

**CRITERIOS PARA EL EMPOTRAMIENTO  
DE PILOTES EN ROCA  
BASADOS EN EL CONTROL DE EJECUCION**

**Octubre 2016**

## **PRESENTACIÓN**

Este documento ha sido preparado por un grupo de trabajo del Comité Técnico de AETESS compuesto inicialmente por Gustavo Armijo Palacio, Gerardo Marote Ramos y Leoncio Prieto Tercero, con colaboraciones posteriores de Svletana Melentijevic y de Eduardo Manzano Arroyo, en el período comprendido entre 2014 y 2017.

La información utilizada para prepararlo ha sido aportada por las empresas de AETESS, que han utilizado el procedimiento que en él aparece, en distintas obras con el objeto de ponerlo a punto y probar su eficacia.

Este documento está destinado principalmente a obras en las que se utilicen pilotadoras sin registrador de parámetros de perforación y, en consecuencia, se supone que éstas son utilizadas, durante la perforación en roca, con el par nominal.

En el futuro, se publicará otro documento similar, pero destinado a obras en las que se utilicen perforadoras con registrador de parámetros de perforación y, en consecuencia, se tendrán en cuenta, además de la velocidad de perforación, otros parámetros como la energía específica de perforación.

## Contenido

<b>1. OBJETO DEL DOCUMENTO .....</b>	<b>5</b>
<b>2. PROCEDIMIENTO .....</b>	<b>7</b>
<b>3. EJEMPLO DE APLICACIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. Información geotécnica .....</b>	<b>10</b>
<b>3.2. Cálculo de la longitud de empotramiento para cada tipo de roca. ....</b>	<b>11</b>
3.2.1. Dato resistencia a compresión simple: .....	11
3.2.2. Dato presión límite:.....	12
3.2.3. Diseño original: .....	12
<b>3.3. Velocidad de avance de la perforación.....</b>	<b>16</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>22</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>24</b>
<b>6. ANEJO 1: FORMULACIÓN CARGA DE HUNDIMIENTO DE PILOTES EN ROCA.....</b>	<b>1</b>
o <b>Formulación basada en la resistencia a compresión simple de la roca .....</b>	<b>3</b>
▪ <i>GCOC: Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera (2009).....</i>	<i>3</i>
▪ <i>ROM 05-05: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas (2005) .....</i>	<i>6</i>
▪ <i>CTE: Código Técnico de la Edificación (2007).....</i>	<i>8</i>
▪ <i>Comparación de las normativas.....</i>	<i>9</i>

o	<b>Formulación basada en ensayos presiométricos .....</b>	<b>12</b>
▪	<i>GCOC: Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera 2009.....</i>	<i>12</i>
▪	<i>ROM 0.5-05.....</i>	<i>13</i>
▪	<i>ROM 0.5-94.....</i>	<i>14</i>
▪	<i>CTE: Código Técnico de la Edificación (2006).....</i>	<i>14</i>
▪	<i>EC7: Eurocódigo 7 (2006).....</i>	<i>15</i>
▪	<i>Comparación de las normativas.....</i>	<i>17</i>
▪	<i>Aplicación al caso real.....</i>	<i>18</i>
<b>7.</b>	<b>ANEJO 2: ANÁLISIS DE EMPOTRAMIENTO EN ROCA. PARTE DE CONTROL.....</b>	<b>24</b>
<b>8.</b>	<b>ANEJO 3.....</b>	<b>27</b>
	<b>1. Caracterización del Flysch.....</b>	<b>27</b>
	<b>2. Justificación de los parámetros adoptados para resistencia de punta y fuste unitarios en el proyecto del ejemplo.....</b>	<b>28</b>

## 1. OBJETO DEL DOCUMENTO

La longitud de empotramiento en roca de pilotes in situ es un factor clave en el diseño y la ejecución de cimentaciones profundas. El proyecto de cimentación debe definir para cada tipología de roca, qué profundidad de empotramiento garantiza el coeficiente de seguridad necesario. Debido a que la información geotécnica existente es casi siempre limitada, resulta muy complicado conocer a priori las características del sustrato en las diferentes posiciones de los pilotes que forman la cimentación, lo que a menudo conlleva un diseño excesivamente conservador con longitudes elevadas de penetración en el macizo, mayores tiempos de perforación y un aumento considerable del coste de ejecución de la cimentación.

El presente documento propone un procedimiento de trabajo que permite la optimización de las longitudes de empotramiento en base al análisis de los datos de perforación de los pilotes. Cada perforación es un ensayo geotécnico a escala real, por lo que el registro de los parámetros de excavación complementa la información geotécnica disponible y constituye una herramienta fundamental para realizar una asignación de empotramientos más precisa.

Numerosos estudios de investigación coinciden en que el avance de la perforación en un sustrato rocoso es proporcional al par de rotación aplicado e inversamente proporcional al cuadrado del diámetro del pilote. El coeficiente de proporcionalidad  $K$  es función de varios parámetros, siendo el más importante de ellos la resistencia del macizo rocoso. Por lo tanto, para un equipo de perforación concreto definido por su par de rotación nominal, la medición de la velocidad de perforación de un pilote de un diámetro determinado nos permitirá calcular el parámetro  $K$  para cada tipología de roca.

El proceso de optimización que se plantea consiste, en primer lugar, en obtener los coeficientes  $K$  de las tipologías de roca consideradas en proyecto, siguiendo el procedimiento indicado en el párrafo anterior, y para ello se propone llevar a cabo el registro detallado de la perforación de los primeros pilotes de la obra (ubicados preferentemente en las zonas con una información geotécnica más detallada). En segundo lugar, y una vez definidos los valores de  $K$  para cada tipología de roca, la medición en cada pilote de la velocidad de perforación en

el empotramiento, determinará la variedad de roca existente en dicha localización y permitirá la aplicación de la longitud óptima de empotramiento.

En resumen, el objetivo del procedimiento es complementar y correlacionar la información geotécnica existente con los datos de perforación de los pilotes, para conseguir así una asignación de longitudes de empotramiento más racional y vinculada al terreno realmente existente en cada posición de pilote.

En los apartados siguientes se desarrolla el procedimiento descrito y se incluye un ejemplo práctico de aplicación. El documento contiene también dos anejos: el primero, con los métodos de cálculo de pilotes en roca recogidos en la normativa nacional, y el segundo, con los sistemas de toma de datos de perforación en obra, tanto manuales como automáticos.

## 2. PROCEDIMIENTO

Diferentes autores han llegado a la conclusión de que la velocidad de avance de una perforación es directamente proporcional al par de la máquina e inversamente proporcional al cuadrado del diámetro del pilote. Esta relación se muestra en la siguiente expresión:

$$V = \frac{K \times Par}{\Phi^2}$$

Donde:

- V = Velocidad de avance en metros/hora (m/h).
- K = Factor de correlación.
- Par= Par de la cabeza de rotación en toneladas\*metro (T.m).
- $\Phi$  = Diámetro del pilote en metros (m).

El coeficiente de correlación K podrá determinarse a partir de datos de perforación de pilotes, recogidos en obras ejecutadas con anterioridad que presenten un terreno similar al de proyecto. La información disponible deberá permitir la estimación de K en todas las tipologías de roca presentes en la obra que vamos a realizar.

El valor de K para cada tipología de roca se obtendrá según la siguiente expresión(1):

$$K_z = \frac{V_z \times \Phi^2}{Par}$$

Donde:

- Kz = Factor de correlación para el tipo de roca Z.
- Vz = Velocidad de avance de la perforación del pilote, en m/h, registrada en obras anteriores para la variedad de roca Z.
- Par= Par de la cabeza de rotación en T.m, del equipo de pilotes empleado.
- $\Phi$  = Diámetro del pilote en m.

En caso de que no se disponga de datos de obras anteriores similares, los primeros pilotes de la obra en cuestión se realizarán en posiciones cercanas a sondeos que permitan caracterizar a los distintos tipos de roca, midiendo la velocidad de avance en cada caso y calculando el coeficiente K para dicho terreno en función del par de rotación de la máquina y del diámetro de perforación.

Una vez obtenidos los valores de K, ya sea a partir de datos de obras previas o de los primeros pilotes ejecutados en la obra de referencia, se calculará para cada equipo que se vaya a utilizar, la velocidad de avance en cada variedad de roca para los diferentes diámetros contemplados, según la expresión (2):

$$V_{Z1} = \frac{K_Z \times Par}{\Phi_1^2}$$

Donde  $V_{Z1}$  es la velocidad de avance que tendrá un equipo de pilotes determinado, caracterizado por el par de rotación -Par-, en la variedad de roca Z, durante la perforación de un pilote de diámetro  $\Phi_1$ .

De esta forma, para cada equipo que se vaya a emplear en la obra se obtendrá una tabla de velocidades de avance, con el siguiente formato:

**TABLA DE VELOCIDADES DE AVANCE PARA UN EQUIPO DETERMINADO**

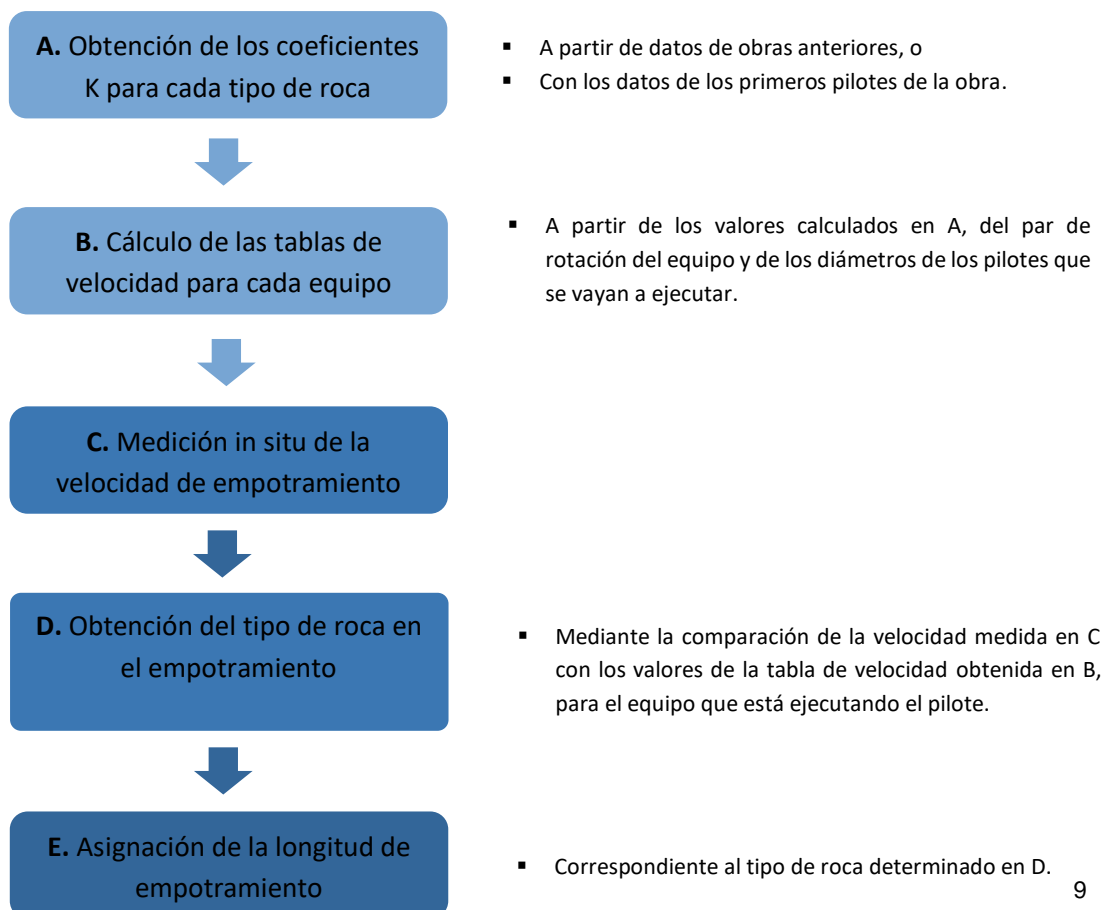
	Roca tipo X	Roca tipo Y	Roca tipo Z
Diámetro 1 (m)	$V_{X1}$	$V_{Y1}$	$V_{Z1}$
Diámetro 2 (m)	$V_{X2}$	$V_{Y2}$	$V_{Z2}$
Diámetro 3 (m)	$V_{X3}$	$V_{Y3}$	$V_{Z3}$

Una vez definidas las tablas de velocidades para cada equipo, la medición in situ de la velocidad de avance en el empotramiento de un pilote de un determinado diámetro, nos permitirá obtener la tipología de roca existente y, a partir de ella, el empotramiento necesario en base a las especificaciones de proyecto.



