

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso De Especialização Em
Análise E Dimensionamento De Estruturas De Concreto Armado E Aço

FRANCIELLY LAS CASAS DE ASSIS

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE PREVISÃO DE
CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS HELICOIDAIS**

Belo Horizonte

2018

FRANCIELLY LAS CASAS DE ASSIS

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE PREVISÃO DE
CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS HELICOIDAIS**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Estruturas".

Orientador: Prof. Ronaldo de Azevedo Chaves

Belo Horizonte

2018



ATA DA DEFESA

“Estudo Comparativo Entre os Métodos de Previsão de Capacidade de Carga de Estacas Helicoidais”

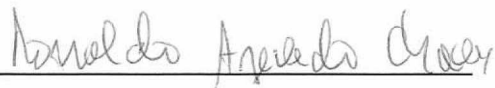
FRANCIELLY LAS-CASAS DE ASSIS

Trabalho Final defendido perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço”

Aprovada em 18 de julho de 2018.

Por:

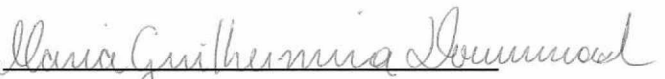
Prof. Ronaldo Azevedo Chaves
Avaliador 1 – Orientador


Nota: 100

Prof. Ney Amorim Silva
Avaliador 2


Nota: 95

Enga. Maria Guilhermina Drummond Guimarães
Avaliador 3


Nota: 96

RESUMO

A aplicação de estacas helicoidais tem se tornado cada vez mais comum nos empreendimentos executados no Brasil. Devido a sua rapidez e facilidade de execução, mesmo com conhecimento limitado acerca do seu comportamento em solos brasileiros, a estaca helicoidal tem se tornado muito popular, principalmente no campo de transmissão de energia. Para entender melhor sobre o assunto, neste trabalho foi realizada a caracterização da estaca, abordando desde seus componentes básicos até a influência de sua instalação no solo. Foi realizado também um apanhado das principais metodologias de previsão de capacidade de carga geotécnica das estacas: metodologia da capacidade de carga individual, metodologia do cilindro de cisalhamento e método do torque. De maneira a compreender os resultados de resistência propostos pelas metodologias, foi realizado um comparativo com uma prova de carga à tração realizada em uma estaca helicoidal fabricada, aplicada e ensaiada pela empresa Torcisão Comercial e Industrial de Aços Ltda. Além das características da estaca aplicada e dos resultados da prova de carga, a empresa Torcisão também forneceu os dados do solo presente no local da instalação por meio de sondagem do tipo SPT e o torque lido durante a instalação da estaca.

Palavras chave: Fundações; estacas helicoidais; capacidade carga; provas de carga.

ABSTRACT

The application of helical piles has become increasingly common in projects carried out in Brazil. Due to its speed and ease of execution, even with limited knowledge about its behavior in Brazilian soils, the helical pile has become very popular, mainly in the field of energy transmission. To better understand the subject, in this work the characterization of the stake was carried out, approaching from its basic components to the influence of its installation in the soil. An overview of the main methodologies for predicting the geotechnical load capacity of piles was also carried out: individual load capacity methodology, shear cylinder methodology and torque method. In order to understand the resistance results proposed by the methodologies, a comparison was made with a tensile load test carried out on a helical pile manufactured, applied and tested by the company Torsistência Comercial e Industrial de Aços Ltda. In addition to the characteristics of the pile applied and the results of the load test, the Torcioso company also provided data on the soil present at the installation site through an SPT-type drilling and the torque read during the installation of the pile.

Keywords: Foundations; helical piles; load capacity; load tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Torres de transmissão de energia	13
Figura 2 – Estaca helicoidal metálica	16
Figura 3 – Estaca de hélice única (a) e multi-hélices (b).....	17
Figura 4 – Farol de Maplin Sands	18
Figura 5 – Utilização da estaca helicoidal ao longo dos anos	20
Figura 6 – Componentes da estaca helicoidal	21
Figura 7 – Hélice soldada na haste de seção transversal circular	22
Figura 8 - Exemplo de conexão em seção quadrada	22
Figura 9 - Exemplo de terminação para estacas helicoidais.....	22
Figura 10 – Exemplos de seções guias (a) e extensores (b)	23
Figura 11 – Instalação de estaca helicoidal em local com acesso reduzido	24
Figura 12 – Aplicação em fundações de linhas de transmissão	26
Figura 13 – Ampliação residencial.....	27
Figura 14 – Trilhas construídas sobre estaca helicoidal.....	27
Figura 15 – Equipamentos de instalação	28
Figura 16 – Passo e seções da estaca.....	29
Figura 17 – Procedimentos de instalação	30
Figura 18 – Retirada de obstruções rasas	32
Figura 19 – Configuração das hélices (a) cilíndrica e (b) cônica	34
Figura 20 – Curvas tensão x deslocamento de provas de carga	35
Figura 21 – Efeito da instalação da estaca em (a) areia fofa e (b) areia compacta.....	36
Figura 22 – Mecanismo de penetração da hélice no solo	37
Figura 23 – Resistências das hélices: provas de carga à compressão (a) e tração (b).....	37
Figura 24 – Estaca helicoidal instalada em areia.....	38
Figura 25 – Modos de ruptura à tração de estacas rasas (a) e profundas (b) em solo arenoso.	39
Figura 26 – Modos de ruptura de estacas rasas (a) e profundas (b) em solo coesivo.....	40
Figura 27 – Modos de ruptura Capacidade de carga individual (a) e Cilindro de cisalhamento (b)	43
Figura 28 – Método da capacidade de carga individual	44
Figura 29 – Fatores de capacidade de carga - Terzaghi (1943) e Meyerhof/Hansen (1951) ...	46
Figura 30 – Combinação dos fatores de capacidade de carga, forma e profundidade	48

Figura 31 – Fatores N_q e N_c sugeridos por Stephenson (1997).....	49
Figura 32 – Valores de K_u recomendados por Das (1990)	56
Figura 33 – Capacidade de carga para argilas e siltes	59
Figura 34 – Estaca helicoidal em estudo	67
Figura 35 – Gráfico do 1º ciclo de carga	70
Figura 36 – Gráfico do 2º ciclo de carga	71
Figura 37 – Gráfico do 3º ciclo de carga	71
Figura 38 – Gráfico comparativo da capacidade de carga individual (solo arenoso).....	76
Figura 39 – Gráfico comparativo da capacidade de carga individual (solo coesivo).....	76
Figura 40 – Gráfico comparativo do cilindro de cisalhamento (solo arenoso)	78
Figura 41 – Gráfico comparativo do cilindro de cisalhamento (solo coesivo).....	78
Figura 42 – Comparativo entre as metodologias e a prova de carga (solo arenoso)	80
Figura 43 – Comparativo entre as metodologias e a prova de carga (solo coesivo)	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de viagens de caminhão necessárias	25
Tabela 2 – Valores de $H1/D1cr$ em função de ϕ	39
Tabela 3 – Critérios para interpretação das curvas de carga e deslocamento.....	41
Tabela 4 – Valores do coeficiente de adesão em função da consistência da argila.....	50
Tabela 5 – Valores de Nq e Nc recomendados pela Earth Contact Products	53
Tabela 6 – Valores de kt em função do diâmetro do fuste	62
Tabela 7 – Valores de kt em função do diâmetro do fuste	62
Tabela 8 – Ensaio SPT	65
Tabela 9 – Peso específico de solos argilosos	66
Tabela 10 – Peso específico de solos arenosos.....	66
Tabela 11 – Diâmetro e passo das hélices	68
Tabela 12 – Variação do torque ao longo da profundidade.....	69
Tabela 13 – Características das hélices	74
Tabela 14 – Capacidade de carga estaca – capacidade de carga individual.....	75
Tabela 15 – Capacidade de carga estaca – cilindro de cisalhamento	77
Tabela 16 – Resumo das resistências obtidas.....	80
Tabela 17 – Relação previsão capacidade de carga e resultado prova de carga.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

% percentual

$\frac{H_1}{D_{1cr}}$ é a relação que separa o modo de ruptura de estacas rasas e profundas, segundo Das (1990)

A_1 é a área da primeira hélice

A_i é a área da hélice i

A_n é a área da última hélice

A_{pha} é a área perimetral do cilindro de cisalhamento

A_{ps} é a área perimetral do fuste da estaca

B_i é a largura da hélice i (igual ao diâmetro)

C_a é a adesão do solo ao fuste

D_1 é o diâmetro da primeira hélice

D_a é o diâmetro médio das hélices

D_i é o diâmetro da hélice i

D_m é o diâmetro médio das hélices

D_n é o diâmetro da hélice inferior

F_q é o fator adimensional que expressa a magnitude da capacidade de carga

H_1 é a profundidade da primeira hélice

H_i é a profundidade da hélice i

H_n é a profundidade da hélice inferior

K_u é o coeficiente de empuxo lateral

N_{70} é o valor de N_{SPT} referente a uma eficiência de 70%

N_c , N_q e N_γ são os fatores de capacidade de carga

Q_f é a resistência devido ao cilindro de cisalhamento

Q_{fs} e Q_{fc} representam a resistência do cilindro de cisalhamento devido ao ângulo de atrito e coesão, respectivamente

Q_p é a resistência da hélice superior ou inferior

Q_{ps} e Q_{pc} representam a resistência da hélice superior ou inferior devido ao ângulo de atrito e coesão, respectivamente

Q_s é a resistência devido ao fuste

Q_{ss} e Q_{sc} representam a resistência do fuste devido ao ângulo de atrito e coesão, respectivamente;

Q_u é a capacidade de carga da estaca

W_s é o peso do solo na zona de ruptura

c_1 é a coesão atuante na primeira hélice

c_f é a coesão atuando no cilindro de solo formado entre as hélices

c_i é a coesão na a profundidade da hélice i

c_n é a coesão na última hélice

c_u é a coesão não drenada do solo

d_c, d_q e d_γ são os fatores de profundidade

k_t é o fator empírico que correlaciona o torque e a capacidade de carga da estaca

\sum_n somatório

q_1 é a tensão efetiva sobre a primeira hélice

q_i é a tensão efetiva do solo sobre a hélice i

$q_i = \gamma_i H_i$ é a tensão efetiva sobre a hélice i

q_n é a tensão efetiva sobre a última hélice

q_{ult} é tensão última da hélice n

s_c, s_q e s_γ são os fatores de forma

γ_1 é o peso específico do solo sobre a primeira hélice

γ_f é o peso específico do solo entre as hélices

γ_i é o peso específico do solo sobre a hélice i

γ_n é o peso específico do solo na profundidade da hélice inferior

λ_{SPT} constante igual a 6,2 kPa/golpe/30 cm

φ_f é o ângulo de atrito interno do solo entre as hélices

φ_i é o ângulo de atrito interno do solo na hélice i

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

c é a coesão

d é o diâmetro do fuste

ft é a unidade de pés

H é o comprimento do fuste acima da hélice

K é um parâmetro de escala

kN quilo newton

L é o comprimento do elemento de fundação (hélice)

lb é a unidade de libras

m metro

mm milímetro

NBR Norma Brasileira Registrada

N_{SPT} é a resistência à penetração no ensaio SPT

p é o passo da hélice

s espaçamento entre hélices

SPT *Standard Penetration Test*

T é o torque de instalação da estaca

tf é a unidade de tonelada força

α é o atrito entre o solo e o fuste

B é a largura do elemento de fundação

D é o diâmetro da hélice

e número de Euler

q é a tensão efetiva do solo

γ é o peso específico do solo

π número pi

φ é o ângulo de atrito interno do solo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contexto.....	13
1.2	Caracterização do estudo	14
2.	JUSTIFICATIVA	15
3.	OBJETIVO	15
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1	Estacas Helicoidais	16
4.2	Histórico	17
4.3	Componentes da estaca helicoidal	20
4.4	Vantagens e desvantagens	23
4.5	Aplicações comuns	26
4.6	Instalação da estaca.....	28
4.7	Dimensionamento geotécnico das estacas helicoidais.....	32
4.8	Espaçamento entre hélices	33
4.9	Configuração e número de hélices.....	34
4.10	Influência da instalação da estaca no solo	36
4.11	Estacas profundas e estacas rasas	38
4.12	Compressão X Tração.....	40
4.13	Provas de carga	41
5.	PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA.....	42
5.1	Método da capacidade de carga individual.....	43
5.1.1	Capacidade de carga à compressão.....	45
5.1.2	Capacidade de carga à tração.....	51
5.2	Método do cilindro de cisalhamento.....	54
5.2.1	Capacidade de carga à compressão.....	55

5.2.2	Capacidade de carga à tração.....	58
5.3	Método do torque.....	61
6.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
6.1	Contextualização das informações	64
6.2	Caracterização do solo.....	64
6.3	Caracterização da estaca.....	66
6.4	Instalação da estaca.....	68
6.5	Provas de Carga	69
6.6	Metodologias de previsão de capacidade de carga	72
7.	COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA E A PROVA DE CARGA.....	73
7.1	Métodos de previsão de capacidade de carga.....	73
7.2	Premissas adotadas para o cálculo da capacidade de carga.....	73
7.2.1	Método da capacidade de carga individual.....	74
7.2.2	Método do cilindro de cisalhamento.....	77
7.2.3	Método do torque.....	79
7.3	Comparativo	79

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Devido ao crescimento da população brasileira, a demanda por energia, seja elétrica, eólica ou fotovoltaica, vem se tornando maior a cada dia que passa. Como consequência disso, a construção de empreendimentos geradores de energia como também linhas de transmissão para escoar a energia gerada, tem aumentado consideravelmente. Apesar da crise econômica e política enfrentada pelo país nos dois últimos anos, o mercado de energia tem se mostrado estável, afetado pela crise, porém ainda em crescimento.

