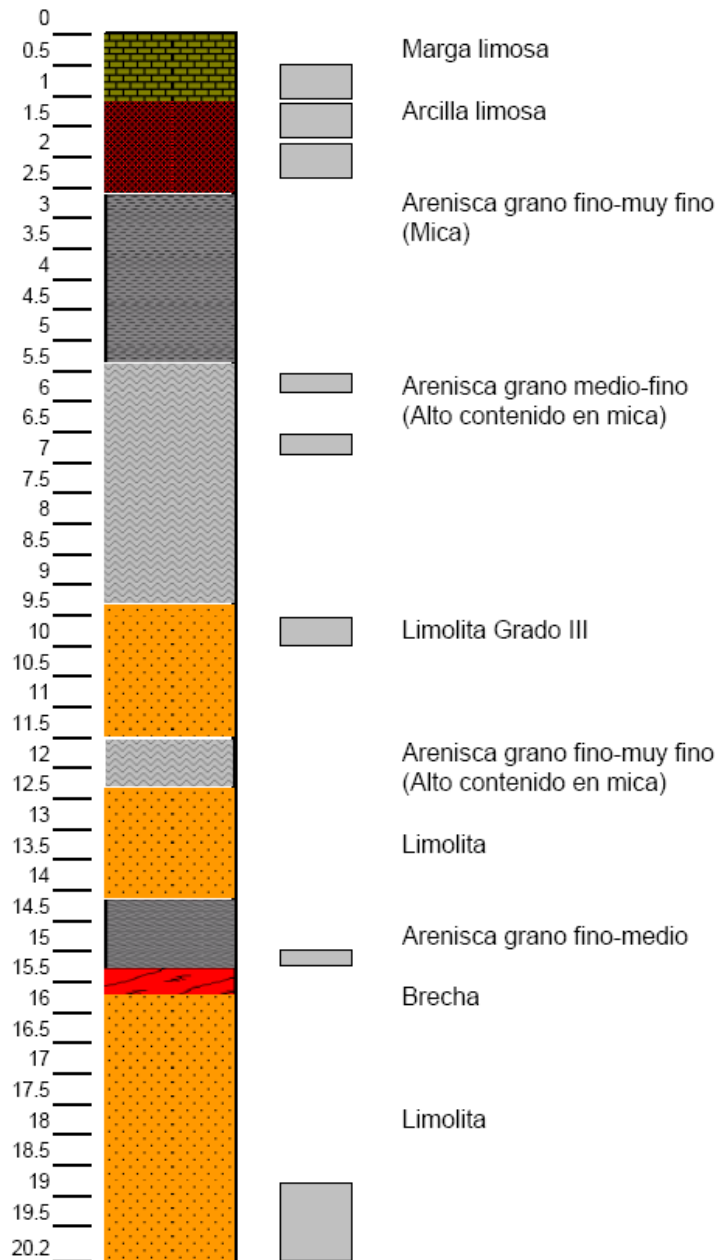


Figura 23: Perfil del sondeo SN1, con información litológica y definición de las muestras disponibles.

Como se puede observar, los fragmentos de sondeo de los cuales se tiene muestra son muy reducidos, por lo que la obtención de los perfiles estuvo muy condicionada por este aspecto.

En la Figura 24 se muestran algunos de los testigos disponibles, tanto de material tipo suelo como de tipo roca. En la imagen de la izquierda se puede remarcar la alta presencia de mica en el material.



Figura 24: Testigos del sondeo SN1

## 4.2. Caracterización del material en laboratorio

Los ensayos realizados en el contexto de la tesina para la caracterización del material procedente del sondeo SN1 tienen como objetivo un conocimiento detallado del material. Los ensayos están enfocados a la determinación de las muestras a utilizar para los ensayos de inducción de la degradación. Por tanto, los parámetros que se obtienen permiten conocer las propiedades básicas del material con el fin de caracterizar su estado de alteración inicial.

Los parámetros que se han obtenido con los ensayos realizados en laboratorio, a partir de las muestras recuperadas del sondeo vertical son:

- Humedad
- Densidad natural y densidad seca de las muestras.
- Densidad de las partículas sólidas.
- Límites de consistencia.

A continuación se describe el procedimiento de ensayo utilizado para hallar los parámetros antes definidos. En cada caso, se presentan y comentan los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

### 4.2.1. Humedad

Una de las características más relevantes a la hora de definir la perfilometría en profundidad del material de estudio es la humedad del terreno. La humedad es una medida sencilla y clara, que permite tener una idea inicial del tipo de terreno y de su

estado. Este valor será de gran utilidad para definir los cambios en las propiedades del material con respecto a la profundidad, aspecto claramente relacionado con la degradación sufrida por el terreno.

La determinación de la humedad se realiza mediante el método del secado en estufa, que se encuentra detallado en la norma UNE 103-300-93. Según especifica esta norma, se puede definir la humedad como el cociente entre el peso de agua que pierde el suelo al secarlo en la estufa y el peso del suelo seco.

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

donde  $W_w$  es el peso del agua y  $W_s$  es el peso del suelo.

#### 4.2.2. Densidad natural y seca

La determinación de la densidad natural se realiza por el método de la balanza hidrostática, o método de la parafina, usado normalmente en la determinación de la densidad de muestras con formas irregulares. Este método se basa en la determinación de la densidad natural del suelo como el cociente entre su peso y su volumen.

