

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code: 703316	Pag/pages: 30 Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE MUESTRAS DE LOS SONDEOS DE LA CUENCA DEL EBRO

M.V. Villar & M.J. Turrero

Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos

Departamento de Impacto Ambiental de la Energía

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa´s code:	Pag/page:2/30
		Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. MUESTRAS ANALIZADAS	5
3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS Y ANÁLISIS REALIZADOS	6
3.1. PROPIEDADES DE ESTADO	6
3.2. POROSIMETRÍA	6
3.3. SUPERFICIE ESPECÍFICA	7
3.4. GRANULOMETRÍA	7
3.5. PRESIÓN DE HINCHAMIENTO	8
3.6. PERMEABILIDAD	9
3.7. LÍMITE LÍQUIDO	10
4. RESULTADOS	11
4.1. PROPIEDADES DE ESTADO	11
4.2. PERMEABILIDAD	22
4.3. PRESIÓN DE HINCHAMIENTO	23
5. CORRELACIÓN ENTRE LAS DISTINTAS VARIABLES	27
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES	28
7. AGRADECIMIENTOS	29
8. BIBLIOGRAFÍA	29

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 3/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

1. INTRODUCCIÓN

Este informe tiene por objeto presentar las características físicas, hidráulicas y mecánicas que se han determinado en las muestras arcillosas de los sondeos VE-1A y PE-1 de la Cuenca del Ebro para el Proyecto MAR. Éstas se utilizarán para evaluar su comportamiento en función de la profundidad, como indicadores de la movilidad de fluidos en la roca y como soporte para interpretar los mecanismos de transporte.

Se ha realizado el levantamiento litológico de las 17 muestras del testigo del sondeo VE-1A y de 9 muestras del testigo de sondeo PE-1, de acuerdo con el Procedimiento remitido por ENRESA "Toma y manipulación de muestras de testigos destinadas a ensayos destructivos y descripción geológica de los mismos en el laboratorio".

Se cuenta con 2 Formaciones Objeto de Estudio (FOEs). La más alta estratigráficamente es la FOE arcillosa miocena EAO-A2 (representada en ambos sondeos). La más baja estratigráficamente es la FOE arcillosa oligocena EAO-A1 (representada tan solo en el sondeo PE-1). Las cotas de techo y muro que se han considerado en este trabajo (Fm EAO-A1: 469-590 m, Fm EAO-A2: 42-392m), están basadas en el estudio detallado del testigo del sondeo PE-1 (Fuente: Documentación del Proyecto AFA), ya que no se dispone de datos precisos de dichas cotas para el sondeo VE-1A.

Las FOEs corresponden a sedimentos depositados en un sistema lacustre instalado en el centro de la Cuenca del Ebro durante el Oligoceno y Mioceno. La sedimentación se produjo bajo condiciones cambiantes que modificaron el sistema deposicional, pudiendo modelizarse tres situaciones teóricas:

- Nivel de lago alto (fase carbonatada): predominio de la sedimentación detrítica fina (arcilla) y carbonatada; escasa sedimentación de evaporitas.
- Nivel de lago bajo (fase sulfato-carbonatada): menos sedimentación detrítica fina (arcilla) y carbonatada, aumento de la deposición evaporítica (sulfatos) en las zonas de borde de lago (por bombeo) y en el centro por precipitación. Aumento de los detríticos gruesos (arenas) en el abanico aluvial.

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 4/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

- Desecación muy intensa (fase halítica): sedimentación detrítica gruesa en los abanicos aluviales que penetra poco en la cuenca, poca sedimentación carbonatada y arcillosa, deposición de sulfatos en el mud-flat y halita en el centro del lago.

El análisis de las muestras de la FOE EAO-A2 del sondeo VE-1A permite diferenciar tres tramos, en función de las características mineralógicas y texturales (Turrero & Peña 1998):

- Un tramo superior que correspondería a las muestras 5 a 11. Estaría incluido dentro de lo que se ha llamado el Miembro Superior de la FOE arcillosa EAO-A2 (Documentación del proyecto AFA), que va de los metros 42 a 197. Incluye fangolitas margoso calcáreas, de tonos grises, con abundantes nódulos de anhidrita de tamaño variable, de milimétrico a centimétrico, dispuestos paralelamente a la laminación, y en algunas ocasiones con laminación interna que parece indicar una generación en diagénesis temprana. En algunas ocasiones presentan laminación fina y abundante bioturbación.
- Un tramo intermedio que correspondería a las muestras 27 a 35. Estaría incluido dentro de lo que se ha llamado el Miembro Intermedio de la FOE arcillosa EAO-A2 (Documentación del proyecto AFA), que va de los metros 197 a 305. Consiste en alternancia de fangolitas y arcillitas ligeramente calcáreas-dolomíticas, de tonos marrones-rojizos a grises, bioturbadas y con esporádicos nódulos de anhidrita. Presentan laminación paralela fina.
- Un tramo inferior que correspondería a las muestras 42 a 44. Estaría incluido dentro de lo que se ha llamado el Miembro Inferior de la FOE arcillosa EAO-A2 (Documentación del proyecto AFA), que va de los metros 305 a 392. Consiste en mudstone margoso alternando con algún nivel de limos, de tonos grises, con niveles frecuentes de anhidrita nodular, a veces de tamaño centimétrico, dispuestos paralelos a la laminación o dispersos en la muestra, que a veces está ondulada por deformación. Presentan laminación paralela fina y en algunos niveles se observa una bioturbación muy intensa.

La FOE EAO-A1 también es de origen lacustre y naturaleza margosa, aunque con contenidos de carbonatos y nódulos de anhidrita más abundantes que en la formación EAO-A2. Presenta un elevado grado de compactación por enterramiento.

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page:5/30
		Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

2. MUESTRAS ANALIZADAS

Se han realizado ensayos en muestras del sondeo VE-1A comprendidas entre los metros 57 y 337, es decir, pertenecientes a la Formación EAO-A2, y de muestras del sondeo PE-1 comprendidas entre los metros 154 y 565, por lo que comprenden parte de las Formaciones EAO-A2 y EAO-A1. En concreto, la formación EAO-A1 se corta entre los metros 469 y 590. Las muestras del sondeo VE-1A se conservaron parafinadas desde su extracción. Sin embargo las muestras del sondeo PE-1 no tenían ningún tipo de protección, por lo que la humedad inicial determinada no se corresponde con la de salida del sondeo, excepto en aquéllas marcadas con asterisco en la Tabla, que se conservaron parafinadas y se recibieron en el laboratorio con posterioridad. La relación de muestras analizadas se sintetiza en la Tabla I:

Tabla I: Relación de muestras de los sondeos VE-1 y PE-1 estudiadas en CIEMAT

METRO	Ref. muestra	METRO	Ref. muestra
57,9	VE1-3	154,8	PE1-166
58,3	VE1-4	301,3	PE1-323
58,6	VE1-5	307,9	PE1-331*
131,3	VE1-9	330,4	PE1-355
131,7	VE1-10	345,9	PE1-372
132,1	VE1-11	364,5	PE1-376
265,4	VE1-27	385,1	PE1-416*
265,8	VE1-28	475,0	PE1-474
266,1	VE1-29	481,1	PE1-521
303,1	VE1-33	485,2	PE1-525
303,4	VE1-34	511,3	PE1-555*
303,8	VE1-35	517,5	PE1-562
336,0	VE1-42	525,1	PE1-570
336,5	VE1-43	530,3	PE1-576*
336,8	VE1-44	551,4	PE1-600
		564,6	PE1-614

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 6/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS Y ANÁLISIS REALIZADOS

Después de realizar el levantamiento de los testigos de sondeo de los que se disponía (Peña & Turrero 1998), una parte de cada testigo se destinó para el estudio de sus características físicas. En primer lugar se determinó la densidad y humedad de la muestra inalterada y se realizó su estudio porosimétrico. Después, aproximadamente 100 g de cada muestra se disgregaron suavemente hasta pasar por el tamiz de 2 mm para determinación de la superficie específica, granulometría y presión de hinchamiento de la muestra remodelada. En probetas torneadas o talladas a partir de la muestra inalterada se han determinado la permeabilidad y el hinchamiento bajo carga, respectivamente. Finalmente, con el polvo obtenido al torrear algunas de las muestras, se ha determinado el límite líquido.