Figura 1 – Torres de transmissão de energia



Fonte: Mata de Santa Genebra Transmissão S.A., 2014.

O tema abordado nesse trabalho é o dimensionamento geotécnico de fundações em estacas helicoidais. Devido à sua rapidez e facilidade de execução, a estaca helicoidal tem ganhado espaço no mercado, sendo considerada uma das melhores opções de fundação para solos que apresentam camadas superficiais com baixa capacidade resistente e, sobretudo, em fundações solicitadas por esforços de compressão e de tração. No Brasil, esse tipo de fundação tem sido largamente empregado na indústria de energia, mercado que tem se mostrado promissor para esse tipo de solução.

As estacas helicoidais podem ser instaladas de maneira rápida e sem demandar grandes escavações, mão de obra, transporte de insumos (concreto, armação, etc.) e estão prontas para receber as cargas imediatamente após a sua instalação, características que se encaixam muito bem e favorecem a execução das fundações de torres de linhas de transmissão de energia.

Apesar de todas as vantagens da utilização de fundações em estacas helicoidais, o conhecimento sobre o assunto ainda é pequeno no Brasil. Existem poucos estudos a respeito do comportamento das estacas em solo brasileiro e sua utilização não é normatizada, ou seja, não há uma norma brasileira registrada (NBR) que trate desse tipo de fundação. Devido ao conhecimento pouco difundido sobre assunto, ainda há uma resistência por parte de alguns projetistas e donos de empreendimentos à utilização da solução em fundação com estacas helicoidais.

Na literatura brasileira dois autores se destacam pelas pesquisas realizadas nesse tema: Tshua (2007) e Carvalho (2007).

1.2 Caracterização do estudo

O estudo geotécnico das estacas helicoidais envolve a apresentação e descrição da fundação e de seus elementos constituintes, abordagem do histórico desde suas primeiras utilizações, materiais utilizados na sua fabricação, aplicações comuns das estacas, vantagens e desvantagens da sua aplicação.

Será realizada também, uma revisão bibliográfica contemplando a capacidade de carga à tração e à compressão, os modelos de ruptura admitidos nas duas situações e, ao final, será apresentado um comparativo entre as metodologias de previsão de capacidade de carga.

2. JUSTIFICATIVA

Todas as metodologias consagradas da engenharia para o cálculo da capacidade de carga de estacas, sejam elas brasileiras ou não, foram amplamente estudadas, ensaiadas e discutidas para comprovar sua eficiência e compreender suas limitações de aplicação. Dentre algumas dessas metodologias, para estacas escavadas, cravadas, franki, hélice contínua, etc., podem ser destacadas: Aoki e Velloso, Décourt-Quaresma, Pedro Paulo da Costa Veloso, entre outros.

Através dos estudos, discussões e ensaios, um banco de dados é gerado para consultas e formação de profissionais especializados, e o seu emprego se torna mais confiável para os projetistas e proprietários dos empreendimentos.

Por muitas vezes, o emprego de estacas metálicas helicoidais foi vetado devido à falta de conhecimento acerca do seu comportamento quando instaladas no solo. Um maior entendimento acerca da capacidade de carga das estacas é essencial em algumas situações práticas e usuais, pois, por vezes, pode vir a solucionar desafios que as alternativas mais comuns não conseguem resolver com a mesma facilidade e rapidez.

3. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é promover um maior entendimento acerca das estacas helicoidais. Podem ser citados como objetivos específicos:

1. Caracterizar os componentes da estaca, citar as vantagens e desvantagens da sua aplicação, e os efeitos causados no solo devido à instalação, espaçamento e configuração das hélices;
2. Realizar um estudo de caso, aplicando as metodologias de previsão de capacidade de carga e comparando os resultados com um ensaio específico.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Estacas Helicoidais

De acordo com a ABNT NBR 6122:2010, fundações profundas são aquelas implantadas a mais de duas vezes o valor da menor dimensão do elemento estrutural da fundação e a pelo menos 3m de profundidade, ou seja, a transmissão dos esforços em fundações profundas se dá através do atrito lateral (fuste) e da resistência de ponta (base).

Segundo Velloso e Lopes (1998) estaca é um elemento de fundação profunda executada com o auxílio de ferramentas ou equipamentos. A execução pode ser feita por cravação à percussão, prensagem, vibração, escavação, ou ainda de forma mista envolvendo mais de um destes processos.

As fundações em estacas helicoidais estão inseridas nesse contexto, onde os esforços provenientes da estrutura são transmitidos ao solo através do fuste e das hélices que são instaladas no solo por aplicação de torque.

Perko (2009) definiu as estacas helicoidais como fundações feitas em aço, compostas por uma ou mais placas em forma de hélice soldadas à haste central que são instaladas no solo para suportar estruturas.

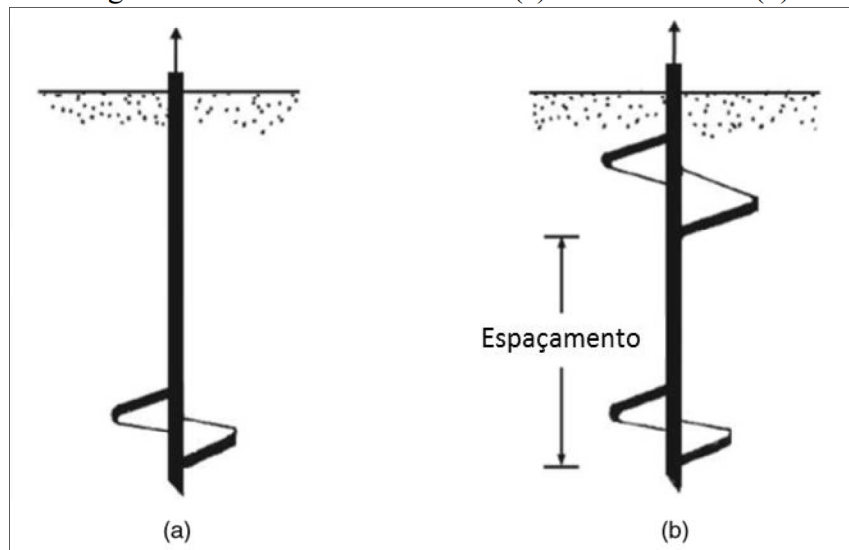
Figura 2 – Estaca helicoidal metálica



Fonte: Asel-Tech (2012).

Segundo Das (1941), as estacas consistem em um eixo metálico com uma ou mais hélices anexadas. Quando são constituídas de apenas uma hélice, são chamadas de ancoragem de hélice única. Quando constituídas de duas ou mais hélices, são denominadas ancoragens multi-hélices, onde as placas circulares são soldadas com um espaçamento apropriado entre elas.

Figura 3 – Estaca de hélice única (a) e multi-hélices (b)



Fonte: Das (1990).

Apesar de se tratar do mesmo dispositivo, o termo “Estaca Helicoidal” é geralmente utilizado para fundações submetidas a esforços de compressão, já o termo “Ancoragem Helicoidal” é utilizado para fundações submetidas a esforços de tração. O termo “Estaca Helicoidal” é utilizado de maneira geral, a menos que a distinção entre as aplicações (compressão e tração) seja necessária (Perko, 2009).

Desde que possam suportar esforços de compressão e de tração, as estacas podem ser utilizadas como fundações e/ou ancoragens no terreno.

4.2 Histórico

Segundo Perko (2009), o primeiro registro da utilização de estacas helicoidais se deu em 1836. Um dos problemas que mais intrigavam o engenheiro civil Alexander Mitchell era como construir fundações para estruturas marinhas em solos fracos, recifes de areias, lama e encostas de rios. Aos 52 anos de idade, Mitchell desenvolveu a solução para seus problemas: a estaca helicoidal.

Em 1838 Mitchell usou as estacas helicoidais para construir a fundação do Farol de Maplin Sands no rio Tâmesa (FIGURA 4). A fundação era constituída de nove estacas forjadas em ferro, dispostas em forma de octógono com uma estaca no centro.

Figura 4 – Farol de Maplin Sands



Fonte: Perko (2009).

Em 1853, Eugenius Birch começou a utilizar as estacas helicoidais de Mitchell nas fundações de cais marítimos em toda a Inglaterra. Entre 1862 e 1872 foram construídos 18 cais marítimos com a utilização das estacas helicoidais. (Perko, 2009)

Durante a expansão do Império Britânico, as estacas helicoidais foram utilizadas como fundações de novas pontes em diversos países e em diversos continentes. (Perko, 2009)

Existem controvérsias quanto à primeira utilização das estacas helicoidais nos Estados Unidos. Segundo Lutenegger (2003), o capitão William H. Swift construiu o primeiro farol dos EUA em estacas helicoidais em 1943, em Connecticut. Já para o National Historic Landmark Registry, o engenheiro Major Hartman Bache completou o primeiro farol em estacas helicoidais em Delaware Bay em 1850. Em ambos os casos, Mitchell navegou para a América do Norte para servir de consultor (Perko, 2009).