El peso de la muestra se obtiene directamente utilizando una balanza. La dificultad de este método recae en la necesidad de conocer el volumen total de la muestra. Para ello se requiere parafinar inicialmente la muestra y pesarla posteriormente en una balanza, tanto al aire como sumergido en agua. De este modo se obtiene el peso sumergido de la muestra con parafina, que se define como el peso al aire de la muestra con parafina menos su volumen por la densidad del agua. A partir de estas medidas se puede obtener el volumen total de las muestras como:

$$V_T = V_{T+P} - V_P = \frac{M_{T+P} - M_{SUM}}{\gamma_w} - \frac{M_{T+P} - M_T}{\gamma_p}$$

donde se ha utilizado la expresión:  $M_{SUM} = M_{T+P} - V_{T+P}\gamma_w$

En la fórmula para obtener el volumen total ( $V_T$ ),  $V_P$  representa el valor del volumen de la parafina,  $M_{SUM}$  es el peso sumergido y  $M_T$  y  $M_{T+P}$  son los pesos al aire de la muestra sin y con parafina, respectivamente. La densidad de la parafina es conocida, y toma un valor de  $0.87\text{g/cm}^3$ .

Con este procedimiento, se obtienen los valores de la densidad natural del suelo ( $\gamma_n$ ) para las diferentes profundidades del sondeo a partir del cociente entre peso y volumen de cada muestra. Se puede, de igual modo, obtener la densidad seca ( $\gamma_d$ ) utilizando el valor conocido de la humedad ( $w$ ) a partir de la expresión siguiente:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{(1 + w)}$$

#### 4.2.3. Densidad de las partículas sólidas

El ensayo para la determinación de la densidad de las partículas sólidas se basa en el cálculo de la densidad como el cociente entre peso del suelo y su volumen. Para realizar dicho experimento, se necesita tener el material seco y tamizado (tamiz nº40). El peso de las partículas sólidas se obtiene directamente como el peso de la muestra en una balanza. Por otro lado, el volumen de las partículas sólidas se obtiene utilizando un picnómetro. El procedimiento consiste en introducir el material dentro del picnómetro, que se ha rellenado de alcohol previamente, y medir la variación del nivel del alcohol antes y después de introducir la muestra. Esta variación se debe medir en idénticas condiciones de temperatura, ya que el volumen del alcohol dentro del picnómetro varía con la temperatura. Para conseguir estas condiciones constantes, se introduce el picnómetro dentro de un baño de agua que mantiene el picnómetro a una temperatura constante de 25°C.

La formula utilizada en la determinación de la densidad de las partículas sólidas a partir de los valores obtenidos en laboratorio es la siguiente:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{P_2 - P_1}{H_3 - H_1}$$

donde  $P_2$  es el peso del picnómetro con el suelo,  $P_1$  es el peso del picnómetro sin el suelo,  $H_3$  el nivel del alcohol después de 24h y  $H_1$  el nivel del alcohol inicial.

En las Figuras 25 y 26 se muestra el equipo utilizado para la obtención de la densidad de las partículas sólidas: el recipiente para el baño de agua a temperatura constante y uno de los picnómetros utilizados.



Figura 25: Recipiente para el baño de agua a temperatura constante de 25°C

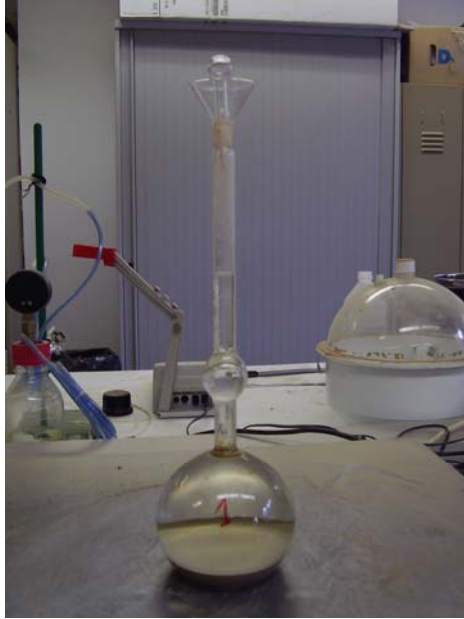


Figura 26: Pícnómetro

#### 4.2.4 Límites de consistencia

El límite líquido y plástico de un material son parámetros que permiten caracterizar a los suelos. A partir de la obtención de estos límites, que corresponden a dos valores de la humedad en el suelo, se obtiene el índice de plasticidad como la diferencia entre ambos. Con estos valores, se caracteriza el tipo de suelo mediante el ábaco de Casagrande.

En nuestro caso, el material que se dispone es una limolita, que puede definirse como una roca blanda. Sin embargo, las muestras más cercanas a la superficie están tan degradadas que presentan un aspecto de tipo suelo, pudiéndose realizar por tanto la determinación de los límites. Así pues, se realiza la determinación del límite plástico y líquido para cuatro profundidades del sondeo, siendo la más profunda la de 2.40m. De este modo, se puede conocer el tipo de suelo presente hasta dicha profundidad.

La determinación del límite líquido se realiza a partir del método de la cuchara de Casagrande, detallada en la norma UNE 103-103-94. El procedimiento consiste en colocar el suelo, amasado con agua, sobre una cuchara normalizada, denominada cuchara de Casagrande. Una vez colocado el suelo correctamente se realiza un surco mediante un acanalador también normalizado, que divide el suelo en dos mitades. A continuación se procede a dejar caer la cuchara desde una altura de 10mm sobre una base, transmitiendo así una serie de golpes al suelo. El límite líquido se define según este método como la humedad que presenta el suelo que, tras dejar caer 25 veces la cuchara, a 2 golpes por segundo, se cierra a lo largo de su fondo una distancia de 13mm. Para realizar este resultado se realiza el ensayo como mínimo para dos muestras del mismo suelo con distinto contenido de agua, de manera que una necesite más de 25 golpes para alcanzar los 13mm de contacto, y la otra necesite menos. De estas dos muestras se obtienen las dos humedades mediante el secado en estufa, procedimiento antes descrito. Con estos resultados se puede obtener el valor de la

humedad para los 25 golpes al ajustar la recta en el gráfico nº de golpes/humedad, con pendiente ya conocida, a los dos puntos obtenidos. Una muestra del equipo utilizado se puede observar en la Figura 27, donde se observa la muestra de suelo en la cuchara una vez realizado el surco con el acanalador:



Figura 27: Cuchara de Casagrande para la determinación del límite líquido.

