

Estudio de los residuos mineros de la Presa de Almagrera por medio de piezoconos

Study of tailings in Almagrera Dam by piezocones

José Luis Justo^{1*}, Francisco A. Jiménez², E. Justo¹, M. Vázquez-Boza¹, C. Soriano¹ y José Castilla¹

Palabras clave

residuos de mineral;
piezocono;
sondeo;

Sumario

Durante la clausura de una presa de residuos de mineral se ha realizado una inspección a fondo de los lodos y del material supra yacente, por medio de piezoconos y sondeos. Se muestran, en primer lugar, las correlaciones más recientes para encontrar los parámetros de terreno a partir de las resistencias por punta y por el manguito de fricción del piezocono. El artículo revela que pueden existir diferencias importantes entre los parámetros encontrados con el piezocono y con los ensayos de laboratorio realizados sobre muestras extraídas de los sondeos y destaca la necesidad de combinar ambos procedimientos para obtener parámetros fiables.

Keywords

tailings;
piezocone;
borehole;

Abstract

During the closure of a tailings dam, the tailings and the material placed above have been thoroughly investigated through piezocones and boreholes. First, the most recent correlations to find the ground parameters from the cone and sleeve friction cone resistances have been presented. The article reveals that there may be important differences between the parameters found from the piezocone and laboratory tests performed on samples taken from the boreholes and highlights the need to combine both methods to obtain reliable parameters.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la fase de reconocimiento del terreno para redactar un modelo de clausura de la presa de Almagrera (Justo *et al.* 2012), en el año 2008, se investigó preferentemente la presa de materiales sueltos. En el mismo reconocimiento, se trató de investigar los lodos, fuertemente agresivos. Para ello se ejecutaron 4 piezoconos (CPTU-1 a CPTU-4) y se tomaron muestras alteradas en 7 emplazamientos. Desgraciadamente, por no disponerse de medios adecuados, los piezoconos se realizaron en las orillas del embalse, con una profundidad máxima de lodos de 1,06 m. La situación de los piezoconos y de las muestras inalteradas se muestra en la Figura 1.

Como han descrito Justo *et al.* (2012), en el proceso de clausura se comenzó por bombear el agua del embalse. A continuación se depositaron en el embalse residuos de la mina próxima Las Viñas, para regenerar dicho emplazamiento. El relleno terminó con una delgada capa de arcilla. En septiembre del año 2010, cuando se alcanzó la cota 208,77 y una vez terminado este relleno, se ejecutaron cuatro piezoconos (CPTU1 a CPTU4) hasta profundidades que superaron en algunos casos los 25 m, hacia el centro del embalse. Más tarde, en enero de 2012 se ejecutan los CPTU6 y CPTU7. Los resultados obtenidos con estos piezoconos son muy diferentes a los hallados en la fase de reconocimiento del terreno, debido probablemente a las diferentes condiciones de depósito.

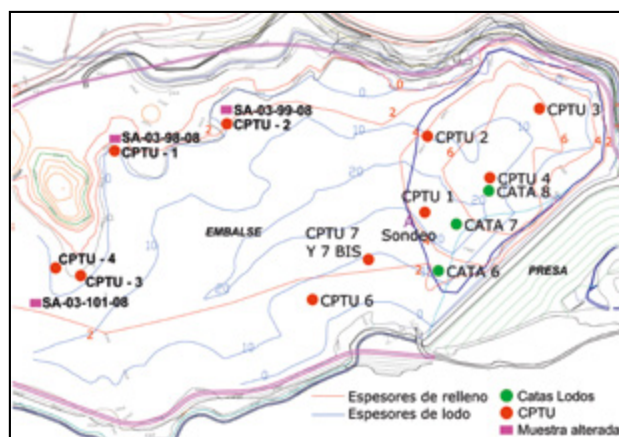


Figura 1. Plano del embalse de Almagrera, mostrando la situación de piezoconos, sondeo y muestras alteradas.

El piezocono está considerado como uno de los métodos más adecuados para el estudio de terrenos blandos debido al amplio número de correlaciones establecidas, que permiten encontrar prácticamente todos los parámetros de cálculo del suelo. El 9 de agosto de 2012, es decir dos años después de la ejecución de los piezoconos CPTU1 a CPTU4, se ejecuta un sondeo, al lado del CPTU1 hasta 27,94 m de profundidad. Sin olvidar la diferente fecha de realización de las pruebas, los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras del sondeo contradicen, en muchos, casos los obtenidos mediante correlaciones con los resultados de los piezoconos.

2. ENSAYOS DE LABORATORIO DE LA INVESTIGACIÓN DE 2008

Los ensayos de identificación realizados en los lodos en dicha fecha se incluyen en la Tabla 1.

* Corresponding author: jlj@us.es

¹ Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

² Agencia de Medio Ambiente y Agua, Sevilla, España.

Tabla 1. Ensayos en los lodos (investigación del terreno de 2008)

Zona	Muestra	T (0,08mm) %	USCS	w _L	I _p	w (%)	I _L	ρ _d (kg/m ³)	γ (kN/m ³)
Cata CPTU-1 (0,00-0,60 m)	SA-03-98-08	98,5	ML	41	0	344,7		300	13,0
Cata CPTU-2 (0,00-0,60 m)	SA-03-99-08	91,5	MH	53	5	327,5	56	280	11,7
Zona cola balsa entre 0,00 y 0,60 m	SA-03-100-08	14,3	SM	NP	NP	16,8			
Zona cola balsa entre 0 y 0,30 m	SA-03-101-08	64,2	ML	12	2	17,9	4,0	1770	20,5
Cata 6, -6 m	SA-04-107-08	96,4	CL-ML	23	6				
Cata 7, -6,50m	SA-04-109-08	90,6	CL	27	8				
Cata 8, -5,50 m	SA-04-110-08	93,5	CL	40	12				
Perfil 3- Sondeo 3 (0,50-1,00)		95,0	CL	29	15	24,8	0,7		
Medias generales		80,3	CL-ML	32	6,9	146,3		780	15,1
Medias blandos		95,0	ML	47	2,5	335,9		290	13,2
Medias cerca presa		93,9	CL	30	10	24,8	0,7		

Se distinguen tres grupos de terrenos:

1. En las cercanías de los CPTU-1 y CPTU-2, aparecen limos muy blandos, con límite líquido del orden de 50, índice de plasticidad casi nulo y con densidades secas próximas a 300 kg/m³. Se trata de muestras superficiales (menos de 60 cm) y alteradas.
2. En la cola del embalse aparecen limos arenosos con una densidad seca de 1.770 kg/m³ y arenas limosas.
3. En las proximidades de la presa (catas 6 a 8 y perfil 3) aparecen arcillas de plasticidad media a baja y limos arcillosos, pero no se conoce su consistencia, porque no se realizó este tipo de ensayos por ser las muestras alteradas.

