

# *Cimentaciones sobre pilotes en Roca. Pruebas de hinca.*

**Autor: Eliezer Castillo Martínez. Estudiante 5to año Ingeniería Civil.**

**Tutor: Dr. Ing. Luis O. Ibañez. Dpto Ingeniería Civil.  
Universidad Central de Las Villas. Villa Clara. Cuba**

## Resumen

En este trabajo se realizara un estudio y crítica de las expresiones para determinar la capacidad de carga de pilotes en roca así como también de las expresiones dinámicas para la determinación de la capacidad de carga en pilotes. También se hará un estudio y critica de los métodos para la realización de ensayos de carga in-situ en pilotes. Para esto es necesario desarrollar una búsqueda bibliográfica con el fin de que nos permita realizar un análisis adecuado para el desarrollo de la tesis.

## Introducción

La capacidad de una cimentación sobre pilotes para soportar cargas o asentamientos, depende de forma general de la resistencia por el fuste del pilote y de la resistencia por la punta del mismo. Para el caso que analizaremos es específico ya que son pilotes hincados en roca, y esto lo diferencia de la capacidad de carga de los pilotes no hincado en roca. En casos de responsabilidad donde se requieran garantías excepcionales es recomendable realizar pruebas de carga sobre los pilotes construidos. Éstas pueden ser destructivas y no destructivas. Los cálculos asociados al estudio de las cimentaciones profundas son poco precisos, y por ello, la realización de pruebas de carga “in situ” resulta especialmente recomendable. Las pruebas de carga deben realizarse sobre pilotes de tamaño semejante (longitud y diámetro) a aquéllos a cuyo estudio vayan a aplicarse los resultados; de esa forma no será necesario introducir imprecisiones importantes a la hora de considerar el efecto escala. Las pruebas de carga deben realizarse sobre pilotes construidos en terrenos semejantes (preferiblemente, en la propia obra) al caso en estudio y, sobre todo, deben ser construidos con técnicas análogas. La máxima utilidad de los ensayos de carga “in situ”, se obtiene cuando los pilotes ensayados son los propios pilotes cuyo comportamiento se quiere conocer, pero el ensayo sobre los propios pilotes de obra, sin embargo, impide alcanzar la carga de rotura, ya que si esta se alcanza sería destructiva. La medida de cargas y movimientos, debidamente interpretada, conduce a un conocimiento bastante preciso de la resistencia por punta y fuste. Las fórmulas de hinca de pilotes tratan de relacionar la capacidad portante de un pilote con su resistencia al hincado. Aunque desacreditadas por muchos ingenieros, las fórmulas de hinca todavía se utilizan en el sitio, como una verificación de las predicciones de diseño utilizando la mecánica de suelos. No se recomienda el empleo de las fórmulas de hinca en el diseño

de pilotes; sin embargo, a pesar de sus limitaciones puede utilizarse para ayudar al ingeniero a evaluar las condiciones del terreno en un pilotaje, revelando probablemente variaciones que no fueron aparentes durante la investigación de campo. Las capacidades de carga de pilotes determinadas en base a las fórmulas de hincado no son siempre confiables. Deben estar apoyadas por experiencia local y ensayos; se recomienda precaución en su utilización.

## **1.1 Capacidad de carga de pilotes en roca**

### **1.1.1 Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca**

#### **1.1.1.1 Teorías existentes**

Se distinguen, en principio, dos grandes grupos para la evaluación de la resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca. En uno se calcula su valor como función lineal de la resistencia a compresión simple; mientras que en el otro grupo se obtiene a partir de la raíz cuadrada de dicha resistencia a compresión simple ( $\sigma_c$ ).

Además, y como casos particulares, se consideran otras teorías cuyas expresiones no responden a ninguna de las dos formas de cálculo de la resistencia última por fuste indicadas anteriormente:

- Normativa DIN 4014 (1980).
- Williams y Pells (1981).
- Serrano y Olalla (2004; 2006).

Por último, completando a los distintos modelos existentes que permiten obtener la resistencia por fuste como función lineal de la resistencia a compresión simple, se estudia la formulación propuesta por Jiménez Salas et al. (1981) para el cálculo de dicha resistencia por fuste.

#### **1.1.1.1.1 Resistencia por fuste como función lineal de la resistencia a compresión simple**

Torne (1977) propone los siguientes valores mínimo y máximo para el cálculo de la resistencia por fuste:

$$\tau_{ult} = 0.05(\rightarrow 0.1) \cdot \sigma_c \quad \text{exp. 1.1}$$

Poulos y Davis (1980) establecen una resistencia admisible por fuste de  $0.05 \sigma_c$ . Suponiendo un coeficiente de seguridad de 3, se obtiene una resistencia última de  $0.15 \sigma_c$ , proporcionándose además una resistencia última de 0.45 MPa para el caso de rocas que no estén meteorizadas:

$$\tau_{ult} = 0.15 \cdot \sigma_c \quad (\tau_{ult} < 0.45 \text{ MPa}) \quad \text{exp. 1.2}$$

Tanto en esta teoría como en las formuladas a continuación, se considera un coeficiente de seguridad de 3. Aunque se trata de un valor elevado respecto del coeficiente de seguridad de 2.5 usado tradicionalmente para la evaluación de la resistencia por fuste, en el análisis comparativo la resistencia última por fuste se ha obtenido siempre multiplicando el valor de la carga admisible por 3.

La formulación ofrecida por Hooley y Lefroy (1993) solamente es aplicable paraocas fuertemente meteorizadas, con una resistencia a compresión simple muy baja, inferior a 0.25 MPa:

$$\tau_{ult} = 0.3 \cdot \sigma_c \quad (\tau_c < 0.25 MPa) \quad \text{exp. 1.3}$$

Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca como función lineal de la resistencia a compresión simple: $f(\sigma_c)$ $\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c$				
Autores	Fecha	Coeficiente $\alpha$	Limitaciones	Observaciones
Thorne	1977	0,05 → 0.1	-	Propone un valor mínimo y otro máximo para $\tau_{ult}$
Poulos & Davis	1980	0,15	$\tau_{ult} < 0,45 MPa$	Para rocas no muy meteorizadas, se consideran $\tau_{ult} = 0,45 MPa$
Hooley & Lefroy	1993	0,3	$\sigma_c < 0,25 MPa$	Solamente aplicable a rocas fuertemente meteorizadas

**Cuadro Resumen 1**

#### 1.1.1.1.2 Resistencia por fuste como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple

La resistencia aportada por el fuste de un pilote a lo largo de si empotramiento en roca puede ser también obtenida como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple:

$$\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (\tau_{ult} \text{ y } \sigma_c \text{ en MPa}) \quad \text{exp. 1.4}$$

Rosenberg y Journaux (1976) proponen la siguiente expresión:

$$\tau_{ult} = 0.375 \cdot \sigma_c^{0.515} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.5}$$

Dicha fórmula solamente puede ser usada con rigor para pilotes de diámetros comprendidos entre 200 y 610 mm y empotrados en un tipo específico de roca: pizarra.

