



ESTACAS HELICOIDAIS

DIMENSIONAMENTO



GEOTECNIA E
ENGENHARIA

(21) 99798-2790
www.geotechnical.com.br
contato@geotechnical.com.br

1.1 – Aspectos Gerais

As estacas helicoidais são construídas a partir de um tubo de aço (fuste) que pode ser de secção quadrada ou circular e por placas circulares de aço, em forma de hélice soldadas ao fuste (Fig. 1a). As placas moldadas em forma de hélice têm um passo controlado para que durante a sua instalação o distúrbio do solo seja o menor possível. A função do fuste é no essencial transferir cargas axiais às placas helicoidais e fornecer resistência ao carregamento lateral. Este é constituído por duas secções, a principal e a de extensão. A secção principal é composta pelo fuste com as hélices soldadas, e as secções de extensão são peças de aço usadas para aumentar o comprimento total da estaca (Stephenson, 2003, in Carvalho, 2007). A ligação entre as várias secções é assegurada por emendas no fuste através uma zona alargada na extremidade ligada com parafusos (Fig.1b).

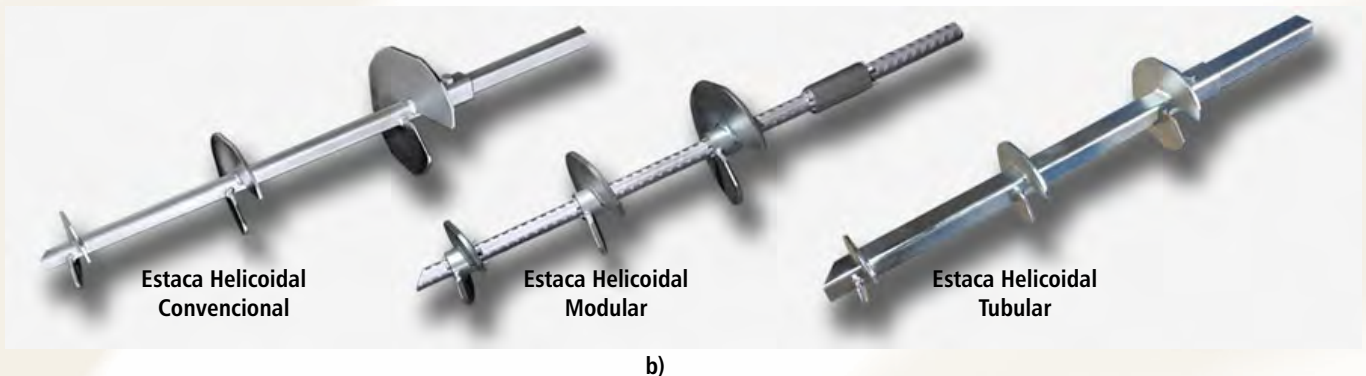
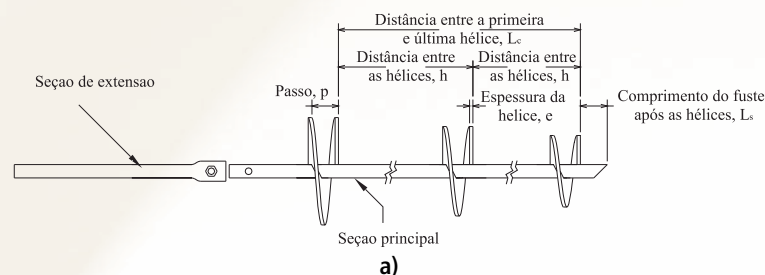


Figura 1 – Elementos Principais da Estaca Metálica Helicoidal (a partir de Stephenson, 2003, in Carvalho, 2007), Elementos de Ligação entre Secções, Circular e Quadrada Respetivamente.



Figura 2 – Instalação debaixo de um viaduto no sentido horizontal. FONTE: A.B.CHANCE, 2004, p. 6.

1.2 – Métodos de Avaliação da Capacidade de Carga

Para avaliar a capacidade de carga de estacas helicoidais os métodos mais utilizados são: o método da capacidade de carga individual e o método da ruptura do cilindro (Fig. 3 a e b). O método mais adequado à estimativa da capacidade de carga depende do número de hélices e do espaçamento entre elas. Neste trabalho será explanado com maior detalhe o método da capacidade de carga individual, por ser o mais adequado quando o espaçamento entre as hélices das estacas for maior que três vezes o diâmetro da hélice inferior.