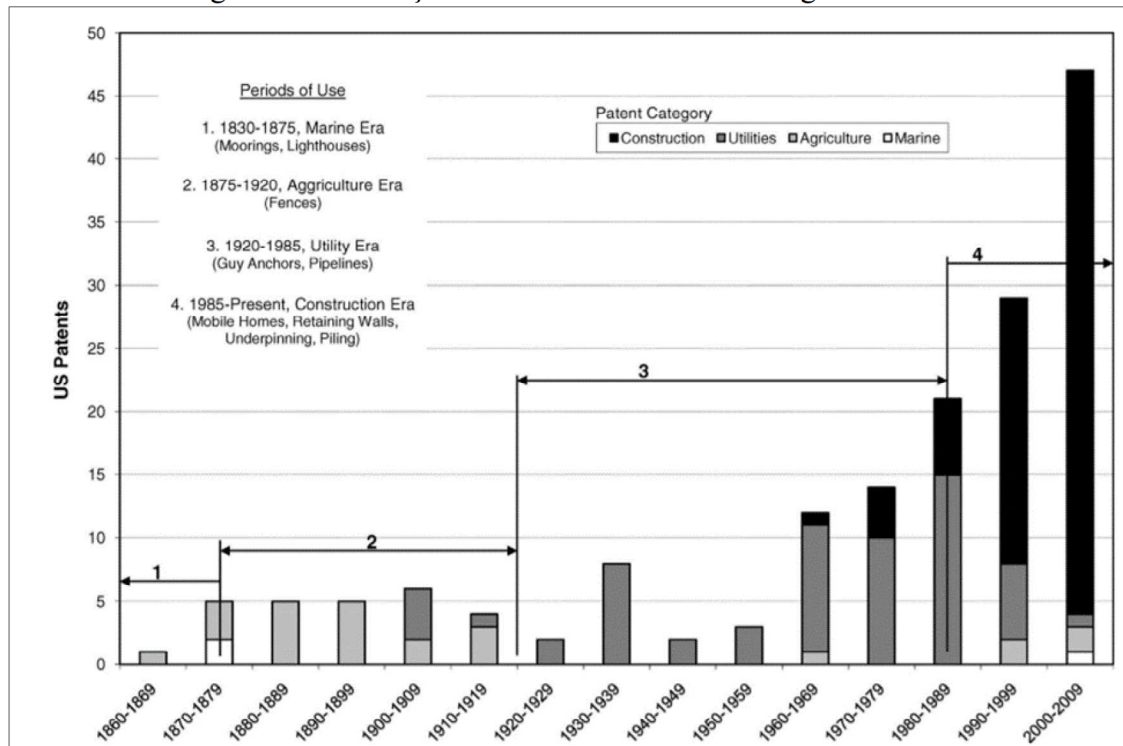
Entre as décadas de 1850 e 1890, mais de cem faróis foram construídos com fundações em estacas helicoidais ao longo da costa dos Estados Unidos e ao longo do Golfo do México. Dentre eles, podem ser citados: Roanoke River (1867), Harbor Island Bar (1867), Southwest Point Royal Shoal (1867), Long Point Shoal (1867) e Brant Island (1867), na Carolina do Norte. Hooper Strait (1867), Upper Cedar Point (1867), Lower Cedar Point (1867), Janes Island (1867) e Choptank River (1871) em Maryland e White Shoals (1855), Windmill Point (1869), Bowlers Rock (1869), Smith Point (1868), York River Spit (1870), Wolf Trap (1870), Tue Marshes (1875) e Pages Rock (1893) na Virgínia. Muitas das fundações dos faróis foram submetidas a cargas laterais dos fluxos de gelo, apresentando-se consideravelmente melhores do que as fundações convencionais (NPS, 2007, *apud* Perko, 2009).

De acordo com Perko (2009), o primeiro artigo escrito acerca das estacas helicoidais foi o “On Submarine Foundations; particularly Screw-Pile and Moorings,” por Alexander Mitchell e publicado no “Civil Engineer and Architects Journal” em 1848. Nesse artigo, Mitchell afirmou que as estacas helicoidais podem ser aplicadas para suportar esforços de compressão e de tração, e que sua capacidade portante é diretamente relacionada à dimensão das hélices, à natureza do solo em que está inserida e à profundidade em que está instalada.

Entre 1900 e 1950, a utilização de estacas helicoidais sofreu uma queda. Tal diminuição se deu em função do desenvolvimento de equipamentos mecânicos de cravação e perfuração. Foram desenvolvidas também as fundações em estacas Franki, hélice contínua e tubulões com abertura de base. Porém, com o advento de motores de torque hidráulicos modernos, avanços na fabricação e novas técnicas de galvanização, a estaca helicoidal moderna foi utilizada principalmente para aplicações em ancoragens até 1980, quando o engenheiro Stan Rupiper projetou a primeira aplicação das estacas à compressão (Perko, 2009).

A figura 5 ilustra o crescimento da utilização das estacas helicoidais ao longo dos anos.

Figura 5 – Utilização da estaca helicoidal ao longo dos anos



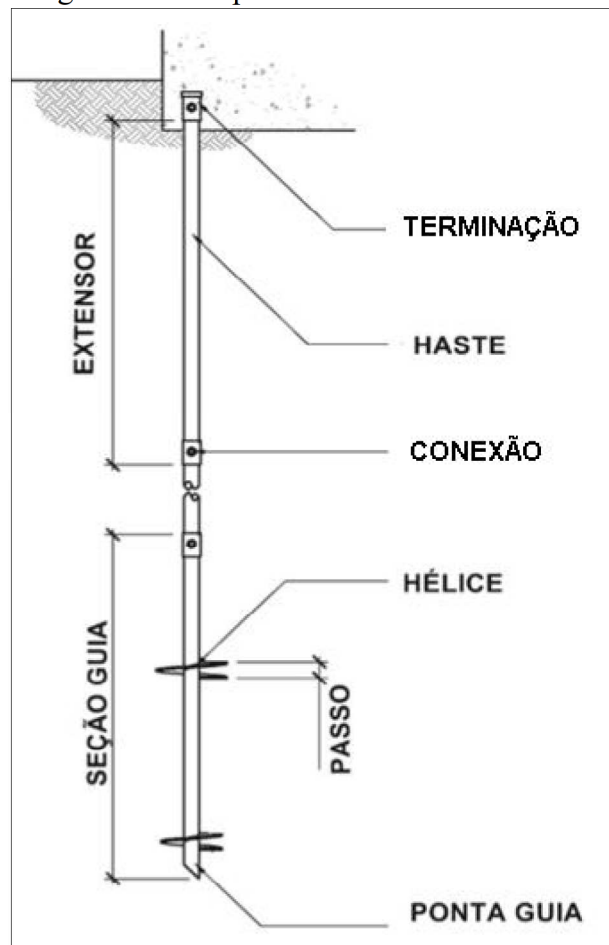
Fonte: Perko (2009).

4.3 Componentes da estaca helicoidal

De acordo com Perko (2009) as estacas helicoidais são fundações que são aparafusadas no solo para suportar estruturas.

Conforme demonstrado pela figura 6, os componentes básicos da estaca helicoidal são a haste, hélice, conexão e terminação.

Figura 6 – Componentes da estaca helicoidal



Fonte: Adaptado de Perko (2009).

A haste é composta por um perfil metálico em forma de tubo circular ou seção quadrada maciça de diversas dimensões e comprimentos. As hélices possuem forma de disco e são soldadas nas hastes. As conexões são os elementos responsáveis por conectar as seções das estacas e garantir que os esforços sejam transmitidos a toda fundação. Já as terminações são os elementos que transferem a carga da superestrutura para a fundação. (Cigrè, 2018)

A figura 7 ilustra uma hélice soldada em haste de seção circular, e as figuras 8 e 9 apresentam respectivamente, exemplos de conexão e terminações das estacas.

Figura 7 – Hélice soldada na haste de seção transversal circular



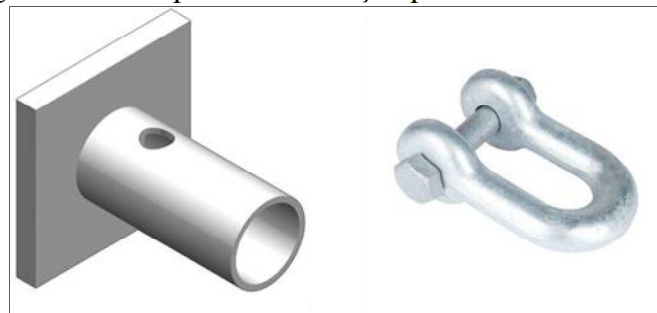
Fonte: Cigrè (2018).

Figura 8 - Exemplo de conexão em seção quadrada



Fonte: Cigrè (2018).

Figura 9 - Exemplo de terminação para estacas helicoidais

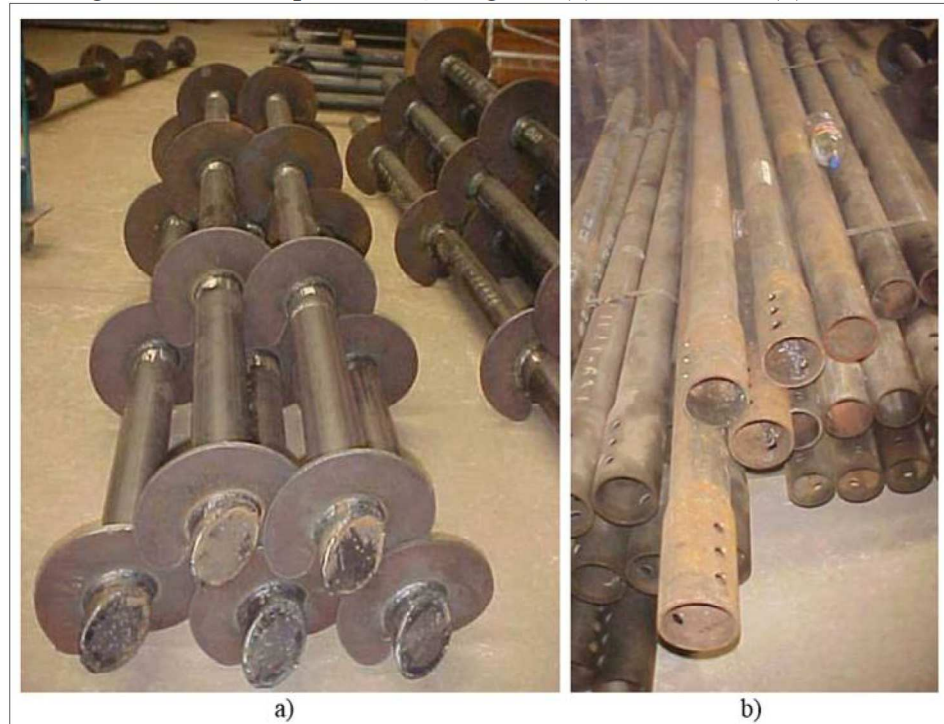


Fonte: Cigrè (2018).

As estacas podem ser subdivididas em duas partes: seção guia e extensores. A seção guia é responsável por guiar a instalação da estaca no solo, nela são soldadas as primeiras

hélices da estaca. Já os extensores são conectados à seção guia ou com outros extensores e podem possuir hélices soldadas na haste ou não. Sua função é adicionar comprimento à estaca até que a profundidade e o torque de projeto sejam atingidos.

Figura 10 – Exemplos de seções guias (a) e extensores (b)



Fonte: Carvalho (2007).

4.4 Vantagens e desvantagens

Segundo Perko (2009), as vantagens das estacas helicoidais frente às demais soluções de fundação são as seguintes:

- Pode ser aplicada temporariamente e removida quando necessário;
- São facilmente transportadas e instaladas em locais de difícil acesso; (FIGURA 11)
- O torque de instalação é um bom indicativo da capacidade de carga da estaca;
- Podem ser instaladas sem revestimento em solos com presença de água;
- Geralmente precisam de menos tempo para a instalação (são de rápida instalação);

Figura 11 – Instalação de estaca helicoidal em local com acesso reduzido



Fonte: Perko (2009).

- Podem ser instaladas em ângulo, de maneira a resistir melhor às cargas laterais;
- Os equipamentos de instalação são menores e de fácil transporte;
- Quase não produzem barulho e vibrações durante a instalação;
- Estão aptas a receber cargas logo após a instalação;
- Eliminam as formas e a cura, necessárias às fundações em concreto;
- Sua aplicação pode ser mais econômica em alguns casos;
- São facilmente reinstaladas em caso de erros de locação e/ou execução na obra;
- Diminuem os impactos ao meio ambiente ocasionados pela obra.

Perko (2009) destaca ainda que a construção de fundações em estacas helicoidais é uma prática ambientalmente correta e sustentável. As fundações helicoidais reduzem a emissão de carbono na atmosfera de várias maneiras. Mesmo que sejam transportadas por longas distâncias (por exemplo, do fornecedor ao local de construção), o fato de exigirem menos matéria prima

na sua confecção e um número menor de viagens de caminhão para sua aplicação, significam um consumo total de energia muito menor quando comparadas às fundações profundas convencionais, conforme demonstrado pela tabela 1.

Tabela 1 – Número de viagens de caminhão necessárias

OPÇÃO DE FUNDAÇÃO	Nº DE VIAGENS	DESCRIÇÃO DA VIAGEM
50 estacas helicoidais	1	equipamento de instalação
	2	estacas helicoidais
	3	
50 estacas escavadas	14	caminhões de concreto
	1	caminhão de bomba
	1	armadura das estacas
	1	equipamento de perfuração
	17	
50 estacas metálicas	2	estrega e recolhimento de guindastes
	4	perfis metálicos
	1	equipamento de cravação
	7	

Fonte: Adaptado de Perko (2009).

