

SELECCIÓN DE MARTILLOS DIÉSEL PARA EL HINCADO DE TUBERÍA CONDUCTORA MEDIANTE EL USO DE LA FÓRMULA ENR

DIESEL HAMMERS SELECTION FOR DRIVING CONDUCTIVE PIPE USING THE ENR FORMULA

Mauricio Adrián Bustos Moreno

Facultad de Ciencias de la Ingeniería - Carrera de Ingeniería en Petróleo. Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE). Avda. Principal La Libertad - Santa Elena. La Libertad. Ecuador.
Email: sc.sym@hotmail.com

Recibido: 26 de octubre, 2023. Aprobado: 27 de agosto, 2024. Versión final: 25 de septiembre, 2024.

Resumen


En ciertos países de Latinoamérica como Ecuador, Colombia, Perú y México; la sección inicial de perforación de un pozo corresponde a la sección de 26 pulgadas, la cual es revestida con tubería conductora de 20 pulgadas. Actualmente esta sección inicial del pozo se lleva a cabo con taladros de perforación, pero también se está optando por el uso de un martillo diésel para realizar el hincado de la tubería conductora. El uso de la fórmula ENR es uno de los métodos más sencillos y más utilizados para determinar la capacidad de carga permitida y la resistencia de la tubería hincada por cada golpe aplicado debido a su simplicidad, ya que solamente es necesario conocer las especificaciones técnicas de la tubería conductora a hincar y el modelo del martillo diésel a utilizar. Además, se debe considerar que no todos los modelos de martillos diésel pueden emplearse para realizar los trabajos de hincado de la tubería conductora y que exceder el punto de rechazo en el último pie hincado podría ocasionar el colapso de la tubería conductora. El uso de un martillo diésel para el hincado de tubería conductora puede ofrecer un ahorro del 50% en comparación con los costos asociados a los taladros de perforación. Este ahorro convierte al martillo diésel en una opción muy atractiva para llevar a cabo la sección inicial de un pozo.

Palabras claves: Tubería conductora; ENR; Martillo diésel; Punto de rechazo; Hincado de conductores.

Abstract

In certain Latin American countries such as Ecuador, Colombia, Peru and Mexico; the initial drilling section of a well corresponds to the 26-inch section, which is lined with 20-inch conductive pipe. Currently this initial section of the well is carried out with drilling drills, but the use of a diesel hammer is also being chosen to drive the conductive pipe. The use of the ENR formula is one of the simplest and most used methods to determine the allowable load capacity and resistance of the driven pipe for each blow applied due to its simplicity, since it is only necessary to know the technical specifications of the conductive pipe to be driven and the model of diesel hammer to be used. In addition, it must be considered that not all models of diesel hammers can be used to carry out the driving work of the conductor pipe and that exceeding the rejection point in the last foot driven could cause the collapse of the conductor pipe. Using a diesel hammer for driving conductive pipe can offer a 50% savings compared to the costs associated with drilling drills. This savings makes the diesel hammer a very attractive option for carrying out the initial section of a well.

Keywords: Conductive pipe; ENR; Diesel hammer; Rejection point; Conductor driving.

Como citar: Bustos Moreno, M. A. 2024. Selección de Martillos Diésel para el hincado de tubería conductora mediante el uso de la fórmula ENR. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 22(2), 7-18. <https://doi.org/10.18273/revfue.v22n2-2024001> 

1. Introducción

La fórmula ENR fue publicada en 1888 por Arthur Mellen Wellington, originalmente fue desarrollada para estimar la capacidad de carga permitida del pilote o determinar el tamaño del martillo diésel a emplearse (Fragaszy, Higgins, & Lawton, 1985).

A lo largo del tiempo se han desarrollado numerosas fórmulas para determinar la capacidad de carga permitida de los pilotes que han sido publicadas en textos de mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones. Además, frecuentemente se ven informes en revistas técnicas sobre nuevas investigaciones realizadas por investigadores que no han encontrado una fórmula de su agrado y que han desarrollado una nueva que se adapte mejor a los resultados de su experiencia personal. Sin embargo, los diversos resultados obtenidos han sido contradictorios y con frecuencia han fallado cuando se prueban en la práctica. Por lo tanto, los ingenieros utilizan estas fórmulas con mucha precaución.

Aunque la fórmula ENR tiene muchas variaciones, su forma básica es la siguiente:

$$R = F \frac{w \times h}{S + c} \quad (1)$$

donde,

R = Capacidad de carga permitida (*lbs*).

F = Factor de Seguridad.

W = Peso del Drop Hammer o partes que golpean del Steam Hammer (*lbs*).

h = Caída del martillo o partes que golpean (*ft*).

S = La penetración de un pilote hincado por cada golpe aplicado ($\frac{\text{in}}{\text{blow}}$).

C = Constante que depende del tipo de martillo a utilizar (1 para Drop Hammers y 0,1 para Steam Hammers).

El objetivo principal de la fórmula ENR es determinar la capacidad de carga permitida y la resistencia de la tubería hincada por cada golpe aplicado, normalmente esta resistencia se registra en golpes por pulgada o golpes por pie.

Para finalidades de este estudio se utilizará una variante de la fórmula ENR empleada por Global Piling Equipment, Inc. (2015) y Bauer-Pileco, Inc. (2012). Además de la constante 0,1 para steam hammers o diesel hammers, quedando de la siguiente manera:

$$R = \frac{2 \times E}{S + 0,1} \quad (2)$$

donde,

E = Energía por golpe del steam hammer o diesel hammer (*lbs.ft*).