Posteriormente, Horvath et al (1983) deducen una nueva expresión, que para empotramientos realizados en argilitas ó rocas similares con diámetro de pilote entorno a los 710 mm adopta la forma:

$$\tau_{ult} = 0.2 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.6}$$

Si la pared del pilote presenta una cierta rugosidad, el correspondiente aumento en la resistencia por fuste del pilote empotrado en roca considera mediante la fórmula:

$$\tau_{ult} = 0.3 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.7}$$

En caso de que la superficie de contacto pilote-terreno sea muy rugosa, se puede considerar la siguiente expresión, para tener en cuenta el aumento de la resistencia por fuste:

$$\tau_{ult} = 0.60 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp 1.8}$$

Wyllie (1991) proporciona una resistencia última por fuste comprendida entre los siguientes valores:

$$\tau_{ult} = 0.4 \cdot \sigma_c^{0.5} \text{ y } \tau_{ult} = 0.6 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.9}$$

Para pilotes empotrados en rocas suficientemente blandas, con  $\sigma_c < 0.5$  MPa, Fleming et al. (1992) proponen considerar una resistencia última por fuste de:

$$\tau_{ult} = 0.4 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp1.10}$$

Hooley y Lefroy (1993) establecen para rocas alteradas blandas como las pizarras, limonitas y argilitas, con  $0.25 < \sigma_c < 3.0$  MPa, el siguiente límite inferior de resistencia:

$$\tau_{ult} = 0.15 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp.1.11}$$

Ambos autores indican además que el límite superior aceptable debe ser menor o igual a:

$$\tau_{ult} = 0.4 MPa$$

Kulhawy y Phoon (1993) establecen el siguiente límite superior:

$$\tau_{ult} = 0.67 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.12}$$

Lo definen para superficies de contactos terreno-pilotes muy rugosas, incluso con rugosidad provocada artificialmente. Para las rocas consideradas por estos autores como blandas, con  $\sigma_c \leq 5$  MPa, se establece el mínimo valor para dicha resistencia última por fuste:

$$\tau_{ult} = 0.22 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.13}$$

Carubba (1997) también considera la variación de la resistencia última por fuste entre dos valores:

$$\tau_{ult} = 0.13 \cdot \sigma_c^{0.5} \text{ y } \tau_{ult} = 0.25 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.14}$$

Zhang y Einstein (1998) aplican coeficientes mayores Para la determinación de dichos valores:

$$\tau_{ult} = 0.40 \cdot \sigma_c^{0.5} \text{ y } \tau_{ult} = 0.80 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.15}$$

Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple: $f(\sigma_c^{1/2})$				
$\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c$				
Autores	Fecha	Coeficiente $\alpha$	Limitaciones	Observaciones
Rosenberg & Journaux	1976	0,375	En pilotes de diámetro entre 210 · 610 mm, empotrados en pizarras.	-
Horvath et al.	1983	0,2 / 0,3	En pilotes de 710 mm de diámetro (aprox). en argilitas o similares.	Si la pared del pilote presenta cierta rugosidad, se considera un coeficiente de 0,3
Rowe & Armitage	1987	0,45 / 0,6	-	Si la superficie de contacto pilote – terreno es muy rugosa, se considera un coeficiente de 0,6
Wyllie	1991	0,4 → 0,6	-	Establece un límite inferior y otro superior.
Fleming et al.	1992	0,4	$\sigma_c < 0,50 \text{ MPa}$	Aplicable solo a rocas suficientemente blandas
Hooley & Lefroy	1993	0,15 → 0,4	$0,25 < \sigma_c < 3,00 \text{ MPa}$ en pizarras, lutitas y argilitas.	Aplicable sobre rocas alteradas y blandas
Kulhawy & Phoon	1993	0,22 → 0,67	-	El coeficiente superior, para superficies de contacto pilote – terreno muy rugosas. El inferior, para rocas blandas.
Carubba	1997	0,13 → 0,25	-	Establece un límite inferior y otro superior.
Zhang & Einstein	1998	0,4 → 0,8	-	Establece un límite inferior y otro superior.

**Cuadro resumen 2**

#### 1.1.1.1.3 Casos singulares

Dentro de las teorías existentes sobre resistencia última por fuste de pilotes empotrados en roca, se pueden añadir a las anteriormente descritas cuatro casos especiales o singulares. En el método de cálculo propuesto por Serrano y Olalla (2004; 2006), el exponente que opera con la resistencia a compresión simple varía entre los valores de 0.5 y 1, dependiendo del valor del tipo de roca, de la resistencia a compresión simple, del grado de fracturación y alteración del macizo rocoso y de las profundidades del trabajo del pilote.

##### 1.1.1.1.3.1 Normativa DIN 4014 (1980)

La Normativa DIN 4014 (1980) establece la siguiente correspondencia entre valores de la resistencia a compresión simple de la roca de empotramiento y la resistencia última por fuste ( $\tau_{ult}$ ):

$\sigma_c$ (MPa)	$\tau_{ult}$ (MPa)
0,5	0,08
5	0,5
20	0,5

Ajustando los valores proporcionados mediante una curva del tipo  $\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c^\beta$  (MPa), para el tramo de 0.5 a 5 MPa la mejor aproximación se obtiene considerando los parámetros  $\alpha=0.14$  y  $\beta=0.8$ .

##### 1.1.1.1.3.2 Williams y Pells (1981)

Williams y Pells (1981) consideran una ley no lineal para la definición de dicha resistencia a partir de dos parámetros adicionales,  $\alpha$  y  $\beta$ , que tienen en cuenta tanto la calidad de la roca (RQD) como la resistencia a compresión simple de la misma ( $\sigma_c$ ).

Establecen la siguiente relación no lineal entre la resistencia última unitaria por fuste de la parte del pilote empotrada en roca y la resistencia a compresión simple de la misma:

$$\tau_{ult} = \beta \cdot [\alpha(\sigma_c) \cdot \sigma_c] \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.16}$$

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  que intervienen en la expresión se estiman a partir de correlaciones empíricas establecidas por Williams, Johnston y Donald (1980).

Aunque estos autores realizan sus estudios para un tipo de roca específica como es la lutita de Melbourne, los gráficos que proporcionan para la determinación de ambos coeficientes también pueden ser aplicados a otras masas rocosas blandas con las siguientes características:

$$0.6 \text{ MPa} \leq \sigma_c \leq 12.5 \text{ MPa}$$

Según una curva ajustada a los resultados obtenidos empíricamente por Williams, Johnston y Donald (1980), nos permite estimar el denominado factor adhesión “ $\alpha$ ” a partir de la resistencia a compresión simple de la roca sana,

El Factor de reducción de la resistencia por fuste,  $\beta$ , es función del factor de la masa rocosa “ $j$ ” tal y como su puede observar en Gannon et al. (1999) siendo  $j$  el “Factor de Masa” obtenido como cociente del módulo de deformabilidad de de la masa rocosa ( $E_m$ ) y el módulo de la roca intacta ( $E$ ).