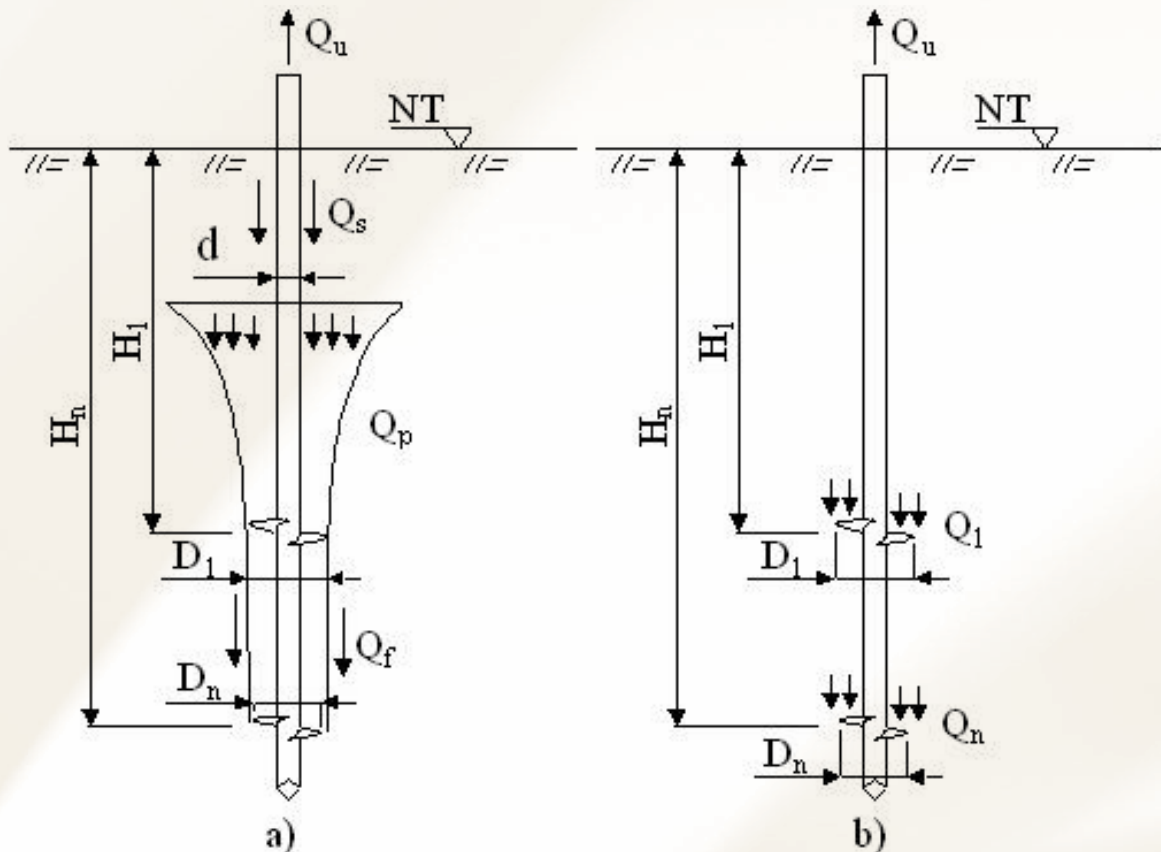


Figura 3 – Mecanismos de Ruptura: a) Cilindro de Cisalhamento; b) Capacidades Individuais (Carvalho, 2007).

Estacas metálicas helicoidais, com hélices espaçadas de aproximadamente 3 vezes o diâmetro ao longo do fuste, apresentam resultados aproximados para ambos os métodos teóricos, Cilindro de Cisalhamento e Capacidades Individuais, para a maioria dos parâmetros de solo (PERKO e RUIPIPER, 2000).

1.2.1. Método da Capacidade de Carga Individual

A previsão da capacidade de carga segundo este método consiste no somatório da capacidade de carga individual de cada hélice com a soma do atrito lateral pelo fuste (esquema de esforços representado na Figura 3 a) e b). A capacidade de carga individual de cada hélice obtém-se pela expressão de Terzaghi (1943), desprezando-se a parcela do fator N_g se a profundidade da hélice for superior, verticalmente, a cinco vezes o seu diâmetro (Perko, 2009) e pode-se obter pela expressão:

$$Q_u = \sum_n Q_{ub} + Q_{uf}$$

Onde:

Q_u - capacidade de carga;

$Q_{ub} = q_{ult} \times A_n$ - carga da base;

q_{ult} - tensão de ruptura;

A_n - área projetada da hélice num plano perpendicular ao eixo do fuste;

n - número de hélices;

Q_{uf} - carga de atrito lateral.

Sendo que a tensão de ruptura segundo Terzaghi (1943) é apresentada em [2], e tendo em consideração a posterior alteração por Meyerhof (1951), a forma e a profundidade deste tipo de estaca, a expressão pode tomar a forma de acordo com [3] (Perko, 2009).

$$q_{ult} = 1,3cN_c + q'N_q + 0,3\gamma BN\gamma \quad [2]$$

$$q_{ult} = cN'_c + q'(N_q - 1) + 0,5\gamma DN'\gamma \quad [3]$$

onde:

c - coesão;

q' - sobrecarga;

γ - peso específico do solo;

B, D - largura do elemento de fundação ou diâmetro da hélice;

$N_c, N_q, N\gamma$ - fatores de capacidade de carga;

$N'_c, N'_q, N'\gamma$ - fatores de capacidade de carga combinados com a forma, profundidade e capacidade de carga das estacas helicoidais.

Perko (2009) sugere expressões para o cálculo da tensão de ruptura em solos argilosos, areias e solos residuais competentes em função do parâmetro obtido no ensaio de penetração dinâmica (SPT) com uma eficiência energética de 70 %, N_{70} :

$$q_{ult} = 11\lambda_{SPT} N_{70}, \text{ em argilas} \quad [4]$$

$$q_{ult} = 12\lambda_{SPT} N_{70}, \text{ em areias} \quad [5]$$

$$q_{ult} = 13\lambda_{SPT} N_{70}, \text{ solos residuais competentes} \quad [6]$$

onde:

λ_{SPT} - fator de correção = 6,2kPa/golpe/30cm.

Em relação ao atrito lateral existem na bibliografia diversas formas para o seu cálculo, merecendo referência a Equação [7] para o caso de estacas helicoidais em areia (Mitsch e Clemence 1985), e as Equações [8] e [9] para estacas em argila e em silte (Mooney et al. 1985):

$$Q_{uf} = p_s H_{ef} (\gamma' H_1 / 2) K_u \tan \emptyset, \text{ para areias} \quad [7]$$

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

$$Q_{uf} = p_s H_{ef} C_a, \text{ para argilas} \quad [8]$$

$$Q_{uf} = p_s H_{ef} (\gamma' H_1 / 2) K_u \tan \emptyset + p_s H_{ef} C_a, \text{ para silte} \quad [9]$$

onde:

K_u - coeficiente de impulso;

H_1 - profundidade da hélice superior;

H_{ef} - altura efetiva de atrito;

p_s - perímetro do tubo da estaca;

C_a - adesão ao longo do tubo da estaca ($C_a = a \times C_u$, onde a é o fator de adesão entre o solo e a estaca).