La mayoría de las fórmulas empleadas en el hincado de pilotes se basan en la ecuación fundamental de la energía, donde la energía cinética producida por el pistón del martillo al momento del impacto se equipará al trabajo realizado sobre el pilote, es decir, el producto de la distancia que recorre el pilote y la fuerza del suelo que resiste este movimiento.

La fórmula de la ecuación 2 es una de las fórmulas más simples y más utilizadas en los Estados Unidos, debido a su simplicidad.

2. Materiales y Métodos

2.1. Diesel Hammers

Los diesel hammers son básicamente motores de pistón, es decir, motores de combustión interna de dos tiempos con ignición espontánea. La eficiencia de un motor de ciclo diésel, aunque importante, no afecta directamente a la eficiencia mecánica de la máquina. Sin embargo, durante las operaciones del hincado la interacción del diesel hammer opera básicamente entre el pistón y el pilote (Figura 1).

Antes del impacto, para efectuar la combustión es necesario tener comprimido el aire entre el pistón y el bloque de impacto, esto puede consumir hasta el 20% de la energía del diesel hammer (Rausche & Klesney, 2007). Parecería que esta energía se perdería, sin embargo, esta presión de compresión también puede actuar sobre el pilote antes del impacto.

Además de la fuerza de impacto habitual del pistón, la fuerza de la explosión del combustible también actúa sobre el pilote e inicia el ascenso del pistón. Si hay preignición (la explosión del combustible se genera antes de que se produzca la combustión del mismo), esto también puede afectar la transferencia de energía al pilote.

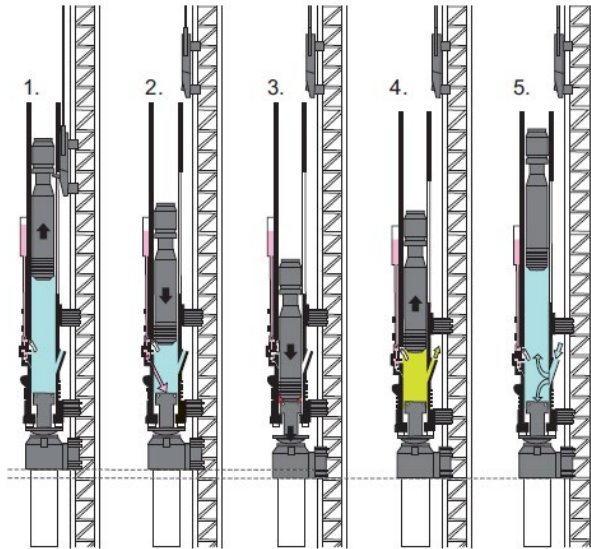


Figura 1. Funcionamiento Operativo del Matillo Diésel.
Fuente: DELMAG, 2022.

En la Tabla 1, se proporcionan los valores de la energía mínima y máxima por golpe en lbs.ft de los diferentes modelos de los diesel hammers de la empresa DELMAG. Además de los valores de la energía máxima con una eficiencia del 80%.

Tabla 1. Energías por golpe de los diesel hammers.

Diesel Hammers	Energía Mínima (Lbs/Ft)	Energía Máxima (Lbs/Ft)	Energía Máxima al 80% (Lbs/Ft)
D6-32	6638	14014	11211
D8-22	9588	19914	15931
D12-42	14751	33928	27142
D16-32	18439	39828	31863
D19-42	21389	48679	38943
D25-32	29502	66381	53104
D30-32	35403	75969	60775
D36-32	41303	90720	72576
D46-32	52367	122435	97948
D62-22	78919	165214	132171
D70-32	89245	182178	145742
D80-23	126123	212418	169934
D100-13	157838	26552	21242
D125-32	196929	308301	246641
D138-32	217581	340016	272013
D160-32	241183	394596	315677
D180-32	271423	444012	355210
D200-42	321577	503017	402414

Los pilotes que se utilizan en las operaciones de hincado generalmente son fabricados de los siguientes materiales: madera, acero (pilotes de sección H y tubulares) y los pilotes prefabricados de hormigón o de hormigón pretensado (ya sean macizos o huecos). Siendo los pilotes de acero tubulares los más utilizados en las operaciones de hincado para la sección inicial de un pozo.

2.2. Mecánica de Suelos

Según el tamaño de las partículas, se pueden distinguir los siguientes tipos de suelos desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos (Figura 2).

2.2.1. Suelos No Cohesivos

Este tipo de suelos también son conocidos como suelos granulares y están compuestos por partículas que se encuentran sueltas y no están unidas sí debido a su gran tamaño. Las principales características de estos suelos son su alta capacidad para soportar cargas y su gran permeabilidad. Dentro de esta categoría, se pueden distinguir dos grupos principales: las gravas y las arenas (Bañón & Beviá, 2000).

2.2.2. Suelos Cohesivos

A diferencia de los suelos granulares, esta categoría se distingue por tener partículas con tamaños más pequeños, lo que les otorga propiedades superficiales significativas. Dentro de los suelos cohesivos se pueden identificar dos grupos principales: los limos y las arcillas (Bañón & Beviá, 2000).

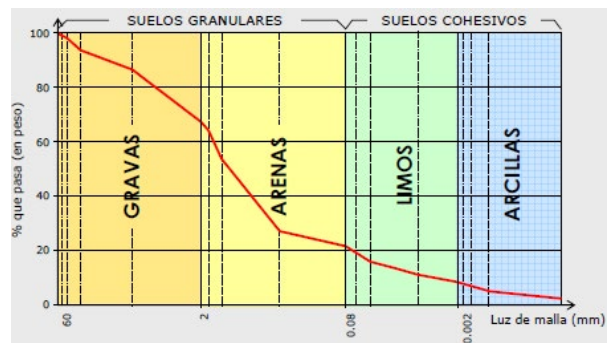


Figura 2. Curva granulométrica de un suelo
Fuente: Bañón & Beviá, 2000.