Calidad de la roca	RQD	Frecuencia de fractura (*) (por metro)	Factor de masa $j$
Muy mala	0 – 25	> 15	0,2
Mala	25 – 50	15 – 8	0,2
Regular	50 – 70	8 – 5	0,2 – 0,5
Buena	75 – 90	5 – 1	0,5 – 0,8
Excelente	90 – 100	1	0,8 – 1,0

(\*) La frecuencia de fractura viene dada por el número de discontinuidades por metro de longitud del testigo de sondeo de la masa rocosa.

**Tabla 1.1**

El factor “ $j$ ” puede ser estimado a partir de la calidad en la roca. En la tabla de Gannon et al (1999), se relaciona dicho factor con el RGD de la masa rocosa (tabla 1.1).

El módulo de deformabilidad de la masa rocosa ( $E_m$ ) debe estar comprendido entre los siguientes valores:

$$100 \text{ MPa} \leq E_m \leq 1000 \text{ MPa}$$

#### 1.1.1.1.3.3 Método de Jiménez Salas et al. (1981)

Para poder estimar según este método la resistencia última por fuste,  $\tau_{ult}$ , de un pilote empotrado en roca, se ha de calcular previamente la resistencia unitaria por la base del pilote.

La resistencia por la base o punta del pilote viene definida por la expresión:

$$R_B = \alpha' \cdot \sigma_c \quad (\text{MPa}) \quad \text{exp. 1.17}$$

Siendo  $\alpha'$  un coeficiente menor o igual que uno y que tiene en cuenta la longitud del pilote empotrado en roca ( $D_e$ ), el diámetro de la perforación ( $B$ ) y la naturaleza del sustrato rocoso de empotramiento ( $\beta'$ ):

$$\alpha' = \beta' \cdot \left(0.5 + \frac{D_e}{6 \cdot B}\right) \quad \text{exp. 1.18}$$

Los valores propuestos para el parámetro adimensional  $\beta'$  varían de 0.3 en el caso de rocas metamórficas como las pizarras, filitas y esquistos hasta los 0.8 alcanzados por rocas sedimentarias como las calizas y areniscas compactas.

Para rocas ígneas como el granito, la diabasa o la granodiorita, se recomienda un valor intermedio de  $\beta'=0.6$ .

Empotramiento $\left(\frac{D_e}{B}\right)$	Rocas metamórficas $\beta' = 0,3$	Rocas ígneas $\beta' = 0,6$	Rocas sedimentarias $\beta' = 0,8$
1	0.10	0.20	0.27
3	0.15	0.30	0.40
5	0.23	0.45	0.50
12	0.38	0.50	0.50

NOTA:  $\alpha'$  no puede ser mayor que uno

**Tabla 1.2**

Una vez obtenida la resistencia por la base del pilote, la resistencia por fuste de la parte empotrada en roca se considera igual a la mitad de dicho valor:

$$\tau_{ult} = \frac{R_B}{2} \quad \text{exp. 1.19}$$

La resistencia última por fuste adopta por tanto la expresión:

$$\tau_{ult} = 0.15 \cdot (\rightarrow 0.4) \cdot \left(0.5 + \frac{D_e}{6 \cdot B}\right) \cdot \sigma_c \quad \text{exp. 1.20}$$

Esta expresión resulta linealmente dependiente del empotramiento ( $D_e/B$ ) del pilote, de tal manera que, en función del tipo de roca, la resistencia a compresión simple de la misma ( $\sigma_c$ ) por el valor que corresponda de la tabla 1.2.

#### 1.1.1.1.3.4 Método de Serrano y Olalla (2004; 2006)

Partiendo del criterio de resistencia de Hoek y Brown (1980) para el estado tensional en rotura de la roca, Serrano y Olalla (1994) expresan de forma paramétrica dicho criterio de rotura, en función del ángulo de rozamiento instantáneo  $\rho$  y de los parámetros  $\beta$  (Modulo de Resistencia) y  $\xi$  (Coeficiente de Tenacidad) siendo:



$$\beta = \frac{m \cdot \sigma_c}{s} = \frac{m_0 \cdot \sigma_c}{8} \cdot \exp \frac{GSI-100}{28} \quad \text{exp. 1.21}$$

$$\xi = \frac{8 \cdot s}{m^2} = \frac{8}{m_0^2} \cdot \exp \frac{GSI-100}{25.2} \quad \text{exp. 1.22}$$

Donde m, s y GSI, (análogo, a grandes rasgos, en su valor al RMR básico), son los conocidos parámetros definidos por Hoek y Brown.

Se supone que sólo hay resistencia por fuste en la superficie del pilote empotrada en roca, considerando por tanto la no contribución de la resistencia por fuste de los suelos que pudieran encontrarse por encima de la roca. La posible contribución de la punta del pilote tampoco se tiene en cuenta.

El método considera que la resistencia del contacto roca pilote es equivalente a la de la roca. Ello implica la no existencia de alteración, ni modificación o perturbación en la superficie de la roca en contacto con el fuste del pilote, además de una resistencia del material del pilote (generalmente hormigón o acero) superior a la de la roca.

Las tensiones horizontales ( $\sigma_h$ ) que actúan sobre el fuste se calculan según la expresión:

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v \quad \text{exp. 1.23}$$

Donde  $K_0$  es un coeficiente de proporcionalidad y  $\sigma_v$  cuantifica las tensiones verticales que se desarrollan a lo largo del fuste.

Ha de existir una longitud mínima de pilote atravesando la roca a fin de garantizar la movilización de las tensiones de corte propuestas por el método. Para rocas duras, dicha longitud de empotramiento debe ser superior a 0.5 m, mientras que para rocas blandas ha de ser mayor de 2.5 m (DIN 4014).

### 1.1.1.2 Normativa Española

Fundamentalmente son cuatro los Códigos Normativos que existen en España y que definen como valorar la resistencia por fuste de un pilote perforado en roca.

- ROM 0.5-94: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas (1994).
- GCOC: Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras (2004).
- ROM 0.5-05: Recomendaciones Geotécnicas para obras Marítimas (2005).
- CTE: Código Técnico de la Edificación (2006).

Tanto el nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE) como la guía de Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas en su versión anterior (ROM 0.5-94) considerar la resistencia por fuste como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple ( $\sigma_c$ ).

La Guía de cimentaciones en Obras de Carreteras (GCOC) y la guía ROM en su última versión (ROM 0.5-05) incorporan nuevos parámetros para la descripción del macizo rocoso de empotramiento, aunque los hacen también función lineal de la resistencia a compresión simple.

#### 1.1.1.2.1 ROM 0.5-94: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas (1994)

La ROM 0.5-94 recomienda utilizar la siguiente fórmula para el cálculo de la resistencia por fuste como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple.

$$\tau_{ult} = 0.5 \cdot \left( \frac{\sigma_c}{10} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{exp. 1.24}$$

Estando expresada tanto la resistencia última por fuste ( $\tau_{ult}$ ) como la resistencia a compresión simple ( $\sigma_c$ ) en *MPa*.