Em contrapartida, não é recomendável a aplicação das estacas helicoidais em solos com pedregulhos, matacões e com presença de materiais que possam danificar as hélices ou a haste.

Segundo Carvalho (2007), também podem ocorrer impedimentos de instalação das estacas em solos onde há restrição na profundidade devido a pedregulhos, matacões, pois é necessário certo comprimento de engaste no solo para resistir aos esforços. Em solos com N_{SPT} menor que cinco (solos moles ou fofos), deverá ser verificada a flambagem das estacas sujeitas a esforços de compressão.

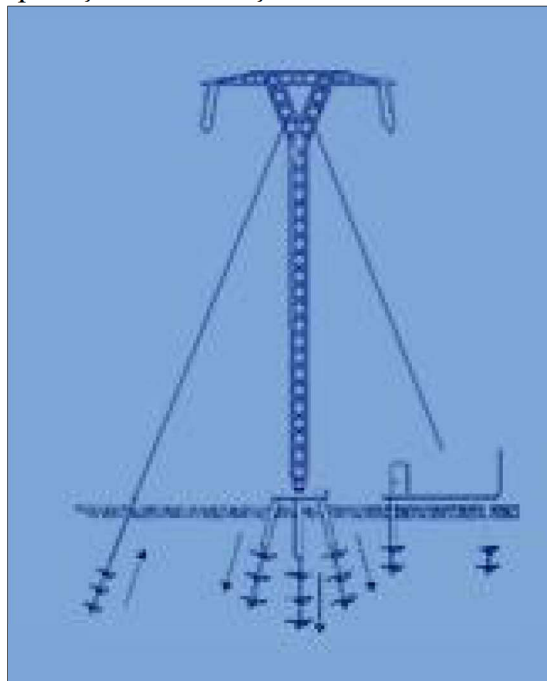
As estacas também não são muito eficazes quando submetidas a cargas laterais e a momentos fletores significativos. Devido a este fato, em algumas situações, para reduzir os efeitos das cargas laterais, as estacas são instaladas com determinada inclinação.

Perko (2009) destaca que a flambagem compromete a resistência das estacas à aplicação de cargas axiais de compressão.

4.5 Aplicações comuns

Devido às vantagens e facilidades de sua aplicação, nos últimos anos as estacas helicoidais passaram a ser empregadas em diversos ramos da engenharia. Além das aplicações na indústria de energia, onde são largamente utilizadas como fundações de torres de linhas de transmissão (FIGURA 12), elas passaram a ser empregadas também como tirantes de muro de arrimo, fundações de postes de luz, estruturas temporárias, reforços, grampeamento de solo, etc. (Stephenson, 1997)

Figura 12 – Aplicação em fundações de linhas de transmissão



Fonte: Vértice Engenharia (2018).

Perko (2009) destaca que as estacas helicoidais também são aplicadas na construção residencial, geralmente são instaladas como novas fundações para realizar ampliações, construir *decks*, varandas e reforçar fundações existentes (FIGURA 13). Devido ao pequeno impacto provocado pela instalação das estacas, ela também se transformou em uma solução interessante para locais de preservação ambiental, como por exemplo, na construção de trilhas em meio à florestas e reservas naturais (FIGURA 14).

Figura 13 – Ampliação residencial



Fonte: Perko (2009).

Figura 14 – Trilhas construídas sobre estaca helicoidal



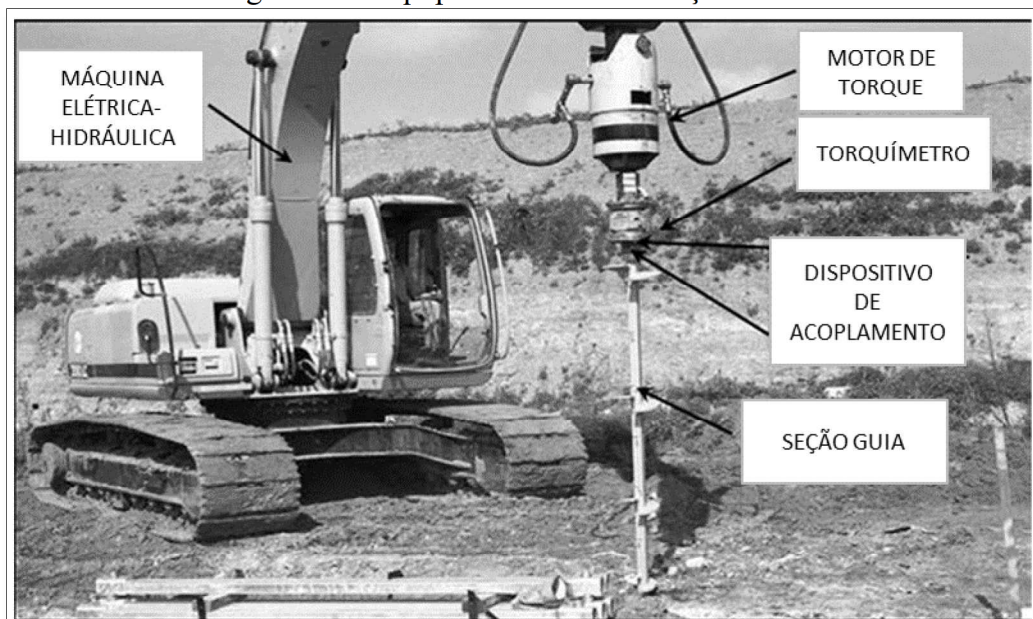
Fonte: Perko (2009).

4.6 Instalação da estaca

A execução desse tipo de fundação era feita, no passado, aparafusando a estaca no solo com o auxílio de força humana ou animal, que se locomoviam em uma plataforma para fazer a alavanca necessária à instalação (Rankine, 1877, *apud* Tshua, 2007).

Hoje, as estacas são instaladas por meio de torque rotacional no sentido horário, aplicado por equipamentos adequados. Os equipamentos mínimos necessários são: máquina elétrica-hidráulica (retroscavadeira, guindaste, trator, etc.), motor de torque (capaz de girar no sentido horário e anti-horário), torquímetro e dispositivo de acoplamento, conforme demonstrado pela figura 15. Em locais de difícil acesso, a instalação pode ser realizada com o auxílio de um motor de torque portátil.

Figura 15 – Equipamentos de instalação



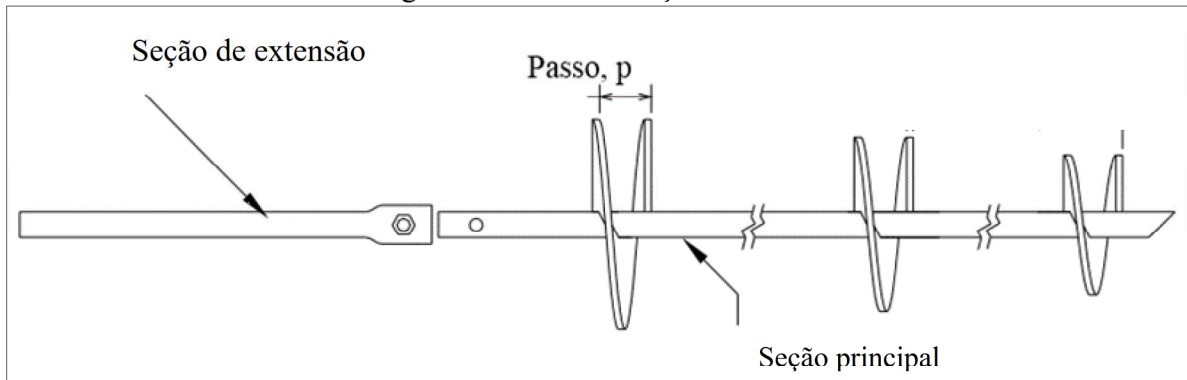
Fonte: Adaptado de Perko (2009).

De acordo com Perko (2009), a instalação de estacas helicoidais é simples, desde que sejam adotados os equipamentos e procedimentos adequados. Tal simplicidade tem contribuído para popularização da estaca no mercado.

As estacas, submetidas a uma carga axial pequena, são giradas para dentro do solo de maneira a promover a penetração das primeiras hélices (seção guia). À medida que a estaca é inserida no solo, a estaca é estendida com o acréscimo das extensões necessárias para atingir a

profundidade e o torque de projeto. Para cada giro completo da estaca, a distância penetrada no solo é igual a um passo da hélice.

Figura 16 – Passo e seções da estaca



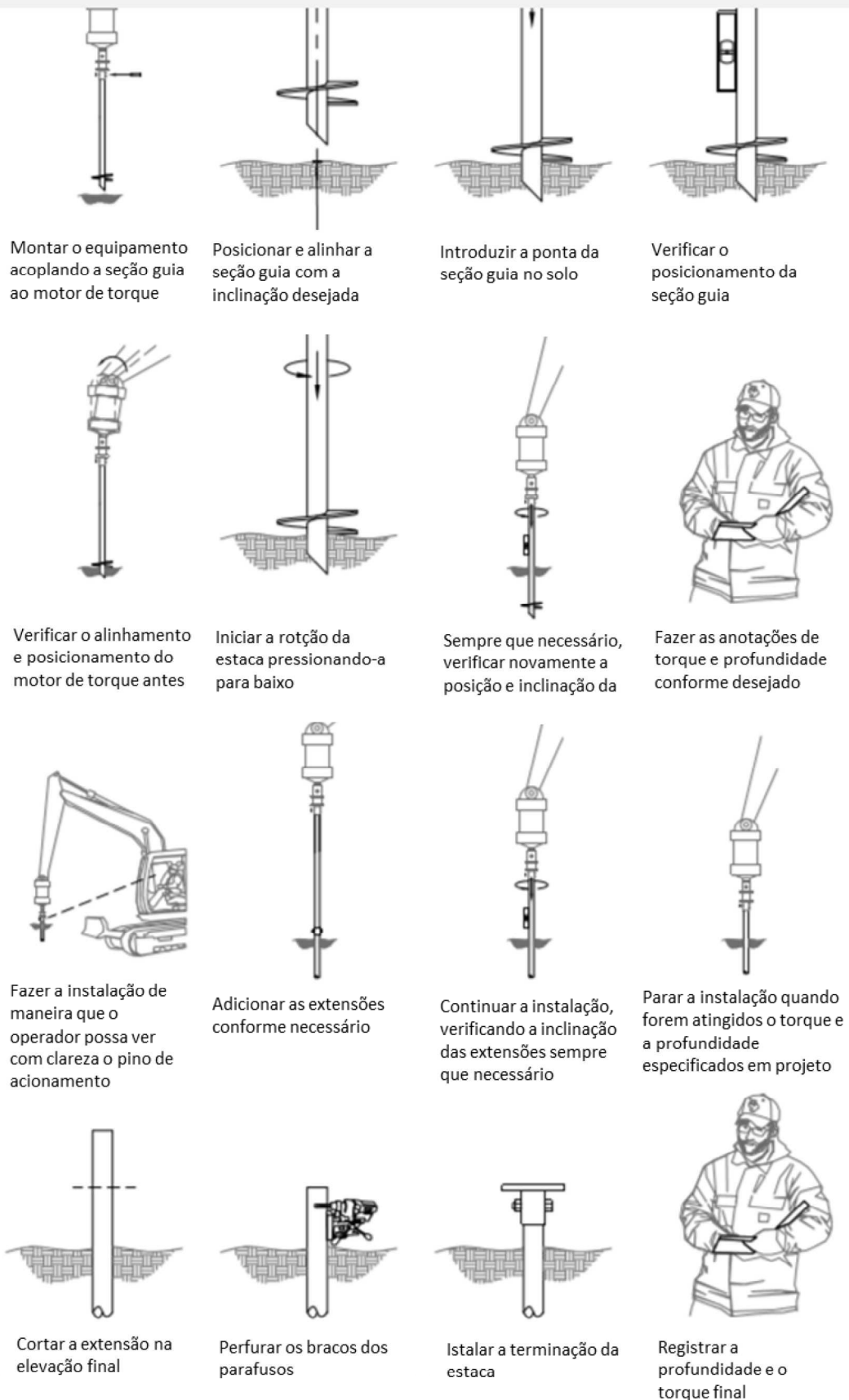
Fonte: Adaptado de Carvalho (2007).