3.1. Propiedades de estado

En un fragmento de testigo inalterado de unos 10 g de peso se ha determinado la densidad seca mediante el método del desplazamiento con mercurio (Norma UNE 7045), con el que se evalúa el volumen de la muestra mediante el peso del volumen de mercurio desalojado por ésta (Norma UNE 7045).

En este mismo fragmento se determina el contenido de humedad inicial de las muestras mediante secado en estufa, definiéndose la humedad (w) como la relación entre el peso de agua perdido después de calentar la muestra a 110 °C durante 24 horas y el peso de arcilla seca, expresado en porcentaje (Norma UNE 103-300-93).

3.2. Porosimetría

El estudio porosimétrico se ha realizado sobre un fragmento del testigo inalterado de entre 2 y 4 g. La distribución de tamaño de poro se mide mediante porosimetría de mercurio utilizando un Poresizer 9320 de Micromeritics, con un rango de presión de inyección de mercurio de 7 kPa a 210 MPa, lo que permite medir diámetros de poro aproximadamente entre 200 y 0,006 µm. Por lo tanto, el mercurio intruye sólo la macro y mesoporosidad, quedando la microporosidad sin determinar (poros menores de 0,002 µm). Además, sólo

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n ^o 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 7/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

los poros interconectados quedarán representados en la distribución obtenida. Antes de introducir las muestras en el porosímetro, se debe eliminar todo el agua de los poros. Para ello el método más aceptado es la liofilización. La muestra se sumerge en un recipiente con nitrógeno líquido, cuya temperatura es de -196°C, para congelar el agua de los poros rápidamente, en estado amorfo, sin permitir que el crecimiento de cristales produzca aumento de volumen de poros. Después se introduce en un liofilizador Telstar donde se somete la muestra a un vacío de 10 Pa y una temperatura de -40 °C, con lo que el hielo se sublima.

3.3. Superficie específica

Los valores de superficie específica se refieren a superficie específica externa, puesto que se han medido con el método BET del punto único por adsorción de nitrógeno en un equipo Flowsorb II 2300 de Micromeritics. Se utilizan 5 g de muestra molida y seca en estufa a 110 °C, con el fin de que sus poros no contengan agua que impida la entrada del gas. La determinación se realiza sobre dos alícuotas, y el valor que se da para cada muestra es la media de las dos determinaciones. En caso de haber discrepancia importante entre ambas se realiza una tercera medida. Este parámetro se ha determinado porque sus variaciones pueden significar modificaciones de la estructura microscópica de la arcilla.

3.4. Granulometría

Los análisis granulométricos de las muestras se han realizado siguiendo las Normas UNE 103-102 y 103-101.

El primer paso para la realización de las granulometrías es la dispersión de la muestra, que permite que todos los tamaños de partícula queden representados en el análisis. Ésta se ha realizado mezclando 20 g de muestra con agua destilada y 5 g de hexametáfosfato sódico y agitando periódicamente durante 24 horas. Las muestras del sondeo PE-1 presentaron mayor dificultad de dispersión, por lo que, después de disgregarlas intensamente con mazo de madera, han permanecido 48 horas en suspensión. Para asegurar la dispersión, se somete la suspensión a 5 sesiones de ultrasonido de 5 minutos de duración, separadas entre sí por un tiempo de 5 minutos durante el que se mantiene la agitación mecánica. El

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page:8/30
		Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

análisis granulométrico de las partículas finas se realiza mediante densímetro y aplicando la ley de Stokes. Posteriormente, se lava la muestra sobre el tamiz de 74 µm y con la parte retenida, una vez seca, se realiza el tamizado por una batería de tamices, para obtener la distribución granulométrica de las partículas más gruesas.

3.5. Presión de hinchamiento

Los materiales arcillosos se caracterizan por su gran deformabilidad al hidratarse, ya que las partículas incorporan el agua en su estructura aumentando la distancia entre interláminas. Su capacidad de hinchamiento depende fundamentalmente de la mineralogía, y especialmente de la existencia de láminas en las que pueden situarse cationes con capacidad de hidratación. Si el material se satura a volumen constante impidiendo su deformación, las partículas ejercen una presión sobre la estructura confinante que se denomina presión de hinchamiento.

Para determinar la presión de hinchamiento en un edómetro convencional, la muestra se introduce en un anillo portamuestras que impide su deformación lateral, y se satura por la superficie inferior a través de una placa porosa. El pistón superior, solidario con una piedra porosa, está conectado a un vástago de carga cuyo desplazamiento se puede medir con exactitud por medio de un comparador. Para mantener el volumen de la muestra constante, se aplica a ésta carga mediante un sistema de palanca, de manera que no se registre ningún desplazamiento en el comparador. Aplicando a esta carga el factor del brazo de palanca y dividiéndola por la superficie de la pastilla, se tiene la presión de hinchamiento de la muestra para la densidad a la que se realizó el ensayo.

En el valor de la presión de hinchamiento para un mismo material influyen su densidad seca y su humedad inicial, además de las características mineralógicas y químicas de las muestras, lo que dificulta la comparación entre diferentes muestras y la interpretación de los resultados. Por esta razón se decidió realizar el ensayo de presión de hinchamiento en condiciones iniciales similares para todas las muestras. Para ello, después de determinar la humedad de la muestra inalterada, se disgregaron 100 g de cada muestra hasta pasar por el tamiz de 2 mm y se dejó estabilizar su humedad en las condiciones de humedad y temperatura del laboratorio. Con la muestra así preparada se fabricaron pastillas de

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page:9/30
		Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

densidad seca nominal de 1,70 g/cm³, mediante compactación uniaxial directamente en el anillo del edómetro. La superficie de las pastillas fabricadas es de 11,40 ó 9,98 cm², y su altura de 1,20 cm.

Los ensayos de presión de hinchamiento se han realizado a la temperatura del laboratorio (de 20 a 25°C). Como agua de saturación se ha utilizado agua destilada. La duración de los ensayos ha estado comprendida entre 2 y 6 días, considerando como valor de presión de hinchamiento el correspondiente a la carga necesaria para mantener la deformación a cero durante 24 horas. Al final del ensayo se seca la muestra en estufa, y con el peso seco obtenido se determina la humedad final de la muestra y se comprueba la densidad seca y la humedad inicial.

3.6. Permeabilidad

Consiste en la medida en función del tiempo del volumen de agua que atraviesa una probeta de material confinada lateralmente y a la que se impone un gradiente hidráulico entre la parte superior y la inferior. El método consiste en aplicar una carga hidráulica (ΔP), es decir, una diferencia de potencial, entre la parte superior e inferior de una muestra de dimensiones fijas y conocidas (superficie: S, altura: l) previamente saturada. Al mismo tiempo, se mide el flujo de agua que atraviesa la probeta en función del tiempo ($\Delta V/\Delta t$). Con estos parámetros se calcula la permeabilidad K aplicando la ley de Darcy sobre flujo en medios porosos:

$$K = \frac{\Delta V \times l}{S \times \Delta t \times \Delta P}$$

La determinación se ha realizado en permeámetro de carga fija, con la muestra confinada en una celda triaxial.

Las probetas se han obtenido mediante torneado de una sección del testigo según la dimensión longitudinal del mismo, y tienen un diámetro nominal de 3,8 cm y una longitud comprendida entre 3 y 8 cm. En la parte superior e inferior de la probeta se coloca un disco

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 10/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

de papel de filtro y una piedra porosa del diámetro de la muestra y el conjunto se enfunda en una camisa de látex y se coloca en la celda triaxial.