En el caso de que la resistencia por fuste así obtenida sea superior a 0.5 *MPa*, se ha de adoptar dicho valor (0.5 *MPa*) como resistencia última por fuste del pilote empotrado en roca.

#### 1.1.1.2.2 GCOC: Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (2004)

Según esta normativa, para que el estrato de empotramiento del pilote pueda ser considerado realmente como roca, han de concurrir las siguientes condiciones:

$$\sigma_c \text{ (resistencia a compresión simple de la roca sana)} \geq 1 \text{ MPa}$$

$$RQD \geq 10$$

$$\text{Grado de meteorización de la roca (según la escala } ISRM) \geq 3$$

Si no se produjera alguna de las tres condiciones, el sustrato pasaría a ser tratado como un suelo, aplicando el procedimiento descrito para estos casos por la propia Guía para el cálculo de la resistencia unitaria por fuste.

Cuando la zona de empotramiento del pilote pueda ser considerada como roca, la resistencia por fuste se calcula según la expresión:

$$\tau_{ult} = 0.1 \cdot q_q \leq 2 \text{ MPa} \quad \text{exp. 1.25}$$

Siendo  $q_q$  es la resistencia unitaria por punta que corresponde a la roca, obtenida a partir de:

$$q_q = 2 \cdot p_{vadm} \leq 20 \text{ MPa} \quad \text{exp. 1.26}$$

siendo:

$$p_{vadm} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{p_0}} \quad (\text{MPa}) \quad \text{exp. 1.27}$$

$p_{vadm}$ : presión admisible, en *MPa*, para la cimentación superficie roca.

$\sigma_c$ : resistencia a compresión simple de la roca sana en *MPa*.

$p_p$ : presión de referencia. Se toma un valor de 1 *MPa*.

$\alpha_1$ : parámetro que es función del tipo de roca. Su valor puede calcularse a partir de la resistencia a tracción simple de la roca o tracción indirecta, aunque su forma más habitual de estimación sea a partir de una tabla proporcionada por la

propia Guía, donde adopta los valores de 0.4; 0.6; 0.8 ó 1 en función del tipo de roca.

$\alpha_2$ : coeficiente en función del grado de meteorización de la roca. Se estima partir de la Tabla 3.3 de la Guía, adoptando los valores de 0.5; 0.7 ó 1 cuando el grado de meteorización sea de III; II ó I respectivamente.

$\alpha_3$ : coeficiente que es función del espaciamiento existente entre litoclasas dentro del macizo rocoso. La Guía proporciona la siguiente fórmula para su estimación:

$$\alpha_3 = \sqrt{\frac{RQD (\%) }{100}} \quad \text{exp. 1.28}$$

En el caso de que el sustrato tenga que considerarse como un suelo por el incumplimiento de alguna de las tres condiciones anteriormente indicadas, la presión vertical admisible ( $p_{vadm}$ ) se calcula según el criterio establecido por la Guía para cimentaciones superficiales en suelos.

Se usa entonces la expresión polinómica clásica conocida coloquialmente por el nombre de uno de sus autores, Brinch-Hansen. Esta fórmula se basa en la teoría de la plasticidad y viene afectada por diversos factores de corrección empíricos que tienen en cuenta tanto la geometría de la cimentación como las características geotécnicas del terreno.

#### 1.1.1.2.3 ROM 0.5-05: Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas (2005)

Para poder considerar el estrato de empotramiento como roca, esta normativa utiliza las dos primeras condiciones establecidas anteriormente por la GCOC (2004), referentes a una resistencia a compresión simple ( $\sigma_c$ ) mayor o igual que 1 MPa y un valor de RQD mayor o igual que 10

La tercera condición (que en el caso de la GCOC consistía en la definición del grado de alteración máximo admisible por el estrato de empotramiento para que éste pudiera seguir siendo considerado como roca) viene definida en la ROM 0.5-05 (2005) como una separación o espaciamiento mínimo entre litoclasas por debajo del cual la fracturación del terreno impide que pueda ser tratado como roca:

$$s \text{ (espaciamiento entre litoclasas)} \geq 0.1 \text{ m}$$

Si no se produjera alguna de las tres condiciones, el sustrato pasaría a ser considerado entonces como un suelo, pudiendo aplicarse la fórmula analítica para el cálculo de  $\tau_{ult}$  en suelos cohesivos a largo plazo proporcionada por la ROM 0.5-05.

Si se cumplen las tres condiciones de forma simultánea, se aplica el procedimiento descrito por la ROM 0.5-05 en su Capítulo III, "Criterios Geotécnicos", Apartado 3.6.4.6 "Cimentaciones con pilotes en roca".

Según dicho apartado, la resistencia por fuste de pilotes en roca ha de ser contabilizada solamente en zonas donde el grado de alteración sea inferior o igual a III, en cuyo caso se considera la siguiente expresión para el cálculo de la resistencia unitaria por fuste ( $\tau_{ult}$ ):

$$\tau_{ult} = 0.1 \cdot p_{vh} < 2 \text{ MPa} \quad \text{exp. 1.29}$$

$p_{vh}$  es la presión vertical de hundimiento que corresponde a la roca del fuste. Su valor se obtiene de la siguiente fórmula, debiendo ser inferior a 15 MPa:

$$p_{vh} = 3 \cdot (p_r \cdot \sigma_c)^{\frac{1}{2}} \cdot f_D \cdot f_A \cdot f_\delta < 15 \text{ MPa} \quad \text{exp. 1.30}$$

siendo:

$p_r$ : presión de referencia. Se considera igual a 1 MPa.

$\sigma_c$ : resistencia a compresión simple de la roca sana expresada en MPa.

$f_D$ : factor de reducción debido al diaclasamiento de la roca. Se toma el valor mínimo obtenido de las dos expresiones siguientes:

$$f_D = 2 \cdot \left(\frac{s}{B^*}\right)^{\frac{1}{2}} \leq 1 \quad \text{exp. 1.31}$$

$$f_D = 0.2 \cdot \left(\frac{B_0 \cdot RQD(\%)}{B^*}\right)^{\frac{1}{2}} \leq 1 \quad \text{exp. 1.32}$$

donde:

$s$ : espaciamiento entre litoclasas. Se recuerda que cuando  $s < 0.10$  m, este método no es aplicable.

$B^*$ : ancho equivalente de la cimentación. Para el caso de cálculo de la resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca, se ha de considerar igual al diámetro.

$B_0$ : ancho de referencia. Se considera un valor igual a 1 m.

$RQD$ : índice de fragmentación de la roca. Cuando sea inferior al 10%, el procedimiento de cálculo aquí descrito deja de ser válido.

$f_A$ : factor de reducción debido al grado de alteración de la roca. Adopta los valores de 1; 0.7 ó 0.5 según que el grado de meteorización de la roca sea I; II; III respectivamente.

$f_\delta$ : factor que tiene en cuenta la inclinación de la carga. Para el caso concreto del cálculo de la resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca adopta un valor igual a 1.