Segundo Perko (2009), deve-se atentar para o torque aplicado na instalação: o motor de torque deve ter capacidade de rotação no sentido horário e anti-horário; o torque aplicado não deverá ser superior ao resistido pelos componentes e encaixes das estacas; a capacidade do motor de torque tem que ser, no mínimo, igual ou superior ao torque especificado em projeto; o motor deve ter rotação contínua, proporcionando o avanço suave e contínuo da estaca, minimizando-se assim, as perturbações no solo.

Quando instaladas de maneira correta, as estacas impactam minimamente as propriedades do solo, podendo-se admitir que todas as hélices seguem o mesmo trajeto no interior do solo (Kulhawy, 1985).

Os procedimentos básicos para instalação da estaca estão citados na figura 17, a seguir.

Figura 17 – Procedimentos de instalação



Fonte: Adaptado de Perko (2009).

Para os casos onde a profundidade mínima de projeto não é alcançada, e é atingido o torque máximo admitido pela estaca, Perko (2009) recomenda que sejam realizados os seguintes procedimentos:

- 1- Inverter o sentido de rotação, retirando a estaca do solo de 0,5 a 1,0 metro e tentar avançar novamente. Em alguns casos, este procedimento deverá ser repetido por várias vezes;
- 2- Retirar a estaca e substituí-la por uma nova estaca com elementos e conexões mais resistentes ou por uma estaca com nova configuração de hélices;
- 3- Remover a estaca e executar um furo guia para auxiliar na nova tentativa de penetração da estaca;
- 4- Caso a obstrução da estaca seja rasa, deverá ser retirada a estaca e removida a obstrução antes da reinstalação da mesma, conforme figura 18;
- 5- Se possível, relocar a estaca para um local próximo para evitar a obstrução;
- 6- Reavaliar a capacidade de carga da estaca e instalar outras se necessário;
- 7- Remover a estaca e adaptar a geometria e o número de hélices por meio de cortes realizados *in loco*;
- 8- Remover a estaca e instalar uma com geometria mais adequada ao solo presente no local.

Para determinação do torque final de projeto, são consideradas correlações empíricas com a capacidade de carga da fundação em estaca helicoidal. Nos casos onde o seu valor não seja atingido na profundidade definida em projeto, as seguintes opções são possíveis (Perko, 2009):

Prosseguir com a instalação, aumentando a profundidade cravada por meio do acréscimo de novas extensões.

- 1- Adicionar extensões com hélices, de maneira a aumentar o torque e, conseqüentemente, a capacidade de carga da estaca;
- 2- Remover a estaca e instalar uma nova com hélices adicionais ou maiores;
- 3- Considerar uma capacidade de carga menor para a estaca e instalar estacas adicionais para completar a resistência necessária prevista em projeto.

Figura 18 – Retirada de obstruções rasas



Fonte: Perko (2009).

4.7 Dimensionamento geotécnico das estacas helicoidais

De uma maneira geral, pode-se dizer que o dimensionamento de uma estaca helicoidal consiste em determinar o número e o diâmetro das hélices e as dimensões da haste para suportar as cargas definidas no projeto, com base nas condições do solo presente no local da instalação. (Perko, 2009)

Segundo Stephenson (1997), existem os seguintes métodos para previsão da capacidade de carga de uma estaca helicoidal: métodos teóricos, semi-empíricos, empíricos e de prova de carga de protótipo.

Os métodos teóricos são embasados nos estudos de mecânica dos solos acerca do comportamento e interação entre a fundação e o solo onde está inserida. São consideradas as características básicas das fundações (deformabilidade e resistência), assim como as características de resistência e compressibilidade do solo. Nesse método, não há distinção entre os equipamentos utilizados para instalação das estacas. (Stephenson, 1997)

Já os métodos semi-empíricos são basicamente os métodos teóricos modificados pela experiência acumulada ao longo do tempo. A modificação nos métodos teóricos é realizada através de fatores de correção obtidos através de ensaios realizados e do desempenho de modelos reais. (Stephenson, 1997)

Devido ao acesso a um grande banco de dados acerca do comportamento das estacas, os métodos empíricos são comumente desenvolvidos e utilizados pelos fabricantes de estacas helicoidais. São baseados em correlações estatísticas entre a capacidade de carga da estaca e alguns parâmetros facilmente identificáveis, como N_{SPT} , torque, entre outros. (Stephenson, 1997)

As provas de carga de protótipos são realizadas testando uma estaca idêntica à estaca que se pretende utilizar, em condições de solo também idênticas. Os resultados dos testes são extrapolados para as demais estacas helicoidais aplicadas no mesmo local. Este método traz uma percepção do real comportamento das estacas em suas condições de utilização. Porém, é necessário que a geometria e o comprimento das estacas sejam determinados à priori, o que faz com que o método não seja tão interessante, pois a realização de diversos ensaios para determinação da geometria ótima pode ser onerosa. Sendo assim, as provas de carga são comumente utilizadas para validar resultados obtidos através dos métodos empíricos e semi-empíricos. (Stephenson, 1997)

De acordo com Perko (2009), quando as metodologias são utilizadas em conjunto, a determinação da capacidade de carga da estaca pode ser realizada com um alto grau de confiança.

4.8 Espaçamento entre hélices

Segundo Perko (2009), o espaçamento ideal entre hélices é aquele onde as hélices trabalham de maneira uniforme, evitando-se uma estaca de seção guia longa com poucas hélices ou o desperdício de hélices, em uma estaca muito curta.

Estudos realizados em 1974, sugerem que a distância máxima entre hélices para formação do cilindro de cisalhamento é de aproximadamente duas vezes o diâmetro da hélice. Em contrapartida, resultados de estudos realizados em 1984 revelaram a formação do cilindro com distâncias de até quatro vezes o diâmetro da hélice. (Kulhawy, 1985 *apud* Carvalho, 2007)

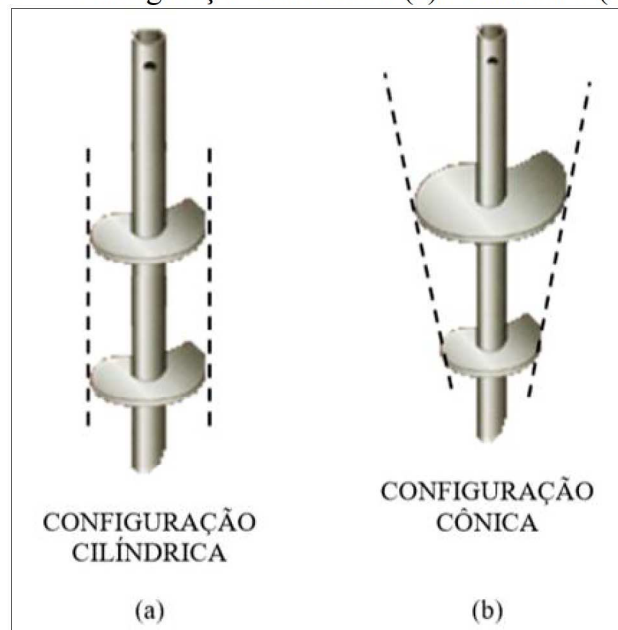
Para diâmetros de haste de 38mm a 89mm na maioria dos tipos de solo, o espaçamento ótimo é comumente considerado de duas a três vezes o diâmetro médio das placas helicoidais (Seider, 2004 *apud* Perko, 2009).

É recomendável que o espaçamento entre hélices seja um valor múltiplo do passo, fazendo com que todas as hélices sigam o mesmo caminho durante a instalação, evitando-se grandes perturbações no solo.

4.9 Configuração e número de hélices

As estacas helicoidais podem ser divididas pela sua configuração de hélices em dois modelos distintos: configuração cilíndrica e cônica, conforme ilustrado pela figura 19. Na configuração cilíndrica as hélices possuem o mesmo tamanho, já na configuração cônica, há um aumento nas dimensões das hélices ao longo da estaca. (Santos, 2013)

Figura 19 – Configuração das hélices (a) cilíndrica e (b) cônica



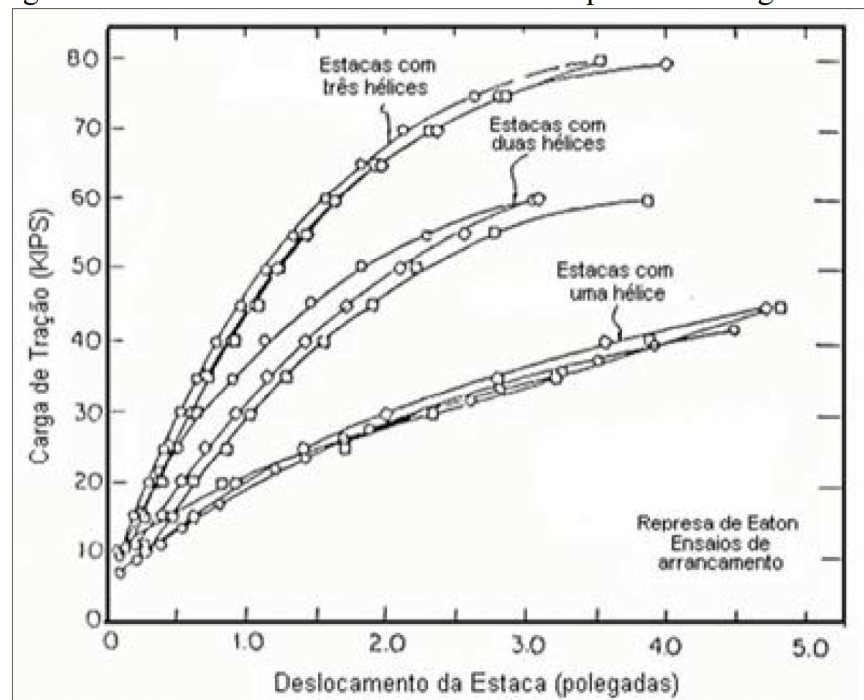
Fonte: Santos (2013).

Estudos realizados em solo arenoso por Lutenegeger, 2011, *apud* Santos, 2013 indicaram que as estacas com configuração cilíndrica de hélices apresentam maior capacidade de carga do que estacas com configuração cônica de hélices. Essa diferença de capacidade de carga pode ser explicada pela perturbação causada no solo durante a instalação da estaca, que não é tão significativa em estacas de configuração cilíndrica. A hélice de maior diâmetro no topo da estaca de configuração cônica pode ter contribuído com a perda de capacidade de carga da estaca. O autor destaca ainda que o fenômeno da instalação é mais complexo do que o concluído através dos resultados das provas de carga, e que são necessários mais ensaios para avaliar melhor o comportamento da estaca.

Estudos realizados por Rao (1989) *apud* Carvalho (2007) indicaram que para um mesmo tipo de solo, a capacidade de carga aumenta com o aumento do número de hélices.

Clemence, 1994, *apud* Santos, 2013 apresenta as curvas de tração x deslocamento, obtidas através de provas de carga realizadas em estacas de uma hélice, duas hélices e três hélices instaladas em solo arenoso (FIGURA 20).

Figura 20 – Curvas tensão x deslocamento de provas de carga



Fonte: Santos (2013).