El límite plástico se define como la humedad correspondiente al momento cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe. Por tanto, se puede obtener el límite plástico de un suelo como la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de 3mm de diámetro, rodando el suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros empiecen a resquebrajarse. Al rodar los cilindros, el suelo va perdiendo agua, llegando a la humedad en la que se empiezan a formar fisuras en el sentido longitudinal de los cilindros. Una vez llegado a este momento, se mide la humedad tal y como se definió anteriormente y se obtiene el valor del límite plástico. Esta metodología se encuentra detallada en la norma UNE 103-104-93. En la Figura 28 se puede observar la formación de una fisura longitudinal en uno de los cilindros de suelo que se realizaron:



Figura 28: Fisura longitudinal en uno de los cilindros de suelo realizados en la determinación del límite plástico.

### 4.3. Resultados experimentales

Se realiza el procedimiento descrito para diversas muestras a diferentes profundidades, obteniendo el perfil de humedades mostrado en la Figura 29. Como se puede observar, la humedad en superficie tiene un valor elevado, que va disminuyendo con la profundidad. A cotas cercanas a la superficie se presentan humedades en torno al 12-13%, llegando a alcanzar valores del 21% a 60cm de profundidad. Sin embargo, a mayor profundidad, las humedades toman valores alrededor del 4-5%. Este aspecto marca claramente la degradación más fuerte del material situado en los primeros metros, en comparación con el de mayor profundidad. El material situado a menor profundidad estará más afectado por los procesos de cambios en la succión, y sus propiedades resistentes se verán muy afectadas por una mayor presencia de agua. Cabe destacar que la muestra a profundidad de 20m muestra una humedad mayor, ya que en este caso la muestra es de limolita, en vez de arenisca como en la mayor parte de los casos intermedios.

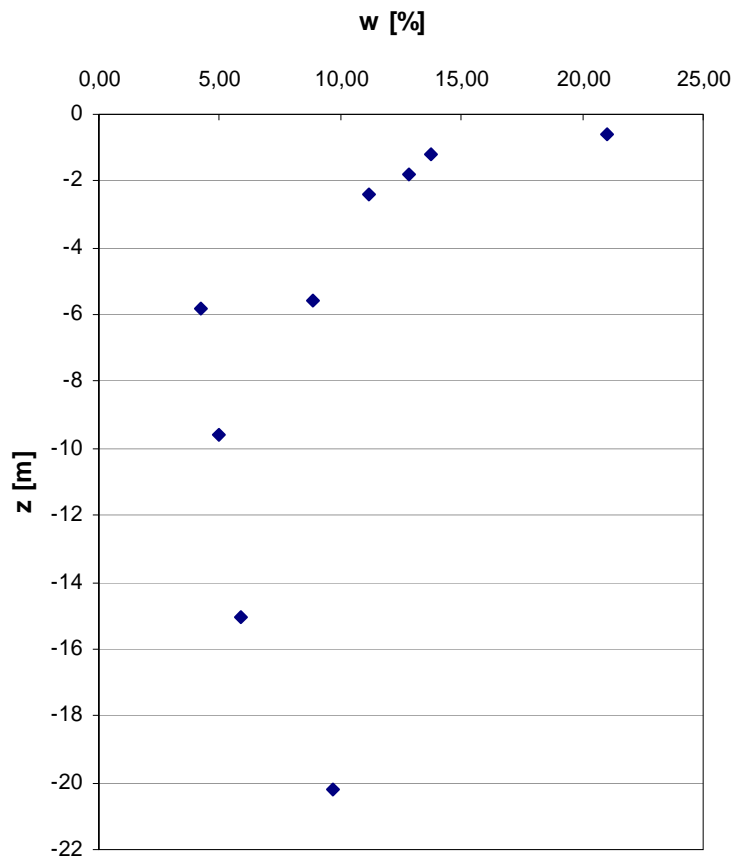


Figura 29: Perfil de humedades en función de la profundidad

Los resultados obtenidos para el sondeo SN1 se pueden comparar con los obtenidos por el Laboratorio de Geotécnia en la Figura 30. Los valores de densidad obtenidos son muy similares a los correspondientes al resto de los sondeos situados en la margen derecha (SN3 y SN3bis). Por tanto, presenta valores de humedad elevados para profundidades bajas, mientras que estos valores se reducen a cotas inferiores alcanzando valores similares al del conjunto de todos los sondeos realizados en la cerrada de la presa.