El coeficiente de permeabilidad se ha obtenido a partir de la ecuación:

$$k_v = \frac{c_v \gamma_w}{E_{oed}} \quad (1)$$

3. PIEZOCONOS

Como ya se ha indicado en la Introducción, en el año 2008 se realizan 4 piezoconos a escasa profundidad. En septiembre del año 2010, cuando se ha alcanzado la cota 208,77 con material de las Viñas se ejecutan otros cuatro piezoconos (CPTU1 a CPTU4) hasta profundidades que superan en algunos casos los 25 m. Más tarde, en enero de 2012 se ejecutan los CPTU6 y CPTU7.

La caracterización de estos piezoconos ha sido extraordinariamente prolija, ya que se produce una importante y frecuente variación de las resistencias por punta y fuste. En casi todos los casos ha habido que iniciar la perforación con el DPSH.

A partir de los datos de resistencia por punta, q_c , y fuste, f_s , se calcula la *relación de fricción*:

$$R_f = f_s / q_c (\%) \quad (2)$$

La situación de los valores de q_c/p_a y R_f en el gráfico de la Figura 2 permite distinguir los tipos de suelo, 1 a 9, de la Tabla 2 (Robertson, 2010a).

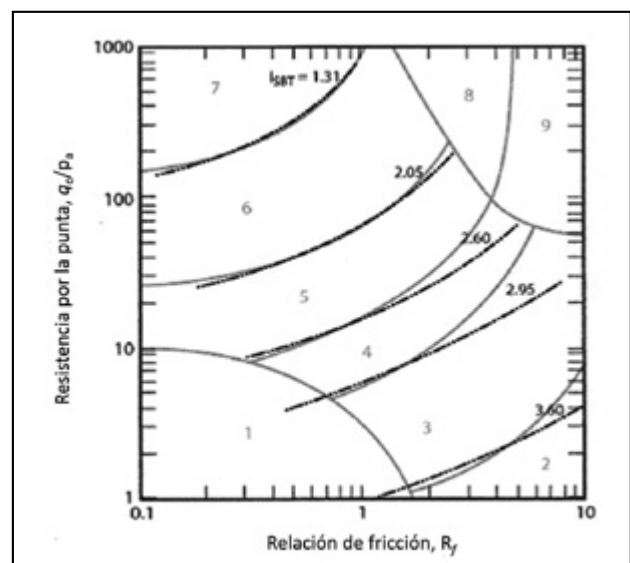


Figura 2. Situación en el diagrama $q_c/p_a - R_f$ de los tipos de suelo de la Tabla 3 ($p_a = 100$ kPa), Robertson (2010 a). Cortesía de la ASCE.

Tabla 2. Separación de los distintos tipos de suelo en función de los valores del Índice de comportamiento del suelo.

Zona	Tipo de suelo	ISBT
1	Arcilla susceptible	
2	Arcilla-Suelo orgánico	>3,60
3	Arcilla-Arcilla limosa	2,95-3,60
4	Limo arcilloso y arcilla limosa	2,60 a 2,95
5	Arena limosa a limo arenoso	2,05 a 2,60
6	Arenas limpias a arenas limosas	1,31 a 2,05
7	Arena densa a arena con grava	<1,31
8	Arena densa a arena arcillosa*	
9	Suelo muy firme de grano fino*	

* Sobreconsolidado o cementado

Una forma más directa de encontrar el tipo de suelo es calcular el **Índice de comportamiento del suelo**:

$$I_{SBT} = [(3,47 - \log(q_c/p_a))^2 + (\log R_f + 1,22)^2]^{0,5} \quad (3)$$

Las curvas de raya y dos puntos de la Figura 2 marcan aproximadamente la separación entre los tipos de suelo de

la Tabla 2. En general, cuanto mayor es q_c y cuanto menor es R_f mayor es el tamaño de las partículas. Nótese la singular posición del suelo tipo 1.

Tabla 3. Valores del coeficiente α en arcillas y limos

USCS	q_c (kPa)	α	w (%)
CL	<700	3-8	
	700-2000	2-5	
	>2000	1-2,5	
ML	<2000	3-6	
	>2000	1-3	
MH y CH	<2000	2-6	
OL	<1200	2-8	
Turba y OH		1,5-4	50-100
	<700	1-1,5	100-200
		0,4-1	>200

La resistencia sin drenaje en suelos arcillosos, c_u , se ha obtenido por medio de la conocida ecuación, (Meigh, 1987):

$$c_u = (q_c - \sigma_{v0}) / N_k \quad (4)$$

siendo σ_{v0} la presión total vertical de la sobrecarga de tierras.

Para arcillas normalmente consolidadas $N_k = 15$

Para arcillas sobreconsolidadas $N_k = 18$ (arcilla glacial)-27 (arcilla fisurada)

Para el índice de densidad en arenas normalmente consolidadas e $I_D \geq 15$ se ha utilizado la ecuación (Jamiołkowski et al., 1985):

$$I_D = -131 + 66 \log \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{v0}}} \quad (5)$$

siendo σ'_{v0} la tensión efectiva vertical inicial. Al ser la fórmula no dimensional, todas las tensiones deben expresarse en kilopascales.

El coeficiente de permeabilidad se ha hallado también a partir del índice de comportamiento del suelo, por medio de las ecuaciones que se indican a continuación (Robertson, 2010 b).

$$\text{Para } 1,0 < I_{SBT} \leq 3,27 \quad k(m/s) = 10^{0,952 - 3,04 \cdot I_{SBT}} \quad (6)$$

$$\text{Para } 3,27 < I_{SBT} < 4,0 \quad k(m/s) = 10^{-4,52 - 1,37 \cdot I_{SBT}} \quad (7)$$

El **módulo de deformación** en arenas normalmente consolidadas se ha hallado por medio de la ecuación (v. Schmertmann, 1970; Meigh, 1987):

$$E = 2 q_c \quad (8)$$

En arenas sobreconsolidadas:

$$E > 4 q_c \quad (9)$$

En los suelos calificados como limo/arena, el módulo edométrico se ha obtenido en función del de elasticidad utilizando la conocida ecuación:

$$E_{oed} = E (1-\nu) / (1-\nu-2\nu^2) \quad (10)$$

Para arcillas y limos el módulo edométrico puede hallarse por medio de la ecuación:

$$E_{oed} = \alpha q_c \quad (11)$$

Los valores de α se pueden obtener a partir de la Tabla 3, dada por Sanglerat (1979). Dado el amplio abanico que el autor presenta en los valores de α , se comprende que la determinación del módulo edométrico en arcillas y limos no se puede realizar con precisión