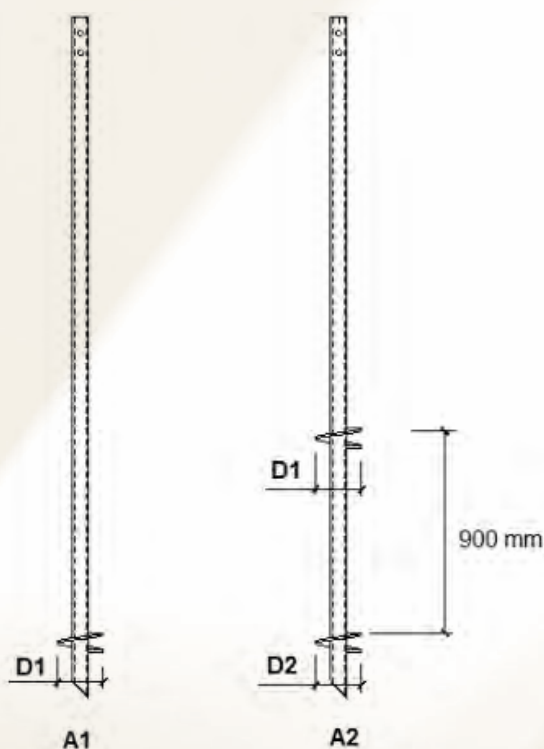


Desenho esquemático da cravação das estacas helicoidais.

O desenvolvimento do trabalho pode dividir-se em duas partes essenciais: a parte teórico-prática e a parte experimental. No que respeita à parte teórico-prática realizou-se toda uma revisão bibliográfica inerente ao tema e interpretaram-se os resultados da parte experimental. Considera-se como experimental toda a panóplia de ensaios de laboratório e ensaios in situ realizados para a caracterização do maciço, a instalação das estacas helicoidais e os ensaios de carga estática rápida nas mesmas. O mesmo encontra-se descrito criteriosamente em trabalho de Louro Carlos (2013), correspondente à dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior (UBI), tendo os trabalhos experimentais decorrido numa área do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (CRHEA/EESC/USP), (Brasil). Neste artigo merece essencialmente referência a instalação e tipo de estacas ensaiadas bem como os ensaios de carga.

2.1 – Construção e instalação das estacas helicoidais

As estacas foram construídas com placas circulares de aço, em forma de hélice soldadas a um tubo de aço (fuste). As suas formas e dimensões encontram-se representadas na Figura 3. Como orientam as boas regras em relação à proteção contra a corrosão, salienta-se que no presente caso as estacas foram fabricadas em aço Corten.



Estaca	A1	A2
Nº de hélices	1	2
Diâmetro do fuste*	73	73
Espessura do fuste*	9,8	9,8
D1*	203,2	203,2
D2*	–	203,2
Espessura da hélice*	12,7	12,7
Passo da hélice	75	75
Comprimento instalado no terreno [m]	10	10
*Dimensões em mm		

Figura 3 – Esquemas e Propriedades das Estacas Helicoidais A1 e A2 Instaladas no Campo Experimental de Estudos.

2.1 – Ensaios de carga estática rápida à compressão

Desde já se salienta que as estacas em estudo, antes do presente trabalho, foram ensaiadas à tração. Neste trabalho realizou-se o ensaio de carga estática rápido à compressão e seguiram-se as indicações da norma NBR 12131/2006 (2006). Segundo esta, o carregamento deve ser executado em estágios iguais e sucessivos, sendo que a carga a aplicar não deve ser superior a 10% da carga de serviço prevista; em cada estágio a carga deve ser mantida durante 10 minutos (caso se pretenda simular a fundação de torres de linha de transmissão, que foi o caso, a carga pode ser mantida durante 5 min). Neste trabalho os incrementos de carga foram de 5% da carga de ruptura prevista. Em cada estágio os deslocamentos devem ser registados no

início e no fim do mesmo. Atingida a carga máxima do ensaio, devem ser feitas cinco leituras a 10, 30, 60, 90 e 120 min, neste estágio. Como neste trabalho as leituras se fizeram de 5 em 5 min na fase de descarga as leituras efetuaram-se aos 0,5, 10, 30, 60 e 120 min. Efetuaram-se dois ciclos completos de carga e descarga em cada uma das duas estacas (A1 e A2) a fim de analisar possíveis acréscimos de carga no 2º ciclo devido à influência positiva do carregamento no solo envolvente e para despistar possíveis erros de leitura inicial dado o fato de as estacas terem sido ensaiadas anteriormente à tração.