La celda triaxial se presuriza a 0,7 MPa, con el fin de asegurar un contacto perfecto entre las paredes de la probeta y la camisa de látex, de manera que se impida el paso de agua por este contacto. Las tomas de agua superior e inferior de la celda se conectan a un sistema de presión (depósitos de mercurio) constante a 0,6 MPa. De esta manera se hidrata la muestra hasta saturación completa durante al menos dos días.

Una vez saturada la muestra se aplica el gradiente hidráulico, que es de 0,1 MPa, tras haber incrementado la presión en la celda (presión confinante) a 0,75 MPa. Se registra el paso de agua en función del tiempo hasta alcanzarse el régimen estacionario y con los datos obtenidos se calcula el coeficiente de permeabilidad aplicando la ley de Darcy. Al final del ensayo se desmonta la probeta y se pesa y se mide antes de determinar la humedad final por secado en estufa. Se ha comprobado que las dimensiones iniciales y finales de la probeta difieren, debido al hinchamiento que se produce durante la saturación. Las dimensiones finales son las utilizadas en el cálculo de la permeabilidad.

3.7. Límite líquido

El límite líquido es el porcentaje de humedad a partir del cual el comportamiento del suelo deja de ser plástico para pasar a ser semilíquido o viscoso. Esta separación arbitraria del estado del suelo se determina según la Norma UNE 103-103-94: "Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande". Básicamente consiste en amasar el suelo con la cantidad de agua necesaria para que, una vez colocado el suelo en una cuchara normalizada, un surco realizado en él con un acanalador normalizado se cierre a lo largo de su fondo, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara según establece la citada Norma. El porcentaje de humedad añadida es el límite líquido. El ensayo se ha realizado con la muestra que pasa por el tamiz 400 µm amasada con la cantidad de agua destilada conveniente y dejada reposar durante 24 horas. El límite líquido está directamente relacionado con el porcentaje de partículas finas del suelo.

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n ^o 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 11/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

4. RESULTADOS

4.1. Propiedades de estado

La Tabla II muestra los valores de densidad seca (ρ_d) y humedad (w) obtenidos para cada muestra del sondeo VE-1A y la Tabla III para las del sondeo PE-1. El valor de la porosidad (n) y del grado de saturación (S_r) se han calculado tomando un peso específico medio de 2,77 para todas las muestras del sondeo VE-1 y para las muestras del sondeo PE-1 los valores que se muestran en la Tabla correspondiente (Documentación del Proyecto AFA: GEOCISA). En la Tabla II se incluyen también los valores medios de estas propiedades para cada uno de los tramos distinguidos en la sección "INTRODUCCIÓN" y en la Tabla III los valores medios para las dos Formaciones cortadas por el sondeo.

Tabla II: Propiedades de estado de las muestras estudiadas (sondeo VE-1A)

Referencia	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	n	S_r (%)
VE1-3	1,97	14,1	0,289	96
VE1-4	1,83	18,1	0,339	98
VE1-5	1,82	18,5	0,343	98
VE1-9	2,04	13,4	0,264	100
VE1-10	1,88	16,2	0,321	95
VE1-11	2,01	14,7	0,274	100
VE1-27	2,02	13,0	0,271	97
VE1-28	1,98	14,8	0,285	100
VE1-29	2,01	12,9	0,274	95
VE1-33	2,03	12,5	0,267	95
VE1-34	2,08	12,2	0,249	100
VE1-35	1,95	15,8	0,296	100
VE1-42	2,09	12,2	0,245	100
VE1-43	2,16	10,5	0,220	100
VE1-44	2,05	13,1	0,260	100
MEDIA	1,99	14,1	0,280	100



Proyecto/project: MAR Código Enresa/Enresa's code:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	Fecha/date: 14/04/2010
	Revisión/version: nⁿ 0
	Pag/page:12/30
	Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

Referencia	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	n	S _r (%)
DESVEST	0,09	2,2	0,034	4
Superior	1,93	15,8	0,305	100
Medio	2,01	13,5	0,274	99
Inferior	2,10	11,9	0,242	100

Tabla III: Propiedades de estado de las muestras estudiadas (sondeo PE-1)

Referencia	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	n	S _r (%)	Peso específico
PE1-166	2,03	8,3	0,267	63	2,77
PE1-323	2,06	12,7	0,256	100	2,77
PE1-331	2,74	2,0	0,015		2,78
PE1-355	2,13	4,7	0,240	42	2,79
PE1-372	1,85	18,1	0,329	100	2,77
PE1-376	1,97	14,5	0,282	100	2,74
PE1-416	2,01	13,4	0,262	100	2,72
PE1-474	2,15	10,5	0,223	100	2,76
PE1-521	2,15	9,9	0,218	98	2,75
PE1-525	2,32	6,3	0,156	94	2,75
PE1-555	2,22	9,7	0,184	100	2,72
PE1-562	2,27	6,9	0,157	100	2,69
PE1-570	2,27	6,3	0,182	79	2,77
PE1-576	2,25	9,1	0,188	100	2,77
PE1-600	2,20	3,6	0,205	39	2,77
PE1-614	2,00	14,4	0,275	100	2,76
MEDIA	2,16	9,4	0,215	90	2,75
DESVEST	0,20	4,4	0,072	24	0,03
MEDIA EAO-A2	2,11	10,5	0,236	86	2,76
MEDIA EAO-A1	2,20	8,5	0,199	93	2,75

La Figura 1 muestra la evolución de la densidad seca y de la humedad en función de la profundidad para el sondeo VE-1A, junto con los mejores ajustes entre cada una de las variables y la profundidad en el tramo ensayado. Con la profundidad la densidad seca tiende a ser mayor y la humedad menor, manteniéndose los grados de saturación elevados. La evolución de la densidad seca y humedad con la profundidad en el sondeo PE-1 se muestra en la Figura 2, en la que se puede apreciar que no hay una tendencia clara de estas propiedades en función de la profundidad, aunque el valor medio de la densidad para la Formación EAO-A2 cortada en este sondeo (por encima de 469 m) es inferior que el valor medio para la Formación EAO-A1, mientras que la humedad es mayor, como corresponde a un mayor grado de consolidación por enterramiento (Tabla III). Destaca la elevada densidad seca de la muestra PE1-331, 2,74 g/cm³, lo que debe de ser causado por la existencia de algún mineral de elevado peso específico.

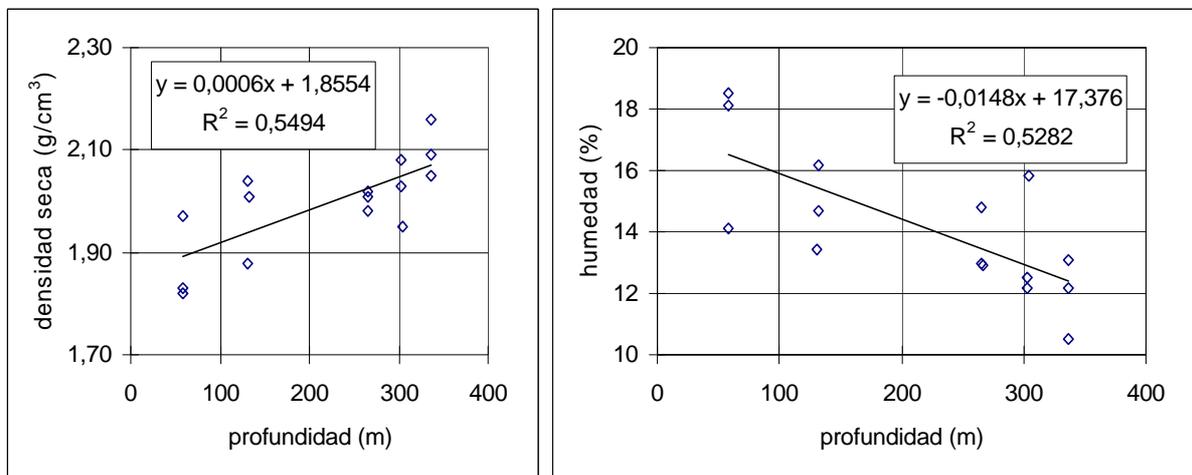


Figura 1: Densidad seca y humedad en función de la profundidad en muestras del sondeo VE-1A