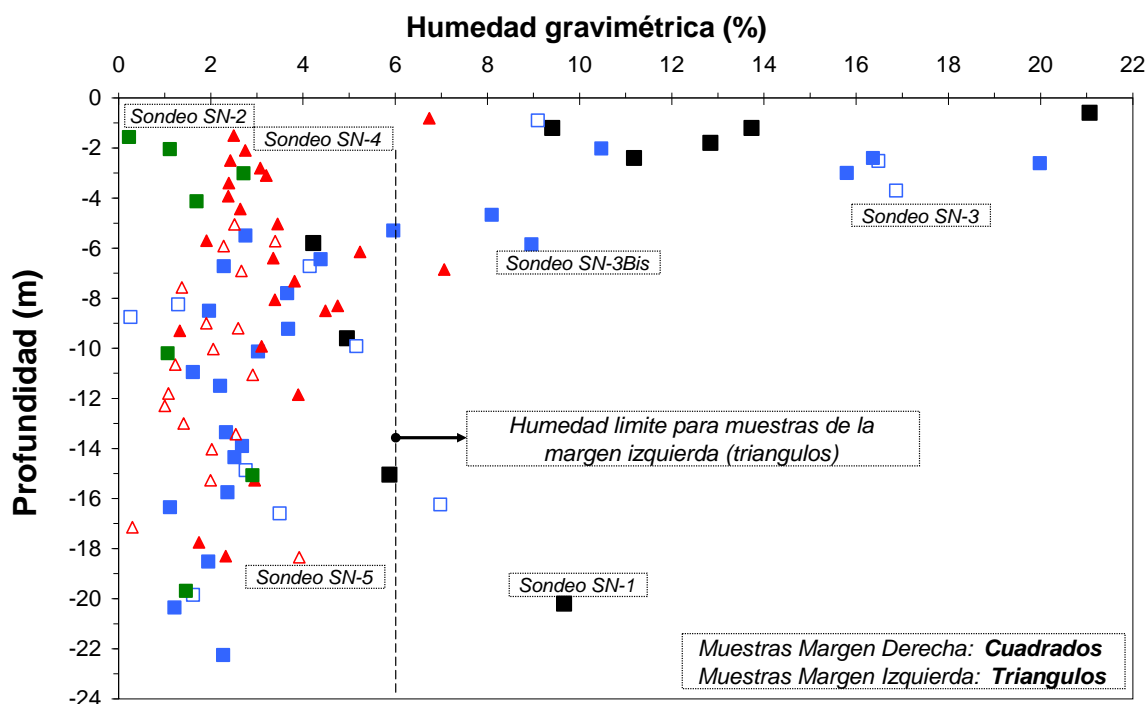


Figura 30: Perfil de humedades para el conjunto de sondeos analizados, incluyendo el sondeo SN1.

Los resultados de densidades naturales y secas en función de la profundidad obtenidos en los ensayos se representan en la Figura 31. A rasgos generales, puede observarse como la densidad, tanto la natural como la seca, aumenta con la profundidad. Este aspecto responde de manera lógica al comportamiento habitual: la zona de mayor profundidad, al estar sometida a mayor confinamiento debido al peso del material que tiene por encima, tiende a presentar una densidad mayor. Sin embargo, la variación tan marcada que se presenta en cotas cercanas a superficie puede venir también condicionada por el proceso de degradación, que es mucho más importante cerca de superficie, al estar esa zona directamente expuesta a los fenómenos ambientales. Así pues, a profundidades cercanas a la superficie, se obtienen densidades naturales que se mueven entre  $2,15\text{-}2,20\text{ g/cm}^3$ , mientras que a mayores profundidades las densidades llegan a valores de  $2,50\text{ g/cm}^3$ .

De igual modo que en el caso de las humedades, los resultados de densidad natural obtenidos en el sondeo SN1 se comparan con los resultados obtenidos con el resto de sondeos realizado desde el Laboratorio de Geotecnia de la UPC. En la Figura 32 se puede observar que los valores obtenidos quedan dentro del rango esperable, alcanzando valores muy similares a los sondeos SN3 y SN3bis, que corresponden a la misma margen de la cerrada de la presa.

En la Figura 33 se muestra la relación entre la densidad seca y la humedad de las diferentes muestras ensayadas. Se puede observar una disminución de la densidad seca con el aumento de la humedad del material. La comparación con los resultados del resto de sondeos se realiza en la Figura 34, observando igualmente una correlación adecuada.

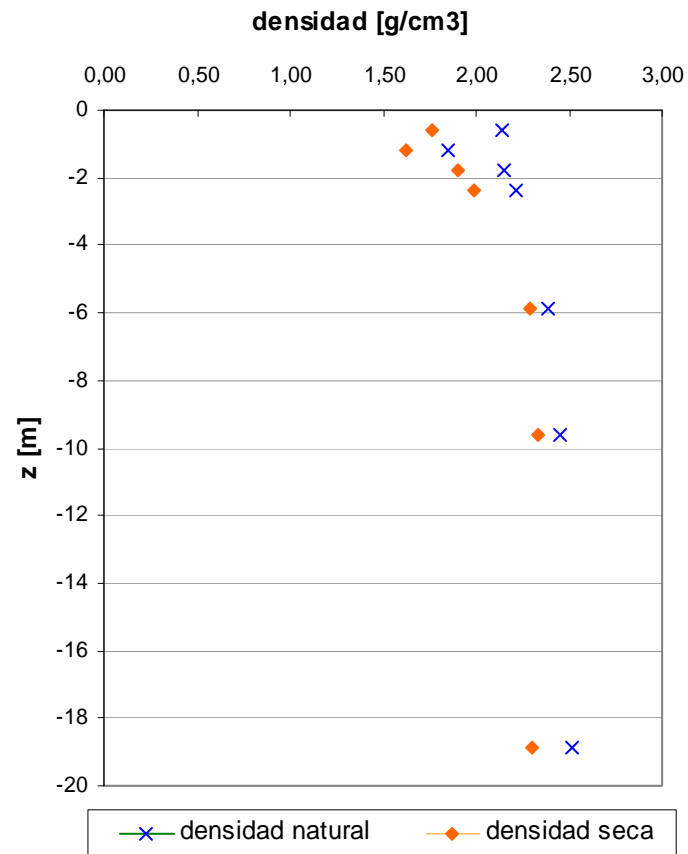


Figura 31: Perfil de densidad natural y seca en función de profundidad.