#### 1.1.1.2.4 CTE: Código Técnico de la Edificación (2006)

En el Apartado F.2.4, Punto 4, del Anexo F del Documento “Seguridad Estructural. Cimientos” del CTE, Parte I, se establece que dentro de zona de roca, para la evaluación de la resistencia por el fuste de pilotes perforados, debe considerarse un valor de cálculo de la resistencia unitaria igual a:

$$\tau_{ult} = 0.2 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (\text{MPa}) \quad \text{exp. 1.33}$$

Donde el valor de la resistencia a compresión simple de la roca intacta ( $\sigma_c$ ) viene especificado en MPa. Se debe verificar siempre que la roca sea estable en agua.

### 1.1.1.3 Normativa Internacional

Dentro de la Normativa de ámbito internacional, se pueden distinguir los siguientes códigos o Manuales que pueden ser usados en la valoración de la resistencia por fuste de un pilote empotrado en roca:

- Código de Pilotes Australiano (1980).
- Manual de Ingeniería de Cimentaciones del Canadá (1985).
- Normativa AAHSTO (1997; 1998).
- Eurocódigo 7: Proyecto Geotécnico (1999).

#### 1.1.1.3.1 Código de Pilotes Australiano (1980)

En el Borrador del Código de Pilotes Australiano, citado en Williams et al. (1980), la resistencia admisible por fuste del pilote empotrado en roca viene dada por la expresión:

$$\tau_{adm} = 0.05 \cdot \sigma_c \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.34}$$

Aplicándole a dicha expresión un coeficiente de seguridad de 3 se obtiene:

$$\tau_{ult} = 0.15 \cdot \sigma_c \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.35}$$

#### 1.1.1.3.2 Manual de Ingeniería de Cimentaciones del Canadá (1985)

Este Manual establece una resistencia última por fuste comprendida entre los siguientes valores extremos:

$$\tau_{ult} = 0.2 \cdot \sigma_c^{0.5} \text{ y } \tau_{ult} = 0.33 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.36}$$

#### 1.1.1.3.3 Normativa AAHSTO (1997; 1998)

El Manual de la AAHSTO (1997) recomienda los siguientes límites inferior y superior:

$$\tau_{ult} = 0.21 \cdot \sigma_c^{0.5} \text{ y } \tau_{ult} = 0.26 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.37}$$

Posteriormente, en las AASHTO, “Standard Specifications for Highways Bridges” (1998) se establece un doble criterio para la estimación de la resistencia por fuste de la parte del pilote empotrada en roca, dependiendo de que la resistencia a compresión simple de dicha roca sea menor o igual que 1.9 MPa.

De esta forma, si la resistencia a compresión simple de la roca donde se empotra el pilote es menor o igual que 1.9 MPa se ha de considerar la expresión:

$$\tau_{ult} = 0.21 \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (MPa) \quad \text{exp. 1.38}$$

#### 1.1.1.3.4 Eurocódigo 7: Proyecto Geotécnico (1999)

Dentro de los distintos Eurocódigos Estructurales existentes, el “Eurocódigo 7: Proyecto Geotécnico” constituye una norma de aplicación a aspectos geotécnicos del proyecto de obras de edificación e ingeniería civil.

En la Parte 3 del mismo, referente al “Proyecto asistido por ensayos de campo”, se proporciona un método de evaluación de la resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca.

Se propone para ello, en el Anexo C.3, un método semiempírico de evaluación de evaluación de carga límite del pilote indirectamente, a partir de los resultados de ensayos presiométricos.

Según sea la presión límite ( $P_{LM}$ ) obtenida con estos ensayos, se considera las siguientes categorías para tres tipos de sustrato rocoso (calizas, margas o rocas meteorizadas en general) definidos en la tabla mostrada a continuación:

Tipo de roca	Categoría	$P_{LM}$ (MPa)
Calizas	A	< 0,7
	B	1,0 – 2,5
	C	> 3,0
Margas	A	1,5 – 4,0
	B	> 4,5
Rocas meteorizadas	A	2,5 – 4,0
	B	> 4,5

Tipo de pilote: Hormigonado a baja presión						
Tipo de roca	Calizas			Margas		Rocas meteorizadas
Categoría	A	B	C	A	B	
Curva	2	3	4	5	5	-

**Tabla 1.3**

En función del tipo de pilote (hormigonado a baja presión), la resistencia unitaria por fuste se obtiene utilizando la curva del grafico de resistencia unitaria por fuste para pilotes cargados axialmente, correspondiente al tipo de roca y categoría que se hayan definido.

La selección de dicha curva se realiza en la Tabla “Selección de curvas de proyecto por resistencia unitaria del fuste (tabla 1.3), conforme al criterio establecido.

En la medida en que este procedimiento se basa en los resultados del ensayo presiométrico y no utiliza los valores que se obtienen respecto de la resistencia a compresión simple, no se va a utilizar para efectuar el estudio comparativo, dadas las dificultades que plantea su equiparación.

### 1.1.2 Resistencia por punta de pilotes empotrados en roca

En algunas ocasiones los pilotes se hincan hasta un estrato subyacente de roca. En tales casos, el ingeniero debe evaluar la capacidad de carga de la roca. La resistencia unitaria última de punta en roca (Goodman, 1980) es:

$$q_p = q_u(N_\phi + 1) \quad \text{exp. 1.39}$$

Donde:

$$N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2)$$

$q_u$ : resistencia a compresión no confinada de la roca

$\phi$ : ángulo de fricción drenado

La resistencia a compresión no confinada de la roca se determina por medio de pruebas en el laboratorio sobre especímenes de roca obtenidos durante investigaciones de campo. Sin embargo, debe procederse con extremo cuidado al obtener el valor apropiado de  $q_u$  porque los especímenes de laboratorio son usualmente pequeños en diámetro. Conforme el diámetro del espécimen crece, la resistencia a compresión no confinada decrece, lo que se denomina “efecto de escala”. Para especímenes mayores que 3 pies (1m) de diámetro, el valor  $q_u$  permanece aproximadamente constante. Parece haber una reducción de cuatro o cinco veces la magnitud de  $q_u$  en este proceso. El efecto de escala en rocas es principalmente causado por fracturas pequeñas y grandes distribuidas aleatoriamente y también por rupturas progresivas a lo largo de planos de deslizamiento. Por consiguiente siempre se recomienda que:

$$q_u(\text{diseño}) = \frac{q_u(\text{lab})}{5} \quad \text{exp. 1.40}$$

La tabla de resistencia típica a compresión no confinada de rocas, da valores (de laboratorio) representativos de resistencias a compresión no confinada de rocas. Valores representativos del ángulo,  $\phi$ , de fricción de rocas se dan en la tabla de valores típicos del ángulo de fricción,  $\phi$ , de rocas.