En resumen, el procedimiento descrito consta de los siguientes pasos:

- A. Determinación de los coeficientes de correlación K para todas las variedades de roca presentes en la obra, a partir de datos de proyectos anteriores o de la información de los primeros pilotes ejecutados en la obra en cuestión.
- B. Cálculo de las tablas de velocidad de penetración para cada equipo que vaya a utilizarse, definido por su par de rotación, considerando todas las tipologías de roca y diámetros del proyecto.
- C. Medición in situ de la velocidad de avance en el empotramiento de cada pilote.
- D. Obtención del tipo de roca en el que se está realizando el empotramiento, por comparación de la velocidad medida en el apartado C, con la tabla de velocidades indicada en B y correspondiente al equipo que se está empleando.
- E. Asignación de la longitud de empotramiento definida en proyecto para la variedad de roca obtenida en el punto D.



### 3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Como ejemplo se va a utilizar los datos de un informe de una obra de pilotes in situ de una empresa de AETESS.

#### 3.1. Información geotécnica

En una zona portuaria se van a realizar unos pilotes empotrados en un sustrato terciario variable como el Flysch, que es una formación de arcilla margosa con niveles intercalados de arenisca y caliza margosa. El Flysch se encuentra bajo unos rellenos de potencia entre 14-20 m.

Tras haber realizado los sondeos de reconocimiento descritos en la campaña de reconocimiento geotécnico y en función de los resultados de los ensayos presiométricos podemos clasificar el Flysch en 3 categorías.

**Flysch F-1:** Arcilla margosa con intercalaciones esporádicas de arenisca y caliza, de espesor centimétrico a decimétrico.

**Flysch F-2:** Arcilla margosa con frecuentes intercalaciones de arenisca y caliza, de espesor decimétrico.

**Flysch F-3:** Abundantes intercalaciones rocosas de arenisca y caliza de espesor decimétrico a métrico.

Realizamos una clasificación numérica en función de la presión límite de cada Flysch:

**TABLA 1 CLASIFICACIÓN FLYSCH EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN LÍMITE**

Tipo de flysch	Presión Límite (MPa)	Valores medios adoptados para la presión límite (MPa)
F1	2,5 a 5,0	3,3
F2	5,0 a 10,0	6,5
F3	10,0 a >22,0	15,0

En el Anejo 3, apartado **0 1. Caracterización del Flysch** puede verse los datos para la obtención de la **Tabla 1**.

### **3.2. Cálculo de la longitud de empotramiento para cada tipo de roca.**

Una vez establecidos los rangos de variación de la resistencia a compresión simple de la roca o de la presión límite del ensayo presiométrico, debemos evaluar la carga de hundimiento del pilote, dependiendo de la profundidad de empotramiento y características de la roca en la que se empotre. De este modo, si tenemos una roca de mejores características en las capas superiores, puede ser que empotramientos menores sean suficientes y no sea necesario realizar un empotramiento a cotas inferiores.

En este apartado debemos obtener una tabla con las cargas admisibles en escalones de un metro de empotramiento. Se comprobará si en todos los puntos se consigue la resistencia mínima necesaria.

Dependiendo si nuestro dato de partida es la resistencia a compresión simple o la presión límite del presiómetro utilizaremos la formulación correspondiente, para calcular la resistencia unitaria por punta del pilote en roca en función de la longitud empotrada en ella.

#### *3.2.1. Dato resistencia a compresión simple:*

Si los datos que tenemos del sustrato rocoso es la resistencia a compresión simple y de acuerdo con el artículo 3.6.4.6. de la ROM 0.5-05 del Ministerio de Fomento, utilizaremos la formulación descrita en el apartado correspondiente del Anejo 1.

### 3.2.2. Dato presión límite:

En caso de tener como datos de partida La presión límite mediante el ensayo del presiómetro debemos usar la formulación de la ROM 05-94 Artículo 3.6.4.5, descrita en el Anejo 1.

### 3.2.3. Diseño original:

En el proyecto de nuestro ejemplo se establece que el empotramiento necesario para asegurar la estabilidad de los pilotes es de 6 m.

Con el fin de realizar una comprobación del cálculo se adoptan los siguientes valores, correspondientes a la arcilla margosa del flysch, que es considerada una roca blanda:

- Resistencia por fuste:  $\tau_f = 0,17$  Mpa
- Resistencia por punta:  $q_p = 12$  Mpa

Estos valores se justifican en el Anejo 3, apartado 2.

Además, con criterio conservador, no se considera la aportación a la resistencia por fuste proporcionada por unos rellenos antrópicos, situados por encima del flysch.

La resistencia admisible frente a hundimiento del pilote viene dada por la expresión:

$$R_{adm} = q_p * A_p \frac{1}{\gamma_p} + \tau_f * A_f \frac{1}{\gamma_f} \quad (3)$$

$q_p$  = resistencia unitaria por la punta.

$A_p$  = área de la punta. Para  $\varnothing = 1.00$  m,  $A_p = 0.785$  m<sup>2</sup>

$\tau_f$  = resistencia unitaria por el fuste.

$A_f$  = superficie del fuste del pilote. Para  $\varnothing = 1.00$  m y  $l_{emp} = 6.00$  m,  $A_f = 18.85$  m<sup>2</sup>

$\gamma_p$  = coeficiente de minoración de la resistencia por punta = 3.0

$\gamma_f$  = coeficiente de minoración de la resistencia por fuste = 2.5

Sustituyendo los valores de resistencia unitaria:

$$R_{adm} = 3142 + 1280 = 4422 \text{ kN}$$

Según este resultado, el pilote transmite por punta el 71% de la carga, mientras que el fuste deberá absorber el 29% restante.

Dado que la carga de trabajo del pilote es de 4400 kN, se concluye que el empotramiento de 6.00 m considerado es adecuado según las resistencias unitarias adoptadas.

En nuestro caso partimos de los datos del presiómetro y de acuerdo con el artículo 3.6.4.5. de la ROM 0.5-94 del Ministerio de Fomento, la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) en un pilote a partir del resultado de los ensayos presiométricos vendría dado por:

$$q_p = \left(0,8 + \frac{L}{D}\right) * p_d \leq 5 * p_d \tag{4}$$
$$q_p = \left(0,8 + \frac{L}{D}\right) * p_d \leq 5 * p_d$$

donde,

$q_p$  = resistencia unitaria por la punta.

L = empotramiento en el sustrato rocoso.

D = diámetro.

$p_d$  = presión de rotura o límite de los ensayos presiométricos.

En este caso, por simplicidad, se utiliza la ecuación para obtener la resistencia por punta en función de la presión límite obtenida con presiómetro, incluida en la ROM 94-05 ya que los datos que tenemos son de ese ensayo, aunque se podría haber utilizado cualquiera de las ecuaciones que aparecen en el Anejo 1. En este tipo de formaciones con intercalaciones

rocosas variables el ensayo a compresión simple en laboratorio no es muy representativo y el ensayo presiométrico es más adecuado.

Según esto, la resistencia por punta adoptada correspondería a un Flysch tipo F-1, con una presión límite de 2,5 MPa, aproximadamente.

Puede haber zonas de Flysch en las que aumente la presencia de intercalaciones de arenisca o caliza, así como la presión límite, alcanzando valores correspondientes a flysch tipo F-2 ó F-3. En materiales de este tipo, la perforación de los pilotes será más lenta, siendo difícil alcanzar los 6.00 m de empotramiento previsto. Al mismo tiempo, estos materiales, con mayor presión límite, ofrecerán también mayor resistencia, por lo que la longitud de empotramiento puede reducirse.

Para considerar esto en el cálculo, y empleando la formulación anterior, se puede establecer una relación entre el tipo de Flysch y su resistencia unitaria por punta, asignando longitudes de empotramiento menores para resistencias mayores, manteniendo constante la resistencia unitaria por fuste, y comprobando que la carga admisible frente a hundimiento permanece por encima de la carga de trabajo, que en este caso es de 4400 kN. Para un Flysch con una presión límite de 2.8 MPa (F-1), suponiendo una longitud de empotramiento de 4.00 m, se obtiene una resistencia unitaria por punta de:

$$q_p = (0,8 + 4) * 2,8 = 13,44 \text{ MPa} \quad (5)$$

Resultando por tanto la carga admisible a hundimiento de:

$$R_{adm} = 13,44 * \frac{\pi}{4} * \frac{1}{3} + 0,17 * \pi * \frac{1}{2,5} * 4 = 4373 \text{ KN} \quad (6)$$

Con el mismo procedimiento anterior, para distintos valores de la presión límite y longitudes de empotramiento en escalones de metro en metro, se obtienen las cargas admisibles siguientes:

**TABLA 2 CARGA ADMISIBLE SEGÚN LA LONGITUD DEL EMPOTRAMIENTO**

Tipo de Flysch	Presión límite (MPa)	Empotramiento en el Flysch (m) (metros)	Resistencia unitaria (MPa)		Factor de seguridad		Carga admisible (kN)		
			Fuste	Punta	Fuste	Punta	Fuste	Punta	Total
F-1	1,8	6,0	0,17	11,9	2,5	3,0	1281,8	3113,8	4395,6
	2,2	5,0		12,8			1068,2	3338,9	4407,0
	2,8	4,0		13,4			854,5	3516,8	4371,3
	3,8	3,0		14,3			640,9	3728,8	4369,6
F-2	5,4	2,0		15,1			427,3	3956,4	4383,7
	8,8	1,0		15,8			213,6	4121,3	4334,9
	10,0	1,0		18,0			213,6	4710,0	4923,6
F-3	>10,00	1,0		>18			213,6	>4710	>4911

El cálculo original de proyecto se ha realizado para un Flysch 1 con criterio conservador, como se comprueba en el Anejo 3, apartado 2.