2.3. Peso Unitario del Suelo.

El diseño de estructuras de contención de tierra generalmente implica un análisis de esfuerzos efectivo, aunque en algunas circunstancias puede ser apropiado un diseño de esfuerzos totales; en consecuencia, datos sobre las propiedades del suelo con respecto tanto a la resistencia como a la rigidez en condiciones tanto drenadas como no drenadas debe obtenerse.

Las propiedades del suelo se determinan como parte del proceso de investigación del sitio, pero pueden amplificarse con datos de análisis retrospectivo de estructuras de contención comparables en condiciones de terreno similares (British Standards, 1994).

Los pesos unitarios de los materiales, proporcionan valores razonables para los pesos unitarios de suelos en ausencia de resultados de pruebas confiables como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Pesos Unitarios de Suelos.

Tipo de Suelo		$\gamma \left(\frac{kN}{m^3} \right)$		$\gamma_s \left(\frac{kN}{m^3} \right)$	
		Suelto	Denso	Suelto	Denso
Granular (Suelos sin cohesión)	Grava	16,0	18,0	20,0	21,0
	Arena y grava bien graduadas	19,0	21,0	21,5	23,0
	Arena gruesa o media	16,5	18,5	20,0	21,5
	Arena bien graduada	18,0	21,0	20,5	22,5
	Arena fina o limosa	17,0	19,0	20,0	21,5
	Relleno de roca	15,0	17,5	19,5	21,0
	Ladrillo duro	13,0	17,5	16,5	19,0
	Relleno de escoria	12,0	15,0	18,0	20,0
	Relleno de ceniza	6,5	10,0	13,0	15,0
Cohesivo	Turba (muy variable)	12,0		12,0	
	Arcilla orgánica	15,0		15,0	
	Arcilla blanda	17,0		17,0	
	Arcilla firme	18,0		18,0	
	Arcilla rígida	19,0		19,0	
	Arcilla dura	20,0		20,0	
	Arcilla glacial rígida o dura	21,0		21,0	

Fuente: British Standards, 1994.

2.4. Capacidad de Carga Permitida (R)

Los pilotes pueden cargarse axial y/o transversalmente, pero para evitar fallos estructurales del pilote por compresión, tensión, flexión, pandeo o cizalla es necesario verificar el informe de prueba de material o MTR (Material Test Report), también conocido como informe de prueba de fábrica que actúa como un registro certificado de las propiedades físicas y químicas de un material. La Capacidad de carga permitida también se puede determinar mediante la siguiente fórmula (Almadhoun, 2014):

$$R = \frac{Q_u}{FS} \quad (3)$$

donde,

R = Capacidad de carga permitida .

FS = Factor de Seguridad.

Q_u = Carga máxima aplicada en la parte superior del pilote (lbs).

Según Indian Standard (Part 1/Sec 2) (Second Revision) el factor de seguridad (FS) utilizado generalmente oscila entre 2,5 y 4, dependiendo de las incertidumbres que rodean el cálculo de la carga máxima aplicada en la parte superior del pilote.

2.5. Factor de Seguridad

El factor de seguridad es la relación entre la capacidad de carga máxima aplicada en la parte superior del pilote y la capacidad de carga permitida sobre el pilote (Indian Standard, 2010).

Por lo tanto, el factor de seguridad debe elegirse después de considerar:

- a) La fiabilidad del valor calculado de la capacidad de carga permitida de un pilote.
- b) Los tipos de estructura y el tipo de carga.
- c) Asentamiento total/diferencial admisible de la estructura.

Cuando la capacidad de carga permitida se determina a partir de una fórmula estática, el factor de seguridad dependerá de la confiabilidad de la fórmula y de la confiabilidad de los parámetros del subsuelo utilizados en el cálculo. El factor mínimo de seguridad en fórmula estática será 2,5. La selección final de un factor de seguridad deberá tener en cuenta las características de asentamiento de carga de la estructura en su conjunto en un sitio determinado.

Se podrá adoptar un valor más alto del factor de seguridad para determinar la capacidad de carga permitida sobre pilotes, cuando:

- a) Se debe limitar el asentamiento o evitar el asentamiento desigual.
- b) Se esperan grandes impactos o cargas vibratorias.
- c) Las propiedades del suelo pueden deteriorarse con el tiempo.

Además, debemos considerar que de la carga máxima aplicada en la parte superior del pilote, una parte de la carga se transmite al suelo a lo largo del pilote y el resto se transmite a la base del pilote (Figura 3).

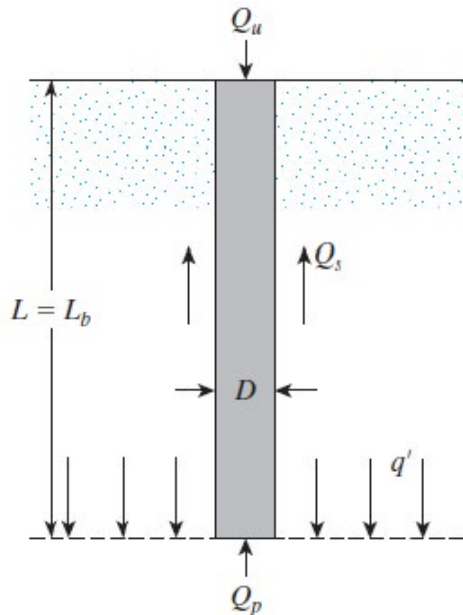


Figura 3. Cargas Q_u , Q_p , Q_s en pilotes.
Fuente: Almadhoun, 2014.