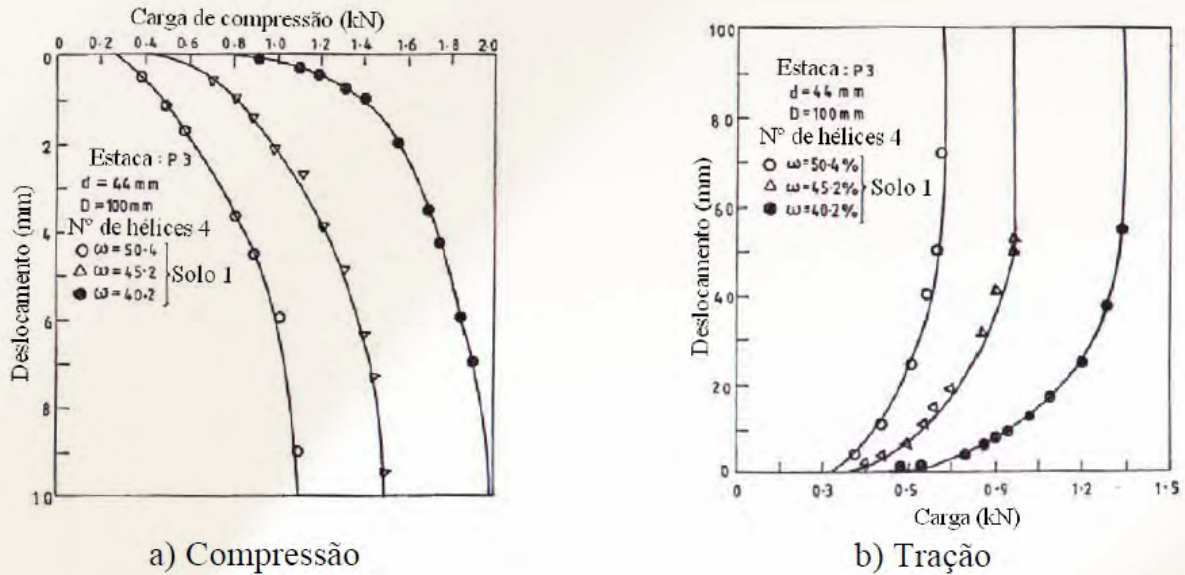
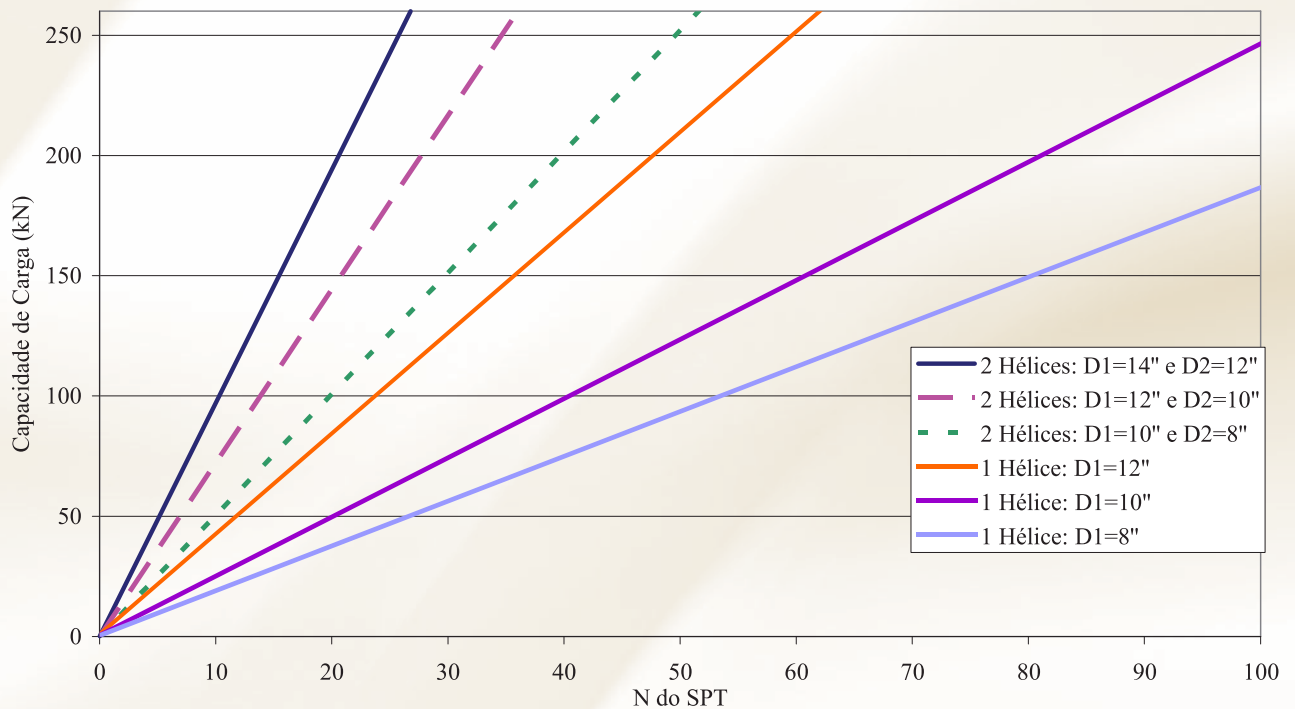
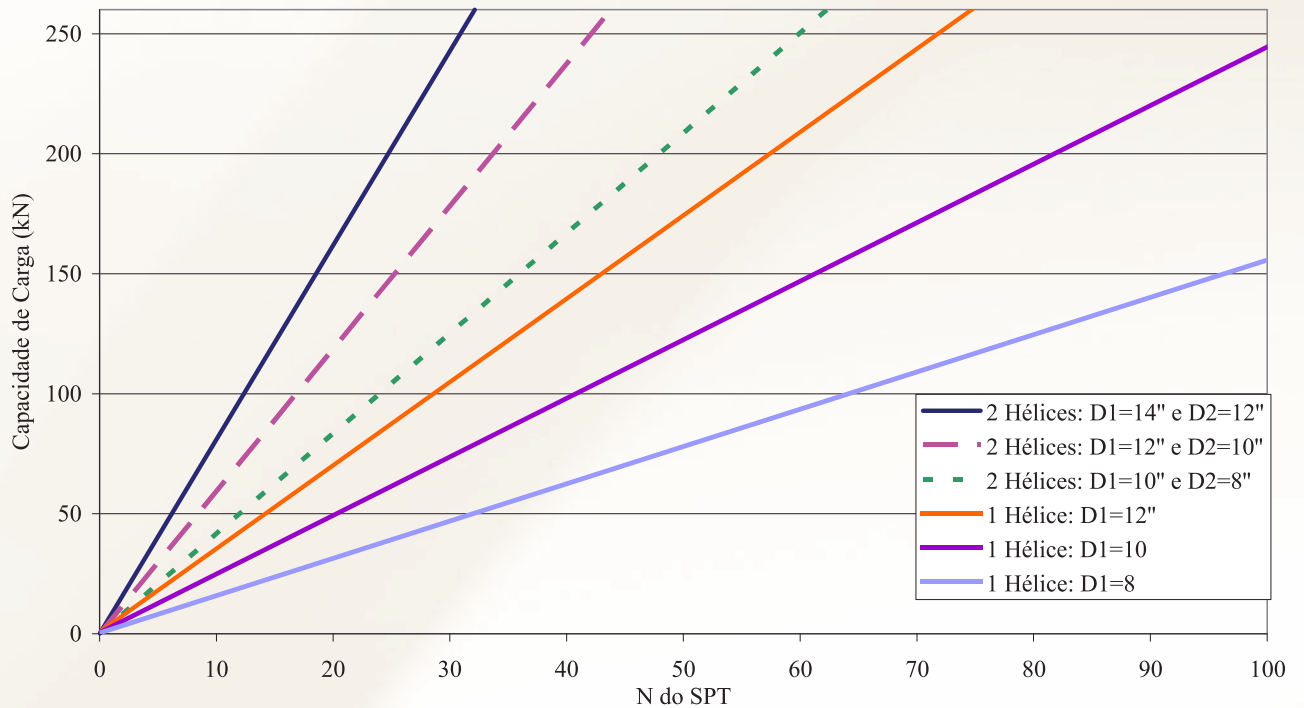