Como se pone de manifiesto en esta tabla, la capacidad de transmisión de cargas de los pilotes para longitudes de empotramiento inferiores a 6.00 m, queda justificada mediante aumentos de la resistencia unitaria por punta, para una resistencia por fuste constante. La relación entre la longitud de empotramiento y la resistencia unitaria por punta puede representarse gráficamente del siguiente modo (se considera un mínimo de un diámetro):

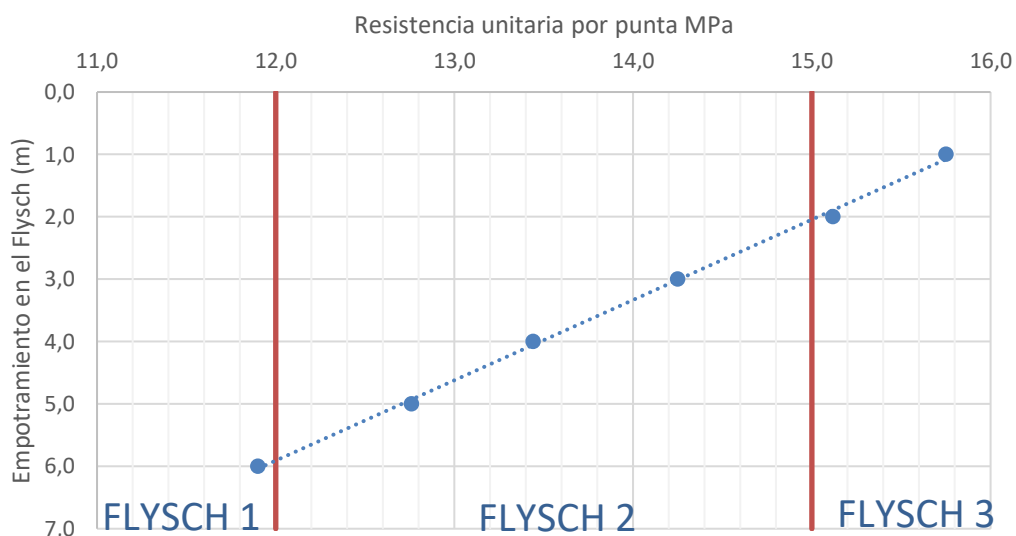


FIGURA 1. RELACIÓN ENTRE EL EMPOTRAMIENTO DEL PILOTE Y LA RESISTENCIA UNITARIA POR PUNTA

### 3.3. Velocidad de avance de la perforación.

Tal y como se ha dicho en el apartado 2, diferentes autores han llegado a la conclusión de que la velocidad de avance es directamente proporcional al par de la máquina e inversamente proporcional al cuadrado del diámetro del pilote. Esta relación aparece en la ecuación siguiente:

$$V = \frac{K * Par}{\Phi^2} \quad (7)$$

Donde:

V = Velocidad en avance en metros/hora.

Par = Par de la cabeza de rotación en toneladas\*metro.

Φ = diámetro del pilote en metros.

K = Factor de correlación.



En función de los datos provenientes de obras anteriores similares en la misma zona o de los nuevos sondeos, se calcula el coeficiente “K” para cada tipo de roca y con él se obtiene la velocidad de avance de la pilotadora que se vaya usar (caracterizada por su par de rotación y el tipo de útiles a emplear), para el diámetro de pilote de proyecto.

En caso de que no se disponga de datos de obras anteriores similares, se deberá realizar perforaciones cercanas a los sondeos que caracterizan los distintos tipos de roca, midiendo la velocidad de avance en cada caso, para obtener el coeficiente “K” en función de ésta, del par de rotación de la perforadora y del diámetro de perforación.

Una vez obtenido K, se puede calcular la velocidad de avance para otros diámetros de pilote, perforados con equipos con un par de rotación diferente.

A partir de la relación anterior, resulta fácil establecer en obra cuándo se alcanza el empotramiento requerido para pilotes con el diámetro especificado y perforados con una máquina de un par determinado, por medio del control de la velocidad de avance de la perforadora.

En la siguiente tabla se relaciona la velocidad de perforación en el Flysch y el empotramiento de pilotes, de 1,50 y 1,80 m de diámetro, en función de los datos obtenidos en obras anteriores en el mismo tipo de terreno del ejemplo, para pilotadoras con pares y útiles de perforación similares.

**TABLA 3 RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PERFORACIÓN EN EL FLYSCH Y EL  
EMPOTRAMIENTO DE LOS PILOTES**

PERFORACIÓN				VELOCIDAD PERF. EMP. (VE) (m/h)	EMPOTRAM.	OBSERVACION ES
$\Phi$ (m)	Útiles	Maq.	Par (tm)		FLYSCH (m)	
1,5	100% UC	IF200	18	1,1 A 1,8	7,5	Flysch F1 (Proyecto)
1,5	100% UC	SM622	20,1	1,2 a 2,0	7,5	Flysch F1 (Proyecto)
1,8	100% UC	SM930	30,5	1,2 a 2,0	7,5	Flysch F1 (Proyecto)
1,5	> 70% UE <30%UC	IF200	18	0,6 A 1,3	5,0 A 7,0	Flysch F2
1,5	> 70% UE <30%UC	SM622	20,1	0,7 a 1,5	5,0 a 7,0	Flysch F2
1,8	> 70% UE <30%UC	SM930	30,5	0,7 a 1,5	5,0 a 7,0	Flysch F2
1,5	100%UE + T (2-4 h)	IF200	18	0,3 a 0,8	2,5 a 3,5	Flysch F3 emp. > 1,0 $\Phi$
1,5	100%UE + T (2-4 h)	SM622	20,1	0,4 a 0,9	2,5 a 3,5	Flysch F3 emp. > 1,0 $\Phi$
1,8	100%UE + T (2-4 h)	SM930	30,5	0,4 a 0,9	2,5 a 3,5	Flysch F3 emp. > 1,0 $\Phi$

Donde:

- UC = Útiles convencionales: Barrenas de alta capacidad – HDH Bucket para roca – HKR, RKR
- UE = Útiles especiales: Barrena de widia – RK Carotieri de widia – RP
- T = Trépano

El valor del factor de correlación (K) depende, a igualdad de útiles de perforación, de las características del Flysch. Aplicando la fórmula a los valores de la tabla anterior se obtiene el rango de variación de K:

**TABLA 4 VARIACIÓN DE K SEGÚN FLYSCH**

Terreno	Rango de variación de K (m <sup>2</sup> /(h*t))
Flysch F1	0.127 – 0.225
Flysch F2	0.074 – 0.168
Flysch F3	0.038 – 0.101

El diámetro de los pilotes de esas obras fue 1,50 y 1,80 m. Los empotramientos que se especificaban en el Flysch variaban entre 7.50 y 2.50 m (VER Tabla 3), dependiendo del tipo de terreno. El rango de variación del empotramiento en función del diámetro fue, por tanto:

**TABLA 5 EMPOTRAMIENTO EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO**

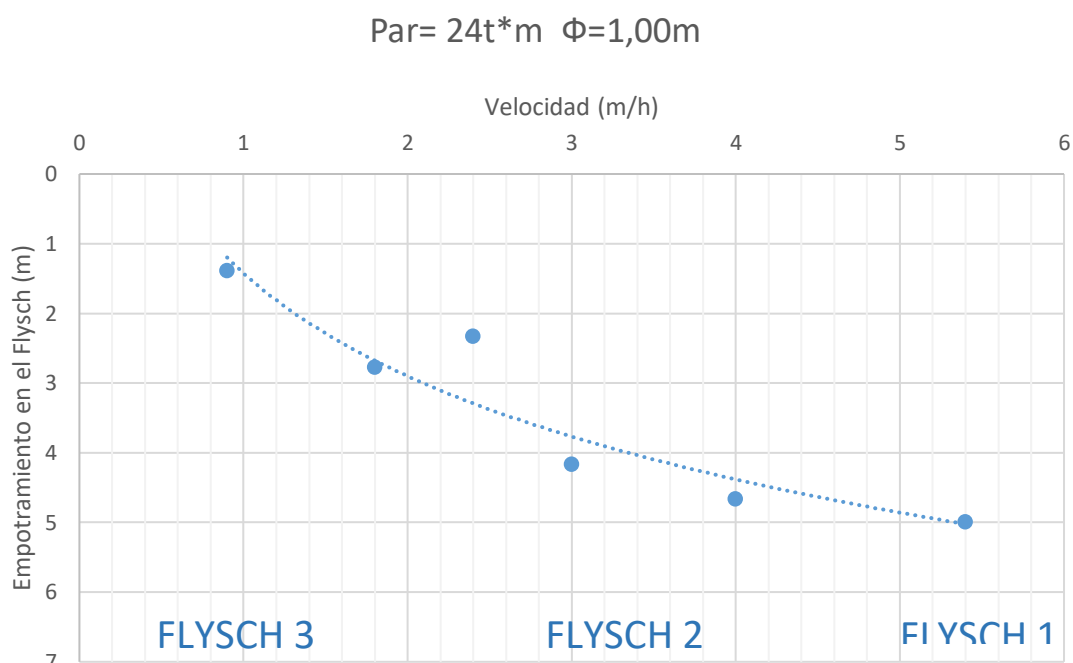
Terreno	Empotramiento en función del diámetro
Flysch F1	4.17Φ – 5.00Φ
Flysch F2	2.78Φ – 4.67Φ
Flysch F3	1.39Φ – 2.33Φ

Los pilotes de la nueva obra tienen 1.00 m de diámetro y está previsto ejecutarlos con una perforadora Bauer MBG 24 cuya cabeza de rotación tiene un par de 24 t\*m. Aplicando la fórmula para los distintos tipos de terreno se obtienen las siguientes velocidades:

**TABLA 6 VELOCIDAD DE AVANCE SEGÚN EL TIPO DE FLYSCH**

Terreno	Velocidad de avance (metros/hora)
Flysch F1	3.0 – 5.4
Flysch F2	1.8 – 4.0
Flysch F3	0.9 – 2.4

Representando estos valores de forma gráfica y sacando una línea de tendencia de los datos, se obtiene la gráfica siguiente:



**FIGURA 2. RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE PERFORACIÓN EN EL FLYSCH Y EMPOTRAMIENTO DEL PILOTE PARA PAR=24T\*M DIÁMETRO=1M**

A modo de guía se propone una tabla, obtenida de la figura anterior, en la que se relaciona la velocidad de avance de la perforación con el empotramiento requerido para los pilotes (en escalones de un metro), reflejando el abanico de tiempos de insistencia en la ejecución del empotramiento:

**TABLA 7 VELOCIDAD DE AVANCE, EMPOTRAMIENTO Y TIEMPO DE INSISTENCIA  
PARA PAR=24T\*M Y DIÁMETRO=1M**

Par = 24 t*m Φ = 1.00 m		
Velocidad de avance (m/h)	Empotramiento (m)	Tiempo de insistencia en la ejecución del empotramiento (horas:minutos.)
> 5.4	6.00	< 1:07
5.4 – 3.4	5.00	0:56 – 1:28
3.4 – 2.1	4.00	1:11 – 1:54
2.1 – 1.3	3.00	1:26 – 2:18
1.3 – 0.9	2.00	1:32 – 2:30

Para la estimación de los tiempos de insistencia reflejados en esta tabla se ha considerado el empleo de dientes de widia en los útiles de perforación (barrena, carotieri y bucket).

Los tiempos de insistencia son calculados como:

$$Tiempo\ de\ insistencia = \frac{Longitud\ de\ empotramiento}{Velocidad\ de\ avance} \quad (28)$$

La medición estos tiempos en obra se debe hacer sobre el tiempo real de perforación, es decir, sin contabilizar paradas por averías, inspecciones de la perforación, etc., debiendo tenerse en cuenta además cualquier eventualidad que pueda afectar al rendimiento de la maquinaria, especialmente en lo referente al par de rotación de la misma.

#### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A partir del análisis realizado se ha obtenido un procedimiento para optimizar el empotramiento de pilotes en roca, en el caso de perforadoras sin registro de parámetros: Después de dividir el terreno en diferentes estratos de roca y calcular los empotramientos necesarios en cada uno de ellos según sus resistencias, se calcula el parámetro K que caracteriza a cada uno de ellos. Este parámetro K, es el factor de proporcionalidad de la ecuación (7).

En función de este parámetro podemos calcular la velocidad de perforación aun variando el diámetro del pilote o la maquina utilizada siempre que conservemos el mismo tipo de útiles de perforación.

Con esta velocidad de perforación y la longitud perforada, (basándonos en los cálculos de longitud de empotramiento según estrato) queda justificado que se ha alcanzado la resistencia necesaria después del tiempo de persistencia obtenido a partir de los dos valores anteriores.