La carga transmitida al suelo a lo largo del pilote se denomina carga de fricción máxima o carga superficial (Q_s) y la transmitida a la base se llama carga base o puntual (Q_p) (Murthy, 2006).

Por lo tanto, la carga máxima aplicada en la parte superior del pilote (Q_u) puede ser expresada como la suma de estas dos, es decir:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (4)$$

donde,

Q_p = Carga base o puntual (*lbs*).

Q_s = Carga de fricción máxima o skin load (*lbs*).

La carga base o puntual (Q_p) se definen como:

$$Q_p = \left(cN_c + q'_o N_q + \frac{1}{2} \gamma D N_\gamma \right) A_p \quad (5)$$

donde,

C = Cohesión del suelo ($\frac{lbs}{ft^2}$).

q'_o = Presión de sobrecarga efectiva en el nivel de la base del pilote ($\frac{lbs}{ft^2}$).

γ = Peso unitario del suelo ($\frac{lbs}{ft^3}$).

D = Ancho o diámetro del eje al nivel de la base (*ft*).

A_p = Superficie total del pilote incrustado bajo la superficie del suelo (ft^2).

N_c, N_q, N_γ = Factores de capacidad de carga que tienen en cuenta el factor de forma.

Se debe tomar en cuenta que los factores de capacidad de carga (N_c, N_q, N_γ) dependen del valor " ϕ " (Tabla 3).

Según la teoría de la capacidad de carga de Vesic, los factores de capacidad de carga se calculan mediante las siguientes ecuaciones (Thadapaneni, Venkata, & Grandhi, 2017):

$$N_q = \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)^2 e^{\pi \tan \phi} \quad (6)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (7)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \quad (8)$$

Tabla 3. Factores de capacidad de carga.

\emptyset	N_q	N_c	N_γ	\emptyset	N_q	N_c	N_γ
0	1,00	5,14	0,00	25	10,66	20,72	10,88
1	1,09	5,38	0,07	26	11,85	22,25	12,54
2	1,20	5,63	0,15	27	13,20	23,94	14,47
3	1,31	5,90	0,24	28	14,72	25,80	16,72
4	1,43	6,19	0,34	29	16,44	27,86	19,34
5	1,57	6,49	0,45	30	18,40	30,14	22,40
6	1,72	6,81	0,57	31	20,63	32,67	25,99
7	1,88	7,16	0,71	32	23,18	35,49	30,21
8	2,06	7,53	0,86	33	26,09	38,64	35,19
9	2,25	7,92	1,03	34	29,44	42,16	41,06
10	2,47	8,34	1,22	35	33,30	46,12	48,03
11	2,71	8,80	1,44	36	37,75	50,59	56,31
12	2,97	9,28	1,69	37	42,92	55,63	66,19
13	3,26	9,81	1,97	38	48,93	61,35	78,02
14	3,59	10,37	2,29	39	55,96	67,87	92,925
15	3,94	10,98	2,65	40	64,20	75,31	109,41
16	4,34	11,63	3,06	41	73,90	83,86	130,21
17	4,77	12,34	3,53	42	85,37	93,71	155,54
18	5,26	13,10	4,07	43	99,01	105,11	186,53
19	5,80	13,93	4,68	44	115,31	118,37	224,63
20	6,40	14,83	5,39	45	134,87	133,87	271,75
21	7,07	15,81	6,20	46	158,50	152,10	330,34
22	7,82	16,88	7,13	47	187,21	173,64	403,65
23	8,66	18,05	8,20	48	222,30	199,26	496,00
24	9,60	19,32	9,44	49	265,50	229,92	613,14
				50	319,06	266,88	762,86

Para suelos no cohesivos, $c = 0$ y el término $\frac{1}{2}\gamma DN_\gamma$ se vuelve insignificante en comparación con el término $q'_o N_q$ para cimentaciones profundas (Murthy, 2006). Por lo tanto, la ecuación 5 de la carga base o puntual (Q_p) se reduce a:

$$Q_p = q'_o N_q A_p \quad (9)$$

La ecuación 9 de la carga base o puntual (Q_p) también puede ser escrita de la siguiente manera:

$$q'_o = \gamma L \quad (10)$$

Reemplazando la ecuación 10 en la ecuación 9 se tiene:

$$Q_p = \gamma L N_q A_p \quad (11)$$

$$q_p = \gamma L N_q \quad (12)$$

Reemplazando la ecuación 12 en la ecuación 11 se obtiene:

$$Q_p = q_p A_p \quad (13)$$

donde,

q_p = Presión de carga unitaria máxima del pilote en la base $\left(\frac{lbs}{ft^2}\right)$.

A_p = Área de apoyo de la base del pilote (ft^2).

L = Longitud de la pila .

La carga de fricción máxima o skin load (Q_s), se define como:

$$Q_s = f_s A_s \quad (14)$$

$$Q_s = (\overline{q'_o} \overline{K_S} \tan \delta) A_s \quad (15)$$

donde,

$\overline{q'_o}$ = Presión de sobrecarga efectiva promedio sobre la profundidad incrustada del pilote $\left(\frac{lbs}{ft^2}\right)$.

$\overline{K_S}$ = Coeficiente de presión lateral promedio del suelo.