En los suelos calificados como limo/arcilla, el módulo de elasticidad se ha obtenido en función del edométrico utilizando la conocida ecuación derivada de la teoría de la Elasticidad:

$$E = E_{oed} (1-\nu-2\nu^2) / (1-\nu) \quad (12)$$

con $\nu = 0,3$

El ángulo de rozamiento interno para arenas cuarcíferas normalmente consolidadas ($R_f \sim 0,5\%$), se obtiene a partir del gráfico de la Figura 3, en función de la presión efectiva y de la resistencia por la punta del cono (Durgunoglu y Mitchell, 1975). Como puede verse en dicha figura, las curvas para ángulo de rozamiento constante son, en realidad, líneas rectas. Por ello hemos situado los valores deducidos de dicho gráfico en la Figura 4. Puede verse que existe prácticamente una relación lineal entre Φ' y q_c / σ'_{v0} . La recta de regresión es:

$$\Phi' = 17,25 + 10,76 \log \frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \quad (13)$$

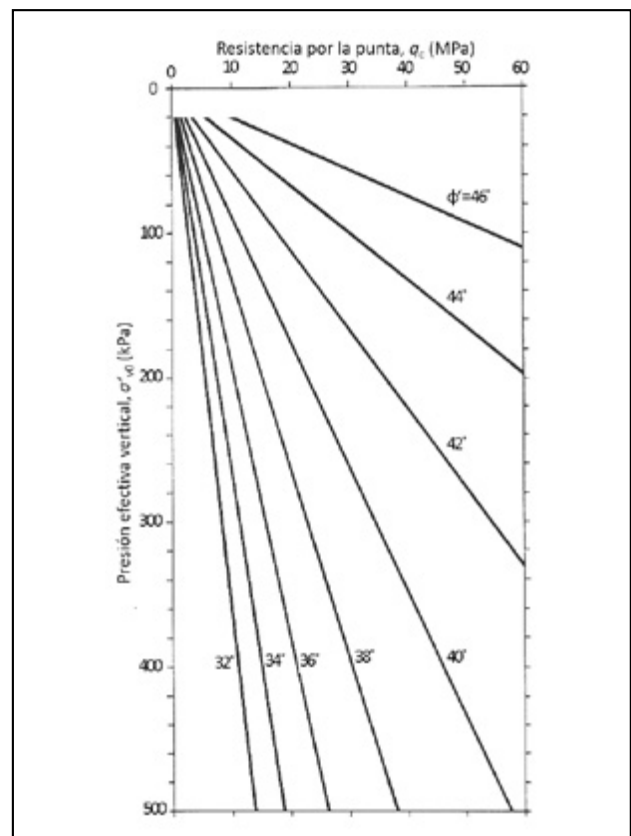


Figura 3. Correlación entre la resistencia por la punta del cono, la presión efectiva vertical inicial y el ángulo de rozamiento interno (Durgunoglu y Mitchell, 1975). Arenas de cuarzo no cementadas. Cortesía de la ASCE.

Con un coeficiente de correlación, R , tan alto como 0,994.

Aunque estas correlaciones se han hallado en arenas, las hemos aplicado también a arcillas.

Para arenas carbonatadas, más compresibles ($R_f \sim 3\%$), el gráfico predice de forma conservadora los ángulos de

rozamiento interno. Para arenas sobreconsolidadas, el gráfico puede sobreestimar ligeramente el ángulo de fricción.

Utilizando todas estas correlaciones encontramos que en el material de las Viñas alternan capas de limos arcillosos y arcillas limosas, de firmes a duras, y de arena limosa y limo arenoso, de flojas a densas. En la Tabla 4 se resumen los valores de los parámetros para dicho material.

Tabla 4. Valores medios de las resistencias por punta y manguito de fricción, y parámetros obtenidos mediante correlaciones en el material de Las Viñas

CPTU	Espesor (m)	Tipo de suelo	q_c MPa	f_s kPa	R_f	I_D %	c_v m ² /s	c_u kPa	N_B g/20cm	k_v m/s	ϕ'	E_{oed} kPa	E kPa	Consistencia
CPTU1	4,56	Limo arcilloso-arcilla limosa	2,0	43	2,77	22,2		122	11	$2,4 \cdot 10^{-9}$	31,8°	3631	2698	muy firme
CPTU2	4,83	Limo arcilloso-arcilla limosa	2	27	1,61	36,0		87,0	8	10^{-8}	33,0°	2455	1800	firme
CPTU3	6,91	Limo arcilloso-arcilla limosa	3,8	80	3,2	70,3		113		$1,3 \cdot 10^{-8}$	34,7°	5677	4217	muy firme
CPTU4	7,27	Arena limosa-limo arenoso	5,9	119	2,5	67				$1,1 \cdot 10^{-7}$	38,0°	8970	6664	densa
CPTU6	4,89	Arena densa-arena arcillosa	23	403	2,8	88			4	$1,7 \cdot 10^{-6}$	43,0°	50812	37746	muy densa
CPTU7	3,43	Arena limosa-limo arenoso	10	190	2,2	74			7	$1,5 \cdot 10^{-6}$	41,6°	46544	34576	densa
Media ponderada	5,3	Arena limosa-limo arenoso	7,4	137	2,6	60,6		108	7	$4,5 \cdot 10^{-7}$	36,8°	16964	12598	densa
Sondeo	5,2	CL-ML					4,0E-06		43	$1,1 \cdot 10^{-8}$	26,2°	2099		

Tabla 5. Valores medios de las resistencias por punta y manguito de fricción, y parámetros obtenidos mediante correlaciones en los lodos

CPTU	Espesor (m)	Tipo de suelo	q_c MPa	f_s kPa	R_f	c_u kPa	c_v m ² /s	k_v m/s	c_h m ² /s	k_h m/s	ϕ'	E_{oed} kPa	E kPa	Consistencia
CPTU1	21,52	Arcilla-arcilla limosa	1,3	30	2,67	33,5		$3,7E-09$	$3,4E-05$	$8,4E-09$	24,8°	3356	2493	media
CPTU2	24,59	Limo arcilloso-arcilla limosa	0,70	3,8	0,42	23,0		$2,5E-08$	$1,8E-05$	$6,1E-08$	22,5°	2752	2021	blanda
CPTU3	10,51	Arcilla-arcilla limosa	0,44	12	2,7	9,3		$1,0E-09$	$3,8E-06$	$1,6E-08$	20,7°	2439	1812	muy blanda
CPTU7	8,62	Limo arcilloso-arcilla limosa	1,3	25	2,1	18		$1,6E-09$			23,0°	2206	1639	blanda
CPTU-1	1,09	Arcilla-arcilla orgánica	1,2	116	14	79		$3,3E-11$				646	480	rígida
CPTU-2	1,65	Arcilla-arcilla orgánica	1,2	120	17	82		$2,9E-11$				612	455	rígida
Media ponderada para todos los piezoconos		Arcilla-arcilla limosa	0,94	20,5	2,32	25,9		$1,1E-08$			23,0°	2740	2027	media
Media ponderada piezoconos nuevos	16,3	Arcilla-arcilla limosa	0,93	16	1,8	24		$1,1E-08$	$2,1E-05$	$3,3E-08$	23,0°	2829	2093	blanda
Sondeo	20,90	Limo arenoso (ML)					$1,5E-06$	$8,9E-10$			35,7	3822		
Ensayo de permeabilidad								$3,1E-07$						