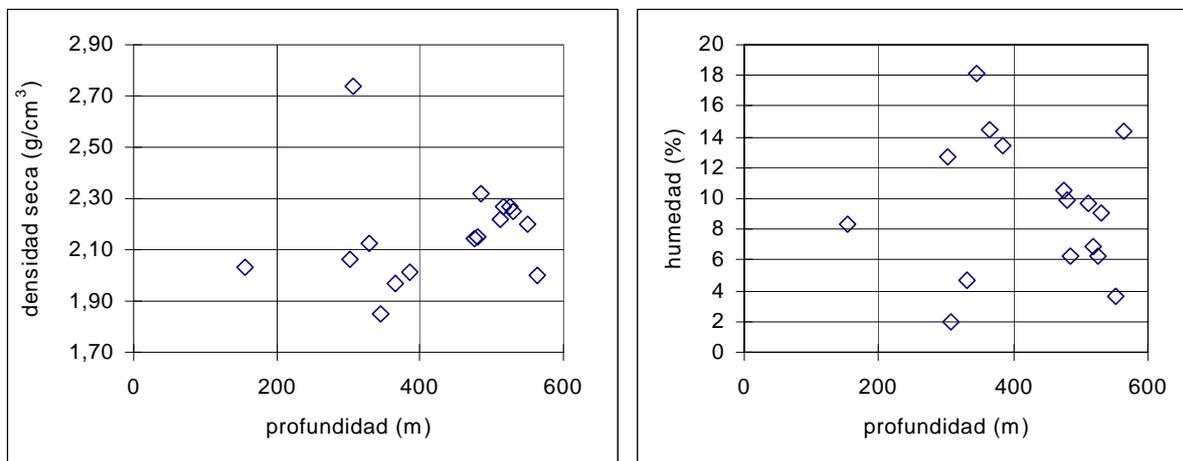


Figura 2: Densidad seca en función de la profundidad en muestras del sondeo PE-1

La Tabla IV recoge los datos de humedad tras estabilización en las condiciones de laboratorio, superficie específica (a_s), límite líquido (w_l) y los obtenidos en la porosimetría de mercurio de las muestras del sondeo VE-1A. El valor de humedad de estabilización ($w_{estab.}$) corresponde a la humedad de la muestra tras alcanzar el equilibrio en las condiciones de humedad relativa y temperatura del laboratorio. La columna “% del total” indica el porcentaje del total de poros que ha sido intruido por mercurio en el ensayo en el porosímetro. Las muestras analizadas presentan una única familia de poros, de la que se señala el diámetro máximo y la moda. Los valores medios de cada parámetro, agrupados según los tres tramos que se señalan en la sección “INTRODUCCIÓN” para la Formación EAO-A2, se muestran también en la Tabla.

Tabla IV: Humedad de estabilización ($w_{estab.}$), superficie específica (a_s), límite líquido (w_l) y datos de la porosimetría de mercurio de las muestras del sondeo VE-1A

Referencia	$w_{estab.}$ (%)	a_s (m ² /g)	w_l (%)	% del total	tamaño máximo (µm)	moda (µm)
VE1-3	3,8	31	63	24	0,240	0,043
VE1-4	5,7	54		29	0,188	0,034
VE1-5	8,2	53				
VE1-9	6,4	24		47	0,240	0,026

Proyecto/project: MAR	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	Fecha/date: 14/04/2010 Revisión/version: n° 0
	Pag/page:15/30 Fichero/file:Mar_vepe; Word 97
Código Enresa/Enresa's code:	

Referencia	w estab. (%)	a _s (m ² /g)	w _i (%)	% del total	tamaño máximo (µm)	moda (µm)
VE1-10	7,3	41		59	0,115	0,021
VE1-11	4,8	29	48			
VE1-27	5,7	20				
VE1-28	4,5	24		3		
VE1-29	6,1	24		43	0,115	0,021
VE1-33	12,4	28		27	0,147	0,021
VE1-34	5,8	32		30	0,115	0,034
VE1-35	5,8	36	53	31	0,115	0,026
VE1-42	4,1	24		47	0,115	0,026
VE1-43	2,4	11		48	0,115	0,034
VE1-44	3,3	17	46	32	0,147	0,034
MEDIA	6	30	53	35	0,150	0,029
DESVEST	2	12	8	15	0,050	0,007
Superior	6,0	38	56	40	0,196	0,031
Medio	6,7	27	53	27	0,123	0,025
Inferior	3,3	17	46	42	0,125	0,031

Los valores de superficie específica externa y los del límite líquido son propios de materiales arcillosos. La superficie específica externa tiende a disminuir con la profundidad, pudiendo distinguirse en función de este parámetro los tramos que se señalan en la Documentación del Proyecto AFA: el tramo superior de la Formación EAO-A2 (muestras de la 1 a la 11); el tramo medio de la formación (muestras de la 27 a la 35); y el tramo inferior (muestras de la 42 a la 44). Se observa también una disminución del límite líquido con la profundidad, lo que confirma el carácter menos arcilloso de los tramos inferiores, que también tienen humedades de estabilización menores. Los datos porosimétricos indican que el porcentaje de poros intruido por mercurio es pequeño, un 35 % en promedio, lo que significa que hay una cantidad de poros importante que no están interconectados o que son menores de 0,006 µm, el límite de intrusión del equipo. Por otra parte, el tamaño máximo

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n ^o 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 16/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

de la familia de poros detectada tiende a disminuir con la profundidad, lo que puede ser un efecto de la mayor compactación.

Los valores de humedad de estabilización ($w_{\text{estab.}}$), superficie específica (a_s) y los obtenidos en la porosimetría de mercurio para las muestras del sondeo PE-1 se recogen en la Tabla V, en la que también se incluyen los valores medios para las dos Formaciones cortadas. Se indica el porcentaje de la porosidad total intruido por mercurio. Las muestras analizadas presentan una familia predominante de poros, de la que se señala el tamaño máximo y la moda del diámetro. Esta familia de poros supone un porcentaje en volumen superior al 90 % del rango de porosidad investigado con mercurio.

Tabla V: Humedad de estabilización ($w_{\text{estab.}}$) y superficie específica (a_s) de las muestras del sondeo PE-1

Referencia	$w_{\text{estab.}}$ (%)	a_s (m ² /g)	% del total	tamaño máximo (µm)	moda (µm)
PE1-166	3,8	23	68	0,070	0,016
PE1-323	3,8	23			
PE1-331	2,2				
PE1-355	3,9	20	100	0,115	0,336
PE1-372	3,5	27			
PE1-376	4,8	30			
PE1-416	6,1		54	0,115	0,010
PE1-474	5,6	27	79	0,642	0,043
PE1-521	6,2	33	50	0,147	0,020
PE1-525	4,3	20			
PE1-555	5,6				
PE1-562	4,9	23			
PE1-570	4,0	18			
PE1-576	6,0				
PE1-600	3,1	9			
PE1-614	1,3	8	100	5,860	0,800

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page:17/30
		Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

Referencia	w estab. (%)	a _s (m ² /g)	% del total	tamaño máximo (µm)	moda (µm)
MEDIA	4	21	75	1,158	0,204
DESVEST	1	8	22	2,313	0,318
EAO-A2	4,0	25	74	0,100	0,121
EAO-A1	4,6	20	76	2,216	0,288

No hay grandes diferencias entre las distintas muestras. La superficie específica es algo mayor en el tramo superior, que por comparación con el sondeo VE-1A debería ser efectivamente el más arcilloso. Por otra parte, al contrario de lo que se observó en las muestras del sondeo VE-1, el porcentaje de poros intruido por mercurio en las muestras del sondeo PE-1 es elevado, un 75 % en promedio, lo que unido al hecho de que también la moda es mayor, indica que los tamaños de poros son mayores en el sondeo PE-1 que en el VE-1A. Puesto que las profundidades a las que se han recogido las muestras del sondeo PE-1 son mayores que las del VE-1A, esta diferencia en el tamaño de poro no puede atribuirse a la diferente compactación, sino al tamaño de las partículas, que es menor en las muestras del sondeo VE-1A que tienen un mayor porcentaje de partículas de tamaño arcilla, como se verá a continuación.