δ = Ángulo de fricción de la pared ($^\circ$).

A_s = Superficie total del pilote incrustado bajo la superficie del suelo (ft^2).

f_s = Unidad de fricción $\left(\frac{lbs}{ft^2}\right)$.

Reemplazando la ecuación 13 y la ecuación 14 en la ecuación 4, la carga máxima aplicada en la parte superior del pilote (Q_u) se define como:

$$Q_u = q_p A_p + f_s A_s \quad (16)$$

Por lo tanto, reemplazando la ecuación 9 y la ecuación 15 en la ecuación 16 tenemos:

$$Q_u = q'_o N_q A_p + (\overline{q'_o} \overline{K_S} \tan \delta) A_s \quad (17)$$

Para suelos cohesivos como los arcillosos saturados (normalmente consolidados), se tiene que $\emptyset = 0$, $= 1$ y $= 0$ (Murthy, 2006). Por lo tanto, la ecuación 5 de la carga base o puntual se define como:

$$Q_p = \overline{Q_p} - q'_o A_p \quad (18)$$

$$\overline{Q_p} = \left(c_p N_c + q'_o N_q + \frac{1}{2} \gamma DN_\gamma \right) A_p \quad (19)$$

$$\overline{Q_p} = (c_p N_c + q'_o) A_p \quad (20)$$

Reemplazando la ecuación 20 en la ecuación 18:

$$Q_p = (c_p N_c + q'_o) A_p - q'_o A_p \quad (21)$$

$$Q_p = c_p N_c A_p \quad (22)$$

donde,

c_p = Resistencia al corte no drenado de la arcilla en el nivel base $\left(\frac{lbs}{ft^2}\right)$.

\bar{Q}_p = Carga base o puntual promedio (lbs).

La carga de fricción máxima o skin load (Q_s), se define como:

$$Q_s = \bar{c}_u \alpha A_s \quad (23)$$

donde,

\bar{c}_u = Resistencia al corte promedio no drenado de la arcilla a lo largo del eje $\left(\frac{lbs}{ft^2}\right)$.

$\bar{\alpha}$ = Factor de adhesión.

A_s = Superficie total del pilote incrustado bajo la superficie del suelo (ft^2).

Reemplazando la ecuación 22 y la ecuación 23 en la ecuación 4, la carga máxima aplicada en la parte superior del pilote (Q_u) se define como:

$$Q_u = c_p N_c A_p + \bar{c}_u \alpha A_s \quad (24)$$

Por otra parte, si Q_s es muy pequeño (Figura 4) entonces se puede considerar que:

$$Q_u \approx Q_p \quad (25)$$

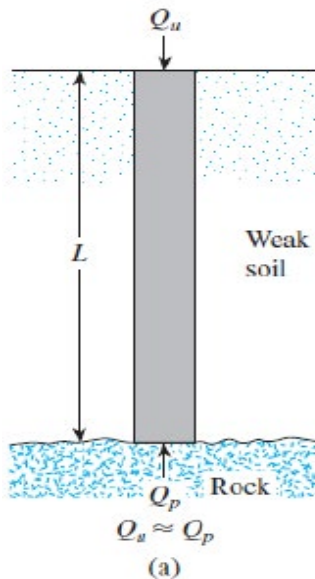


Figura 4. Cargas en pilotes sin Q_s .
Fuente: Almadhoun, 2014.

En este caso, la longitud requerida del pilote se puede estimar con precisión si se dispone de registros adecuados de exploración del subsuelo (Almadhoun, 2014).

Por lo tanto, la carga máxima aplicada en la parte superior del pilote (Q_u) para los diferentes tipos de suelo vendría dado por:

$$Q_u = Q_p \quad (26)$$

Suelos no cohesivos

$$Q_u = Q_p = q'_o N_q A_p \quad (27)$$

Suelos cohesivos

$$Q_u = Q_p = c_p N_c A_p \quad (28)$$

Para el presente estudio únicamente se considerará los suelos no cohesivos, donde el espesor real del estrato de soporte en un suelo homogéneo (L_b) es igual a longitud de la pila (L); por lo tanto, se empleará la siguiente ecuación:

$$Q_u = Q_p = q'_o N_q A_p = q_p A_p \quad (29)$$

$$Q_u = q_p A_p \quad (30)$$

La presión de carga unitaria máxima del pilote en la base (q_p) para cualquier tipo de tubería se considera como el límite elástico mínimo especificado o SMYS (Specified Minimum Yield Strength). Este es el nivel de tensión que la tubería debe ser capaz de experimentar sin deformación permanente.

Los fabricantes especifican un SMYS para cada tipo y grado de tubería. Al hacerlo, certifican que su tubería puede, como mínimo, someterse de forma segura al SMYS certificado. El SMYS de una tubería específica se ve afectado por el grado de acero utilizado y cómo se fabricó. Los aceros más resistentes son más caros, pero pueden proporcionar una mayor resistencia a la fuerza aplicada.

Como se mencionó anteriormente, en ciertos países de Latinoamérica como Ecuador, Colombia, Perú y México la sección inicial de perforación de un pozo corresponde a la sección de 26 pulgadas la cual es revestida con tubería conductora de 20 pulgadas.

Las especificaciones técnicas de la tubería dependen netamente del fabricante (Tabla 4), por lo cual, para el presente estudio se realizarán los respectivos cálculos para la tubería conductora de 20 pulgadas de grado K55 y N80Q.

Tabla 4. Datasheet Tubería Conductor.