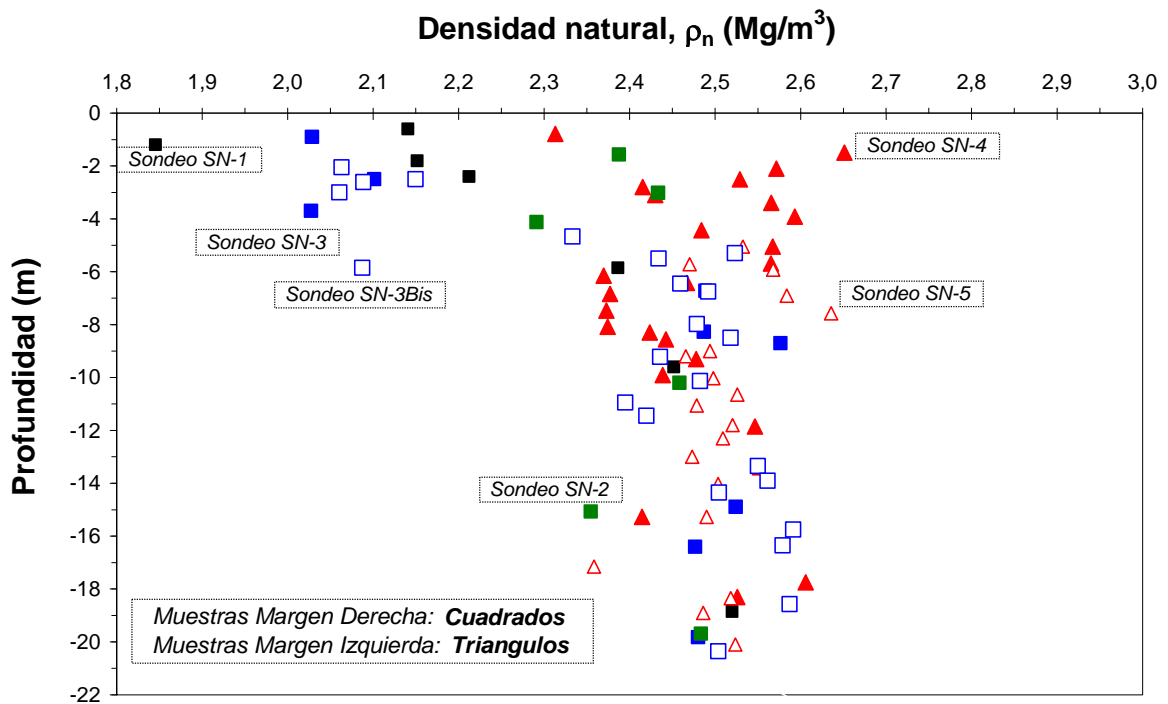


Figura 32: Perfil de densidades naturales para el conjunto de sondeos analizados, incluyendo el sondeo SN1.

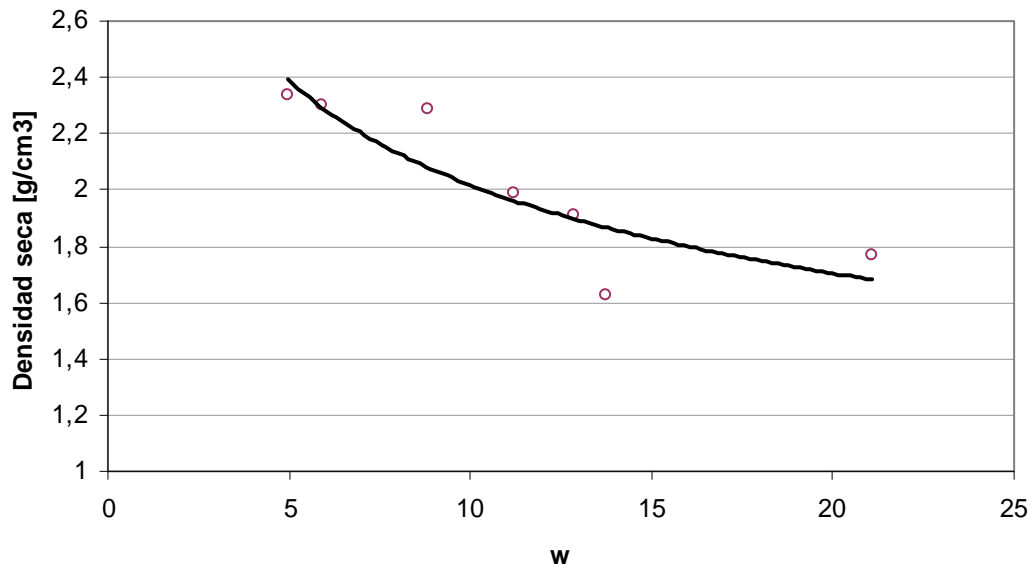


Figura 33: Densidad seca en función de la humedad.