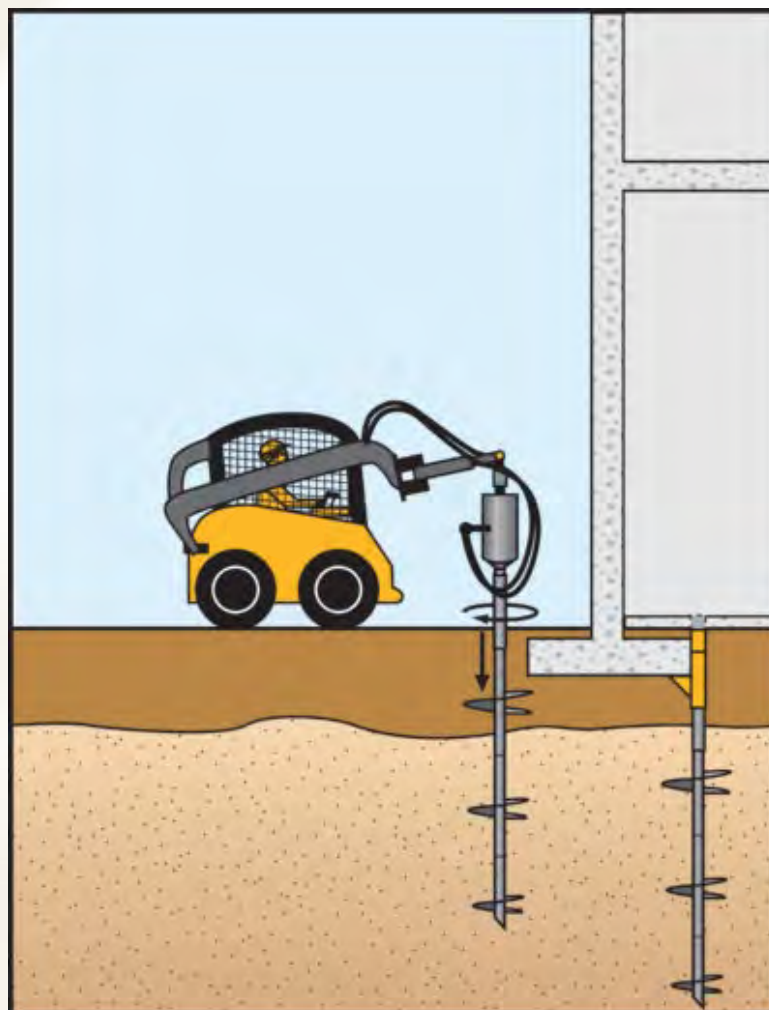
Figura 4 – Resultados de Provas de carga.
Modificado de: RAO, PRASAD e SHETTY, 1991, p.41.



Relação entre a capacidade de carga e o N do SPT para estacas com uma ou duas hélices, com diâmetros em polegadas, de estacas helicoidais em solos não coesivos. Modificado de: PERKO e RUIPIER, 2000, p. 15.



Relação entre a capacidade de carga e o N do SPT para estacas com uma ou duas hélices, com diâmetros em polegadas, de estacas helicoidais em solos coesivos. Modificado de: PERKO e RUIPER, 2000, p. 15



Desenho esquemático da estaca helicoidal como reforço de fundação.