Datos del cuerpo de la tubería			
Tubería	Grado	K55	N80Q
Geometría	OD Nominal (in)	20,000	20,000
	ID Nominal (in)	19,124	19,124
	Tolerancia OD	API	API
	Drift (in)	18,936	18,936
	Espesor de la pared (in)	0,438	0,438
	Peso Nominal (lb/ft)	94	94
	Peso del Extremo Liso (lb/ft)	91,59	91,59
Desempeño	SMYS (psi)	55.000	80.000
	Mín. Presión Interna de Rendimiento (psi)	2.110	3.070
	Mín. UTS (psi)	95.000	100.000
	Presión de Colapso (psi)	520	520

Para calcular la penetración de la tubería conductora hincada por cada golpe aplicado (in/blow) mediante el uso de un diesel hammer, se procede a despejar (S) de la ecuación 2:

$$S = \frac{2 \times E}{R} - 0,1 \quad (31)$$

La energía por golpe del diesel hammer ya fue proporcionada en la Tabla 1, por lo cual, únicamente se procede a seleccionar el modelo del diesel hammer y emplear el valor de la energía máxima con una eficiencia del 80 %. Para este análisis se utilizará el modelo del diesel hammer D25-32 que posee una energía de 53.104 lbs.ft con una eficiencia del 80 %.

Para determinar la capacidad de carga permitida primeramente (R) es necesario calcular (Q_u) la carga máxima aplicada en la parte superior del pilote empleando la ecuación 30.

El área de apoyo de la base del pilote se define como:

$$A_p = \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2) \quad (32)$$

donde,

OD = Diámetro externo de la tubería (in).

ID = Diámetro interno de la tubería (in).

Reemplazando la ecuación 32 en la ecuación 30:

$$Q_u = q_p \times \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2)$$

$$Q_{uK55} = 55.000 \times \frac{\pi}{4} (20^2 - 19,124^2)$$

$$Q_{uK55} = 1'480.471 \text{ lbs} \quad (33)$$

$$Q_{uN80Q} = 80.000 \times \frac{\pi}{4} (20^2 - 19,124^2)$$

$$Q_{uN80Q} = 2'153.412 \text{ lbs}$$

Luego procedemos a dividir la carga máxima aplicada en la parte superior del pilote (Q_u) para el factor de seguridad (FS) de 2,5 de acuerdo a la ecuación 3:

$$R_{K55} = \frac{1'480.471}{2,5}$$

$$R_{K55} = 592.188 \text{ lbs}$$

$$R_{N80Q} = \frac{2'153.412}{2,5}$$

$$R_{N80Q} = 861.365 \text{ lbs}$$

Por lo tanto, reemplazando el valor obtenido de (R) en la ecuación 31 podemos obtener la penetración de la tubería conductora hincada por cada golpe aplicado (in/blow):

$$S_{K55} = \frac{2 \times 53.104}{592.188} - 0,1$$

$$S_{K55} = 0,079 \frac{in}{blow}$$

$$S_{N80Q} = \frac{2 \times 53.104}{861.365} - 0,1$$

$$S_{N80Q} = 0,023 \frac{in}{blow}$$

Si queremos obtener los resultados en blows/in procedemos de la siguiente manera:

$$\frac{blows}{in} = \frac{1}{S} \quad (34)$$

Reemplazando el valor obtenido de (S) en la ecuación 34, tenemos que:

$$\frac{blows}{in}_{K55} = \frac{1}{0,079}$$

$$\frac{blows}{in}_{K55} = 12,60$$

$$\frac{blows}{in}_{N80Q} = \frac{1}{0,023}$$

$$\frac{blows}{in}_{N80Q} = 42,91$$

Para facilidades de estudio este resultado también lo podemos expresar en blows/ft:

$$\frac{blows}{ft} = \frac{blows}{in} * \frac{12 in}{1 ft} \quad (35)$$

Reemplazando el valor obtenido de blows/in en la ecuación 35, obtendremos la cantidad de golpes por pie que se deben suministrar a la tubería conductora utilizando el modelo del diesel hammer **D25-32**:

$$\frac{blows}{ft}_{K55} = 12,60 \frac{blows}{in} * \frac{12 in}{1 ft}$$

$$\frac{blows}{ft}_{K55} = 151$$

$$\frac{blows}{ft}_{N80Q} = 42,91 \frac{blows}{in} * \frac{12 in}{1 ft}$$

$$\frac{blows}{ft}_{N80Q} = 515$$

2.6 Criterios de rechazo para diesel hammers.

Según American Piledriving Equipment (APE) (s.f.), se recomienda no exceder de 20 golpes por pulgada o no más de 250 golpes por pie, alcanzando de esta manera el punto de rechazo en el último pie hincado. Esta especificación estándar es aceptada por el DFI (Deep Foundations Institute o Instituto de Cimentaciones Profundas) y la PDCA (Pile Driving Contractors Association o Asociación de Contratistas de Hincado de Pilotes) y por todos los fabricantes de equipos de hincado de pilotes.

Debemos mencionar que los inspectores de pilotes deben consultar al fabricante para obtener permiso y exceder estos límites o criterios de rechazo (American Piledriving Equipment, s.f.).

A continuación, se ha procedido a elaborar el gráfico denominado The Engineering News Record (ENR) formula (Figura 5) en el cual se puede determinar la penetración de un pilote hincado por cada golpe aplicado (blows/ft) de acuerdo a la capacidad de carga permitida (Tons) y a la energía máxima por golpe según el modelo del diesel hammer utilizado (Tons.ft) con una eficiencia del 80 %. Tomando en consideración que 1 Toneladas cortas = 2000 Libras.