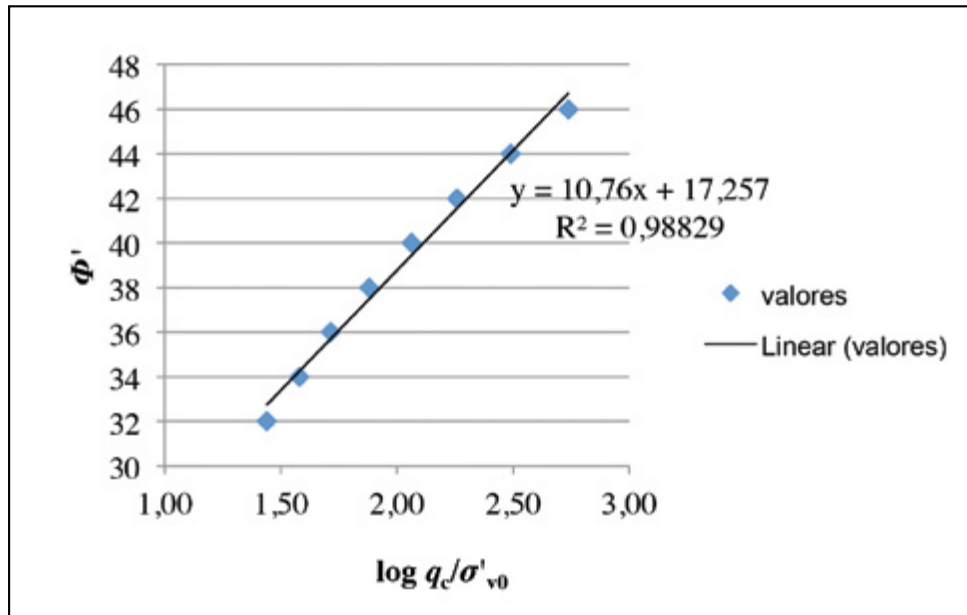


Figura 4. Ángulo de rozamiento interno en función de la resistencia por la punta del cono y la presión efectiva vertical.

Haciendo lo mismo para los lodos, encontramos que los lodos están formados por capas de limo arcilloso y arcilla limosa, de muy blandas a medias, intercaladas con capitas de arena, de muy flojas a densas. La Tabla 5 resume los valores para los lodos.

4. SONDEO

El 9 de agosto de 2012, es decir dos años después de la ejecución de los piezoconos, se ejecuta un sondeo, al lado del CPTU1 hasta 28,9 m de profundidad. El corte y los ensayos realizados en el sondeo se resumen en la Tabla 6. La Figura 5 muestra en su parte superior material de las Viñas hasta 8 m y lodos por debajo. La Figura 6 muestra la parte final de los lodos.

Cuando se realizó el sondeo se habían compactado encima del material de las Viñas 2,6 m de material de regularización y 20 cm de arcilla. El nivel freático apareció a 7 m de profundidad.

Razonando con las cotas, la cota superior del lodo es la 203,94 en el piezocono y la 203,66 en el sondeo, lo que nos da una diferencia de sólo 0,28 m. Suponiendo que el techo del lodo estuviese originalmente al mismo nivel en los emplazamientos del sondeo y del piezocono, esto nos daría un asiento de 28 cm en los dos años transcurridos entre la ejecución de los piezoconos y del sondeo.

Todas las muestras ensayadas de los lodos son limos arenosos (ML), con porcentajes de finos entre 96,3 y 99,1%, coincidiendo en este aspecto con la mayoría de las muestras de la Tabla 1 (excepto las dos de la cola del



Figura 5. Material de Las Viñas hasta 8 m de profundidad. De esta profundidad en adelante lodos.



Figura 6. Los lodos en la parte final del sondeo.

embalse). Sin embargo, aquí son no plásticos, mientras que en la Tabla 1 el índice de plasticidad oscila entre 0 y 15. La fracción de arcilla es del 13,5 %.

El sondeo se perfora el 9 de agosto de 2012. Los primeros ensayos se realizan el 7 de septiembre de 2012, pero se están realizando ensayos hasta el 2 de enero de 2013. Aunque las muestras se conservaron en cámara húmeda, cabe la posibilidad de que las últimas muestras ensayadas se secaran. En los lodos parece que hay una diferencia de consistencia a partir de 25 m de profundidad. Hasta esta profundidad la media de la humedad es del 23,3%, inferior a la del material de las Viñas (29,3%), lo que no se corresponde con el aspecto del terreno en la Figura 6, donde el material entre 15,60 y 20,00 m aparece muy blando. Estas humedades son muy inferiores a las de los lodos blandos de la Tabla 1 (con límite líquido del orden de 50), pero semejantes a las de las otras muestras de dicha tabla, con bajo índice de plasticidad. El material a partir de los 25 m aparece algo más consistente, con una humedad del 12,4%.

La densidad seca de los lodos es muy alta, probablemente debido a la presencia de metales pesados, 2050 kg/m³ hasta 25 m de profundidad y 2870 kg/m³ a partir de esta profundidad. El peso específico del suelo es de 22,3 kN/m³ en Las Viñas, 24,9 kN/m³ en los lodos hasta 25 m y de 31,1 kN/m³ en los lodos a partir de 25 m. Los lodos superficiales de límite líquido del orden de 50 de la Tabla 1 tienen densidades secas bajísimas (en realidad se trata de muestras alteradas) y la densidad seca de la muestra superficial del centro de la balsa de 1770 kg/m³.

Los parámetros efectivos de resistencia se ven menos afectados por la alteración de la muestra, y los valores obtenidos se pueden considerar razonables.

Según se muestra en la Tabla 6, el módulo edométrico calculado en ensayos de corte directo o en ensayos triaxiales crece fuertemente con la presión, sobre todo en los lodos. Los valores de los índices de compresión de dicha Tabla se aproximan a los obtenidos para suelos españoles mediante la ecuación (Jiménez Salas y Justo, 1975):

$$C_c = 0,99w^{1,315} \quad (14)$$

En el material de Las Viñas, la presión de preconsolidación está por encima de la presión efectiva actual, lo que puede deberse al efecto de la compactación y a que todas las muestras inalteradas se encuentran por encima del nivel freático.