Os resultados dos ensaios mostram que na estaca simples, de uma hélice, é necessário um deslocamento maior para obtenção da carga máxima, quando comparada às estacas de duas e três hélices. A análise das curvas apresentadas, indica que o número de hélices tem influência sobre a capacidade de carga da estaca helicoidal. (Santos, 2013)

O grande deslocamento apresentado pela estaca de uma hélice poder ser explicado pelo fato de que, na prova de carga, o deslocamento medido na cabeça da estaca é a soma da deformação elástica da haste e do deslocamento da hélice de ponta (todas as hélices de movem juntamente pois estão soldadas na mesma haste, e a da ponta, por estar em solo mais resistente, comanda o movimento). Portanto, quanto mais hélices a estaca tiver, menor será o deslocamento, pois menor será a carga na hélice de ponta. (Lutenegger, 2011, *apud* Santos, 2013)

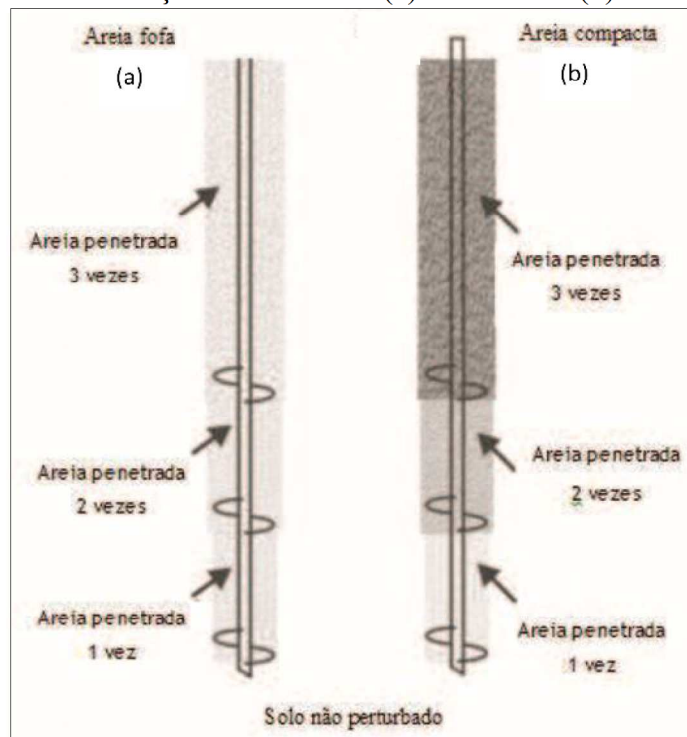
4.10 Influência da instalação da estaca no solo

A instalação da estaca helicoidal modifica o solo atravessado pelas hélices. Durante a instalação da estaca o solo é cisalhado, deslocado lateralmente e verticalmente. Devido a estes efeitos, diversos fatores de redução dos parâmetros de resistência do solo são encontrados na literatura. (Tshua, 2007)

Mediante a realização de ensaios, Tshua (2007) analisou a eficiência das hélices em areias. Os resultados dos estudos demonstraram que a contribuição da hélice inferior (primeira hélice inserida no solo) é mais importante em areias compactas do que em areias fofas. Em estacas instaladas em areias compactas com várias hélices, a diferença de compactidade do solo acima de cada hélice é significativa.

Conforme demonstrado pela figura 21, na areia fofa há uma diferença menor de compactidade no solo entre as hélices. Já para a areia compacta, há uma perturbação maior nos trechos onde a areia foi penetrada mais vezes.

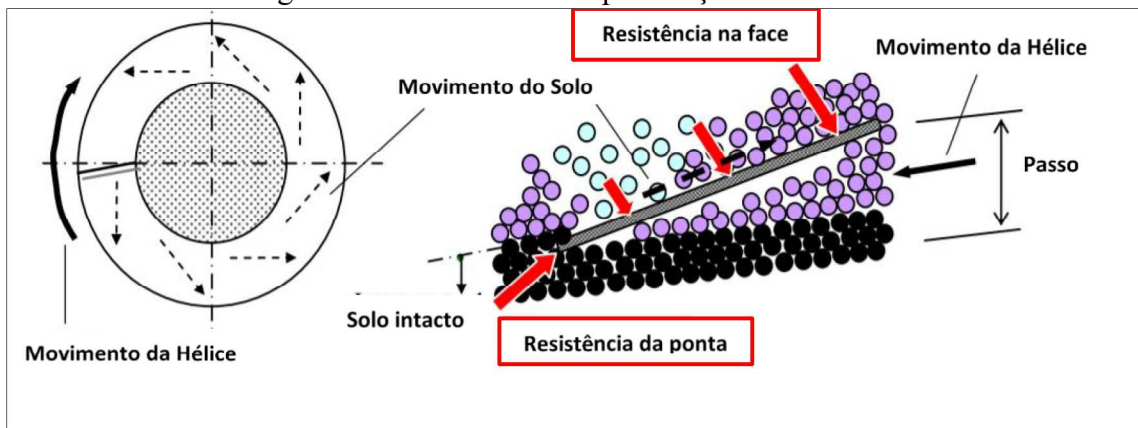
Figura 21 – Efeito da instalação da estaca em (a) areia fofa e (b) areia compacta



Fonte: Tshua (2007).

Para Kanai (2007), durante a instalação da estaca, o solo presente na borda inferior da hélice é movido em direção à borda superior, causando um afogamento do solo sobre a mesma. Acontece também uma redução significativa da tensão confinante do solo nas proximidades da hélice.

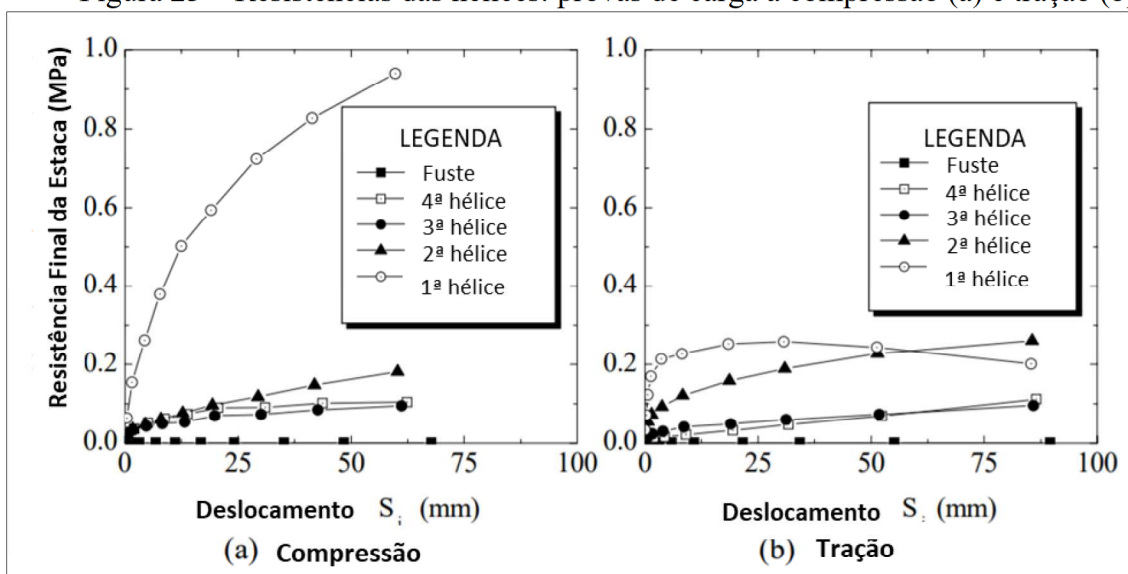
Figura 22 – Mecanismo de penetração da hélice no solo



Fonte: Kanai (2007).

De acordo a resultados de provas de carga à compressão e à tração, Kanai (2007) concluiu que a resistência da hélice inferior (1ª hélice inserida no solo) é mais significativa quando comparada às demais. A explicação para este efeito é dada em virtude do solo acima da primeira hélice ter sido penetrado mais vezes. Observou-se também, que a resistência por atrito devido ao fuste é praticamente nula (FIGURA 23).

Figura 23 – Resistências das hélices: provas de carga à compressão (a) e tração (b)



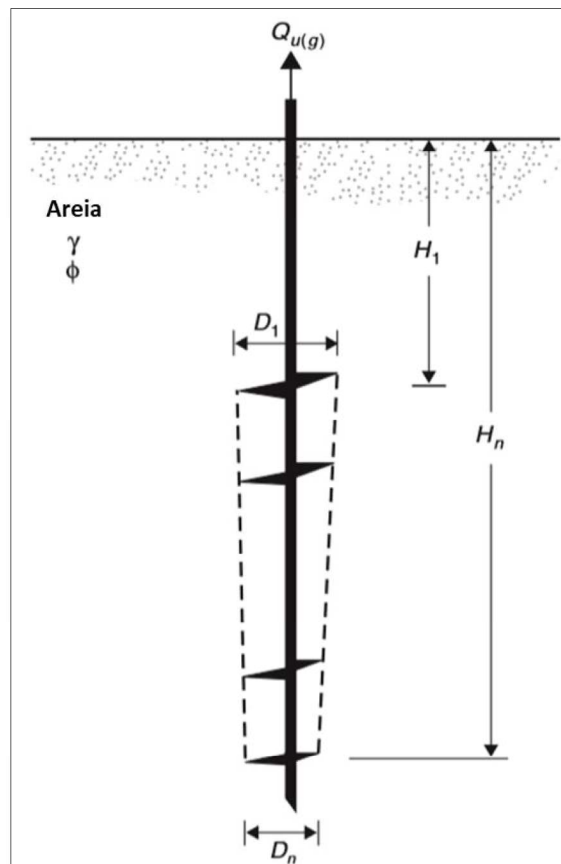
Fonte: Kanai (2007).

Segundo Clemence e Pepe (1984) *apud* Carvalho (2007), o processo de instalação influencia no comportamento da estaca na ruptura. O solo que teve contato direto com as hélices é cisalhado, ocasionando uma superfície cilíndrica de ruptura entre o solo perturbado e o solo ao redor da estaca.

4.11 Estacas profundas e estacas rasas

Segundo Das (1941) as estacas podem ser classificadas como rasas e profundas. O comportamento das estacas está diretamente associado à sua classificação. Estacas rasas são aquelas em que a relação entre a profundidade e o diâmetro da primeira hélice (H_1/D_1) é inferior ao valor crítico (H_1/D_{1cr}). Já as estacas profundas possuem a relação (H_1/D_1) superior ao valor crítico (H_1/D_{1cr}).

Figura 24 – Estaca helicoidal instalada em areia



Fonte: Das (1941).

Para solos arenosos, Das (1941) propõe os valores de H_1/D_{1cr} indicados na tabela 2.

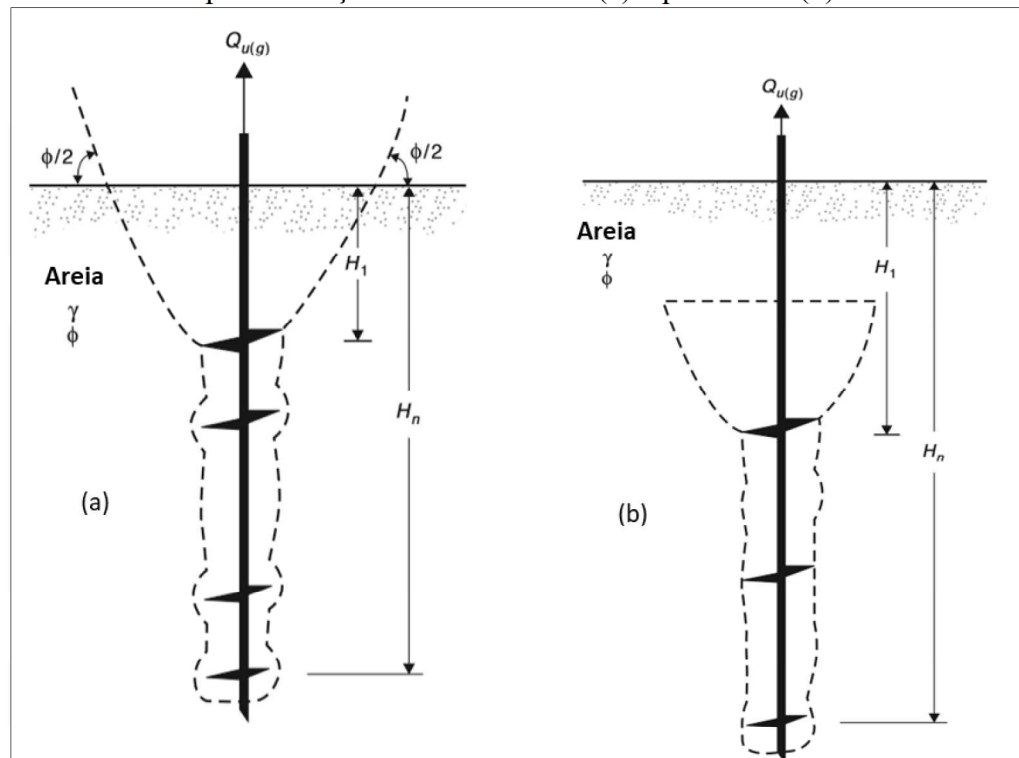
Tabela 2 – Valores de H_1/D_1 cr em função de ϕ

ϕ (°)	$(H_1/D_1)_{cr}$
25	3
30	4
35	5
40	7
45	9
48	11

Fonte: Das (1941).