En función de lo anterior se ha establecido el procedimiento a seguir para optimizar la longitud de empotramiento de los pilotes en roca, en función de las características de la misma en cada zona de la obra, del tipo de pilotadora, del tipo de útiles de perforación y del diámetro de los pilotes.

Si bien este procedimiento puede resultar muy útil en obras con perfiles variables de roca, como el ejemplo mostrado en este documento, tiene el inconveniente de considerar sólo el par nominal de la pilotadora y de no incluir otros parámetros que también intervienen en el proceso de perforación tales como el empuje sobre el útil de perforación y la velocidad de rotación.

Lo anterior se solucionaría utilizando pilotadoras con registro de todos los parámetros de perforación, en función de la profundidad y del tiempo.

A modo de ejemplo se ha analizado un caso de empotramiento de pilotes en un sustrato rocoso variable como el Flysch. Esta es la razón por la que se ha elegido este ejemplo ya que ilustra muy bien la variabilidad de los sustratos. Se trata de una formación de arcilla margosa con niveles intercalados de arenisca y caliza margosa. El espesor de estos niveles puede ser desde orden centimétrico hasta métrico. Estos estratos no son horizontales, ya

que se encuentran fuertemente plegados, siendo frecuente encontrarlos en posiciones sub verticales.

En muchos casos, sobre todo en obras lineales, la separación entre sondeos puede llegar hasta unos 50 m, y en el Flysch los resultados obtenidos en un sondeo no son, por lo general, extrapolables más allá del entorno más próximo al mismo. Por lo tanto, es bastante probable que en zonas situadas entre dos sondeos aparezcan cualquiera de los tipos posibles de Flysch (F-1, F-2 ó F-3).

La cimentación analizada contemplaba, inicialmente, pilotes de 1000 mm de diámetro empotrados 6.00 m en el Flysch F-1, es decir, el más blando. En materiales tipo F-2 o F-3 la perforación de los pilotes será más lenta, siendo difícil alcanzar los 6.00 m de empotramiento previsto. No obstante, estos estratos ofrecerán también mayor resistencia, por lo que la longitud de empotramiento puede reducirse. La capacidad de transmisión de cargas de los pilotes para longitudes de empotramiento inferiores a 6.00 m, queda justificada mediante aumentos de la resistencia unitaria por punta.

Se propone una relación, para un diámetro de pilote y par de la perforadora determinados, entre la velocidad de avance de la perforación de los pilotes y el empotramiento requerido para los mismos (en escalones de un metro), especificando los tiempos de insistencia en la ejecución del empotramiento.

Mediante el parámetro K se puede extrapolar a otras máquinas de par diferente y otros diámetros siempre y cuando se usen útiles de corte similares.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

CELADA B., J. M. GALERA, C. MUÑOZ, I. TARDÁGUILA (2009). "The use of the specific drilling energy for rock mass characterization and TBM driving during tunnel"

BIENIAWSKI, Z.T. (1989) "Engineering Rock Mass Classifications".

COLOSIMO P. (2000) "The use of non-core drilling for geotechnical characterization of the ground". ISRM International Symposium, 19-24 November, Melbourne, Australia.

COMITÉ TÉCNICO AETESS. (2015) "Consideraciones sobre la relación entre la profundidad de empotramiento de los pilotes en roca y la velocidad de avance de la perforación de los mismos"

DE PAOLI R., VIOLA G., TOMIOLO A., (1987) "The use of drilling energy for soil classification".

GUI M. W., ASCE M., SOGA K., BOLTON M. D., AND HAMELIN J. P. (2002). "Instrumented Borehole Drilling for Subsurface Investigation"

MINISTERIO DE FOMENTO (2009). "Guía de cimentaciones en obras de carretera"

MINISTERIO DE VIVIENDA (2006). "CTE Código Técnico de la Edificación"

PUERTOS DEL ESTADO (2005, 1994). "ROM 0.5-05 , ROM 0.5-94 Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias"

SERRANO GONZÁLEZ A., OLALLA MARAÑÓN C., JUÁREZ MILLÁN F. (2010) "Cargas de hundimiento por punta de pilotes en roca: estudio comparativo" Revista Ingeniería Civil Nº 160.

SERRANO GONZÁLEZ A., OLALLA MARAÑÓN C, RÍOS AGUILAR D. (2008) "Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca estudio comparativo entre distintos métodos de cálculo y normativas" Revista Ingeniería Civil Nº 150, págs 35-40

TEALE, R. (1964) "The concept of specific energy in rock drilling". Rock Mechanics Mining Science, vol. 2, pp 57 – 73



## **ANEJOS**

## **ANEJO 1**

## 6. ANEJO 1: FORMULACIÓN CARGA DE HUNDIMIENTO DE PILOTES EN ROCA.

En este anejo se comparan diferentes formulaciones para calcular:

- 1) la carga de hundimiento de los pilotes empotrados en roca basadas en la resistencia a compresión simple de la roca, dadas en los documentos técnicos españoles más usados.
- 2) la carga de hundimiento de los pilotes basadas en los ensayos presiométricos, dadas en los documentos técnicos españoles y la normativa europea Eurocódigo EC-7 (Proyecto Geotécnico).

En España son de aplicación los tres códigos siguientes:

GCOC:        Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras (M° Fomento, 2009)

ROM 05-05: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas (M° Fomento 2005) que sustituye a la ROM 05-94.

CTE:         Código Técnico de la Edificación (2006).

La carga de hundimiento ( $Q_h$ ) de un pilote aislado se considera como suma de dos componentes, la componente debida a la resistencia por punta ( $Q_p$ ) y la componente correspondiente al fuste ( $Q_f$ ). De este modo en todas las normas aparece la siguiente formulación general (Figura 1):

$$Q_h + W' = Q_p + Q_f \quad (1)$$

$Q_h$  = carga vertical aplicada en la cabeza del pilote que produce su hundimiento (cuando parte del pilote quede exenta (fuera del terreno) se tomará como "cabeza", a efectos de cálculo de la carga de hundimiento, la sección horizontal al nivel del terreno).

$W'$  = peso efectivo del pilote (bajo el nivel freático se considerará el peso sumergido).

$Q_p$  = parte de la carga soportada por la punta.

$Q_f$  = parte de la carga soportada por el contacto pilote-terreno en el fuste.

Resistencia por punta:

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad (2)$$

$q_p$  = resistencia unitaria por punta.

$A_p$  = área de la punta.

Resistencia por fuste:

$$Q_f = \int_0^L \tau_f \cdot p_f \cdot dz \quad (3)$$

$\tau_f$  = resistencia unitaria por fuste.

L = longitud enterrada del pilote.

$p_f$  = perímetro de la sección transversal del pilote.

z = profundidad medida desde la superficie del terreno.

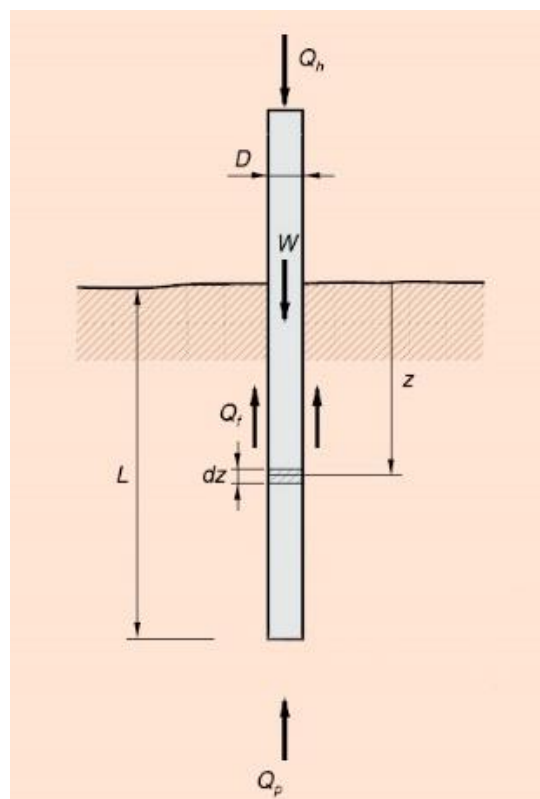


FIGURA 1: ESQUEMA DEL HUNDIMIENTO DE UN PILOTE AISLADO (GCOC, 2009).

Considerando que en este anejo solamente se analizan los pilotes empotrados en roca, a continuación se describen los métodos de cálculo de carga de hundimiento definidos en dichos documentos que se basan principalmente en la resistencia a compresión simple de la roca ( $q_u$ ).

En este anejo también se presentan distintas formulaciones de la carga de hundimiento procedentes del ensayo presiométrico y dilatométrico.

El uso del ensayo in situ tipo presiómetro para definir la carga de hundimiento tiene sus ventajas en comparación con las formulaciones basadas en los ensayos del laboratorio tipo RCS, debido a la problemática de realizar un ensayo sobre muestras de laboratorio cuyo tamaño no es representativo del estado original del sustrato rocoso in situ.

○ **Formulación basada en la resistencia a compresión simple de la roca**

- *GCOC: Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera (2009)*

En esta guía se definen tres condiciones para considerar que el pilote está realmente empotrado en una roca:

- Resistencia a compresión simple de la roca sana ( $q_u$ )  $\geq$  1MPa
- Parámetro “Rock Quality Designation” (RQD)  $\geq$  10%
- Grado de meteorización de la roca según ISRM  $\leq$  III.

Si cualquiera de estos supuestos no se cumpliera, el sustrato rocoso se considera o muy débil ( $q_u < 1$ MPa), o fuertemente diaclasado (RQD < 10%) o muy meteorizado (grado de meteorización > IV), y se recomienda considerarlo como si se tratase de un suelo aplicando los procedimientos correspondientes de cálculo de la carga de hundimiento del pilote en los suelos.

Para el cálculo de la resistencia unitaria por punta de los pilotes empotrados en roca se utiliza el método de cálculo correspondiente a las cimentaciones superficiales, introduciendo el factor de profundidad denominado factor de empotramiento en roca ( $d_f$ )

$$q_p = 2 \cdot p_{vadm} \cdot d_f \quad (4)$$

donde:

$p_{vadm}$  = presión admisible para cimentaciones superficiales en roca expresada como:

$$p_{vadm} = p_0 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \sqrt{\frac{q_u}{p_0}} \quad (5)$$

$p_0$  = presión de referencia (deberá tomarse un valor de 1MPa).

- $q_u$  = resistencia a compresión simple de la roca sana.  
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  = parámetros adimensionales que dependen del tipo de roca, de su grado de alteración y del espaciamiento de las litoclasas.

La influencia del tipo de roca se introduce mediante el parámetro  $\alpha_1$ , que incluye el efecto de la estructura de la roca, según ésta sea más propensa a contener planos de debilidad no detectados mediante los sondeos ni mediante los ensayos del laboratorio.

El parámetro  $\alpha_1$  puede determinarse en laboratorio ensayando muestras a tracción (o tracción indirecta) para medir la relación existente entre la resistencia a tracción simple  $q_t$  y la resistencia a compresión simple  $q_u$ :

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{10 \cdot q_t}{q_u}} \quad (6)$$

Si no se tiene información específica respecto a este parámetro se pueden utilizar los valores de la Tabla 1:

TABLA 1: VALORES DE  $\alpha_1$  SEGÚN EL TIPO DE ROCA (GCOC, 2009)

Grupo N°	NOMBRE GENÉRICO	EJEMPLOS	$\alpha_1$
1	Rocas carbonatadas con estructura bien desarrollada	Calizas, dolomías y mármoles puros Calcarenitas de baja porosidad Granitos, cuarcitas	1,0
2	Rocas ígneas y rocas metamórficas(*)	Andesitas, riolitas Pizarras, esquistos y gneises (esquistosidad subhorizontal)	0,8
3	Rocas sedimentarias(**) y algunas metamórficas	Calizas margosas, argilitas, limolitas, areniscas y conglomerados Pizarras y esquistos (esquistosidad verticalizada) Yesos	0,6

4	Rocas poco soldadas	Areniscas, limolitas y conglomerados poco cementados  Margas	0,4
---	---------------------	--	-----

(\*) A excepción de las indicadas en los grupos 1 y 3.