En la parte superior de los lodos (profundidad 9,30 m) la presión de preconsolidación está muy por encima de la presión efectiva inicial de los lodos, y está próxima (algo por debajo) de la presión efectiva final bajo el peso del material de Las Viñas y el material de regularización. Esto indicaría que en este periodo de dos años los lodos superficiales se han consolidado bajo el peso del material supra yacente. En las muestras de 15,00 a 15,60, 26,00 a 26,60 y 27,40 a 27,94, la presión de preconsolidación calculada por el método de Casagrande es muy inferior a la presión vertical efectiva inicial, lo que nos lleva a considerar estas muestras como normalmente consolidadas; la diferencia se debe a la alteración de estas muestras (se trata de muestras parafinadas, ya que no se pudieron tomar muestras de pistón por falta de adherencia del suelo).

La variación del coeficiente de consolidación con la presión no es excesiva, por lo que se ha podido tomar un valor medio razonable.

El coeficiente de permeabilidad disminuye al aumentar la presión. Se ha procurado encontrar un valor medio correspondiente a su intervalo de presiones. Se realizó, en la célula Rowe, un ensayo de permeabilidad, que dio un coeficiente de permeabilidad de $3,1 \cdot 10^{-7}$ m/s, muy inferior a los obtenidos a partir de ensayos edométricos. Para poder dilucidar qué resultado es más válido, en el Apéndice 1 se ha hallado el coeficiente de permeabilidad en función de la granulometría. Se han obtenido dos valores, cuya media es $2,1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Así pues, se considera el ensayo de permeabilidad obtenido directamente en la célula Rowe como el más probable.

El índice de poros inicial es, curiosamente, muy superior en el material de las Viñas, seguido del de los lodos hasta 25 m, y más bajo en los lodos a partir de los 25 m.

Tabla 6. Corte del sondeo y propiedades medias de las capas

Profundidad tramo (m)	Descripción del suelo	Golpes MI	Recuperación (cm)	T. 0,08 mm	w_L	I_p	USCS	Arcilla %	pH	w (%)	ρ_s (kg/m ³)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ'
0-0,2	Hasta 0,2 m			76,7	39,7	18,3	CL		3,5					
0,2-2,8	Regularización	17	30	31,7	28,7	8,75	SM		5,5	8,6				
2,8-8,0	Las Viñas	43	60	59,8	26,1	4,3	CL-ML		3,9	29,3	1760	22,3	32	26,2
8,0-28,9	Lodos		58,5	98,3	NP	NP	ML	13,5	5,5	16,5	2560	28,8	8,8	35,7
8,0-25,0	Lodos hasta 25 m		60	98,3	NP	NP	ML	13,5	5,5	23,3	2050	24,9	3,5	36,9
25,0-27,94	Lodos desde 25 m		57							12,4	2870	31,1	11,4	35,1
>27,94	Roca descompuesta													

Tabla 6. Corte del sondeo y propiedades medias de las capas (Cont.)

Profundidad tramo (m)	E_{oed} (kPa)			c_v (m ² /s)	k_v (m/s)	e_0	Edómetro			Cota techo (m)
	$\sigma'_v=100$ kPa	$\sigma'_v=200$ kPa	$\sigma'_v=300$ kPa				σ'_p (kPa)	C_c	C_s	
0-0,2										211,66
0,2-2,8										211,46
2,8-8,0	1993		2205	4,0E-06	5,9E-09	1,23	179	0,150	0,024	208,86
8,0-28,9	2365	3582	5518	1,5E-06	8,9E-10	0,58	126	0,099	0,010	203,66
8,0-25,0	1797	2621	8040	1,8E-06	4,2E-09	0,83	110	0,161	0,013	203,66
25,0-27,94	2920	4199	5117	1,4E-06	6,8E-10	0,41	138	0,059	0,007	186,66
>27,94										183,72

5. COMPARACIÓN ENTRE LAS CORRELACIONES DEL PIEZOCONO Y LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL SONDEO

Se han tabulado, por un lado los resultados medios de los distintos parámetros obtenidos mediante correlaciones en los piezoconos (Tablas 4 y 5), y, por otro lado, los resultados de los ensayos realizados a las muestras del sondeo (Tabla 6).

En los piezoconos se han distinguido las capas de limo arcilloso/arcilla limosa por un lado, la de arena limosa/limo arenoso por otro, y finalmente el conjunto (Tablas 4 y 5). Para hallar la calificación conjunta, se han hallado las medias ponderadas de todas las propiedades en relación a su espesor.

El material de las Viñas merece el calificativo conjunto de limo arcilloso a arcilla limosa (de firme a muy firme) en los CPTU1 a CPTU3, el de arena limosa a limo arenoso (densos) en los CPTU4 y CPTU7bis, y el de arena densa a arena arcillosa en el CPTU6 (muy densa).

Los lodos, por lo que respecta a las capas de limo arcilloso/arcilla limosa, son de muy blandos a blandos en los CPTU2, CPTU3 y CPTU7bis, y de consistencia media en el CPTU1. La capa de arena es muy floja en el CPTU 2, de compacidad media en el CPTU1 y densa en el CPTU7bis. Por lo que respecta al conjunto, es muy blando en el CPTU3, blando en CPTU 2 y CPTU7bis y de consistencia media en CPTU1.

5.1. Identificación

Comparando ahora con los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en el sondeo, se pueden hacer los comentarios que se indican a continuación.

En el material de Las Viñas (Tabla 4), la calificación media obtenida con los valores de las resistencias por punta y fuste en los piezoconos (v. Fig. 2) es de arena limosa a limo arenoso. Por el contrario la calificación media en el sondeo es CL-ML, si bien es cierto que el material que pasa por el tamiz de 0,08 mm es sólo del 59,8%,

y que si fuera inferior al 50% recibiría la calificación de arcilla limosa. Además en el CPTU1, próximo al sondeo, la calificación es de limo arcilloso-arcilla limosa, coincidente con la de dicho sondeo.

Los ensayos granulométricos y de límites de Atterberg en el sondeo indican que el lodo es un limo arenoso (ML) sin plasticidad. Las capitas de arena, de espesor entre 6 y 49 cm, no se detectan de forma específica en el sondeo, y el conjunto del material en dicho sondeo no merece el calificativo de arcilla/arcilla limosa como indican los parámetros del CPTU1.

5.2. Coeficientes de permeabilidad

Los coeficientes de permeabilidad deducidos de los ensayos edométricos en el sondeo dan valores entre uno y dos órdenes de magnitud inferiores a los que se deducen de correlaciones en los piezoconos. A su vez el valor deducido de un ensayo de permeabilidad directo, realizado en los lodos, ha dado un valor un orden de permeabilidad superior al deducido de los piezoconos. Los valores correspondientes se comparan en la Tabla 7.