Los datos obtenidos en el análisis granulométrico se muestran en la Tabla VI para las muestras del sondeo VE-1A y en la Tabla VII para las muestras del sondeo PE-1 y las curvas granulométricas se representan en la Figura 3 y Figura 4, respectivamente.

Tabla VI: Datos granulométricos obtenidos por tamizado y sedimentación en las muestras del sondeo VE-1A (en porcentaje de partículas inferiores al diámetro indicado)

Diámetro (mm)	VE1-5	VE1-9	VE1-10	VE1-11	VE1-28	VE1-34	VE1-35	VE1-42	VE1-43	VE1-44
2,000	95	97	100	100	100	100	100	100	98	100
1,190	92	93	100	98	100	100	100	100	94	100
0,590	91	91	100	97	100	100	100	99	92	100
0,297	91	90	99	96	99	100	100	99	91	100



Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	Fecha/date: 14/04/2010
	Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:
	Pag/page:18/30
	Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

Diámetro (mm)	VE1-5	VE1-9	VE1-10	VE1-11	VE1-28	VE1-34	VE1-35	VE1-42	VE1-43	VE1-44
0,148	90	90	99	96	99	99	100	99	91	100
0,074	90	90	99	95	99	99	100	99	90	100
0,052	84	85	91		94	91	91	94	84	91
0,037	81	81	88		89	89	87	91	82	85
0,023	77	78	86		82	87	82	89	78	82
0,014	67	73	78		75	83	71	85	73	77
0,010	60	69	73		67	76	60	78	66	69
0,008	56	67	71		63	74	55	74	58	63
0,005	52	59	63		55	69	51	64	52	55
0,004	47	57	60		50	66	45	60	48	45
0,001	39	48	46		40	60	41	41	36	38

Tabla VII: Datos granulométricos obtenidos por tamizado y sedimentación en las muestras del sondeo PE-1 (en porcentaje de partículas inferiores al diámetro indicado)

Diámetro (mm)	PE1 166	PE1 323	PE1 331	PE1 355	PE1 372	PE1 376	PE1 416	PE1 474	PE1 521	PE1 525	PE1 562	PE1 570	PE1 576	PE1 600	PE1 614
2,000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,190	100	100	74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,590	97	100	63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,297	92	100	58	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,148	90	100	56	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,074	88	100	55	100	100	98	97	100	100	98	100	100	100	100	100
0,052	80		51									98		89	97
0,037	77	100	49	99			87		99			95		81	93
0,023	70	94	46	96	97	95	82	97	96	96		88	98	65	83
0,014	60	85	44	90	89	90	76	86	91	91	91	76	90	48	57
0,010	55	80	43	85	84	84	71	77	88	87	82	68	84	41	43
0,008	52	75	40	82	80	81	69	74	83	83	77	63	81	37	38



Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: <i>CIEMAT/DIAE/54221/2/99</i>
	Fecha/date: <i>14/04/2010</i>
	Revisión/version: <i>nº 0</i>
	Código Enresa/Enresa's code:
	Pag/page: <i>19/30</i>
	Fichero/file: <i>Mar_vepe; Word 97</i>

Diámetro (mm)	PE1 166	PE1 323	PE1 331	PE1 355	PE1 372	PE1 376	PE1 416	PE1 474	PE1 521	PE1 525	PE1 562	PE1 570	PE1 576	PE1 600	PE1 614
0,005	44		38	68	68	74	63	62	71	74	65	54	71	34	30
0,004	40	56	35	58	60	67	58	56	62	63	56	46	62	28	27
0,003	37	51	34	53	55	62	56	51	54	56	51	35	56	26	23
0,001	32	39	27	37	45	50	52	41	38	38	36		41	22	16

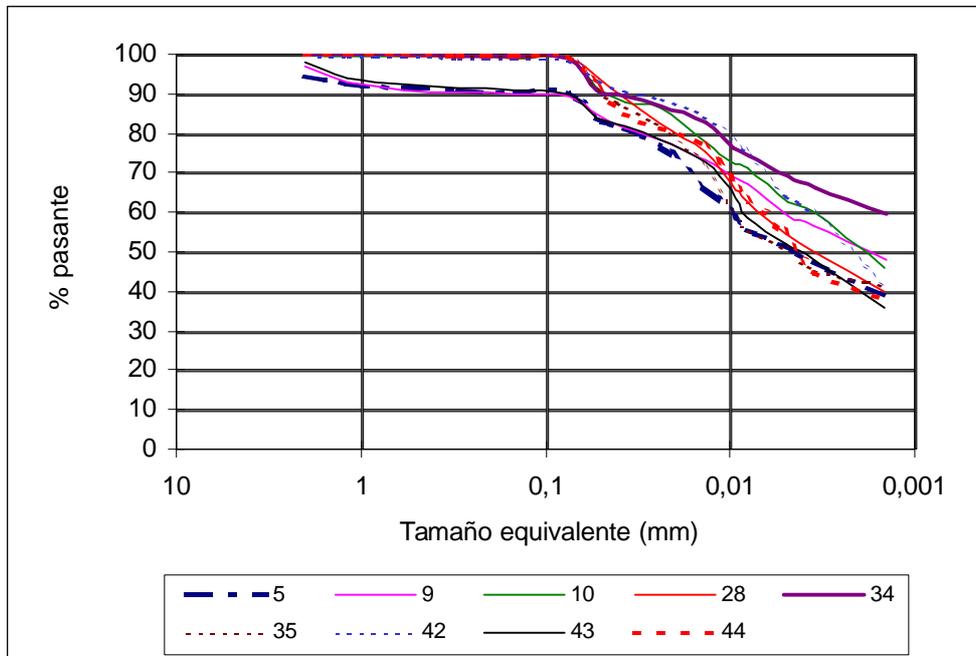


Figura 3: Curvas granulométricas de las muestras del sondeo VE-1A

Proyecto/project: MAR	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	Fecha/date: 14/04/2010 Revisión/version: n° 0
	Pag/page:20/30 Fichero/file:Mar_vepe; Word 97
Código Enresa/Enresa's code:	