Os modos de ruptura à tração em solos arenosos para estacas rasas e profundas é dado conforme figura 25.

Figura 25 – Modos de ruptura à tração de estacas rasas (a) e profundas (b) em solo arenoso



Fonte: Das (1941).

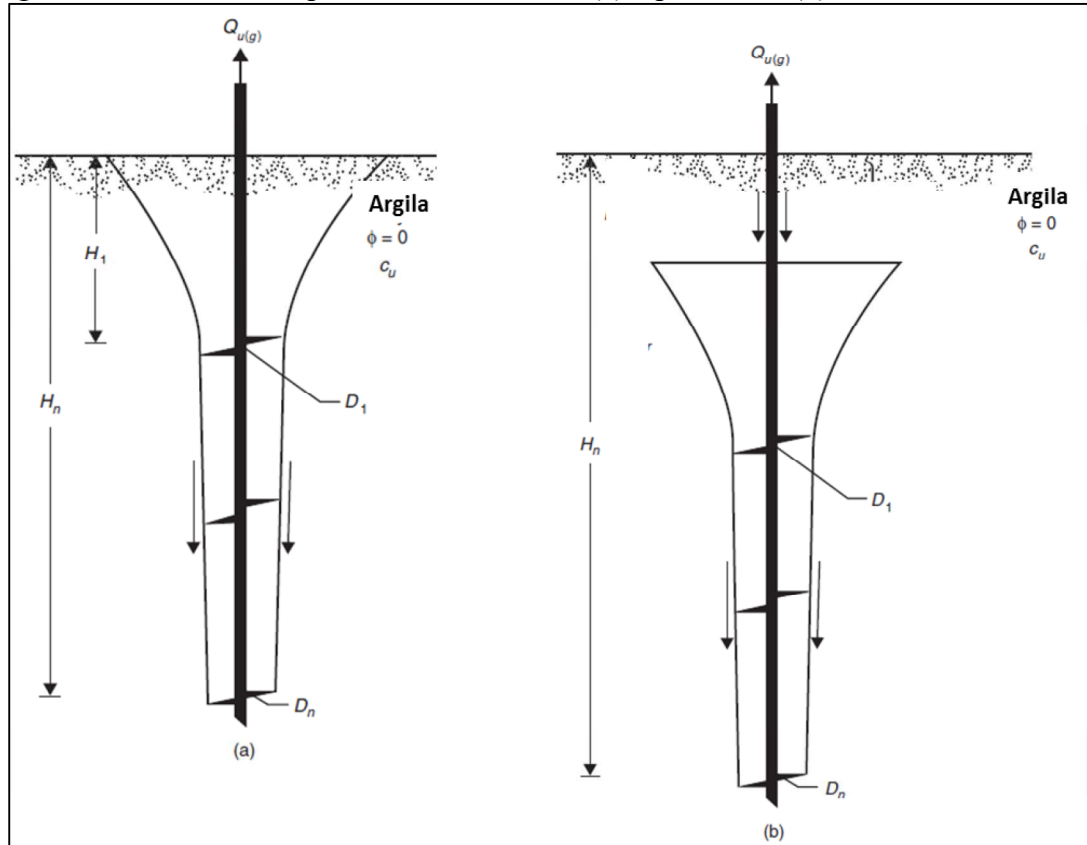
Já para solos coesivos, a relação H_1/D_1 cr pode ser obtida através da equação (1).

$$\left(\frac{H_1}{D_1}\right) = 0,107c_u + 2,5 \leq 7 \quad (1)$$

Onde c_u é a coesão não drenada, expressa em kN/m^2 .

Os modos de ruptura à tração em solos coesivos para estacas rasas e profundas é dado conforme figura 26.

Figura 26 – Modos de ruptura de estacas rasas (a) e profundas (b) em solo coesivo



Fonte: Das (1941).

4.12 Compressão X Tração

Segundo Trofimenkov e Mariupolskii (1965) *apud* Carvalho (2007), a capacidade de carga de estacas helicoidais à compressão é muito maior que à tração. Os fatores determinantes para essa conclusão são: na compressão a carga atua no solo indeformado abaixo da hélice, a densidade do solo aumenta com a profundidade, e a área de influência do fuste à compressão é maior que na tração. Na tração a superfície de ruptura é formada entre a hélice e a superfície do solo, e na compressão a superfície de ruptura é formada abaixo da hélice.

Para mesmo tipo de solo, a capacidade de carga das estacas helicoidais à compressão é da ordem de 1,4 a 1,5 vezes a capacidade carga à tração. (Trofimenkov e Mariupolskii, 1965 *apud* Carvalho, 2007)

Em contrapartida, para estacas com a relação profundidade e diâmetro da hélice muito grande, existem teorias simplificadas que consideram a capacidade de carga à compressão e à tração iguais, como proposto por Adams e Klym (1972).

4.13 Provas de carga

Segundo a ABNT NBR 12131:2006, a prova de carga consiste na aplicação de carregamentos estáticos crescentes à estaca, e no registro dos deslocamentos associados aos carregamentos. Os esforços aplicados podem ser de tração, compressão ou transversais. A partir da realização da prova de carga, é possível estabelecer o comportamento carga x deslocamento da estaca e estimar sua capacidade de carga.

O procedimento de prova de carga consiste em carregar a estaca até a ruptura ou ao menos até duas vezes ao valor previsto para sua carga de trabalho. Este ensaio pode ser realizado com carregamento lento ou rápido. (NBR 12131:2006)

As Recomendações Técnicas para Instalação e Manutenção de Estacas Metálicas Helicoidais (Cigrè, 2018), indicam como referência para o deslocamento máximo de estacas helicoidais submetidas a provas de carga o valor de 50mm.

De acordo com Santos (2013), os critérios normalmente utilizados para interpretação das curvas de carga x deslocamento em estacas helicoidais são os apresentados pela tabela 3.

Tabela 3 – Critérios para interpretação das curvas de carga e deslocamento

AS-2159 (SSA 1995)	50mm em 1,5 vezes a carga última e 30mm no descarregamento. 15mm na carga de serviço
Critério de Davisson (1972)	$\frac{P.L}{A.E} + \frac{D}{120} + 4$ (mm)
FDOT (1999)	$\frac{P.L}{A.E} + \frac{D}{30}$ para D maiores que 61cm
FHWA (Resse e O'Neill, 1988)	5% D
ISSMFE 1985 e BS 8004	10 % D
Zhang (1999)	10 % D_{medio}
NBR 6122/2010	$\frac{P.L}{A.E} + \frac{D}{30}$

Fonte: Santos (2013).

5. PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA

Podem ser citados dois métodos teóricos para determinação da capacidade de carga de estacas helicoidais com base nas teorias da mecânica dos solos: método da “Capacidade de Carga Individual” e método do “Cilindro de Cisalhamento”. (Perko, 2009)

Conforme demonstrado na figura 27, se o espaçamento entre as hélices for muito grande, cada hélice irá atuar de forma independente. A capacidade de carga da estaca é a soma da capacidade individual de cada hélice, constituindo-se assim o método da “Capacidade de Carga Individual”. (Perko, 2009)

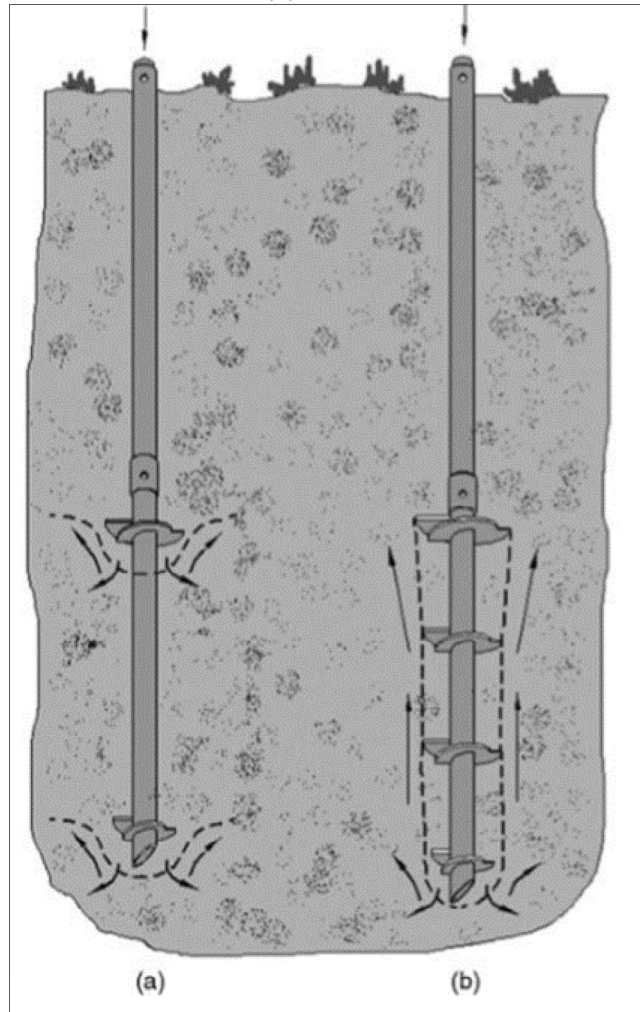
Caso o espaçamento entre hélices seja pequeno, elas atuarão em conjunto, constituindo um cilindro. A capacidade de carga da estaca é a soma da capacidade de carga da hélice superior ou inferior, para esforços de tração e compressão respectivamente, acrescida da resistência do cilindro de cisalhamento formado entre as hélices. (Perko, 2009)

Perko (2009) recomenda que a capacidade de carga da estaca seja calculada por ambos os métodos: Capacidade de carga individual e Cilindro de cisalhamento, e seja tomado como estado limite o menor valor obtido.

Em relação aos métodos empíricos, que se apoiam na experiência, na observação dos fatos, destaca-se o método do torque, largamente empregado para confirmação da capacidade de carga das estacas.

Como sua aplicação é feita mediante a leitura do torque durante a instalação, sua utilização é mais adequada para o controle da obra do que para o dimensionamento. Segundo estudos realizados por Hoyt e Clemence (1989), os resultados obtidos através do método do torque foram mais próximos dos resultados obtidos em provas de carga. (Silva, 2014)

Figura 27 – Modos de ruptura Capacidade de carga individual (a) e Cilindro de cisalhamento (b)



Fonte: Perko (2009).