Tabla 7. Coeficientes de permeabilidad (m/s)

Suelo	Piezoconos		Ensayos de consolidación k_v	Ensayo de permeabilidad k_v	Media geométrica k_v
	k_v	k_h			
Lodos	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$
Material de las Viñas	$4,5 \cdot 10^{-7}$		$5,9 \cdot 10^{-9}$		$5,2 \cdot 10^{-8}$

En el material de Las Viñas se considera más fiable el valor deducido de los piezoconos, ya que la muestra para ensayos de laboratorio corresponde con seguridad a la parte más cohesiva.

5.3. Ángulo de rozamiento interno

El ángulo de rozamiento obtenido en los ensayos de corte directo es superior al deducido de correlaciones en los piezoconos en los lodos, e inferior en el material de Las Viñas. La Tabla 8 compara los valores del ángulo de rozamiento interno deducido de los ensayos en el sondeo, de las correlaciones de los piezoconos y de las ecuaciones que se indican a continuación (Jiménez Salas y Justo, 1975).

Tabla 8. Valores de Φ' (grados sexagesimales)

Suelo	Origen			Media
	Piezoconos	Ensayos de laboratorio	Correlaciones con I_p	
Lodos	23,0	35,7	34,9	31,2
Material de las Viñas	36,8	26,2	33,9	32,3

Para suelos inalterados:

$$\Phi' = 34,9 - 0,338 I_p \quad (15)$$

Para suelos compactados:

$$\Phi' = 36,3 - 0,567 I_p \quad (17)$$

En el material de Las Viñas se considera más fiable el valor deducido de los piezoconos, ya que la muestra para ensayos de laboratorio corresponde con seguridad a la parte más cohesiva.

5.4. Módulos y ensayos edométricos

La Tabla 9 compara los módulos edométricos. En el material de Las Viñas, los valores deducidos de los piezoconos son 15 veces superiores a los obtenidos en los ensayos edométricos. Por el contrario en los lodos, los valores deducidos de los piezoconos son algo inferiores a los deducidos de los ensayos edométricos.

Tabla 10 representa los módulos de deformación. En el material de Las Viñas, los valores deducidos de los golpes con DPSH son bajos, porque dichos golpes se realizaron en las capas superficiales, antes de ejecutar los piezoconos. Se ha intentado encontrar una correlación con los golpes realizados en las muestras inalteradas, que dan valores más altos.

Tabla 9. Módulos edométricos (kPa)

Suelo	Origen		
	Piezoconos	Ensayos de laboratorio	Media aritmética
Lodos	2740	3822	3281
Material de las Viñas	16964	2099	9532

Tabla 10. Módulos de deformación (kPa)

Suelo	Origen		
	Piezoconos	Golpesos MI	Golpesos N_b
Lodos	2027		
Material de las Viñas	12598	17200	2800
Material de regularización		13600	

Tabla 11. Coeficientes de consolidación (m^2/s)

Suelo	Origen	
	Piezoconos (c_h)	Ensayos de consolidación (c_v)
Lodos	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Material de las Viñas		$4 \cdot 10^{-6}$

La Tabla 11 muestra los coeficientes de consolidación para flujo vertical y horizontal deducidos de los ensayos edométricos y de los ensayos de disipación en piezoconos respectivamente. En los lodos este último valor es mucho más alto, lo que es lógico por tratarse de un parámetro para flujo horizontal en un suelo que tiene capitas de material permeable.

6. PARÁMETROS DE CÁLCULO

Los parámetros de cálculo seleccionados se resumen en la Tabla 12. Para las 6 primeras columnas y el peso específico del suelo se han tomado los datos del sondeo (v. Tabla 6). Para los valores de la cohesión sin drenaje se han tomado los valores deducidos de las correlaciones con los parámetros de los piezoconos (v. Tablas 4 y 5). Para los parámetros efectivos

Tabla 12. Parámetros de cálculo

Tipo de suelo	N (MI) g/20cm	T 0,08 %	USCS	w _L	I _p	C _u kPa	C' kPa	Φ'	γ kN/m ³	k _v m/s	k _v m/día	pH	k _h m/s
Arcilla limosa ocre		76,7	CL	39,7	18,3				20			3,5	
Material de regularización	17	31,7	SM	28,7	8,8		2	30°	20			5,5	
Las Viñas	43	59,8	CL-ML	26,1	4,3	108	32 1	26° 33°	22,3	5·10 ⁻⁷	0,043	3,9	
Lodos hasta 25 m		98,3	ML	NP	NP		3,5	31°	24,9	7·10 ⁻⁸	0,006	5,5	3,3·10 ⁻⁸
Lodos desde 25 m							11	31°	31,1	10 ⁻⁸	0,0009		3,3·10 ⁻⁸
Lodos		98,3	ML	NP	NP	24	8,8 1	31° 35°	28,8	1,4·10 ⁻⁸	0,0012	5,5	3,3·10 ⁻⁸

Tabla 12. Parámetros de cálculo (Cont.)

Tipo de suelo	E MPa	E _{oed} MPa	C _v m ² /s	C _h m ² /s	w %	C _c	C _s
Arcilla limosa ocre							
Material de regularización	13,6	18,3			8,6		
Las Viñas	12,6	17,0	4·10 ⁻⁶		29,3	0,15	0,024
Lodos hasta 25 m	2,0	2,7	1,8·10 ⁻⁶	2,1·10 ⁻⁵	23,3	0,16	0,013
Lodos desde 25 m	2,0	3,8	1,4·10 ⁻⁶	2,1·10 ⁻⁵	12,4	0,06	0,007
Lodos	2,0	3,3	1,5·10 ⁻⁶	2,1·10 ⁻⁵	16,5		

se han considerado por un lado los ensayos de corte directo y por otro lado las medias de la Tabla 8. Para el coeficiente de permeabilidad se han tenido en cuenta, entre otras cosas las medias de la Tabla 7. Para los módulos los valores de las Tablas 9 y 10. Para los coeficientes de consolidación los valores de la Tabla 11, y para los índices de compresión y de hinchamiento los valores de la Tabla 6.

7. CÁLCULO DE ASIENTOS

Se supone el nivel freático a 7 m de profundidad, medido en el sondeo.

Se ha realizado el cálculo en el emplazamiento del sondeo en el Apéndice n° 2. Se han efectuado dos cálculos utilizando o bien los módulos edométricos o los valores de C_c y C_s. Los resultados se resumen en la Tabla 13. Con ambos parámetros el asiento principal se produce en la capa superior de lodos desde 8 hasta 25 m, seguido del asiento de la capa inferior de

lodos, desde 25 hasta 27,94 m. El asiento calculado en función del módulo edométrico es mucho mayor.