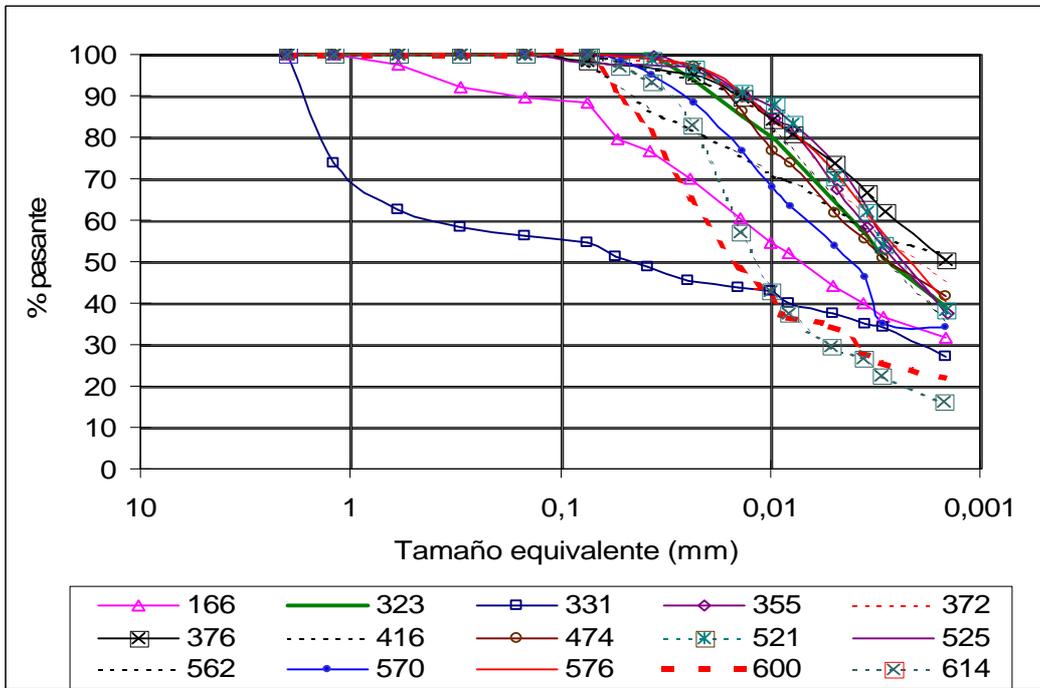


Figura 4: Curvas granulométricas de las muestras del sondeo PE-1

La Figura 5 muestra los porcentajes de cada fracción granulométrica (arena: partículas mayores de 74 μm , limo: partículas entre 74 y 2 μm , y arcilla: partículas menores de 2 μm) en función de la profundidad para las muestras del sondeo VE-1A y la Figura 6 para las muestras del sondeo PE-1, en las que no aparece la fracción arena, debido probablemente a que han sufrido una mayor desagregación mecánica antes de realizar el ensayo de sedimentación. Los valores medios de cada una de las fracciones granulométricas para los tres tramos que se han distinguido de la Formación EAO-A2 y para la Formación EAO-A1 están indicados en la Tabla VIII. Se observa un aumento de la fracción limo con la profundidad y un mayor porcentaje de arcillas en el tramo intermedio de la Formación EAO-A2. El aumento de la fracción limo con la profundidad se observa también en el sondeo PE-1 unido a una disminución del porcentaje de la fracción arcilla, estableciéndose claramente las diferencias entre las Formaciones EAO-A2 y EAO-A1. De acuerdo con estos datos, las muestras de la Formación EAO-A2 se clasificarían como arcillas limosas (silty clay) según los diagramas de clasificación textural del USDA, mientras que las de la Formación EAO-A1 entrarían dentro de la clase "silty clay loam".

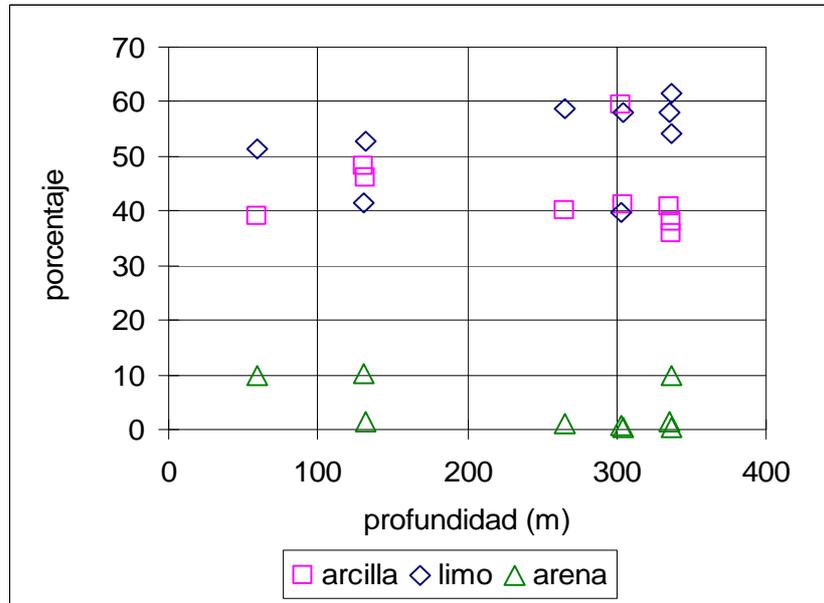


Figura 5: Porcentajes de cada fracción granulométrica en función de la profundidad para las muestras del sondeo VE-1A

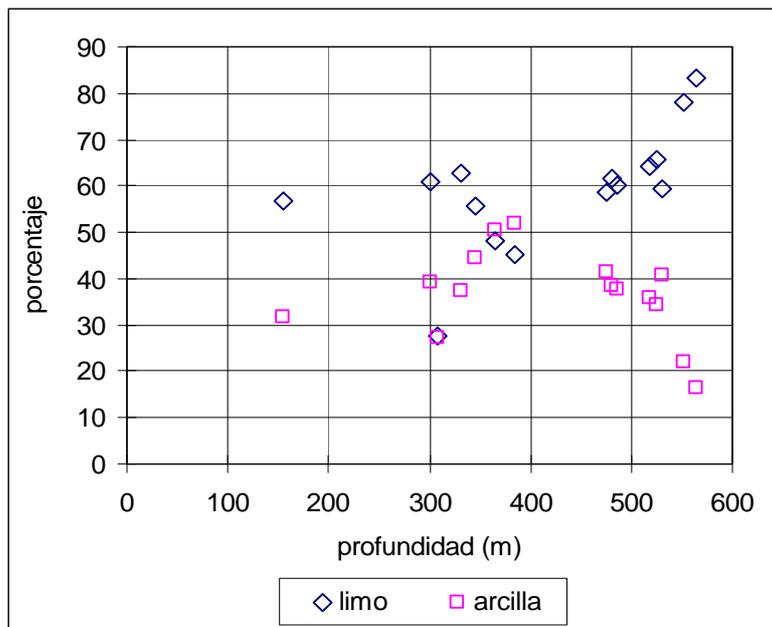


Figura 6: Porcentajes de cada fracción granulométrica en función de la profundidad para las muestras del sondeo PE-1

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page:22/30
		Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

Tabla VIII: Fracciones granulométricas para cada una de las Formaciones

Formación	Tramo	Sondeo VE-1A			Sondeo PE-1		
		arcillas	limos	arenas	arcillas	limos	arenas
EAO-A2	superior	44	49	7	40	51	9
	medio	47	52	1			
	inferior	38	58	4			
EAO-A1					33	66	0

4.2. Permeabilidad

Los resultados de los ensayos de permeabilidad sobre muestra torneada, realizados con el flujo en dirección paralela al eje del sondeo, se resumen en la Tabla IX para el sondeo VE-1 y en la Tabla X para el sondeo PE-1, del que sólo se ha medido una muestra, debido a que sólo se disponía de trozos pequeños de testigo que no permiten el tallado de probetas de las dimensiones apropiadas.

Tabla IX: Resultados de los ensayos de permeabilidad (K) realizados con muestras del sondeo VE-1

Muestra	w inicial (%)	K (m/s)	ρ_d final (g/cm ³)	w final(%)	S _r inicial (%)	S _r final (%)
VE1-3	15,7	$2,9 \cdot 10^{-11}$	1,87	16,9	92	97
VE1-27	10,4	$1,4 \cdot 10^{-11}$	2,12	11,2	99	101
VE1-28	14,0	$1,6 \cdot 10^{-11}$	1,94	15,3	98	100
VE1-43	10,4	$4,7 \cdot 10^{-11}$	2,13	11,0	99	102

Tabla X: Resultados de los ensayos de permeabilidad (K) realizados con muestras del sondeo PE-1

Muestra	w inicial (%)	K (m/s)	ρ_d final (g/cm ³)	w final(%)	S _r inicial (%)	S _r final (%)
PE1-355	4,6	$7,2 \cdot 10^{-12}$	2,02	14,9	42	109

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n ^o 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 23/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

Estos mismos datos se representan en la Figura 7 en función de la profundidad. Las muestras VE1-27 y VE1-28 pertenecen al tramo intermedio de la Formación y la VE1-43, con permeabilidad algo mayor, al tramo inferior. La muestra ensayada del sondeo PE-1, pese a pertenecer a la misma Formación EAO-A2 y a profundidad similar, tiene una permeabilidad casi un orden de magnitud menor.