(\*\*) A excepción de las indicadas en los grupos 1 y 4.

Cuando aparecen varios tipos de roca en un mismo apoyo, se recomienda tomar el valor de cálculo  $\alpha_1=0.4$ .

La influencia del grado de meteorización es introducida mediante el parámetro  $\alpha_2$ . Se recomiendan los siguientes valores:

- Grado de meteorización I (roca sana o fresca):  $\alpha_2=1,0$
- Grado de meteorización II (roca ligeramente meteorizada):  $\alpha_2=0,7$
- Grado de meteorización III (roca moderadamente meteorizada):  $\alpha_2=0,5$

La influencia del espaciamiento entre litoclasas se introduce mediante el parámetro  $\alpha_3$ , considerando el menor de los siguientes valores:

$$\alpha_3 = \min(\alpha_{3a}, \alpha_{3b}) \quad \alpha_{3a} = \sqrt{\frac{s}{1m}} \quad \alpha_{3b} = \sqrt{\frac{RQD(\%)}{100}} \quad (7)$$

s = espaciamiento entre las diaclasas expresado en m. Se utilizará el correspondiente a la familia de diaclasas que conduzca a un valor menor.

1m = valor que se utiliza para hacer adimensional la expresión correspondiente.

RQD = valor del parámetro "Rock Quality Designation", expresado en tanto por ciento.

El factor de empotramiento ( $d_f$ ) viene definido por:

$$d_f = 1 + 0.4 \frac{L_r}{D} \leq 2 \quad (8)$$

$L_r$  = profundidad de empotramiento en roca de la misma o de mejor calidad que la existente en la punta ( $L_r \leq 2.5 D$ ).

D = diámetro real o equivalente del pilote.

Dentro de la zona de empotramiento de pilote en roca se considera la resistencia unitaria por fuste igual a:

$$\tau_f = 0.1 \cdot q_p \quad (9)$$

donde:

$\tau_f$  = resistencia unitaria por fuste.

$q_p$  = resistencia unitaria por la punta que correspondería a dicha roca antes de ser afectada por el factor  $d_f$ .

Los valores de resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) y la resistencia unitaria por fuste ( $\tau_f$ ) se limitan a unos valores máximos de 20MPa y 2MPa, respectivamente.

▪ *ROM 05-05: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas (2005)*

Para que el sustrato en el que se empotra el pilote sea considerado como roca, y se puedan aplicar las formulaciones dadas en este apartado, se deben cumplir simultáneamente:

- Grado de alteración  $\leq$  III.
- RQD  $\geq$  10%.
- Espaciamiento entre litoclasas(s)  $\geq$  0.1m.

Si cualquiera de estos supuestos no se cumpliera se recomienda considerar el sustrato rocoso como si se tratase de un suelo aplicando los procedimientos correspondientes de cálculo de la carga de hundimiento del pilote en los suelos.

La resistencia unitaria por punta de un pilote empotrado en roca se obtiene de la siguiente expresión:

$$q_p = \frac{2}{3} \cdot p_{vh} \cdot \left( 1 + 0.4 \frac{L_r}{D} \right) \quad (10)$$

Donde:

$p_{vh}$  = presión vertical de hundimiento en roca.

$L_r$  = longitud de empotramiento en roca, siempre que esta longitud la roca sea de la misma calidad que la de la punta. Cuando este empotramiento sea mayor que 2.5D se tomara



$L_r=2.5D$ , lo cual implica limitar a un valor máximo de 2 al factor  $(1+0.4L_r/D)$  de la ecuación (10).

La presión vertical efectiva de hundimiento de cimentaciones sobre roca ( $p_{vh}$ ) se calcula mediante la siguiente formula:

$$p_{vh} = 3 \cdot (p_r \cdot q_u)^{\frac{1}{2}} \cdot f_D \cdot f_A \cdot f_\delta < 15 MPa \quad (11)$$

Siendo:

$p_r$  = presión de referencia (1 MPa).

$q_u$  = resistencia a compresión simple de la roca sana.

$f_D$  = factor de reducción debido al diaclasamiento. Será el mínimo de los dos siguientes:

$$f_D = 2 \left( \frac{s}{B^*} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 1; \quad f_D = 0.2 \left( \frac{B_0 \cdot RQD(\%)}{B^*} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 1 \quad (12)$$

siendo:

$s$  = espaciamiento entre las diaclasas expresado en m.

$B^*$  = ancho equivalente de la cimentación (en este caso el diámetro equivalente de la punta del pilote).

$B_0$  = ancho de referencia, se tomará  $B_0 = 1m$ .

RQD= índice de fragmentación de la roca.

$f_A$  = factor de reducción debido al grado de meteorización de la roca (ver tabla 2):

TABLA 2: FACTOR DE REDUCCIÓN  $f_A$  DEBIDO AL GRADO DE METEORIZACIÓN DE LA ROCA (ROM 0.5-05)

Grado de meteorización	Factor $f_A$
I	1
II	0,7
III	0,5

$f_\delta$  = factor que tiene en cuenta la inclinación de la carga. Se tomará en general:

$$f_\delta = (1.1 - tg\delta)^3 < 1 \quad (13)$$

siendo  $\delta$  el ángulo de la inclinación de la carga.

En este caso de pilotes en roca se considera  $f_{\delta} = 1$ .

Dentro de la zona de empotramiento de pilote en roca se considera la resistencia unitaria por fuste igual a:

$$\tau_f = \frac{1}{10} \cdot p_{vh} < 2MPa \quad (14)$$

- CTE: Código Técnico de la Edificación (2007)

En este código se definen las siguientes tres condiciones del estado de sustrato rocoso para considerar el cálculo de los pilotes como empotrados en una roca:

- Resistencia a compresión simple de la roca sana ( $q_u$ )  $\geq 2.5$  MPa
- Parámetro "Rock Quality Designation" (RQD)  $\geq 25\%$
- Grado de meteorización de la roca según ISRM  $\leq III$ .

La resistencia unitaria por punta de los pilotes excavados en roca se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$q_p = 3 \cdot K_{sp} \cdot q_u \cdot d_f \quad (15)$$

Siendo:

$K_{sp}$  = coeficiente dado por la expresión:

$$K_{sp} = \frac{3 + \frac{s}{B}}{10 \sqrt{1 + 300 \frac{a}{s}}} \quad (16)$$

$q_u$  = resistencia a compresión simple de la roca sana.

$s$  = espaciamiento de las discontinuidades;  $s > 300$  mm.

$B$  = anchura del cimiento en metros;  $0.05 < s/B < 2$ .

$a$  = apertura de las discontinuidades;  $a < 5\text{mm}$  en junta limpia,  $a < 25\text{mm}$  en junta rellena con suelo o con fragmentos de roca alterada; siendo  $0 < a/s < 0.02$ .

$d_{fr}$  = factor de profundidad.

$$d_f = 1 + 0.4 \frac{L_r}{D} \leq 3 \quad (17)$$

$L_r$  = profundidad de empotramiento en roca de la misma o mejor calidad que la existente en la punta.

$D$  = diámetro real o equivalente del pilote.

La longitud de empotramiento se mide a partir de la profundidad del contacto con roca en toda su sección transversal, y es dependiente de la inclinación del techo rocoso.

Es importante garantizar la continuidad de la roca con características no inferiores a las consideradas en el cálculo del pilote, en un tramo no inferior a 3 diámetros por debajo del apoyo de la punta.

Dentro de la zona de empotramiento de pilotes perforados en roca se considera la resistencia unitaria por fuste de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\tau_f = 0.2 \cdot q_u^{0.5} \quad (18)$$

$q_u$ , vendrá especificado en MPa, debiéndose verificar siempre que la roca es estable en agua.

- *Comparación de las normativas*

En la siguiente TABLA 3 se recogen las fórmulas de las normativas expuestas anteriormente.

TABLA 3: CUADRO RESUMEN FORMULAS RESISTENCIA UNITARIA PUNTA Y FUSTE DE NORMAS ESPAÑOLAS

	Resistencia unitaria por punta	Resistencia unitaria por fuste	Condiciones
GCOC	$q_p = 2 \cdot p_{vadm} \cdot d_f < 20MPa; d_f = 1 + 0.4 \frac{L_r}{D} \leq 2$ $p_{vadm} = p_0 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \sqrt{\frac{q_u}{p_0}}; \alpha_1 = \sqrt{\frac{10 \cdot q_t}{q_u}}; \alpha_2 = 0.5 - 1.0$ $\alpha_3 = \min(\alpha_{3a}, \alpha_{3b}) \quad \alpha_{3a} = \sqrt{\frac{s}{1m}} \quad \alpha_{3b} = \sqrt{\frac{RQD(\%)}{100}}$	$\tau_f = 0.1 \cdot q_p < 2MPa$	$q_u \geq 1MPa$ $RQD \geq 10\%$ $Gradometeorización \leq III$
ROM 05-05	$q_p = \frac{2}{3} \cdot p_{vh} \cdot \left(1 + 0.4 \frac{L_r}{D}\right)$ $p_{vh} = 3 \cdot (p_r \cdot q_u)^{\frac{1}{2}} \cdot f_D \cdot f_A \cdot f_\delta < 15MPa; f_\delta = 1; f_A = 0.5 - 1$ $\text{mínimo } f_D: f_D = 2 \left(\frac{s}{B^*}\right)^{\frac{1}{2}} \leq 1; f_D = 0.2 \left(\frac{B_0 \cdot RQD(\%)}{B^*}\right)^{\frac{1}{2}} \leq 1$	$\tau_f = \frac{1}{10} \cdot p_{vh} < 2MPa$	$\text{Espaciamiento de diaclasas} \geq 10cm$ $RQD \geq 10\%$ $Gradometeorización \leq III$
CTE	$q_p = 3 \cdot K_{sp} \cdot q_u \cdot d_f; K_{sp} = \frac{3 + \frac{s}{B}}{10 \sqrt{1 + 300 \frac{a}{s}}}; d_f = 1 + 0.4 \frac{L_r}{D} \leq 3$	$\tau_f = 0.2 \cdot q_u^{0.5}$	$q_u \geq 2.5MPa$ $RQD \geq 25\%$ $Gradometeorización \leq III$

Como se puede apreciar la formulación de la resistencia unitaria por punta dada en las tres normativas es similar. La fórmula proviene de las empleadas en las cimentaciones superficiales multiplicada por dos coeficientes: el primero es el denominado factor de empotramiento ( $d_f$ ) y el segundo es variable en cada caso.

En las tres normativas para el cálculo de la resistencia unitaria por punta se incluye la resistencia a compresión simple de la roca. En las normativas GCOC y ROM se introduce a través de la presión vertical de hundimiento.