Tipo de roca	lb/pulg <sup>2</sup>	$q_u$ MN/m <sup>2</sup>
Arenisca	10000 – 20000	70 – 140
Caliza	15000 – 30000	105 – 210
Lutita	5000 – 10000	35 – 70
Granito	20000 – 30000	140 – 210
Marmol	8500 – 10000	60 – 70

**Tabla de resistencia típica a compresión no confinada de rocas**

Tipo de roca	Ángulo de fricción, $\phi$ (grados)
Arenisca	27 – 45
Caliza	30 – 40
Lutita	10 – 20
Granito	40 – 50
Marmol	25 – 30

**Tabla de valores típicos del ángulo de fricción,  $\phi$ , en rocas**

### 1.1.2.1 Norma Cubana

La Norma Cubana establece para la resistencia en punta de los tipos de pilotes: hincados, encamisados, rellenables y perforadores, los cuales se apoyan en suelos rocosos o poco compresibles ( $E_o > 100000$  kPa) la fórmula:

$$Q^*_v = R^* \cdot A_p \quad (\text{kN}) \quad \text{exp. 1.41}$$

donde:

$A_p$ : área de apoyo del pilote ( $\text{m}^2$ ) que se asume para los casos de pilotes de sección transversal constante e igual al área neta de la sección transversal para pilotes encamisados, huecos, cuando estos no son rellenados con hormigón. Si hay relleno con hormigón será igual al área bruta de la sección transversal, siempre que dicho relleno alcance una altura mayor o igual a  $3D$  (b).

$R^*$ : resistencia a compresión no confinada de los núcleos de roca (kPa), que se asume de la forma siguiente:

(\*) Para pilotes encamisados, perforados o de huecos rellenados de hormigón apoyados en suelos rocosos se determina por la expresión siguiente:

$$R^* = \frac{K s q \cdot \bar{R}}{\gamma_{gR}} \cdot dR \quad (\text{kPa}) \quad \text{exp. 1.42}$$

donde:

$\bar{R}$ : valor promedio de la resistencia límite a compresión axial del suelo rocoso en condiciones de humedad natural (en relación con el diámetro: altura de la muestra igual a dos, 2).

$\gamma_{gR}$ : coeficiente de seguridad para los suelos igual a  $\gamma_{gR}=1.6$ .



$$dr = \left( 1 + 0.4 \frac{LE}{D} \right) \leq 3.5$$

exp. 1.43

LE: profundidad de embebimiento del pilote obturado en la roca. Se asume igual a la profundidad de empotramiento (m).

D: diámetro exterior de empotramiento en el suelo rocoso.

Valores de RQD	Espaciamiento de las discontinuidades (m)	Ksq
25 < RQD ≤ 50	0.06-0.2	0.1
50 < RQD ≤ 75	0.2-1.6	0.3
75 < RQD ≤ 90	1.6-2.0	0.75
90 < RQD ≤ 100	>2.0	1.0
Valores de Ksq.		

RQD: índice de calidad de la roca, se define como el porcentaje de recuperación de pedazos de núcleos de rocas mayores de 10cm de longitud con respecto a la longitud del sondeo.

RQD= Longitud de los pedazos de núcleo de 10cm / longitud del sondeo.

## 1.2 Pruebas de carga en pilotes

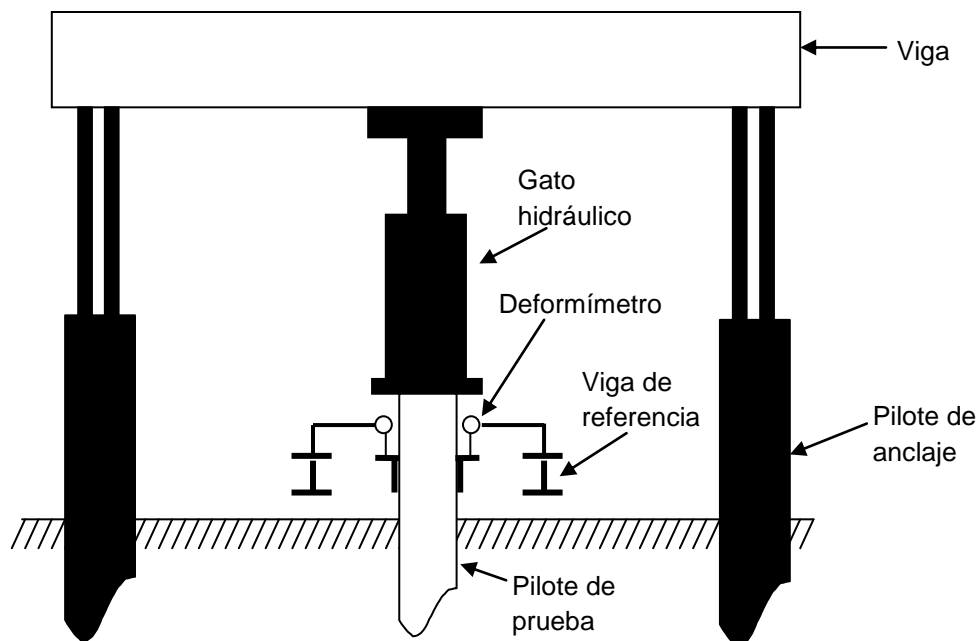
En la mayoría de los grandes proyectos, un número específico de pruebas de carga debe llevarse a cabo sobre pilotes. La razón principal es la falta de confiabilidad en los métodos de predicción. La capacidad de carga vertical y lateral de un pilote debe probarse en el campo.

El método más seguro para determinar la capacidad de carga de un pilote, para la mayoría de los lugares, es la prueba de carga [Juárez (1975), Sowers (1977), Paulos y Davis (1980), Jiménez (1986), Lambert (1991), Fellenius (2001), Vega Vélez (2005)]. Dentro de ella se han desarrollado la prueba de asiento controlado (controlando el incremento de asiento o a una velocidad de asiento constante) y la prueba con carga controlada (incremento de carga constante en el tiempo o asiento mínimo para un incremento de carga). Este último es el más usado, ya que permite determinar la carga última cuando se ha movilizad la resistencia del suelo que se encuentra bajo la punta y rodeando al pilote.

En esencia, estas pruebas, no son más que experimentar a escala real, un pilote, para procesar su comportamiento bajo la acción de cargas y determinar su capacidad de carga. Precisamente, su inconveniente fundamental estriba en su elevado costo y en el tiempo requerido para realizarla.

Sowers (1977), recomienda que los resultados del ensayo son una buena indicación del funcionamiento de los pilotes, a menos que se hagan después de un período de tiempo. Jiménez (1986) muestra preocupación ya que el pilote de prueba puede representar o no la calidad de los pilotes definitivos. Otra limitación planteada por este autor radica en que la prueba de carga se realiza generalmente a un solo pilote y se conoce que el comportamiento de un grupo es diferente al de la unidad aislada.

La figura 1, que se muestra a continuación muestra un diagrama esquemático del arreglo de un ensayo de carga en pilotes para probar la compresión axial en el campo. La carga se aplica al pilote por medio de un gato hidráulico. Cargas por etapas se al pilote y se permite que pase tiempo suficiente tiempo después de cada aplicación de manera que ocurra una pequeña una pequeña cantidad de asentamiento. El asentamiento de los pilotes se mide por medio de deformímetros. La cantidad de carga por aplicar en cada etapa variará, dependiendo de los reglamentos locales de construcción. La mayoría de los reglamentos requieren que cada etapa de carga sea aproximadamente igual a un cuarto de la carga de trabajo propuesta. La prueba debe efectuarse por lo menos a una carga total de dos veces la carga de trabajo propuesta. Después de alcanzarse la carga deseada en el pilote, éste es descargado gradualmente.