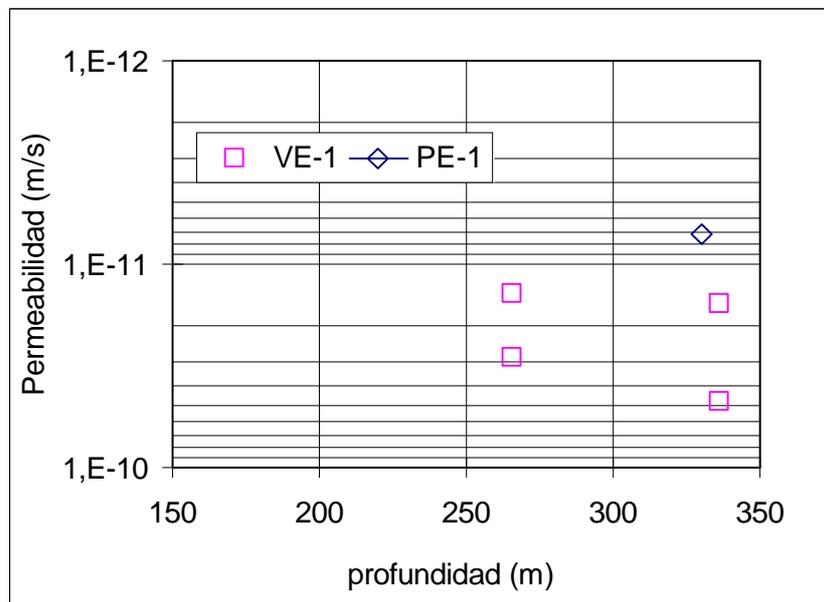


Figura 7: Conductividad hidráulica de las muestras estudiadas de cada sondeo en función de la profundidad

4.3. Presión de hinchamiento

La presión de hinchamiento se ha determinado en la muestra remoldeada después de estabilizar su humedad en las condiciones de laboratorio. Todas las muestras se han compactado uniaxialmente hasta una densidad seca de 1,70 g/cm³. Por lo tanto, los valores que aquí se presentan no corresponden a las presiones naturales in situ, sino que se han determinado para tener un criterio comparativo entre muestras de características naturales diferentes que, de otro modo, habría sido difícil comparar.

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref N°:CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page:24/30
		Fichero/file:Mar_vepe; Word 97

Tabla XI: Resultados de ensayos de presión de hinchamiento (P_s) realizados con muestras remoldeadas del sondeo VE-1A

Referencia	ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	P_s (MPa)	w final (%)
VE1-3	1,66	6,2	0,4	25,1
VE1-4	1,64	7,4	0,6	28,7
VE1-5	1,59	10,2	0,7	27,2
VE1-9	1,70	6,2	0,4	21,9
VE1-10	1,68	8,6	0,7	25,4
VE1-11	1,67	6,5	0,4	23,4
VE1-27	1,71	4,9	0,2	24,7
VE1-28	1,69	4,8	0,4	24,1
VE1-29	1,69	6,9	0,4	24,4
VE1-33	1,70	5,2	0,2	23,5
VE1-34	1,67	7,6	0,3	22,6
VE1-35	1,70	5,9	0,3	24,8
VE1-42	1,67	5,9	0,2	24,9
VE1-43	1,68	3,6	0,4	20,1
VE1-44	1,70	3,3	0,1	25,1
MEDIA	1,68	6,2	0,4	24,4
DESVEST	0,03	1,8	0,2	2,0
Superior	1,66	7,5	0,5	25,3
Medio	1,69	5,9	0,3	24,0
Inferior	1,68	4,3	0,2	23,4

La representación de estos valores en función de la profundidad se muestra en la Figura 8. La presión de hinchamiento de todas las muestras es muy baja, con un valor medio de 0,4 MPa, y tiende a disminuir con la profundidad. Los valores determinados por GEOCISA (Documentación Proyecto AFA) sobre muestra inalterada son incluso inferiores a los determinados para la muestra remoldeada. Esto es debido probablemente a que la muestra inalterada está prácticamente saturada por lo que apenas incorpora agua y no puede desarrollar presión de hinchamiento. Dado que entre los componentes mineralógicos

aparecen minerales expansivos como la esmectita en proporciones importantes (superiores al 50 %), la explicación de que el hinchamiento se vea restringido puede ser la abundancia de otros componentes minerales, como la calcita y los sulfatos.

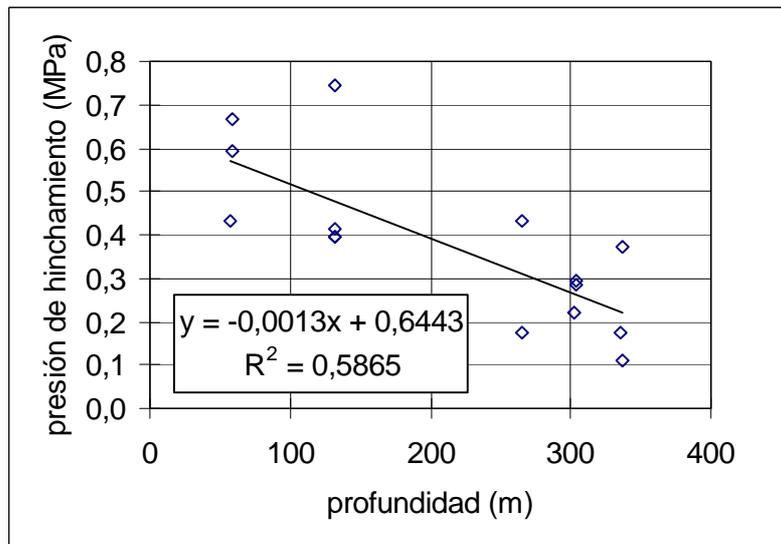


Figura 8: Valores de presión de hinchamiento en función de la profundidad obtenidos en muestras del sondeo VE-1 remoldeadas a densidad seca $1,70 \text{ g/cm}^3$

Los valores obtenidos para las muestras del sondeo PE-1 se muestran en la Tabla XII y se representan en función de la profundidad en la Figura 9.

Tabla XII: Resultados de ensayos de presión de hinchamiento (P_s) realizados con muestras remoldeadas del sondeo PE-1

Referencia	ρ_d (g/cm^3)	w inicial (%)	P_s (MPa)	w final (%)
PE1-166	1,67	5,9	0,2	26,3
PE1-323	1,68	4,8	0,2	25,5
PE1-331	1,67	4,1	0,0	20,6
PE1-372	1,71	3,0	0,2	24,7
PE1-376	1,70	4,8	0,3	24,1
PE1-416	1,66	8,9	0,1	24,6
PE1-474	1,69	6,5	0,4	21,8

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n ^o 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 26/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

Referencia	ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	P _s (MPa)	w final (%)
PE1-555	1,68	6,9	0,2	23,7
PE1-570	1,69	4,8	0,0	21,7
PE1-576	1,68	7,3	0,2	23,7
MEDIA	1,68	5,7	0,18	23,7
EAO-A2	1,68	5,2	0,16	24,3
EAO-A1	1,68	6,4	0,20	22,7

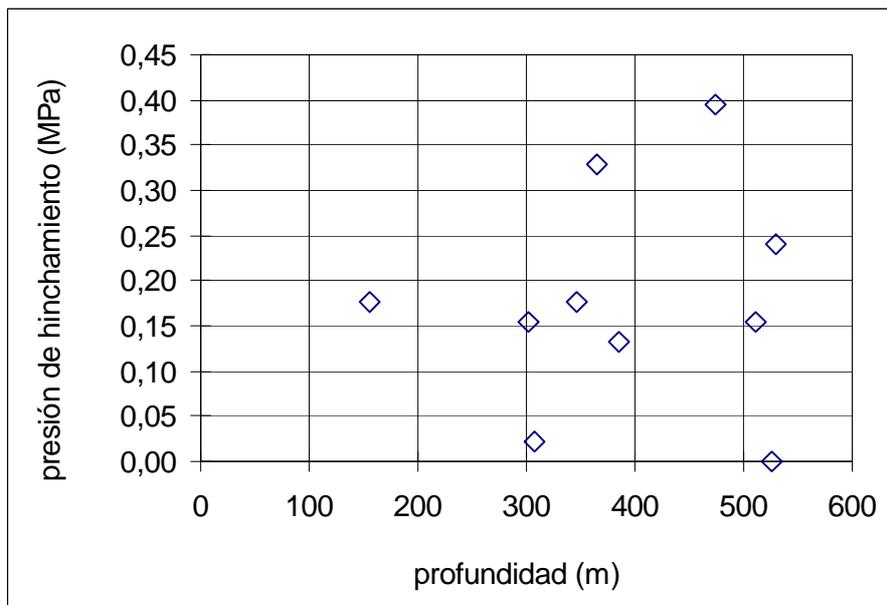


Figura 9: Valores de presión de hinchamiento en función de la profundidad obtenidos en muestras del sondeo PE-1 remoldeadas a densidad seca nominal 1,70 g/cm³

Los valores de presión de hinchamiento obtenidos, como en el caso del sondeo VE-1A, son muy bajos, inferiores a 0,4 MPa, y no muestran una tendencia clara en función de la profundidad. La menor proporción de fracción arcilla en el sondeo PE-1 puede ser la causa de la menor presión de hinchamiento de las muestras de este sondeo respecto a las del VE-1A.