El primer coeficiente  $d_f$  es el que condiciona la longitud máxima de empotramiento en roca  $L_r$ . En las normativas GCOC y ROM 05-0.5 este valor queda limitado a 2.5 diámetros y en el CTE queda limitado a 5 diámetros. Con la condición de no sobrepasar los valores máximos de  $d_f$  (2 en el caso de la GCOC y ROM 0.5-05 y 3 en el caso del CTE) se limita, a su vez, el valor máximo de resistencia unitaria por punta. Teniendo en cuenta lo anterior, los valores de empotramiento de pilotes en roca ( $L_r$ ) para alcanzar la máxima resistencia por punta son:

- GCOC:  $L_r = 2.5D$
- ROM 05-05:  $L_r = 2.5D$
- CTE:  $L_r = 5D$

Según distintas normativas el segundo coeficiente tiene en cuenta lo siguiente:

- GCOC: tipo de roca, grado de meteorización, espaciamiento entre diaclasas.
- ROM 05-05: grado de alteración, espaciamiento de diaclasas, índice fragmentación (RQD).
- CTE: espaciamiento y apertura de las discontinuidades.

A modo orientativo, se presentan los rangos de variación de la resistencia unitaria por punta según cada norma, teniendo en cuenta los empotramientos máximos y mínimos, para un pilote del diámetro de 1 m:

- GCOC:  $q_p = (0.126 \text{ a } 4) q_u^{0.5}$
- ROM 05-05:  $q_p = (0.632 \text{ a } 4) q_u^{0.5}$
- CTE:  $q_p = (0.115 \text{ a } 4.5) q_u$

Los valores límite dados en las normativas para la resistencia unitaria por punta y por fuste para los pilotes empotrados en roca:

- GCOC:  $q_p = 20 \text{ MPa}$ ;  $\tau_f = 2 \text{ MPa}$
- ROM 05-05:  $q_p = 20 \text{ MPa}$ ;  $\tau_f = 2 \text{ MPa}$
- CTE: sin valores máximos indicados

○ **Formulación basada en ensayos presiométricos**

Considerando que los ensayos in situ tipo SPT y CPT son sólo adecuados para suelos, en este apartado se presentan las formulaciones de la carga de hundimiento derivadas de los ensayos presiométricos. En concreto, se utilizan tanto los presiómetros (suelo y roca alterada y meteorizada) como los dilatómetros (roca) que miden la presión radial necesaria en la pared de un sondeo para plastificar el terreno ( $p_l$ ), correlacionándola con las resistencias unitarias de hundimiento por punta ( $q_p$ ) y por fuste ( $\tau_f$ ). El valor de presión límite ( $p_l$ ) utilizada para determinar la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) debe ser la media de los valores correspondientes a la zona de la punta del pilote en estudio.

▪ *GCOC: Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera 2009*

En esta normativa se presenta la siguiente fórmula para el cálculo de resistencia unitaria por punta basada en la presión límite:

$$q_p = K \cdot (p_l - K_0 \cdot p_0) \quad (19)$$

Donde:

$q_p$  = carga unitaria de hundimiento por punta.

$K$  = coeficiente de proporcionalidad que depende de la geometría del cimiento y del tipo de terreno. Puede tomarse igual a 3.2 en suelos granulares e igual a 1.5 en suelos cohesivos.

$p_l$  = presión límite del ensayo presiométrico (o dilatométrico).

$p_0$  = presión vertical efectiva al nivel de la cimentación en el entorno del apoyo (antes de cargar).

$K_0$  = coeficiente de empuje al reposo (valor usual 0.5).

Para la estimación de la resistencia unitaria por fuste se recomienda la siguiente fórmula:

$$\tau_f = \frac{1}{40} \cdot q_p$$

Donde  $q_p$  tiene el significado especificado en el párrafo precedente.

En cualquier caso, el valor de  $\tau_f$  debe limitarse en función del tipo de terreno a los siguientes valores: **( 20 )**

$$\tau_f \leq 90 \text{ kPa en suelos granulares}$$

$$\tau_f \leq 70 \text{ kPa en suelos cohesivos}$$

▪ *ROM 0.5-05*

En esta normativa se establece una fórmula para la estimación de la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) válida para los pilotes hincados, que no obstante, es similar a la de la GCOC del 2009, añadiendo un factor que tiene en cuenta el diámetro del pilote.

$$q_p = K \cdot (p_l - K_0 \cdot p_0) \cdot f_D \quad \text{( 21 )}$$

Donde:

$K_0$  = coeficiente de empuje al reposo.

$K$  = factor adimensional de correlación que puede suponerse igual a 3.2 en suelos granulares e igual a 1.5 en suelos cohesivos. Para rocas alteradas se recomienda adoptar el valor de  $K$  correspondiente a los suelos cohesivos. Si la alteración de la roca no conduce a la presencia de arcillas, el parámetro  $K$  puede ser mayor, aunque nunca superior al correspondiente a los suelos granulares.

$p_l$  = presión límite del ensayo presiométrico (o dilatómetro).

$p_0$  = presión vertical efectiva al nivel del ensayo cuando se realizó.

$f_D$  = factor de reducción por efecto del tamaño del pilote.

$$f_D = 1 - \frac{D}{D_0} > 0.7 \quad \text{( 22 )}$$

$D$  = diámetro del pilote.

$D_0$  = diámetro de referencia, se tomará  $D_0 = 3 \text{ m}$ .

Para la estimación de la resistencia unitaria por fuste ( $\tau_f$ ) se recomienda la siguiente fórmula:

$$\tau_f = \frac{1}{30} \cdot p_l \quad (23)$$

siendo:

$p_l$  = valor medio de la presión límite efectiva al nivel del ensayo presiométrico (o dilatométrico).

El valor máximo de  $\tau_f$  en esta normativa se limita a 125 kPa en suelos granulares y rocas blandas, meteorizadas y/o fragmentadas.

- *ROM 0.5-94*

En la ROM 0.5-94 del Ministerio de Fomento, la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) en cualquier tipo del terreno viene dada por:

$$q_p = \left( 0.8 + \frac{L}{D} \right) \cdot p_d \leq 5 \cdot p_d \quad (24)$$

donde:

D = diámetro del pilote.

L = empotramiento en el sustrato rocoso. De la ecuación anterior se deduce  $L \leq 4.2D$ .

$p_d$  = presión de rotura o límite de los ensayos presiométricos.

En esta normativa no se presentan las fórmulas para determinar la resistencia unitaria por fuste ( $\tau_f$ ) en base a los ensayos presiométricos.

- *CTE: Código Técnico de la Edificación (2006)*

En esta norma se expone la misma fórmula de la GCOC para la estimación de la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ), válida para presiómetros y dilatómetros (ecuación 19).

Para la estimación de la resistencia unitaria por fuste ( $\tau_f$ ) se podrá considerar la siguiente fórmula:



$$\tau_f = \frac{1}{10} \cdot (p_l - K_0 \cdot p_0) \quad (25)$$

- *EC7: Eurocódigo 7 (2006)*

En esta norma se expone la misma fórmula de la GCOC y CTE para la estimación de la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) (ecuación 19).

Esta normativa proporciona una variedad de valores del parámetro K, denominado factor de resistencia portante, en función de las distintas categorías de terreno (arcillas y limos, arenas y gravas, calizas, margas y roca meteorizada), del rango de valores de presión límite ( $p_l$ ) y del método constructivo del pilote.

Para la estimación de la resistencia unitaria por fuste ( $\tau_f$ ) se adoptan los valores deducidos del gráfico que correlaciona el valor de  $\tau_f$  con la presión límite ( $p_l$ ) en función del tipo de terreno y el método constructivo del pilote (ver figura 2).

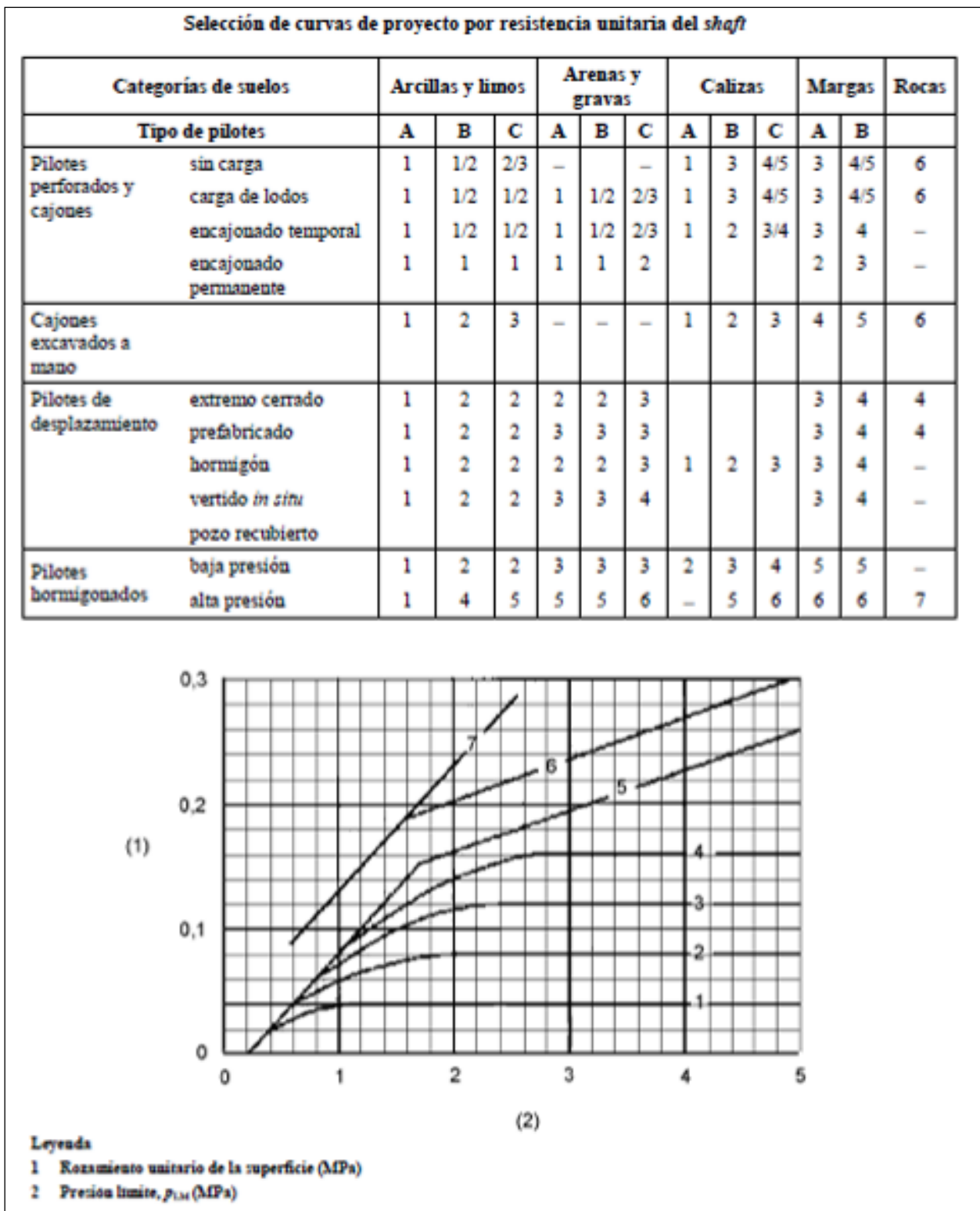


FIGURA 2: RESISTENCIA UNITARIA POR FUSTE (EC 7, 2002).

▪ *Comparación de las normativas*

En la siguiente tabla 4 se recogen las fórmulas basadas en los ensayos presiométricos de las normativas más usadas en España expuestas anteriormente en los apartados 1.2.1 hasta 1.2.4.