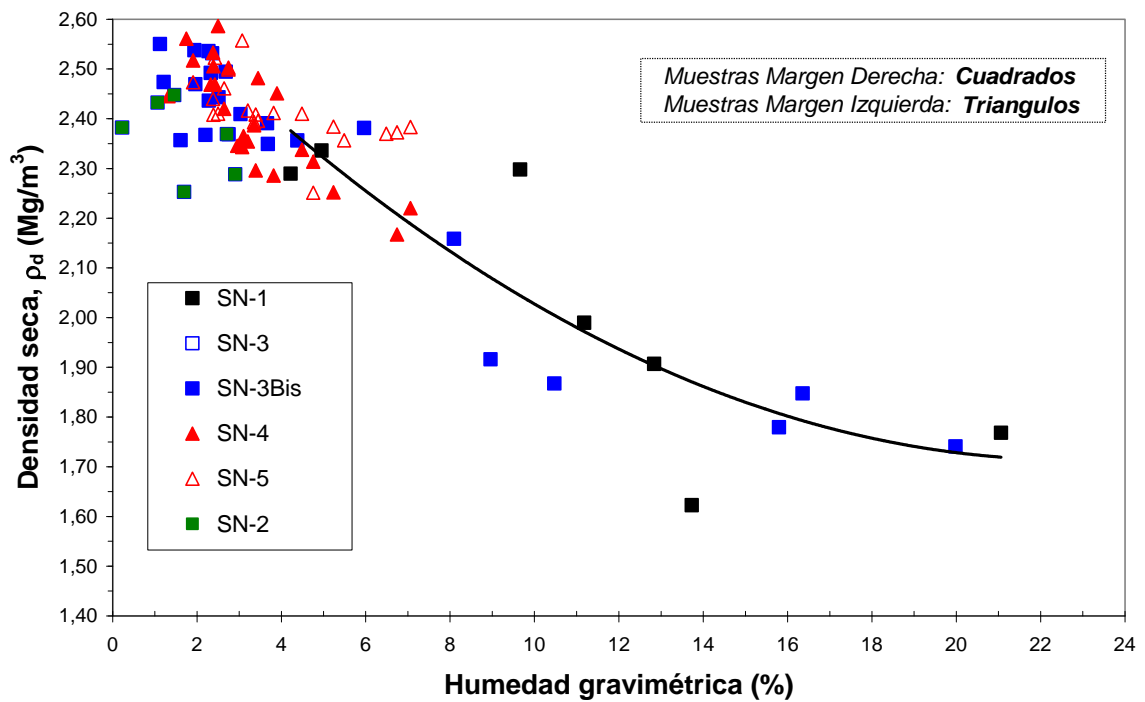


Figura 34: Densidad seca en función de la humedad para el conjunto de sondes analizados, incluyendo el sondeo SN1.

Los resultados de densidad de las partículas sólidas obtenidos para bajas profundidades se resumen en la Figura 35. A partir de los resultados mostrados en la Figura 35 se observa que la densidad de las partículas sólidas aumenta en profundidad.

Este incremento viene marcado por la mayor confinación de los materiales situados a mayor profundidad como consecuencia de un estado de tensiones mayor debido al peso de terreno por encima. Sin embargo, se puede observar como, hasta profundidades de más de 1.5 m, el nivel de densidad es muy similar, presentando un valor promedio de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , que aumenta hasta valores de 2.78 para la profundidad de 2.40m. Este hecho puede estar provocado por la fuerte degradación del material a bajas profundidades, dando lugar a una diferenciación de dos comportamientos, marcados con las líneas rojas.

Los resultados obtenidos en el Laboratorio de Geotecnia permiten conocer valores a mayores profundidades, tal y como se muestra en la Figura 36. Se disponen de pocos valores a bajas profundidades, lo que lleva a no poder realizar una comparación adecuada.

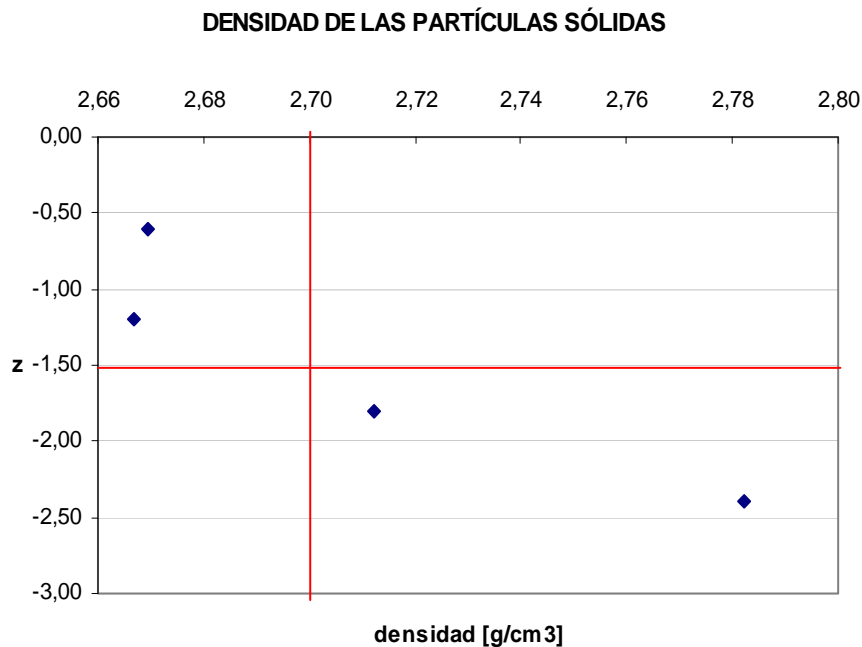


Figura 35: Perfil de densidades de las partículas sólidas en función de la profundidad.