1 - Caracterização do Maciço

A caracterização do maciço foi apresentada com algum detalhe em Louro Carlos (2013) e Louro Carlos et al. (2014), sendo de salientar que ocorrem quatro unidades geotécnicas, de acordo com o seguinte (de cima para baixo):

- **C_S, Argilas arenosas sedimentares**, de cor avermelhada escura, de espessura de 7 a 9m;
- **C_G, Argila arenosa sedimentar com seixos**, de cor avermelhada escura, com pequena espessura, de 1 a 2 m;
- **RS_B, Solo residual de diabase**, constituído por silte areno-argiloso, de coloração avermelhada escura, com espessura variável entre 3 e 5 m, por vezes com blocos de diabase;
- **RB, Diabase**, de coloração acinzentada, ocorre abaixo de 13 a 15 m de profundidade;

Estabelecida a geometria do maciço, determinaram-se os parâmetros mecânicos para cada unidade geotécnica (Quadro 1) considerando três cenários/casos distintos:

- Solo puramente coesivo, a partir dos parâmetros NSPT e do qc (CPT) – Caso I;
- Solo puramente atritivo, a partir dos parâmetros NSPT e do qc (CPT) – Caso II;
- Solo misto, com parâmetros de resistência ao corte a partir dos ensaios triaxiais em termos de tensões efetivas – Caso III.

Quadro 1 – Parâmetros de Resistência ao Corte a Usar no Dimensionamento das Estacas para os Vários Casos de Estudo

Unidade Geotécnica	Caso I	Caso II	Caso III	
			Solo NP	Solo P
C _S	Cu= 81 kN/m ²	∅ = 33º	-	-
C _G	Cu= 97 kN/m ²	∅ = 31º	-	-
RS _B	Cu= 103 kN/m²	∅ = 31º	C' = 30 kN/m²	C' = 25 kN/m²
			∅ = 20º	∅ = 17º
RB – (bedrock)	--	- -	- -	- -

*NP – amostra não perturbada pela instalação da estaca, P – amostra perturbada pela instalação da estaca

A unidade geotécnica RS_B considera-se preponderante neste estudo, visto que, as hélices das estacas encontram-se nesta unidade, ou seja os parâmetros mecânicos desta unidade são essenciais no cálculo teórico da capacidade de carga.



2 - Capacidade de Carga à Compressão

2.1 – Equação teórica

Para a estimativa da capacidade de carga por via teórica consideram-se as hipóteses anteriormente apresentadas, ou seja, calcula-se a capacidade de carga para os casos I, II, e III apresentados no item anterior.

A capacidade de carga de uma estaca em compressão, é o somatório da resistência de duas parcelas: a parcela por atrito lateral (Q_{uf}) e a parcela da base (Q_{ub}).

2.1.1. Parcela relativa ao atrito lateral (Q_{uf})

No cálculo do atrito lateral considerou-se apenas uma parte do comprimento da estaca (H_{ef}), pois admite-se que o solo estará em contato com o fuste, a curto prazo, num comprimento de estaca muito pequeno. Veja a Figura 5a, onde se mostra que o contato entre o fuste e o solo envolvente, imediatamente após a instalação de uma estaca helicoidal.

Apresentam-se no Quadro 2 os valores de carga resistente pelo fuste para os três casos apresentados anteriormente a através das expressões [7], [8] e [9] admitindo como comprimento efetivo da estaca (altura útil de atrito) igual a 1,6 e 0,7 m para a A1 e a A2, respectivamente (Fig. 5b).

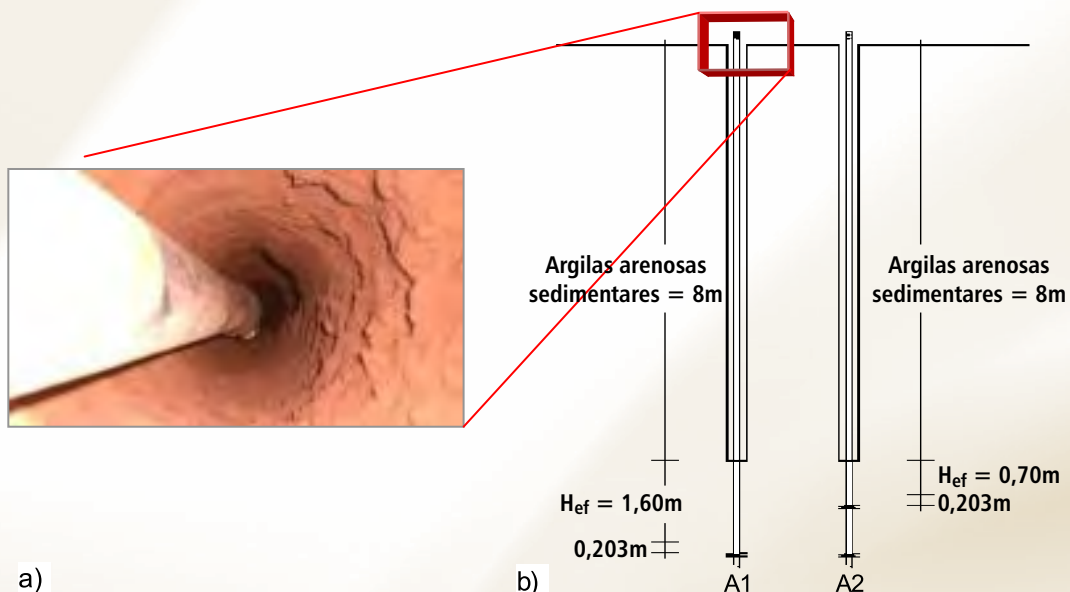


Figura 5 – Imagem do Fuste e do Solo Envolvente, Imediatamente Após a Instalação da Estaca Helicoidal (a) e Valores de H_{ef} Adotados no Cálculo da Parcela de Atrito Lateral Q_{uf} das Estacas A1 e A2 (b)

Quadro 2 – Capacidade de Carga Lateral (Q_{uf} - kN) nas Estacas A1 e A2, Admitindo os Diferentes Critérios de Resistência ao Corte

Estaca	Critério de resistência ao corte/casos		
	I	II	III
A1	14,2	14,6	14,8
A2	6,2	5,8	6,2

No caso III consideram-se os valores de ângulo de atrito e de coesão referentes às amostras perturbadas. O solo que oferece resistência pelo fuste é o solo que se encontra na zona superior às hélices, desta forma considera-se que os resultados das amostras perturbadas são mais próximos dos reais.