TABLA 4: CUADRO RESUMEN FORMULAS RESISTENCIA UNITARIA PUNTA Y FUSTE EN BASE A LOS ENSAYOS PRESIOMÉTRICOS SEGÚN DIFERENTES NORMATIVAS

	Resistencia unitaria por punta	Resistencia unitaria por fuste	Condiciones
GCOC	$q_p = K \cdot (p_l - K_0 \cdot p_0)$	$\tau_f = \frac{1}{40} \cdot q_p$	$\tau_f \leq 90kPa$ en suelos granulares $\tau_f \leq 70kPa$ en suelos cohesivos
ROM 05-05	$q_p = K \cdot (p_l - K_0 \cdot p_0) \cdot f_D$ $f_D = 1 - \frac{D}{D_0} > 0.7$	$\tau_f = \frac{1}{30} \cdot p_l$	$\tau_f \leq 125kPa$ en suelos granulares y rocas blandas, fragmentadas y/o meteorizadas
ROM 0.5-94	$q_p = \left(0.8 + \frac{L}{D}\right) \cdot p_d \leq 5 \cdot p_d$		$L \leq 4.2 \cdot D$
CTE	$q_p = K \cdot (p_l - K_0 \cdot p_0)$	$\tau_f = \frac{1}{10} \cdot (p_l - K_0 \cdot p_0)$	
EC7	$q_p = K \cdot (p_l - K_0 \cdot p_0)$	Figura 2	

Como se puede apreciar la formulación de la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) dada en todas las normativas vigentes CTE, GCOC, ROM 0.5-05 y EC7 es similar. El valor de la resistencia unitaria por fuste ( $\tau_f$ ) viene dado como una fracción de la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) o de la presión límite ( $p_l$ ).

Se han considerado los mismos valores máximos en la estimación de la resistencia unitaria por punta ( $q_p$ ) y por fuste ( $\tau_f$ ) dados en el apartado 1.1 para el cálculo de los pilotes empotrados en roca.

La única normativa que condiciona la longitud máxima de empotramiento en roca  $L_r$  es la ROM 0.5-94, limitándola a 4.2 diámetros. Sin embargo, esta normativa no considera la contribución de la resistencia por fuste en el cálculo de carga de hundimiento en base a los ensayos presiométricos.

- *Aplicación al caso real*

A modo de ejemplo se ha analizado un caso de empotramiento de pilotes en un sustrato rocoso variable tipo Flysch. Se trata de una formación de arcilla margosa con niveles intercalados de arenisca y caliza margosa. El espesor de estos niveles puede ser desde orden centimétrico hasta métrico. Estos estratos no son horizontales, ya que se encuentran fuertemente plegados, siendo frecuente encontrarlos en posiciones subverticales.

Se ha clasificado en 3 categorías al Flysch en base a los sondeos de la campaña de reconocimiento geotécnico y a los resultados de los ensayos presiométricos:

Flysch F-1: Arcilla margosa con intercalaciones esporádicas de arenisca y caliza, de espesor centimétrico a decimétrico.

Flysch F-2: Arcilla margosa con frecuentes intercalaciones de arenisca y caliza, de espesor decimétrico.

Flysch F-3: Abundantes intercalaciones rocosas de arenisca y caliza de espesor decimétrico a métrico.

En la siguiente tabla 5 se presentan los valores de presión límite ( $p_l$ ) obtenidos en campo para cada tipo de Flysch:

TABLA 5: CLASIFICACIÓN DE FLYSCH EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN LÍMITE

Tipo de flysch	Presión límite (MPa)	Valores medios adoptados para la presión límite (MPa)
F-1	2.5 a 5.0	3.3
F-2	5.0 a 10.0	6.5
F-3	10.0 a > 22.0	15.0

A continuación se presenta el resumen del cálculo de la carga admisible en base a los valores de la resistencia por punta y por fuste obtenidas mediante las formulaciones presentadas en este apartado en función de los ensayos presiométricos realizados en la obra de pilote en estudio.

El pilote analizado es de 1000 mm de diámetro empotrado hasta 6.0 m (6 diámetros) en el flysch tipo F-1, hasta 2.0 m (2 diámetros) en el flysch tipo F-2 y 1.0 m (1 diámetro) en el flysch tipo F-3.

En la siguiente Tabla 6 y en la figura 3 se presentan los valores estimados de las resistencias unitarias últimas por punta ( $q_p$ ) y por fuste ( $\tau_f$ ) en base a los ensayos presiométricos según distintas normativas.

Para el cálculo de  $q_p$  mediante las normativas GCOC, CTE y ROM 0.5-05 se ha tomado, con carácter conservador, el coeficiente de proporcionalidad con su valor mínimo  $K=1.5$ , válido para el material arcilloso. La normativa ROM 0.5-94 no tiene en cuenta este parámetro  $K$  en el cálculo de resistencia por punta. Dado que EC7 proporciona una variedad de valores de  $K$  en función del tipo de suelo y del método constructivo del pilote, se ha considerado el valor de  $K=1.8$  en base a estos parámetros, considerando que los pilotes fueron ejecutados con lodos bentoníticos..

TABLA 6: RESISTENCIA UNITARIA ÚLTIMA POR PUNTA Y POR FUSTE SEGÚN DISTINTAS NORMATIVAS EN FUNCIÓN DE ENSAYOS PRESIOMÉTRICOS

Tipo de flysch	EC7		ROM 0.5-94	GCOC		CTE		ROM 0.5	
	$q_p$ (MPa)	$\tau_f$ (MPa)		$q_p$ (MPa)	$\tau_f$ (MPa)	$q_p$ (MPa)	$\tau_f$ (MPa)	$q_p$ (MPa)	$\tau_f$ (MPa)
F-1	5.94	0.25	5.94	4.95	0.124	4.95	0.33	3.47	0.11
			9.24						
			12.54						
			15.84						
			19.14						
			22.44						
F-2	11.70	0.6	11.70	9.75	0.244	9.75	0.65	6.83	0.217
			18.20						
F-3	27.00	1.54	27.00	20.00	0.50	22.50	1.50	15.75	0.50

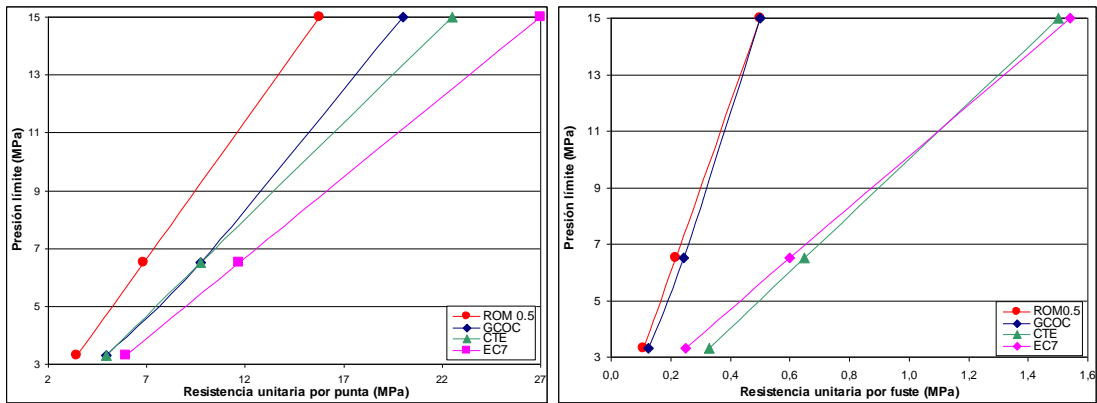


FIGURA 3: CORRELACIÓN RESISTENCIA UNITARIA POR PUNTA Y FUSTE CON LA PRESIÓN LÍMITE DE DISTINTO TIPO DE FLYSCH.

De la tabla 6 y la figura 3 se observa la subestimación de resistencia unitaria por fuste obtenida mediante las normativas ROM 0.5-05 y GCOC en comparación con las normativas CTE y EC-7.

En la Tabla 7 se presenta la relación entre las resistencias unitarias por fuste ( $\tau_f$ ) y por punta ( $q_p$ ), presentadas en la tabla 6 y la figura 3, obtenida mediante diferentes normativas para distintas calidades de flysch.

TABLA 7: RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA UNITARIA POR FUSTE Y POR PUNTA SEGÚN DISTINTAS NORMATIVAS EN FUNCIÓN DE ENSAYOS PRESIOMÉTRICOS

Tipo de flysch	EC7	GCOC	CTE	ROM 0.5
	%	%	%	%
F-1	4.2	2.5	6.7	3.2
F-2	5.1	2.5	6.7	3.2
F-3	5.7	2.5	6.7	3.2

En las figuras 4 y 5 se presentan las cargas de hundimiento por punta y por fuste estimadas mediante distintas normativas para el pilote de diámetro de 1.0 m. La carga de hundimiento por punta resulta constante para distintas longitudes de empotramiento de pilote en roca según las normativas ROM 0.5-05, GCOC, CTE y EC-7, dado que no

depende de la profundidad sino solamente de la presión límite. La única normativa que tiene en cuenta el efecto de profundidad en el cálculo de carga de hundimiento por punta es la ROM 0.5-94.

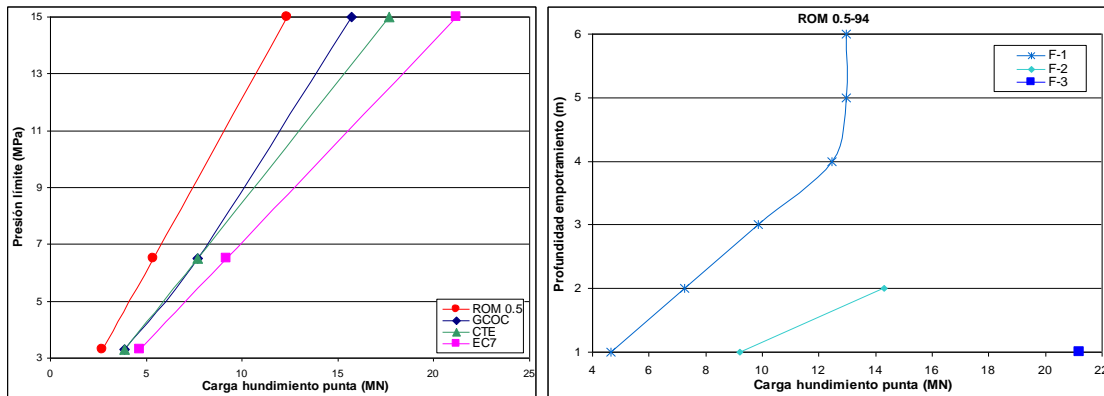


FIGURA 4: CARGA DE HUNDIMIENTO POR PUNTA.