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n ^o 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 27/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

5. CORRELACIÓN ENTRE LAS DISTINTAS VARIABLES

Un análisis de los coeficientes de correlación obtenidos entre los diferentes parámetros que se han determinado en este estudio para las muestras del sondeo VE-1A (densidad seca, humedad, superficie específica, presión de hinchamiento, permeabilidad, fracciones granulométricas, límite líquido) y la profundidad, se muestra en la Tabla XIII, donde sólo se indican los coeficientes significativos. La densidad seca aumenta con la profundidad, mientras que el resto de variables disminuyen. Ha de tenerse en cuenta que la presión de hinchamiento no corresponde a la de la formación in situ, ya que se ha determinado sobre la muestra remoldeada.

Tabla XIII: Coeficientes de correlación de los diferentes parámetros con la profundidad para las muestras del sondeo VE-1A

Variable	Coefficiente correlación
ρ_d (g/cm ³)	0,74
w (%)	-0,73
a_s (m ² /g)	-0,69
W_L (%)	-0,66
tamaño máximo poro	-0,81
P_s	-0,77
% arena	-0,50

Se ha encontrado también una buena correlación entre la presión de hinchamiento de la muestra remoldeada y la superficie específica, aumentando la primera al aumentar la segunda (coeficiente de correlación: 0,71).

Este análisis se ha realizado también para las muestras del sondeo PE-1. No se ha encontrado correlación entre la profundidad y el resto de parámetros estudiados, excepto el porcentaje de fracción limo, que tiende a aumentar con la profundidad (coeficiente de correlación: 0,57). Sin embargo, se obtiene de nuevo una alta correlación positiva entre superficie específica y el porcentaje de fracción arcilla (coeficiente de correlación: 0,87) y la humedad de estabilización (coeficiente de correlación: 0,81). A su vez, la presión de

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n ^o 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 28/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

hinchamiento se correlaciona positivamente con la superficie específica (coeficiente de correlación: 0,83), con la humedad de estabilización (coeficiente de correlación: 0,53) y con el porcentaje de fracción arcilla (coeficiente de correlación: 0,52). Estas correlaciones son lógicas, puesto que una mayor superficie específica significa que hay un mayor número de posiciones de fijar agua, y por lo tanto la humedad de estabilización bajo condiciones de humedad relativa y temperatura análogas será mayor, así como la presión de hinchamiento. Este hecho da confianza en la bondad de los datos obtenidos.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se han analizado muestras procedentes de dos sondeos de la Cuenca del Ebro, el VE-1A y el PE-1. El primero de ellos corta a la Formación EAO-A2, y el segundo a ésta misma y a una inferior denominada EAO-A1. Se han determinado sus propiedades de estado, densidad y humedad, y otras propiedades físicas como la humedad de estabilización, la superficie específica, la distribución porosimétrica, la granulometría, el límite líquido, la permeabilidad y la presión de hinchamiento. Las muestras del sondeo VE-1A estaban mejor preservadas.

En general, en los dos sondeos, la densidad seca aumenta con la profundidad, y la humedad disminuye, lo que responde simplemente a la consolidación producida por la presión suprayacente.

En el sondeo VE-1A se observa una disminución de la superficie específica y del límite líquido con la profundidad, lo que confirma el carácter menos arcilloso de los tramos inferiores, que también tienen humedades de estabilización menores y mayor porcentaje de fracción limo. En concreto la superficie específica disminuye desde valores medios de 38 a 17 m²/g, el límite líquido disminuye desde valores medios de 56 a 46 %, y la fracción limo aumenta desde 49 a 58 %. Todas las muestras entran dentro de la clasificación textural de arcillas limosas. La conductividad hidráulica de la muestra inalterada es del orden de 10⁻¹¹ m/s y las presiones de hinchamiento de la muestra remoldeada con su humedad de equilibrio y compactada a densidad seca 1,70 g/cm³ tienen un valor medio de 0,4±0,2 MPa,

	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n° 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 29/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

con tendencia a disminuir con la profundidad, pasando desde valores medios de 0,5 MPa para el tramo superior a valores medios de 0,2 MPa para el tramo inferior.

Las dos Formaciones cortadas por el sondeo PE-1 pueden distinguirse en función de algunas propiedades. Así, aunque la superficie específica media es de $21 \pm 8 \text{ m}^2/\text{g}$, el valor para la Formación EAO-A2 es de $25 \text{ m}^2/\text{g}$ y para la Formación EAO-A1 de $20 \text{ m}^2/\text{g}$. De la misma manera, el porcentaje de fracción limo de la Formación EAO-A2 es de 51 y el de la Formación EAO-A1 de 66. Es decir, mientras que las muestras procedentes de la Formación EAO-A2 son arcillas limosas, las de la Formación EAO-A1 se clasifican texturalmente como "silty clay loam". Por otra parte, las presiones de hinchamiento en las condiciones descritas para el sondeo VE-1 son inferiores a 0,4 MPa, sin que se hayan observado diferencias entre una Formación y otra, y el único valor de conductividad hidráulica determinado para la Formación EAO-A2 es de $7,2 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$. Este valor es más bajo que el determinado para la misma Formación en el sondeo VE-1, que sin embargo es más arcilloso, lo que no puede corroborarse ni evaluarse debido a la falta de datos.

Los resultados obtenidos para la Formación EAO-A2 en muestras procedentes de los dos sondeos son concordantes, aunque parecen indicar un menor carácter arcilloso en el sondeo PE-1, lo que pudiera deberse a un cambio lateral de facies.

7. AGRADECIMIENTOS

El trabajo de laboratorio ha sido realizado por Ramón Campos, Juan Aroz y Joaquín Almendrote. Juan Manuel Durán realizó las porosimetrías y determinación de la superficie específica.

8. BIBLIOGRAFÍA

Documentación del Proyecto AFA: Informe final del sondeo PE-1. Vol. V: Estudio geotécnico de muestras. CGS.

Norma UNE 7045(1952): Determinación de la porosidad de un terreno.

Ciemat	Proyecto/project:	Nº Ref/Ref Nº: CIEMAT/DIAE/54221/2/99
	MAR	Fecha/date: 14/04/2010
		Revisión/version: n ^o 0
	Código Enresa/Enresa's code:	Pag/page: 30/30
		Fichero/file: Mar_vepe; Word 97

Norma UNE 103-101: Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

Norma UNE 103-102: Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.

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

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

Proyecto AFA. Estudios temáticos en medios sedimentarios. Área: Monegros (AO01). 46.93-AO-01-IF. Capítulo 5: Sondeos. CGS.

Proyecto AFA. Estudios temáticos en medios sedimentarios. Área: Monegros (AO01). 46.93-AO-01-IF. Capítulo 2: Estratigrafía y sedimentología. CGS. Octubre 1994.

Turrero, M.J. & Peña, J. (1998): Descripción litológica de los testigos del sondeo VE-1A procedente de materiales arcillosos. CIEMAT/DIAE/54221/7/98.