2.1.2. Parcela relativa à base (Q_{ub})

Em relação à capacidade de carga garantida pela base, Q_{ub} , usando as expressões [1] e [3] a [6], obtêm-se os valores apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Capacidade de Carga da Base (Q_{ub} - kN) para as Estaca A1 e A2

Estaca	Método	Carga de Rotura [kN]		
		Caso I	Caso II	Caso III
		(solo coesivo)	(solo atritivo)	(Solo $C' - \phi'$)
A1	Meyerhof (1951)	29	199	90
	Perko (2009)	14	13	*
A2	Meyerhof (1951)	55	355	143
	Perko (2009)	27	25	*

* - Não se aplica.

No caso III considera-se para ambas as estacas os valores de ângulo de atrito e de coesão referentes aos resultados das amostras não perturbadas. Esta escolha deveu-se ao fato da capacidade de carga assegurada pela hélice ser essencialmente condicionada pelo solo que está abaixo destas (no caso de estacas com duas hélices, apenas a hélice inferior está apoiada em solo não perturbado, ou seja considerou-se os parâmetros de solo perturbado no cálculo da capacidade de carga assegurada pela hélice superior).

2.1.3 – Capacidade de carga global (Q_u)

A capacidade de carga para as duas estacas em compressão, é o resultado do somatório da resistência das duas parcelas que se apresentaram anteriormente, a parcela por atrito lateral e a parcela da base (Quadro 4).

Quadro 4 – Capacidade de Carga (Q_u - kN) para as Estaca A1 e A2

Estaca	Método (autor)	Carga de Ruptura [kN]		
		Caso I	Caso II	Caso III
		(solo coesivo)	(solo atritivo)	(Solo $C' - \phi'$)
A1	Meyerhof (1951)	43	222	105
	Perko (2009)	28	28	*
A2	Meyerhof (1951)	61	361	149
	Perko (2009)	33	31	*

* - Não se aplica.

2.2 – Ensaio de carga

Os resultados dos ensaios nas estacas A1 e A2 em termos de compressão apresentam-se nas Figuras 5 a) e b) respetivamente, sendo de mencionar que cada ensaio teve o 1º e o 2º ciclo.

No 1º ciclo de ambas as estacas verifica-se um grande assentamento inicial; este deve-se ao fato das estacas terem sido anteriormente ensaiadas à tração, levando a que haja esse significativo assentamento até a estaca se ajustar à sua posição inicial.

Assim, para efeitos de análises em termos de capacidade de carga, para aplicação dos vários critérios de ruptura (critério de Terzaghi e critério da NBR 6122), considera-se o ajuste das curvas no troço inicial do 1º ciclo (representado a tracejado nos gráficos) levando a uma nova origem com o referencial X_2Y_2 .

Salienta-se ainda que para uma análise dos critérios de ruptura em termos do 2º ciclo também considera-se o referencial X_3Y_3 .

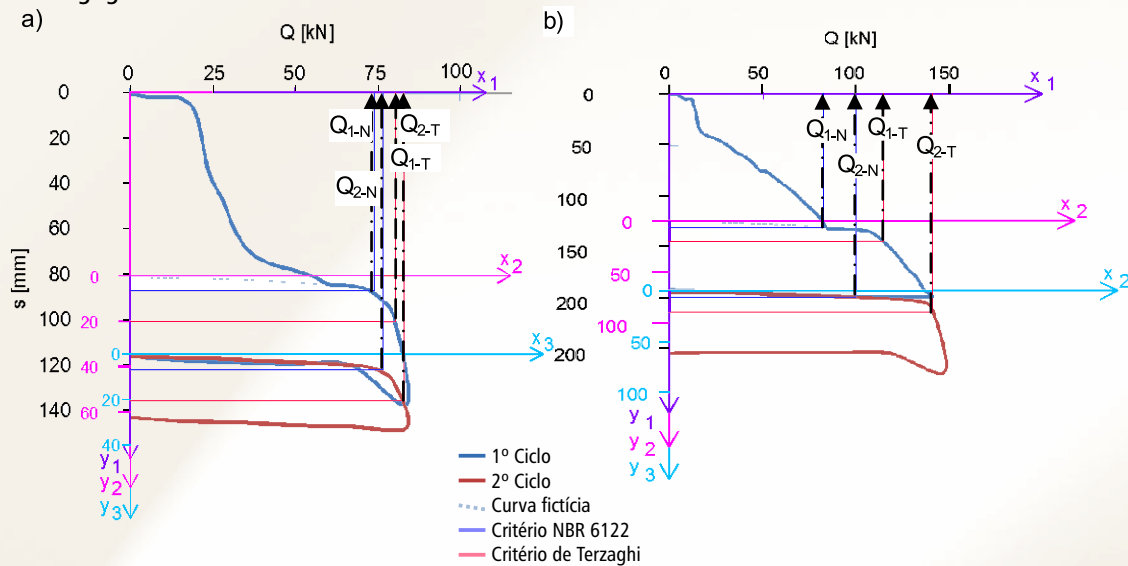


Figura 5 – Ensaio de Carga Estático Rápido na Estaca A1 (a) e Ensaio de Carga Estático Rápido na Estaca A2 (b)

No Quadro 5 apresenta-se a síntese da capacidade de carga que se obteve pelos dois critérios de ruptura para ambas as estacas através dos ensaios de carga.