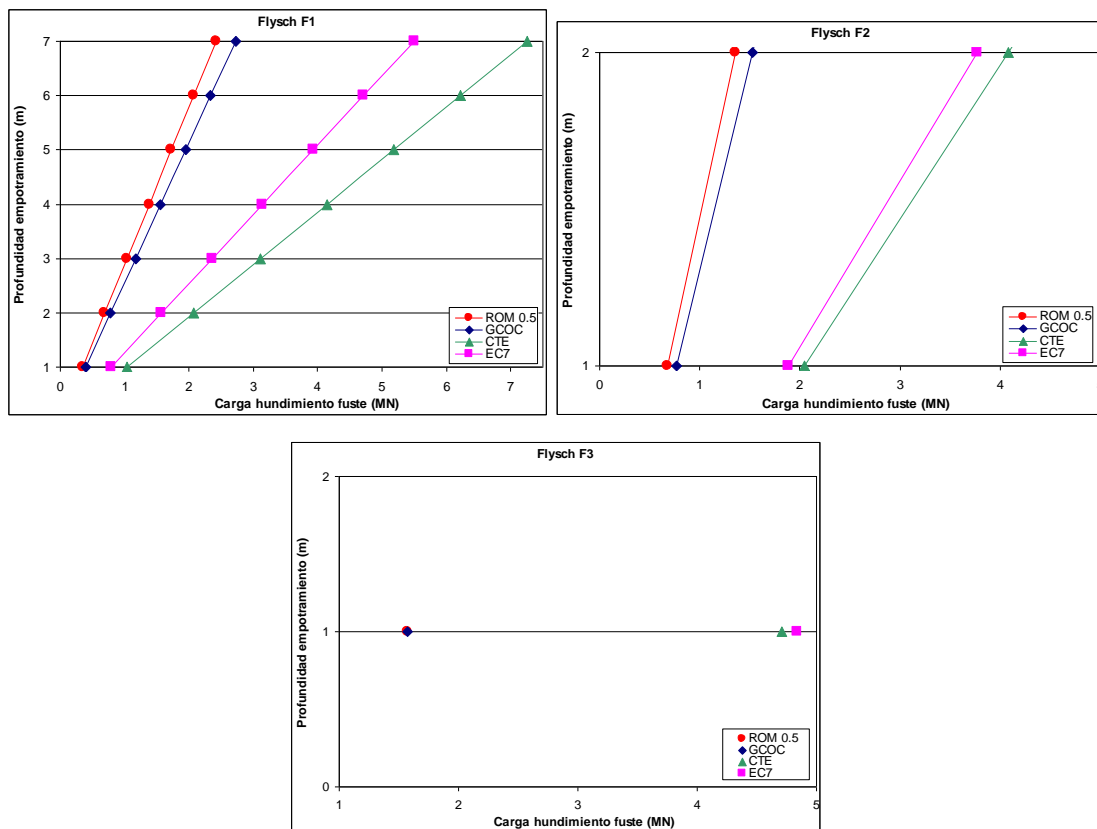


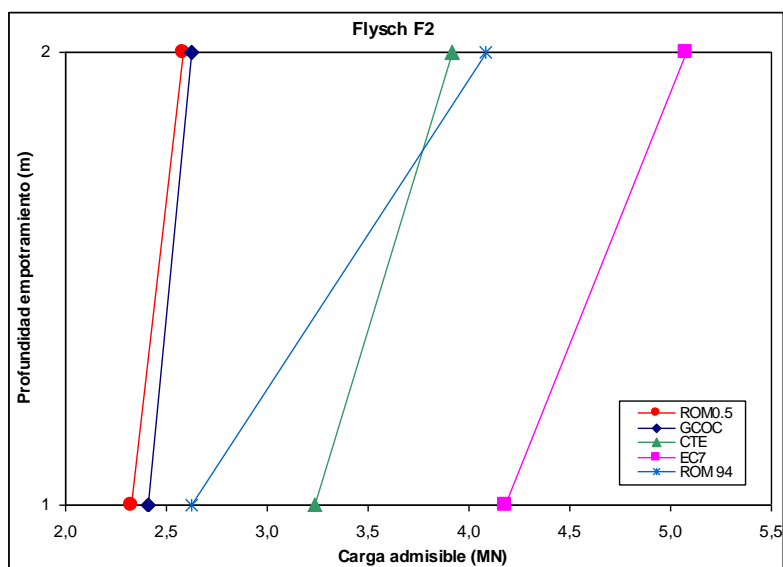
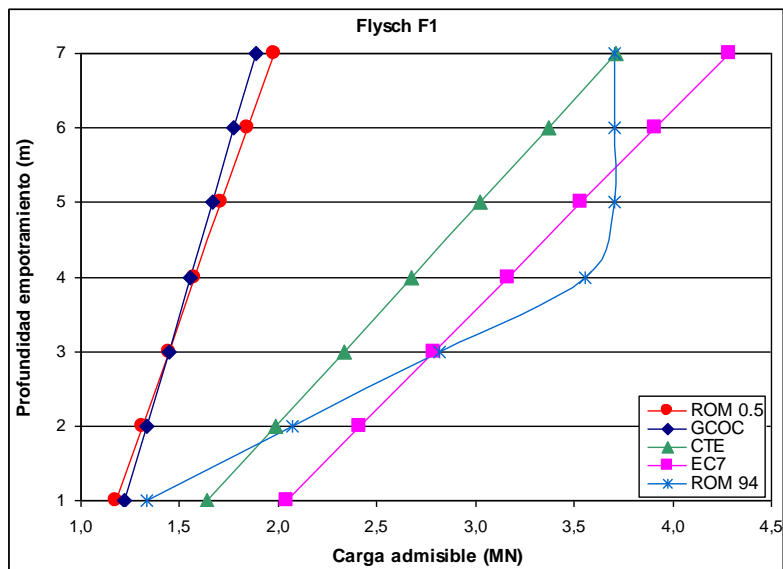
FIGURA 5: CARGA DE HUNDIMIENTO POR FUSTE.

En la tabla 8 se recogen los coeficientes de seguridad a tener en cuenta para el cálculo de la carga de hundimiento en base a los ensayos presiométricos según distintas normativas.

TABLA 8: FACTORES DE SEGURIDAD SEGÚN DISTINTAS NORMATIVAS

ROM 0.5-94	EC7	GCOC	CTE	ROM 0.5
3.5	FSp=2.8 FSf=2.1	3.5	3.0	2.6

En la Figura 6 se muestran los valores de la carga admisible obtenida para el pilote del diámetro de 1.0 m para distintos empotramientos considerados para la roca flysch de distinta calidad, y para diferentes coeficientes de seguridad establecidos en distintas normativas según la tabla 8.





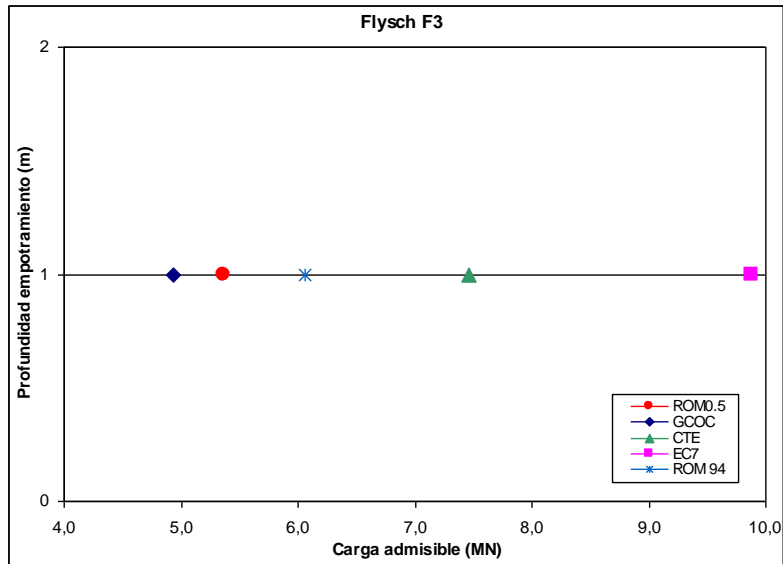


FIGURA 6: CARGA ADMISIBLE.

Se observa una relación lineal entre la carga admisible y la profundidad de empotramiento de pilote. La única normativa que tiene en cuenta la limitación de la carga de hundimiento con profundidad es la ROM 0.5-94 a partir de  $L_r=4.2$  diámetros. Sin embargo, esta normativa no tiene en cuenta la aportación de la resistencia por fuste en el valor total de la carga admisible del pilote empotrado en roca en base a los ensayos presiométricos.

Las normativas GCOC y ROM 0.5-05 subestiman la carga admisible del pilote comparándola con las normativas EC7 y CTE. Considerando que la normativa EC7 tiene en cuenta mayor número de parámetros (tipo del terreno y el método constructivo del pilote), se recomienda la aplicación de las normativas EC7 y CTE para estimar la carga admisible del pilote empotrado en roca de diferentes calidades en base a los ensayos presiométricos.

## **ANEJO 2**

### **7. ANEJO 2: ANÁLISIS DE EMPOTRAMIENTO EN ROCA. PARTE DE CONTROL**

**ANÁLISIS DE EMPOTRAMIENTOS EN ROCA**  
**PARTE DE CONTROL**



FECHA	05-oct-10		OBRA	Nuevo Puente sobre el Embalse Ricobayo	
EMPRESA	TERRABAUER		LOCALIZACIÓN	Zamora	
CLIENTE	FERROVAL		EMPUJE (T)	20,00	
EQUIPO	BAUER BG 36	PAR DE ROTACIÓN (mT)	36,00		
DIÁMETRO PILOTE	1.800	mm	NÚMERO	P-17	
DESCRIPCIÓN DEL SUSTRATO ROCOSO			PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN		
PIZARRAS - RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE MEDIA: 50 MPa - RQD: 80%			Lodos bentoníticos (seco, entubado, con lodos, etc)		

HORA	PROFUNDIDAD	ACTIVIDAD					MANTENIMIENTO	AVERÍA	PARADA	ÚTILES DE CORTE			OBSERVACIONES
		PERFORACIÓN								UNIDADES CAMBIADAS			
		CORONA	HÉLICE	CAZO						DIENTES	PICAS	PIÑAS	
10:00	15,00	X										Roca muy dura	
10:30			X										
10:45				X									
10:55	15,50	X											
11:15			X							7	2		
11:30				X		X							
11:40	16,00		X									Roca fracturada	
13:00	17,50							X		5	3		
17:00	17,50		X										
18:00	18,50	X										Roca dura - Empuje máximo	
18:50			X										
19:30				X							10		
19:40	19,00								X				
20:00												Fin de la Jornada	
TOTAL	4,00	100	220	30			10	240	20	12	15		
	m	Minutos							Unidades				

## **ANEJO 3**

## 8. ANEJO 3

### 1. Caracterización del Flysch

Para obtener la Tabla 1 Clasificación FLYSCH en función de la presión límite, se han realizado ensayos presiométricos en 6 sondeos para caracterizar el terreno.

TABLA A-1 CONJUNTO DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Presión Límite, PI	Mínima	Máxima	Media
Valor (Mpa)	2,2	22,6	11,3

Los valores medios por sondeo de los ensayos realizados en los 4 a 7 m superiores del Flysch, donde se concentrará la transmisión de cargas procedentes de los pilotes, se resumen a continuación:

TABLA A-2 VALORES MEDIOS POR SONDEO DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PRESIOMÉTRICOS REALIZADOS EN LOS 4-7M SUPERIORES DEL FLYSCH

Sondeo	SR1	SR2	SR3	SR6	SR7	SR8
PI (Mpa)	16,5	7,5	11,5	8,0	3,0	10,1

Con todos los datos se han establecido tres rangos para clasificar al Flysch:

TABLA A-3 CLASIFICACIÓN DEL FLYSCH EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN LÍMITE

Tipo de flysch	Presión Límite (MPa)	Valores medios adoptados para la presión límite (MPa)
F1	2,5 a 5,0	3,3
F2	5,0 a 10,0	6,5
F3	10,0 a >22,0	15,0

## 2. Justificación de los parámetros adoptados para resistencia de punta y fuste unitarios en el proyecto del ejemplo.

Según la fórmula para la resistencia unitaria por punta a partir de la presión límite incluida en el Anejo 1, para un diámetro de 1m y un empotramiento de 6m:

$$12Mpa = \left(0,8 + \frac{6m}{1m}\right) * p_d$$

$$p_d = 1,76 Mpa$$

Como podemos observar el criterio es conservador ya que los ensayos del pesiómetro dan un rango de 2,5-5 Mpa para el Flysch de peores características.

Mediante la correlación de resistencia a compresión simple-presión límite:

$$RCS = 2 * \frac{1,76}{10} = 0,352 Mpa$$

Según ROM 05-05:

$$\tau_f = \frac{1}{10} * p_{vh} = \frac{1}{10} * (3 * 0,352^{0,5}) = 0,17Mpa$$

DOCUMENTO ELABORADO POR EL COMITÉ TÉCNICO DE ATESS

OCTUBRE 2016