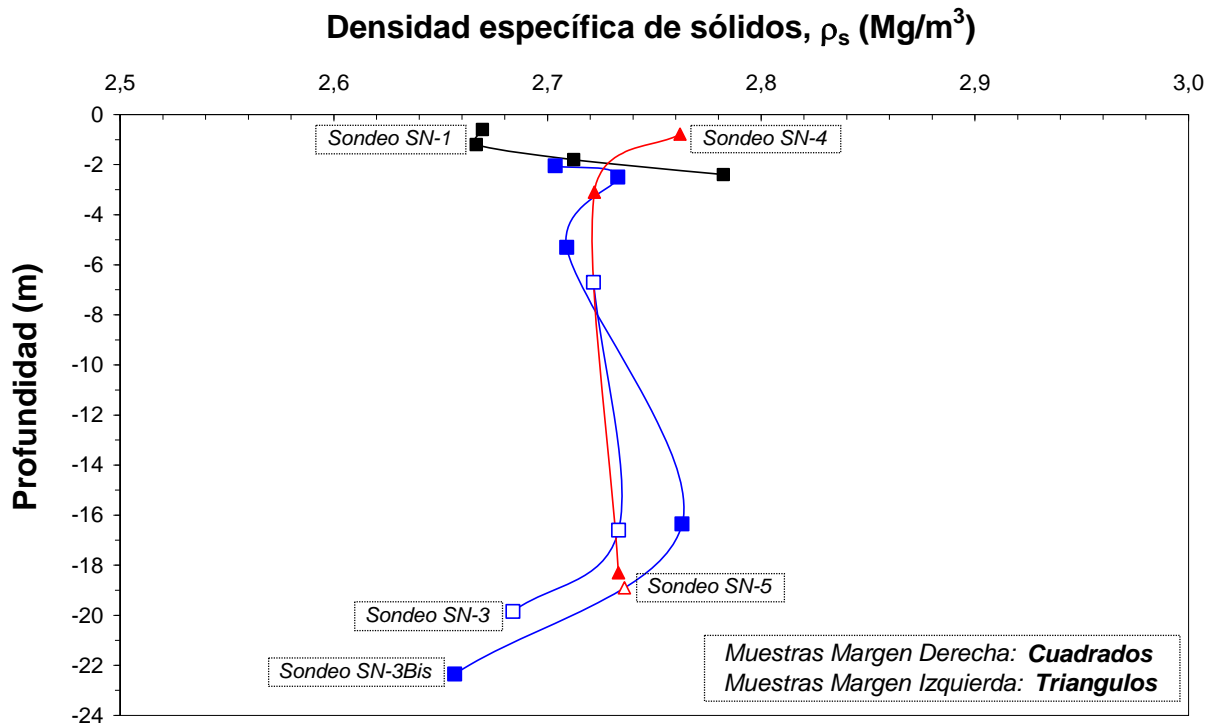


Figura 36: Perfil de densidades de partículas sólidas para el conjunto de sondeos analizados, incluyendo el sondeo SN1.

Los resultados obtenidos para los límites y los respectivos índices de plasticidad son los siguientes:

z (m)	LL	LP	IP
0.60	34,70	16,66	18,04
1.20	31,80	14,61	17,19
1.80	25,80	15,90	9,90
2.40	24,70	15,12	9,58

Figura 37: Valores del límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) para las diferentes profundidades estudiadas.

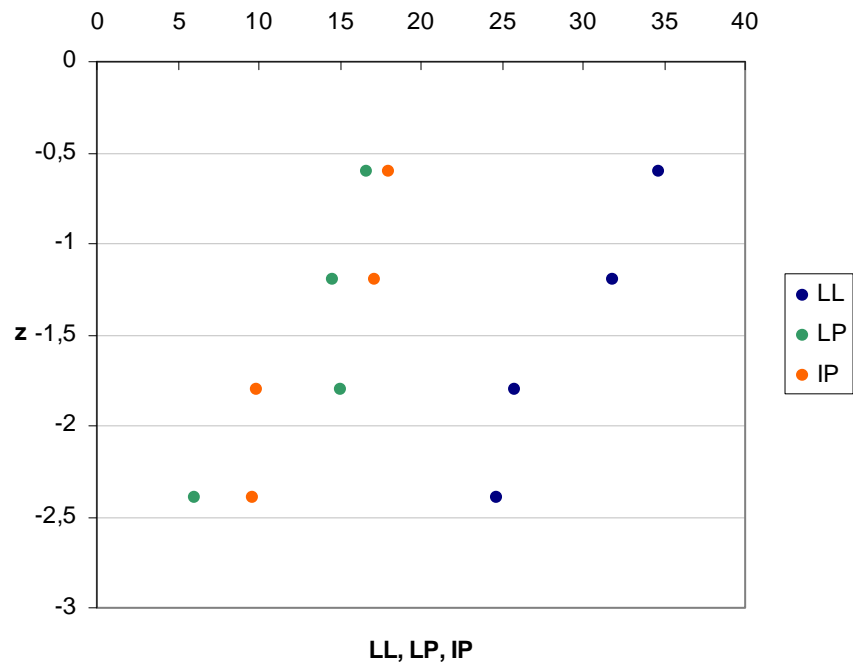


Figura 38: Perfiles del límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) en función de la profundidad.

Tal y como se observa en la tabla anterior, se pueden diferenciar dos resultados diferentes, que pueden asignarse a dos tipos de suelo diferentes. Por un lado, las muestras de los suelos situados a profundidad menor (0.60-1.20m) presentan un límite líquido (LL) mayor, dando lugar a un índice de plasticidad también mayor con respecto a los obtenidos para profundidades mayores (1.80-2.40m). Esta división entre dos suelos diferentes es también apreciable a nivel visual, siendo el material superficial más arcilloso que el situado unos cuantos metros más abajo.

Para la clasificación de los suelos arcillosos y limosos, se puede utilizar el ábaco de Casagrande que se muestra en la Figura 39.