Tabla 13. Asientos parciales y totales (m) calculados con dos parámetros distintos

Capa	Parámetro de cálculo	
	E _{oed}	C _c y C _s
Regularización	0,0043 m	0,0043 m
Las Viñas hasta 7 m	0,0254 m	0,0154 m
Las Viñas 7-8 m	0,010 m	0,0154 m
Lodos hasta 25 m	1,020 m	0,5317 m
Lodos desde 25 m	0,1662 m	0,0296 m
Asiento total	1,265 m	0,596 m

8. CONCLUSIONES

El piezocono ha sido considerado hasta ahora como un ensayo in situ de gran calidad del que pueden obtenerse

por correlación la mayoría de los parámetros del suelo. Estos parámetros se han comparado con los ensayos de laboratorio realizados sobre un sondeo próximo a uno de los piezoconos. Sin negar el valor de este ensayo in situ, puede decirse que las correlaciones del piezocono son, en muchos casos, bastante diferentes a las obtenidas en el sondeo. Excepto en lo que respecta a la identificación, esto no quiere decir que necesariamente los ensayos de laboratorio sean más acertados, pues, por ejemplo, existe una tendencia a ensayar los materiales más arcillosos, ya que no es fácil obtener muestras inalteradas de los granulares. También las muestras de sondeo pueden desecarse si se tarda mucho en ensayarlas. Todo esto ha hecho que el asiento obtenido utilizando el módulo edométrico como parámetro de cálculo (de ensayos piezométricos y de laboratorio) sea el doble que el obtenido con los índices de compresión y de hinchamiento.

Por otro lado las diferentes auscultaciones realizadas señalan la heterogeneidad de los lodos, que pueden oscilar entre lodo arenoso (ML) no plástico, limo de alto límite líquido (MH) y arcilla limosa (CL). Esto se debe a las diferentes condiciones de deposición.

9. RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del Proyecto de Investigación BIA 2010-2377 del Ministerio de Economía y Competitividad.

10. REFERENCIAS

- Durgunoglu, M.J. y Mitchell, J.K. (1975). "Static penetration resistance of soils. Proc. Conf. on In-situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Raleigh (N. Carolina), June 1975, Vol. 1, 151-188.
- Hatch, T. (1933). "Determination of average particle size from the screen analysis of non-uniform particulate substances". J. Franklin Institute, 215: 27-37
- Jamiolkowsky, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T., Lancellotta, R. (1985). "New developments in the field and in laboratory testing of soils". Theme lecture. 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng., San Francisco, 1: 57-153.
- Jiménez salas, J.A. y Justo, J.L. (1975). Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los Suelos y de las Rocas". Rueda, Madrid.
- Justo, J.L., Durand, P., Jiménez, F.A. y Vázquez, M. (2012). "La clausura seca de la presa de recursos mineros de Almagrera" Ingeniería Civil, Cedex. ISSN 0213-8468, 93-100.
- Loudon, A.G. (1953). "The computation of permeability from simple soil tests". Géotechnique, 3: 165-183
- Meigh, A.C. (1987). "Cone penetration testing, methods and interpretation". CIRIA Ground Engineering Report: In-situ Testing, Butterworths.
- Robertson, P.K. (2010 a). "Soil behaviour type from the CPT: an update". 2nd Int. Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May, CPT'10.
- Robertson, P.K. (2010 b). "Estimating in-situ permeability from CPT & CPTu". 2nd Int. Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May, CPT'10.
- Robertson, P.K. y Campanella, R.G. (1983). "Interpretation of cone penetration tests. Part I: sand". Canadian Geotechnical J., 20: 718-733).
- Sanglerat, G. (1979). "The Penetrometer and Soil Exploration". Elsevier, Amsterdam, 2ª edición.

Schmertmann, J.H. (1970). "Static cone to compute static settlement over sand". J. Soil Mech. & foundations Div., ASCE, 96: SM3: 1011-1043.

APÉNDICE 1. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE LOS LODOS UTILIZANDO LA CURVA GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTACIÓN

Se utiliza la fórmula de Loudon (1953):

$$\log_{10} (k S^2) = 1,365 + 5,15 n \quad (1)$$

siendo n la porosidad, S la superficie específica en $1/\text{cm}$ y k el coeficiente de permeabilidad en cm/s .

Para curvas granulométricas de distribución logarítmica normal, el valor de S se obtiene más fácilmente mediante la fórmula:

$$S = f \cdot 6/D_s \quad (2)$$

siendo f un coeficiente que depende de la forma de las partículas, D_s , el diámetro de la partícula con igual superficie específica que el conjunto, que viene dado por la fórmula (Hatch, 1933):

$$\log_{10} D_s = \log_{10} D_{50} - 1,1513 \log_{10}^2 (D_{50}/D_{15,87}) \quad (3)$$

siendo $D_{15,87}$ el diámetro correspondiente al 15,87% de la curva granulométrica

Muestra de 15,00 a 15,60:

$$D_{50} = 0,033 \text{ mm}$$

$$D_{15,87} = 0,0033 \text{ mm}$$

$$D_s = 0,0023 \text{ mm} = 0,00023 \text{ cm} = D_{13,3}$$

La superficie específica, según la ecuación (2) es:

$$S = f \cdot 6/D_s = 1,4 \cdot 6/0,00023 = 36521,7 \text{ } 1/\text{cm}$$

$$e_0 = 0,98 \quad n = e_0/(1+e_0) = 0,49$$

La ecuación (1) nos da:

$$\log_{10} (k S^2) = 3,889$$

$$k = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s} = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

Muestra a 20 m:

$$D_{50} = 0,01 \text{ mm}$$

$$D_{15,87} = 0,0035 \text{ mm}$$

$$D_s = 0,0058 \text{ mm} = 0,00058 \text{ cm} = D_{23,5}$$

La superficie específica, según la ecuación (2) es:

$$S = f \cdot 6/D_s = 1,4 \cdot 6/0,00058 = 14482,8 \text{ } 1/\text{cm}$$

Suponemos que la porosidad es la de la muestra anterior: $n=0,49$

La ecuación (1) nos da:

$$\log_{10}(k \text{ S}^2)=1,365+5,15 \cdot 0,49$$

$$k=3,7 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}=3,7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$$