La figura 2 muestra un diagrama ca \_ **Figura 1** \_ amiento obtenido de una carga y descarga de campo. Para cualquier carga,  $Q$ , el asentamiento neto del pilote se calcula como sigue:

- Cuando  $Q = Q_1$

Asentamiento neto,  $s_{\text{neto}(1)} = s_{t(1)} - s_{e(1)}$

- Cuando  $Q = Q_2$

Asentamiento neto,  $s_{\text{neto}(2)} = s_{t(2)} - s_{e(2)}$

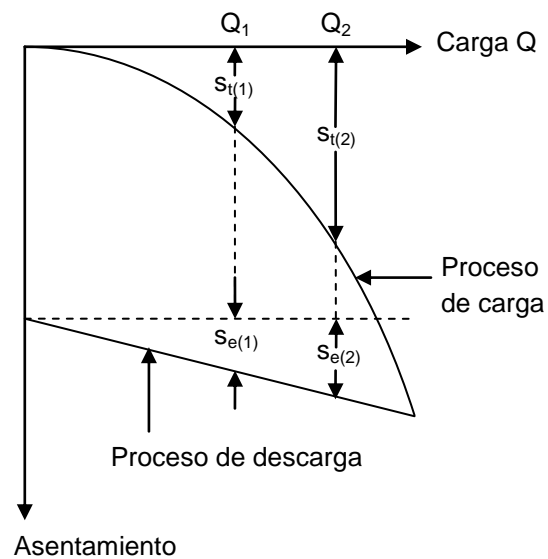
⋮

Donde

$s_{\text{neto}}$ : asentamiento neto

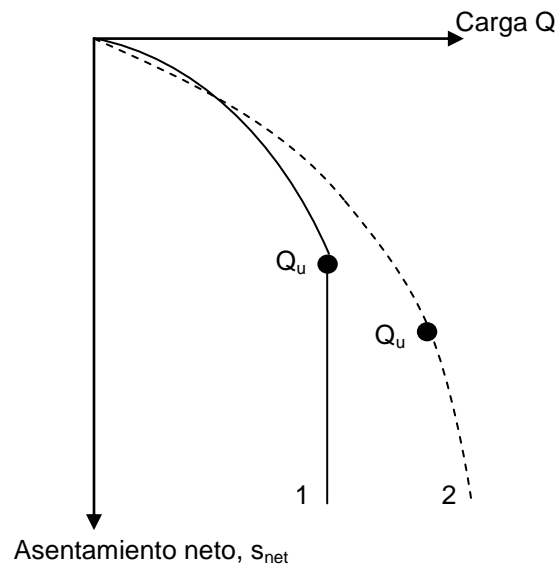
$s_e$ : asentamiento elástico del pilote mismo

$s_t$ : asentamiento total



**Figura 2**

Estos valores de  $Q$  se indican en una gráfica contra el asentamiento neto correspondiente  $s_{\text{neto}}$ , como se muestra en la figura 3. La carga última del pilote se determina con esta gráfica. El asentamiento del pilote crece con la cara hasta cierto punto, más allá del cual la curva carga – asentamiento se vuelve vertical. La carga correspondiente al punto que la curva  $Q$  versus  $s_{\text{neto}}$  se vuelve vertical es la cara última,  $Q_u$ , del pilote. En muchos casos, la última etapa de la curva carga – asentamiento es casi lineal, mostrando un grado amplio de asentamiento para un pequeño incremento de carga. La carga última,  $Q_u$ , para tal caso se determina del punto de la curva  $Q$  versus  $s_{\text{neto}}$  donde empieza esta porción lineal empinada.



**Figura 3**

El procedimiento de prueba de carga antes descrito requiere la aplicación de cargas por etapas sobre los pilotes así como la medición del asentamiento y se llama ensayo de carga controlada. La otra técnica usada para una prueba de carga en pilotes, tasa de penetración a velocidad constante, la carga sobre el pilotes es continuamente incrementada para mantener una velocidad constante de penetración, que varía de 0.01 a 0.1 pulg/min (0.25 a 2.5 mm/min). Esta prueba da una gráfica carga – asentamiento similar a la obtenida con la carga controlada. Otro tipo de prueba es la carga cíclica en la que una carga incremental es repetidamente aplicada y retirada.

Las pruebas de carga sobre pilotes empotrados en arena se conducen inmediatamente después que se hincan los pilotes. Sin embargo, cuando están empotrados en arcilla, debe tenerse cuidado al decidir el lapso de tiempo entre el hincado y el principio de la prueba de carga.

A modo de conclusión podemos plantear que la prueba de carga es un método bastante seguro en la determinación de la carga última de los pilotes, siempre que se proporcione el mismo grado de calidad al pilote en prueba y al definitivo, pero es muy costoso y por esto se toman otras alternativas en la medición de la capacidad de carga.

### **1.3 Expresiones Dinámicos**

Para desarrollar la capacidad de carga deseada, un pilote de punta debe penetrar suficientemente el estrato denso de suelo o tener contacto suficiente con un estrato de roca. Este requisito no es siempre satisfecho hincando un pilote a una profundidad predeterminada debido a la variación de los perfiles de suelo, por lo que se han desarrollado varias ecuaciones para calcular la capacidad última de un pilote durante la

operación. Las ecuaciones dinámicas son ampliamente usadas en el campo para determinar si el pilote ha alcanzado un valor satisfactorio de carga a la profundidad predeterminada.

### 1.3.1 Fórmula del Engineering News Record (ENR)

Una de las primeras de esas ecuaciones dinámicas, comúnmente llamada la fórmula del Engineering News Record (ENR), se deriva de la teoría del trabajo y la energía. Es decir,

Energía impartida por el martillo por golpe =  
(Resistencia del pilote)(Penetración por golpe del partillo)

De acuerdo con la fórmula ENR, la resistencia del pilote es la carga última  $Q_u$ , expresada como:

$$Q_u = \frac{W_R h}{S + C} \quad \text{exp. 1.44}$$

Donde:

$W_R$ : peso del martinete  
 $h$ : altura de la caída del martinete  
 $S$ : penetración del pilote por golpe de martillo  
 $C$ : constante

La penetración,  $S$ , del pilote se basa usualmente en el valor promedio obtenido de los últimos golpes del martillo. En la forma original de la ecuación se recomendaron los siguientes valores de  $C$ .