**Gráfico de plasticidad de Casagrande**

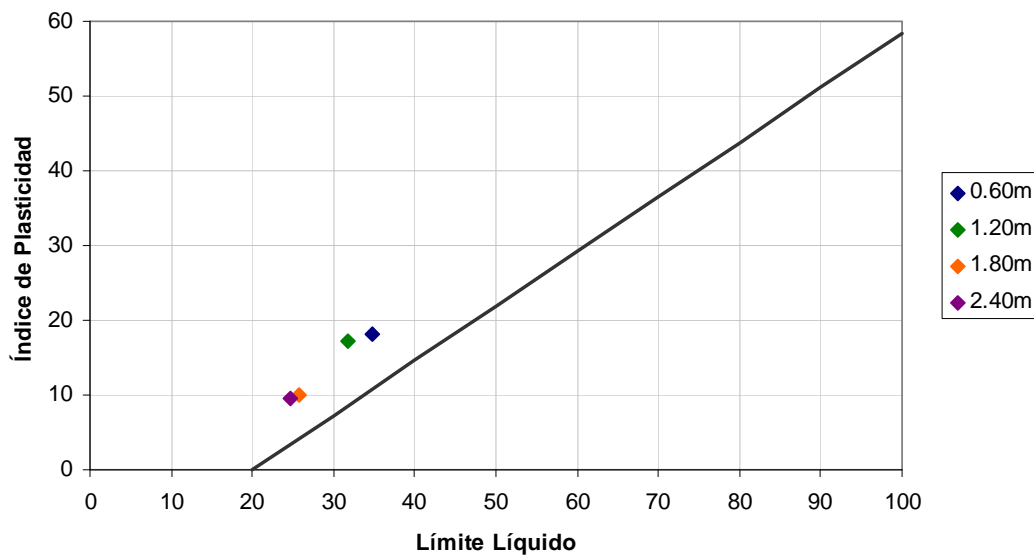


Figura 39: Ábaco de Casagrande

A partir de los valores de los límites y el índice de plasticidad, se puede clasificar un suelo. En nuestro caso, si se comprueban estos resultados dentro del ábaco de Casagrande, se observa que el material ensayado para profundidades de entre 0.60 y 2.40 metros corresponde a una arcilla de baja plasticidad. Se puede observar que, para profundidades entre 0.60 y 1.20m el material presenta un índice de plasticidad y un límite líquido mayor que en el caso de las muestras correspondientes a profundidades de 1.80-2.40m.

#### 4.4. Interpretación de resultados y elección de la muestra

La elección de la muestra empleada en los ensayos que se describirán en la sección 5 recae en la determinación de la profundidad a la cual la muestra se haya en las condiciones más idóneas para el tipo de estudio que se va a realizar. Se pretende inducir una degradación sobre la muestra que lleve a un estado final semejante al estado del material situado cerca de la superficie. Por tanto, se requiere partir de un material suficientemente profundo pero que a la vez presente inicialmente una moderada degradación que facilite la ejecución de los ensayos.

Un estado intermedio del material a nivel de humedades y densidades corresponde a una profundidad entre 1.8 y 2.4m, de acuerdo con los perfiles obtenidos.

El material empleado, según los ensayos de caracterización realizados, corresponde a una arcilla de baja plasticidad. Según la descripción litológica de los sondeos el material se define como una arcilla limosa con fragmentos de roca limolítica. Según los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio, las humedades

relativas presentes en el terreno corresponden a valores de entre el 11 y el 13%. La densidad natural toma valores entre 2.1 y 2.2 g/cm<sup>3</sup> y la densidad seca alrededor de 1.9 g/cm<sup>3</sup>. La densidad de las partículas sólidas es de 2.78 g/cm<sup>3</sup>. Los parámetros más característicos del material se definen en la tabla:

Parámetro	Valor
Humedad	12 ± 1%
Densidad natural	2.15 ± 0.05 g/cm <sup>3</sup>
Densidad seca	1.9 ± 0.1 g/cm <sup>3</sup>
Densidad partículas sólidas	2.78 ± 0.01 g/cm <sup>3</sup>
Índice de poros	0.45 ± 0.05
Grado de saturación	0.78

Figura 40: Tabla de valores medios de los parámetros para la muestra de z= 1.80-2.40m

Los valores representados en esta tabla son valores medios. Para cada una de las muestras que se utilicen en los ensayos, se recalcaron los valores de humedad, a fin de caracterizar de forma más ajustada el valor de las densidades natural y seca, así como el índice de poros y el grado de saturación.

#### 4.5. Resumen de este capítulo

El estudio planteado en esta tesina requiere un conocimiento previo del material de estudio. Con este fin, se han realizado un conjunto de experimentos en laboratorio que permiten obtener la perfilometría del material en profundidad. Los parámetros obtenidos en este reconocimiento son: la humedad, la densidad natural, seca y de las partículas sólidas, y los límites de Atterberg.

Los resultados obtenidos permiten observar una variación de los parámetros antes mencionados con la profundidad, de forma que en las cotas superiores el material presenta un frente alterado. Este frente se caracteriza por una mayor humedad y menor densidad, fruto de una fuerte figuración y degradación del material. El frente de material alterado se extiende hasta una profundidad de alrededor de los 5m. Por debajo de esta profundidad, el material presenta unas propiedades más constantes y con valores más próximos a los característicos de las rocas arcillosas.

Para el desarrollo de los ensayos de inducción y seguimiento de la degradación, la muestra seleccionada es la correspondiente a una profundidad de 2,4 metros. El material presente a dicha profundidad se caracteriza por ser una argilita sensiblemente degradada, presentado propiedades características de los suelos.



#### **4.6. 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

UNE 103-100. Preparación de muestras para ensayos de suelos.

UNE 103-103-94. Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.

UNE 103-104-93. Determinación del límite plástico de un suelo.

UNE 103-300-93. Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

UNE 103-301-94. Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática.

UNE 103-302-94. Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.