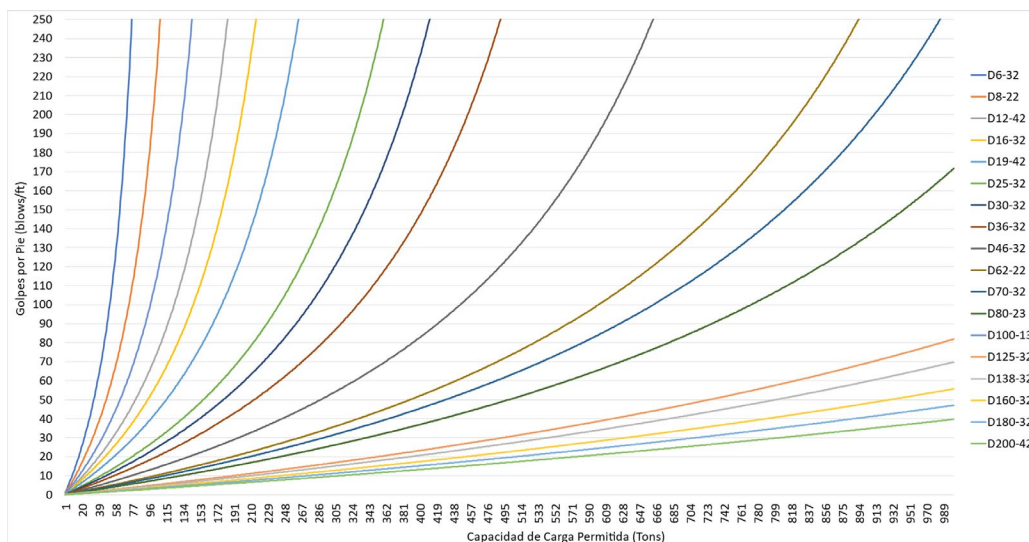


Figura 5. The Engineering News Record (ENR) formula.

A partir de los cálculos obtenidos anteriormente, se procede a realizar la conversión de unidades de la capacidad de carga permitida de lbs a Tons y de la energía máxima por golpe con una eficiencia del 80% según el modelo del diesel hammer empleado de lbs.ft a Tons.ft. Obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 5.

$$R_{K55} = 592.188 \text{ lbs} = 296 \text{ Tons}$$

$$R_{N80Q} = 861.365 \text{ lbs} = 431 \text{ Tons}$$

Tabla 5. Cantidad de golpes por pie (blows/ft) de la tubería conductora de 20 pulgadas de grado K55 y N80Q.

Diesel Hammers	Energía al 80% (Tons.ft)	Golpes por Pie (blows/ft) K55	Golpes por Pie (blows/ft) N80Q
D6-32	5,61		
D8-22	7,97		
D12-42	13,57		
D16-32	15,93	1570	
D19-42	19,47	380	
D25-32	26,55	151	517
D30-32	30,39	114	293
D36-32	36,29	83	175
D46-32	48,97	52	94
D62-22	66,09	35	58
D70-32	72,87	31	50
D80-23	84,97	25	41
D100-13	10,62		
D125-32	123,32	16	25
D138-32	136,01	15	23
D160-32	157,84	12	19
D180-32	177,60	11	17
D200-42	201,21	10	14

3. Discusión y Resultados

De acuerdo a los cálculos obtenidos en la Tabla 5 se observa que no es recomendable utilizar los diesel hammers para la tubería conductora de 20 pulgadas de grado K55 con una capacidad de carga permitida de 296 Tons: **D6-32, D8-22, D12-42, D16-32, D19-42, D100-13**. En cambio, para la tubería conductora de 20 pulgadas de grado N80Q no es recomendable utilizar los diesel hammers con una capacidad de carga permitida de 431 Tons: **D6-32, D8-22, D12-42, D16-32, D19-42, D25-32, D30-32 (podría ser utilizado sin exceder el punto de rechazo), D100-13**. Esto debido a que se estableció que el punto de rechazo en el último pie hincado no debe exceder de **20 golpes por pulgada o 250 golpes por pie** (Figura 6).

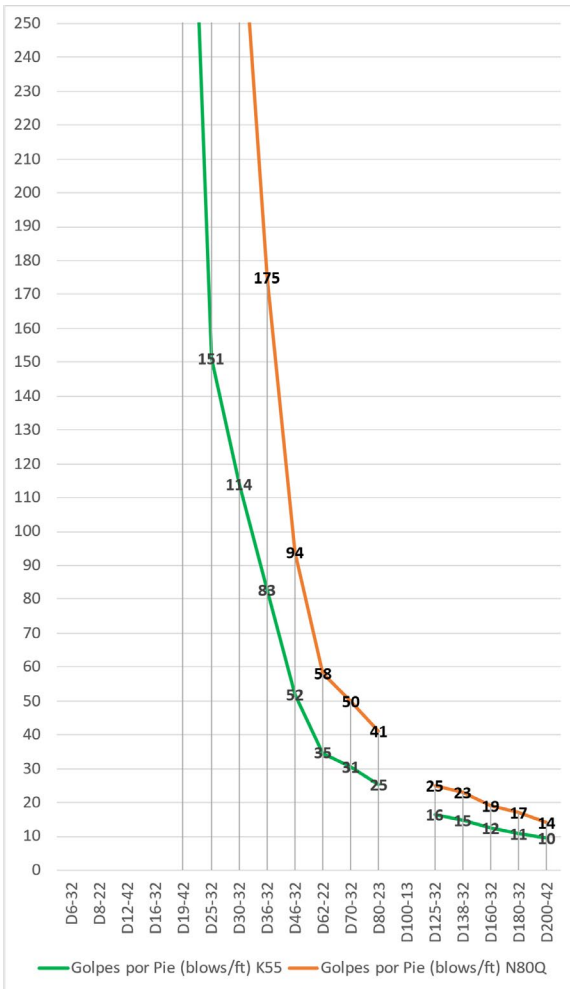


Figura 6. Cantidad de golpes por pie (blows/ft) sin exceder el punto de rechazo.