APÉNDICE 2. CÁLCULO DE ASIENTOS

1. Asiento con los módulos edométricos

1.1. Asiento de la capa de regularización

$$\Delta\sigma=2,8 \cdot 20/2=28 \text{ kPa}$$

$$s=\Delta\sigma \cdot 2,8/E_{\text{sed}}=0,0043 \text{ m}$$

1.2. Asiento de la capa de Las Viñas hasta 7 m

$$\Delta\sigma=2,8 \cdot 20 + (7-2,8) \cdot 22,3/2=56+46,83=102,83 \text{ kPa}$$

$$s=\Delta\sigma \cdot (7-2,8)/E_{\text{sed}}=0,0254 \text{ m}$$

1.3. Asiento de la capa de Las Viñas de 7 a 8 m

$$\Delta\sigma=2,8 \cdot 20 + (7-2,8) \cdot 22,3+1 \cdot 12,3/2=56+93,66+=167,66 \text{ kPa}$$

$$s=\Delta\sigma \cdot (8-7)/E_{\text{sed}}=0,010 \text{ m}$$

1.4. Asiento de la capa de lodos hasta 25 m

$$\Delta\sigma=2,8 \cdot 20 + 4,2 \cdot 22,3+1 \cdot 12,3=56+93,66+12,3=161,96 \text{ kPa}$$

$$s=\Delta\sigma \cdot (25-8)/E_{\text{sed}}=1,020 \text{ m}$$

1.5. Asiento de la capa de lodos desde 25 m

$$\Delta\sigma=2,8 \cdot 20 + 4,2 \cdot 22,3+1 \cdot 12,3=56+93,66+12,3=161,96 \text{ kPa}$$

$$s=\Delta\sigma \cdot (28,9-25)/E_{\text{sed}}=0,1662 \text{ m}$$

1.6. Asiento total

$$s=0,0043+0,0254+0,010+1,020+0,1662=1,265 \text{ m}$$

2. ASIENTOS CON C_c Y C_s

2.1. Asiento de la capa de Las Viñas hasta 7 m

$$\sigma'_0=4,2 \cdot 22,3/2=46,83 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_f=2,8 \cdot 20 + (7-2,8) \cdot 22,3/2=56+46,83=102,83 \text{ kPa}$$

$$s=\frac{\Delta H}{1+e_0} C_s \cdot \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_0} =$$

$$=\frac{7-2,8}{1+1,231} 0,024 \cdot \log \frac{102,83}{46,83} = 0,0154 \text{ m}$$

2.2. Asiento de la capa de Las Viñas de 7 a 8 m

$$\sigma'_0=1 \cdot 12,3/2=6,15 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_f=2,8 \cdot 20 + (7-2,8) \cdot 22,3+1 \cdot 12,3/2=56+93,66+6,15=167,66 \text{ kPa}$$

$$s=\frac{\Delta H}{1+e_0} C_s \cdot \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_0} =$$

$$=\frac{1}{1+1,231} 0,024 \cdot \log \frac{167,66}{6,15} = 0,0154 \text{ m}$$

2.3. Asiento de la capa de lodos hasta 25 m

$$\sigma'_0=(25-8) \cdot 14,9/2=126,65 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_f=2,8 \cdot 20 + 4,2 \cdot 22,3+1 \cdot 12,3+(25-8) \cdot 14,9/2=56+93,66+12,3+126,65=288,61 \text{ kPa}$$

$$s=\frac{\Delta H}{1+e_0} C_c \cdot \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_0} =$$

$$=\frac{25-8}{1+0,83} 0,16 \cdot \log \frac{288,61}{126,65} = 0,5317 \text{ m}$$

2.4. Asiento de la capa de lodos desde 25 m

$$\sigma'_0=(25-8) \cdot 14,9+ (28,9-25) \cdot 21,1/2=294,445 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_f=2,8 \cdot 20 + 4,2 \cdot 22,3+1 \cdot 12,3+(25-8) \cdot 14,9+(28,9-25) \cdot 21,1/2=56+93,66+12,3+253,33+41,145=444,105 \text{ kPa}$$

$$s=\frac{\Delta H}{1+e_0} C_c \cdot \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_0} =$$

$$=\frac{28,9-25}{1+0,41} 0,06 \cdot \log \frac{444,105}{294,445} = 0,0296 \text{ m}$$

2.5. Asiento total

$$s=0,0043+++0,596 \text{ m}$$



Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión. R-13

Luis Balairón Pérez

ISBN: 978-84-7790-492-2

AÑO: 2009

P.V.P.: 40€

La “Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión” es el resultado de un trabajo realizado en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX por encargo de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente. Tiene por objeto compilar la normativa y reglamentación vigente sobre la materia, así como establecer unos criterios generales en lo relativo al proyecto, instalación y mantenimiento de tuberías para el transporte de agua a presión, independientemente de cual sea su destino final (abastecimientos, regadíos, etc).



Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano.(3era. edición). R-17

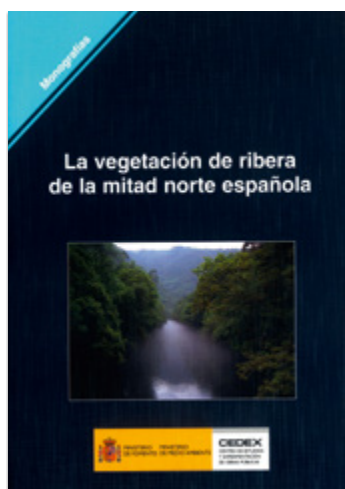
Varios

ISBN: 978-84-7790-491-5

AÑO: 2009

P.V.P.: 48€

La Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano es un documento cuyo objetivo es ordenar el estado del arte en la materia y servir de guía al usuario de las redes de saneamiento y drenaje en la aplicación de la muy abundante e inconexa normativa al respecto. El ámbito de aplicación es de las redes de saneamiento y drenaje, independientemente de cuál sea su funcionamiento hidráulico (en lámina libre, bajo presión o por vacío), o su concepción (unitarias o separativas). Quedan excluidos expresamente los emisarios submarinos y las estaciones depuradoras. Tampoco son objeto de la guía las instalaciones de recolección de las aguas residuales y pluviales en el interior de los edificios, ni las conducciones de drenaje de las obras lineales.



La vegetación de ribera de la mitad norte española. M-81

Francisco Lara, Ricardo Garilletei y Juan Antonio Calleja

ISBN: 84-7790-407-3

AÑO: 2004

P.V.P.: 50€

Esta obra representa una síntesis novedosa y exhaustiva sobre los bosques y matorrales de los cursos de agua de las cuencas del Ebro, Norte, Internas de Cataluña y tercio oriental de la del Tago. Se basa en el estudio de campo de más de 500 tramos seleccionados de ríos y se complementa con una extensa base de datos bibliográfica. El empleo de una perspectiva territorial y ambiental amplia proporciona el criterio unificador que permite caracterizar las diferentes comunidades riparias. La obra pretende describir todos los tipos de formaciones vegetales leñosas, en términos de estructura y composición florística, parámetros ambientales bajo los que se desarrollan, variabilidad y distribución, así como determinar sus relaciones de sustitución espacial o temporal. La inclusión de numerosos esquemas, tablas, cuadros informativos e imágenes de plantas y comunidades enriquece la detallada información que se ofrece.