Quadro 5 – Resultado da Capacidade de Carga na Ruptura (Q_r - kN) para as Estacas A1 e A2 pelas Diversas Metodologias, a partir dos Ensaios de Carga

Critério de Ruptura	1º Ciclo		2º Ciclo		Média
	NBR 6122	Terzaghi	NBR 6122	Terzaghi	
Qr1 (A1 - uma hélice)	74	80	76	83	78
Qr2 (A2-duas hélices)	83	115	100	141	110
Qr2 / Qr1	1,1	1,4	1,3	1,7	1,4



2.3 – Síntese de resultados

Nesta subsecção apresenta-se no Quadro 6 a capacidade de carga na ruptura pelos diversos métodos e autores, a fim de se poderem comparar.

Quadro 6 – Capacidade de Carga na Ruptura (Q_u - kN) de Estacas Helicoidais com Uma (A1) e Duas (A2) Hélices.

Estaca	Método/autor	A partir de método teórico				A partir de ensaio de carga				
		Caso				1º Ciclo		2º Ciclo		Média
		I (solo coesivo)	(solo atritivo)	III (solo C' - Ø)	Média	NBR 6122	Terzaghi	NBR 6122	Terzaghi	
A1	Meyerhof	43	214	105	121	74	80	76	83	78
	Perko (2009)	28	28	-	28					
Média		36	121	105	74					
A2	Meyerhof	61	361	149	190	83	115	100	141	110
	Perko (2009)	33	31	-	32					
Média		47	196	149	111					
	<u>Qu2</u>	1,3(*1)	1,6(*1)	104	1,5	1,1	1,4	1,3	1,7	1,4
	Qu1									

(*1) - Valores obtidos considerando os valores médios de A1 e de A2

3 – Conclusões

Com a realização deste trabalho pode-se aferir que:

- a capacidade de carga em compressão de estacas helicoidais (Q_u), foi avaliada a partir de equações teórico-empíricas, tendo sido possível discriminar a componente da base (Q_{ub}) e a componente por atrito lateral (Q_{uf}). Em termos médios o contributo de Q_{uf} é de 22 e 7% em relação a Q_u , para a situação A1 e A2, respetivamente.
- os resultados em termos de Q_u apresentam-se em síntese no Quadro 6, sendo de salientar o seguinte:
 - os resultados a partir dos formulários teórico-empíricos, para os vários cenários (Casos I a III) não são convergentes entre si, salientando-se que genericamente o cenário II é o que leva aos valores mais altos, ou seja, obtêm-se valores de Q_u mais altos quando se considera um cenário de solo atritivo; esta situação é particularmente correta quando se considera o critério de Meyerhof (1951); não se verifica para o caso da proposta de Perko (2009), que é demasiado conservadora (esta última utiliza os resultados de N_{spT} diretamente);
 - os resultados a partir do ensaio de carga nas estacas, o método da NBR 6122 é mais conservador que o método de Terzaghi (carga equivalente ao assentamento de 10% do diâmetro da hélice); as estacas submetidas a um 2º Ciclo de carga apresentam melhor comportamento (carga-assentamento), contudo não apresentam maior capacidade de carga significativa; essa diferença foi mais significativa na estaca com duas hélices;
 - ao se fazer uma análise comparativa entre os resultados teóricos e práticos da capacidade de carga para as estacas A1 e A2 pode-se referir que:
 - * ao se considerar que o solo de RS_B é atritivo não se está do lado da segurança, ou seja, os valores obtidos através de cálculo teórico são genericamente superiores ao medidos na realidade;
 - * ao se partir de valores obtidos em ensaio triaxial e se utilizar a expressão de Meyerhof para a estimativa da capacidade de carga também não se está do lado da segurança;
- o acréscimo de uma hélice na estaca A2 traduziu-se num acréscimo de carga de cerca de 50% segundo os métodos teóricos e de 40% segundo os ensaios de carga, podendo-se assim afirmar que os métodos teóricos não se afastam muito do que acontece na realidade, neste aspeto.

- Carvalho, I. P. G. (2007). Estudo teórico-experimental da capacidade de carga à tração e compressão de estacas metálicas helicoidais, Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade federal de Minas Gerais.
- Louro Carlos, G. D. (2013) Dimensionamento de Estacas Helicoidais, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, 83p.
- Louro Carlos, G.D., Ferreira Gomes, L.M., e Cavalcanti Tsuha (2014). Caracterização Geotécnica de um maciço de solos Tropicais com o objetivo de aferir o dimensionamento de estacas helicoidais. 14º Congresso Nacional de Geotecnia, UBI e SPG, Covilhã; 12p.
- Meyerhof, G. G. (1951). The Ultimate Bearing Capacity of Foundations, Gheotechnique, vol. 2. Mitsch, M.P. and Clemence, S.P. (1985). The Uplift Capacity of Helix Anchors in Sand. Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, ASCE, pp. 26-47.
- Mooney, J.S., Adamczak, S.Jr., and Clemence, S.P. (1985). Uplift Capacity of Helix Anchors in Clay and Silt. Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, ASCE, pp. 48-72.
- NBR 12131/2006. Estacas – Prova de Carga Estática, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR 6122/2010. Projeto e Execução de Fundações, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Perko, H. A. (2009). Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation. John Wile & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 512p.
- Santos, T. C. (2013). Estudo da Capacidade de Carga à Tração de Estacas Metálicas Helicoidais em Solos Tropicais, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/ USP.
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, 510p.
- Tsuha, C. H. C. (2012). Fundações em Estacas Helicoidais, Revista de Fundações e Obras Geotécnicas, Nº 18, pp. 56-66.



Reforço de fundação e macaqueamento de edificação.