Por lo tanto, en el caso de la tubería conductora de 20 pulgadas de grado K55 el modelo del diesel hammer D25-32 empleado para el hincado es el más adecuado con 151 golpes por pie, caso contrario al de la tubería conductora de 20 pulgadas de grado N80Q donde el modelo del diesel hammer D25-32 no puede ser empleado.

Para la tubería conductora de 20 pulgadas de grado N80Q el modelo del diesel hammer más recomendable a utilizar es el D36-32 con 175 golpes por pie, sin embargo, también es aceptable el uso del modelo del diesel hammer D30-32 siempre y cuando no se exceda el punto de rechazo de 250 golpes por pie.

El número de golpes por pie para un determinado tipo de tubería puede ser menor o mayor a lo establecido, dependiendo del tamaño y/o ajuste de energía del martillo diésel que se esté utilizando y de las

especificaciones técnicas de la tubería conductora (diámetro externo, diámetro interno, espesor de pared y el grado de material).

Los martillos diésel están diseñados para un número máximo de golpes de 250 golpes por pie. Cualquier situación que requiera más de 250 golpes por pie, se recomienda utilizar el siguiente tamaño de martillo.

3. Conclusiones

Para determinar la penetración de un pilote hincado por cada golpe aplicado (blow/ft) es necesario conocer las especificaciones técnicas de la tubería conductora a hincar como son el diámetro externo e interno y el límite elástico mínimo especificado o SMYS (Specified Minimum Yield Strength) relacionado con el grado de la tubería. Además, es necesario verificar el informe de prueba de material o MTR (Material Test Report) de la tubería y el modelo del diesel hammer a utilizar.

Mientras se utilice un modelo de diesel hammer que posea mayor energía, la cantidad de golpes por pie (blows/ft) disminuirá de manera significativa con relación a la capacidad de carga permitida, dependiendo del grado de la tubería conductora empleada.

No todos los modelos de diesel hammers pueden emplearse para realizar los trabajos de hincado de la tubería conductora, debido a que se debe tomar en cuenta la capacidad de carga permitida.

Exceder el punto de rechazo en el último pie hincado (20 golpes por pulgada o 250 golpes por pie) podría ocasionar el colapso de la tubería conductora de 20 pulgadas.

Referencias

- [1] Almadhoun, Y. (2014). Civil Engineering Department: Foundation Engineering (ECIV 4052). Gaza: Cengage Learning. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/473700431/Chapter-09>
- [2] American Piledriving Equipment (APE). (s.f.). Refusal Criteria for Diesel and Hydraulic Impact Hammers. Obtenido de <http://www.americanpiledriving.com/pdfs/diesels/Refusal%20Criteria%20Impact%20Hammers.pdf>

- [3] Bañón, L., & Beviá, J. (2000). Manual de Carreteras. Volumen II: Construcción y Mantenimiento. España: Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10045/1787>
- [4] Bauer-Pileco, INC. (2012). Hammer Operations Manual: Follow Our Lead To A Solid Foundation. Houston: BAUER-PILECO. Obtenido de https://www.geoquipusa.com/wp-content/uploads/2017/07/Operations_Manual_2012.pdf
- [5] British Standards. (1994). Code of Practice for Earth Retaining Structures. Reino Unido: BSI.
- [6] DELMAG. (2022). Diesel Pile Hammers. Niedernberg: DELMAG GmbH & Co. KG. Obtenido de <https://www.delmag.com/downloads.html?file=files/content/>
- [7] Fragaszy, R., Higgins, J., & Lawton, E. (1985). Development of Guidelines for Construction Control of Pile Driving and Estimation of Pile Capacity. Pullman: Washington State University. Obtenido de <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/068.1.pdf>
- [8] Global Piling Equipment, Inc. (2015). Operating Instructions Diesel Hammers D6-D180. Conroe: GPE. Obtenido de <https://www.geoquipusa.com/wp-content/uploads/2017/06/OperationsManual2.pdf>
- [9] Indian Standard. (2010). Design and Construction of Pile Foundations — Code of Practice. New Delhi: Bureau Of Indian Standards. Obtenido de <https://law.resource.org/pub/in/bis/S03/is.2911.1.1.2010.pdf>
- [10] Murthy, V. (2006). Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering. New York: Marcel Dekker. Obtenido de <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TERRAMECHANICS%20AND%20MOBILITY/geotechnical-engineering-principles-and-practices-of-soil-mechanics-and-foundation-engineering-vns-murthy.pdf>
- [11] Rausche, F., & Klesney, A. (2007). Hammer Types, Efficiencies and Models in GRLWEAP. Ohio: GRL Engineers, Inc. Obtenido de <https://pdiwebsitestorage.blob.core.windows.net/websitedocstorage/2017/03/200711thAnnualHammerTypes.pdf>
- [12] Thadapaneni, K., Venkata, S., & Grandhi, R. (2017). Analysis of pile foundation: Simplified methods to analyse the pile foundation under lateral and vertical loads. *IJEDR*, 5(3), 991-1001. Obtenido de <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1703139.pdf>