- Para martillos de caída libre:  $C = 1$  pulg. (si las unidades de  $S$  y  $h$  están en pulgadas)
- Para martillos de vapor:  $C = 0.1$  pulg. (si las unidades de  $S$  y  $h$  están en pulgadas)

Se recomendó también un factor de seguridad,  $FS$ , igual a 6, para estimar la capacidad admisible del pilote. Note que para martillos de acción simple y doble, el término  $W_R h$  es reemplazado por  $EH_E$  (donde  $E$  = eficiencia del martillo y  $H_E$  = energía nominal del martillo). Entonces:

$$Q_u = \frac{EH_E}{S + C} \quad \text{exp. 1.45}$$

La fórmula ENR ha sido revisada a lo largo de los años y también se han sugerido otras formulas de hincado de pilotes.

El esfuerzo máximo desarrollado en un pilote durante la operación de hincado se estima con las fórmulas presentadas en la tabla de fórmulas para el hincado de pilotes. Como ilustración usamos la formula ENR modificada:

$$Q_u = \frac{EW_R h}{S+C} \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p} \quad \text{exp. 1.46}$$

En esta ecuación, S es igual a la penetración promedio por golpe de martillo, que también se expresa como:

$$S = \frac{1}{N} \quad \text{exp. 1.47}$$

Donde

S: está en pulgadas

N = número de golpes de martillo por pulgada de penetración

Nombre	Fórmula
Fórmula ENR modificada	$Q_u = \frac{EW_R h}{S+C} \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p}$ <p>Donde</p> <p><i>E</i>: eficiencia del martillo  <i>C</i>: 0.1 <i>pulg</i>, si las unidades de <i>S</i> y <i>h</i> están en pulgadas  <i>W<sub>p</sub></i>: peso del pilote  <i>n</i>: coeficiente de restitución entre el martinete y el capuchón del pilote</p> <p><u>Valores típicos para <i>E</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Martillos de acción simple y doble 0.7 – 0.85</li> <li>• Martillos diesel 0.3 – 0.4</li> <li>• Martillos de caída libre 0.7 – 0.9</li> </ul> <p><u>Valores típicos para <i>n</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Martillo de hierro colado y pilotes de concreto (sin capuchón) 0.4 – 0.5</li> <li>• Cojinete de madera sobre pilotes de acero 0.3 – 0.4</li> <li>• Pilotes de madera 0.25 – 0.3</li> <li>•</li> </ul>
Fórmula de la Michigan State Highway Commission (1965)	$Q_u = \frac{1.25EH_E}{S+C} \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p}$ <p>Donde</p> <p><i>H<sub>E</sub></i>: energía nominal máxima según el fabricante del martillo (<i>lb·pulg</i>)  <i>E</i>: eficiencia del martillo  <i>C</i>: 0.1 <i>pulg</i>.</p> <p>Se recomienda un factor de seguridad de 6.</p>

<p>Fórmula danesa (Olson y Flaate, 1967)</p>	$Q_u = \frac{EH_E}{S + \sqrt{\frac{EH_EL}{2A_pE_p}}}$ <p>Donde</p> <p><math>E</math>: eficiencia del martillo  <math>H_E</math>: energía nominal del martillo  <math>E_p</math>: módulo de elasticidad del material del pilote  <math>L</math>: longitud del pilote  <math>A_p</math>: área de la sección transversal del pilote</p>
<p>Fórmula del Pacific Coast Uniform Building Code (International Conference of Building Officials, 1982)</p>	$Q_u = \frac{(EH_E) \left( \frac{W_R + nW_p}{W_R + W_p} \right)}{S + \frac{Q_u L}{AE_p}}$ <p>El valor de n debe ser de 0.25 para pilotes de acero y de 0.1 para los otros. Se recomienda en general un factor de seguridad de 4.</p>
<p>Fórmula de Janbu (Janbu, 1953)</p>	$Q_u = \frac{EH_E}{K'_u S}$ <p>Donde</p> $K'_u = C_d \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda'}{C_d}} \right)$ $C_d = 0.75 + 0.14 \left( \frac{W_p}{W_R} \right)$ $\lambda' = \left( \frac{EH_EL}{A_p E_p S^2} \right)$
<p>Fórmula de Gates (Gates, 1957)</p>	$Q_u = a\sqrt{EH_E}(b - \log S)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si <math>Q_u</math> está en <i>klbs</i>, entonces <math>S</math> está en pulg, <math>a = 27</math>, <math>b = 1</math> y <math>H_E</math> esta en <i>klb·pies</i>.</li> <li>• Si <math>Q_u</math> está en <i>KN</i> entonces <math>S</math> está en <i>mm</i>, <math>a = 104.5</math>, <math>b = 2.4</math> y <math>H_E</math> está en <i>KN·m</i>.</li> </ul> <p><math>E = 0.75</math> para martillo de caída libre; <math>E = 0.85</math> para los otros martillos.  Use un factor de seguridad de 3</p>

Fórmula de Navy – McKay	$Q_u = \frac{E H_E}{S \left( 1 + 0.3 \frac{W_p}{W_R} \right)}$ <p>Use un factor de seguridad de 6</p>
-------------------------	---

**Tabla de fórmulas de hincia**

Entonces:

$$Q_u = \frac{E W_R h}{\left( \frac{1}{N} \right) + 0.1} \frac{W_R + n^2 W_p}{W_R + W_p} \quad \text{exp. 1.48}$$

Diferentes valores de  $N$  se suponen para un martillo y pilote dados y luego pueden calcularse  $Q_u$ . El esfuerzo de hincado entonces se calcula para cada valor de  $N$  y  $Q_u/A_p$ .

### 1.3.2 Design Manual DM 7.2, 1982

La Tabla 3.1 de US Navy (1982) recomienda el empleo de fórmulas de hincia según el martillo a ser utilizado. Estas fórmulas pueden utilizarse como una guía para estimar las capacidades admisibles de los pilotes y como control de construcción cuando están complementadas por ensayos de carga.

Para martillos en caída libre	Para martillos de acción simple	Para martillos de doble acción diferencial
$(Q_v)_{ad}^c = \frac{2WH}{S + 0.1}$	$(Q_v)_{ad}^{a,c} = \frac{2WH}{S + 0.1}$	$(Q_v)_{ad}^a = \frac{2E}{S + 0.1}$
	$(Q_v)_{ad}^c = \frac{2WH}{S + 0.1 \frac{W_D}{W}}$	$(Q_v)_{ad}^b = \frac{2E}{S + 0.1 \frac{W_D}{W}}$

**Tabla 3.1: Fórmulas Básicas de Hincado de Pilotes (Design Manual DM 7.2, 1982)**

Donde:

- a: usar cuando los pesos hincados son menores que los pesos del martillo.
- b: usar cuando los pesos hincados son mayores que los pesos del martillo.
- c: fórmula de hincado de pilotes basada en la fórmula de Engineering News.
- $(Q_v)_{ad}$ : carga admisible del pilote en libras.
- W: peso del martillo en libras.
- H: altura efectiva de caída en pies.
- E: energía real liberada por el martillo por golpe en pie-libra.
- S: promedio neto de penetración en pulgadas por golpe para las últimas 6 pulgadas del hincado.
- WD: pesos hincados incluyendo el pilote.

**Nota:** la relación de pesos  $(WD / W)$  debe ser  $<3$ .