5.1 Método da capacidade de carga individual

A aplicação deste método é recomendada quando, para estacas multi-hélices, as hélices estão espaçadas o suficiente de modo que trabalhem individualmente. As equações de capacidade de carga são provenientes da teoria de Terzaghi, largamente utilizada para estimar a capacidade de carga em sapatas. (Silva, 2014)

A capacidade de carga total é dada pela soma das capacidades de carga individuais de cada hélice, podendo ser considerado também o atrito entre o fuste da estaca e o solo.

$$Q_u = \sum_n q_{ult} A_i + \alpha H (\pi d) \quad (2)$$

Onde:

Q_u é a capacidade de carga da estaca;

q_{ult} é tensão última da hélice n ;

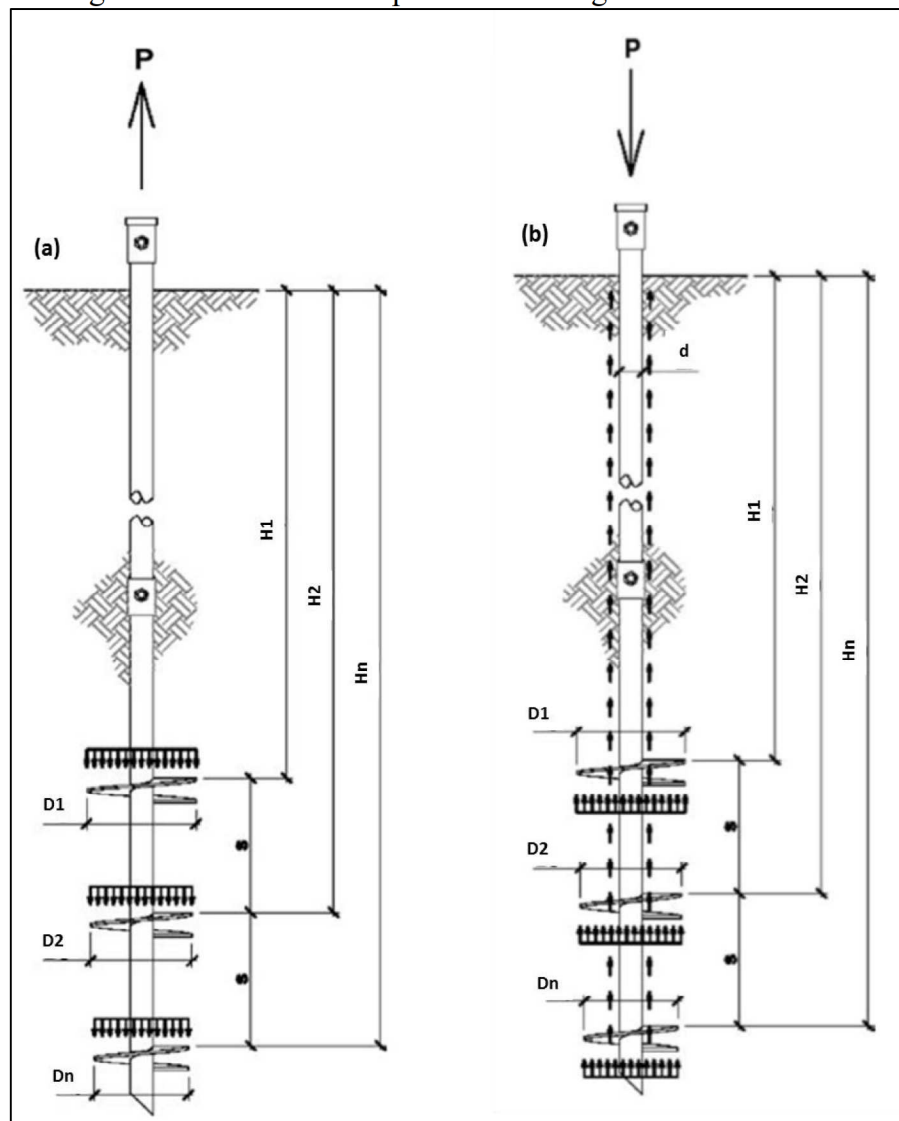
A_i é a área da hélice i ;

α é o atrito entre o solo e o fuste;

H é o comprimento do fuste acima da hélice;

d é o diâmetro do fuste.

Figura 28 – Método da capacidade de carga individual



Fonte: Adaptado de Perko (2009).

Na sequência, estão indicadas algumas das metodologias desenvolvidas por diversos autores para o cálculo das capacidades de carga individuais considerando os dois parâmetros

de resistência do solo: ângulo de atrito e coesão. As demais metodologias, que consideram apenas um dos parâmetros de resistência do solo não serão abordadas nessa pesquisa.

5.1.1 Capacidade de carga à compressão

5.1.1.1 Formulação segundo Perko (2009)

Para Perko (2009), a tensão última de cada hélice pode ser obtida através da seguinte formulação, proposta por Terzaghi:

$$q_{ult} = 1,3c_i N_c + q_i N_q + 0,3\gamma_i B_i N_\gamma \quad (3)$$

Onde:

c_i é a coesão na a profundidade da hélice i ;

q_i é a tensão efetiva do solo sobre a hélice i ;

γ_i é o peso específico do solo sobre a hélice i ;

B_i é a largura da hélice i (igual ao diâmetro da hélice);

N_c, N_q e N_γ são os fatores de capacidade de carga.

Segundo Perko (2009), os fatores de capacidade de carga (N_c, N_q e N_γ) podem ser obtidos através da teoria de Terzaghi para elementos de carga circulares.

Meyerhof (1951) modificou a equação de Terzaghi, incluindo fatores de forma e de profundidade, conforme demonstrado pela equação 4.

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c + qN_q s_q d_q + 0,5\gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (4)$$

Onde:

s_c, s_q e s_γ são os fatores de forma;

d_c, d_q e d_γ são os fatores de profundidade.

Meyerhof (1951) também sugeriu modificações para os fatores de capacidade de carga (N_c, N_q e N_γ).

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi \quad (6)$$

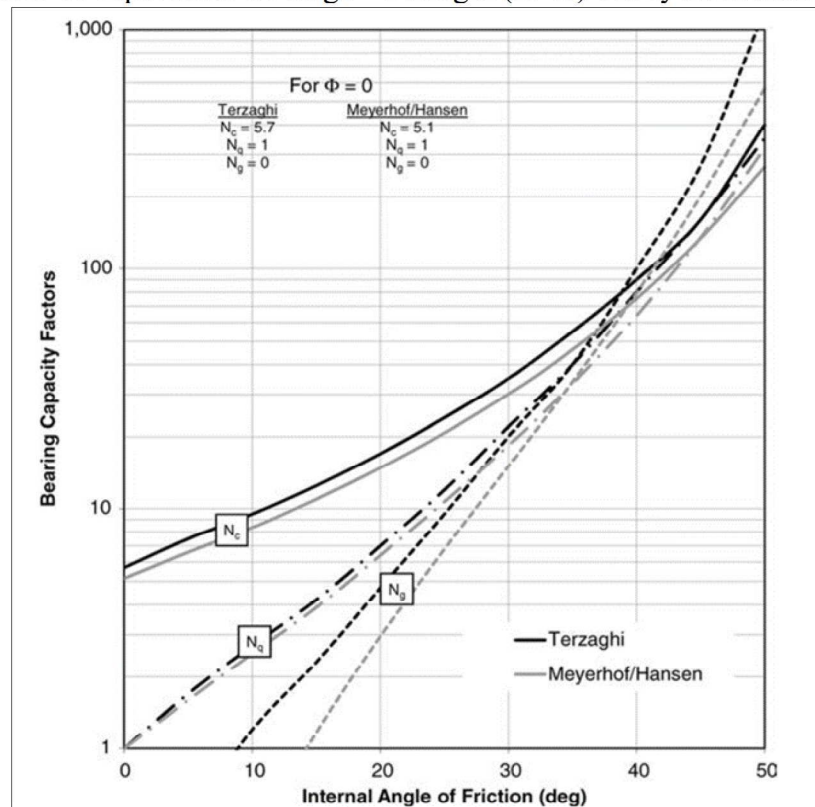
$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1,4\varphi) \quad (7)$$

Onde:

φ é o ângulo de atrito interno do solo.

Como a obtenção matemática destes elementos é tediosa, eles geralmente são dados graficamente, conforme mostrado da figura 29.

Figura 29 – Fatores de capacidade de carga - Terzaghi (1943) e Meyerhof/Hansen (1951)



Fonte: Perko (2009).

Hansen (1970) e Vesic (1973) também contribuíram para a formulação de Terzaghi sugerindo adaptações para os valores dos fatores de forma e de profundidade, conforme demonstrado na sequência. (Perko, 2009)

$$s_c = 1 + \frac{N_q B}{N_c L} \quad (8)$$

$$s_q = 1 + \frac{B}{L} \operatorname{tg} \varphi \quad (9)$$

$$s_\gamma = 1 - 0,4 \frac{B}{L} \quad (10)$$

$$d_c = 1 + 0,4K \quad (11)$$

$$d_q = 1 + 2K \operatorname{tg} \varphi (1 - \operatorname{sen} \varphi)^2 \quad (12)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (13)$$

$$K = \operatorname{arctg} \left(\frac{H}{B} \right) \quad (14)$$

Onde:

L é o comprimento do elemento de fundação (hélice);

K é um parâmetro de escala (obtido em radianos);

φ é o ângulo de atrito interno do solo (em graus).

No caso das estacas helicoidais, podem ser realizadas as seguintes simplificações: como B e L podem ser igualados ao diâmetro da hélice, a relação B/L é igual a 1. De uma maneira geral, a profundidade das hélices (H) é muito maior que o diâmetro (B), portanto a relação H/B fica com um valor elevado, fazendo com que o fator de escala (K) se aproxime de $\pi/2$. (Perko, 2009)

Portanto, a equação da capacidade de carga das hélices pode ser escrita de maneira simplificada, conforme indicado na sequência.

$$q_{ult} = cN'_c + q (N'_q - 1) + 0,5\gamma DN'_\gamma \quad (15)$$

Onde:

$$N'_c = N_c s_c d_c \quad (16)$$

$$N'_q = N_q s_q d_q \quad (17)$$

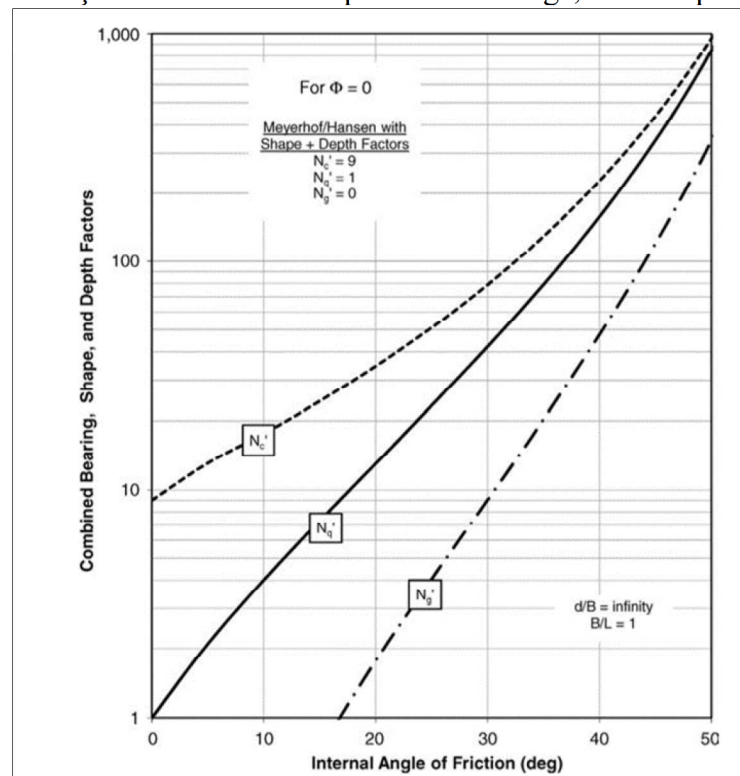
$$N'_\gamma = N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (18)$$

Conforme $N_c, s_c, d_c, N_q, s_q, d_q, N_\gamma, s_\gamma$ e d_γ definidos anteriormente.

Para solos coesivos ($\varphi=0$), após estudos teóricos e experimentais, Skempton (1951) recomenda a utilização do fator $N_c=9,0$ para fundações profundas ($H/D>5$). (Perko, 2009)

Os valores dos fatores de capacidade de carga para a combinação dos fatores de forma, profundidade e capacidade de carga podem ser obtidos na figura 30.

Figura 30 – Combinação dos fatores de capacidade de carga, forma e profundidade



Fonte: Perko (2009).

Alternativamente, Perko (2009) sugere as seguintes expressões para obtenção da capacidade de carga última das hélices:

$$q_{ult} = 11\lambda_{SPT}N_{70} \text{ (solos finos)} \quad (19)$$

$$q_{ult} = 12\lambda_{SPT}N_{70} \text{ (solos granulares)} \quad (20)$$

Onde:

λ_{SP_T} constante igual a 6,2 kPa/golpe/30 cm;

N_{70} é o valor de NSPT referente a uma eficiência de 70% (eficiência dos equipamentos modernos, segundo Perko (2009)).

5.1.1.2 Formulação segundo Stephenson (1997)

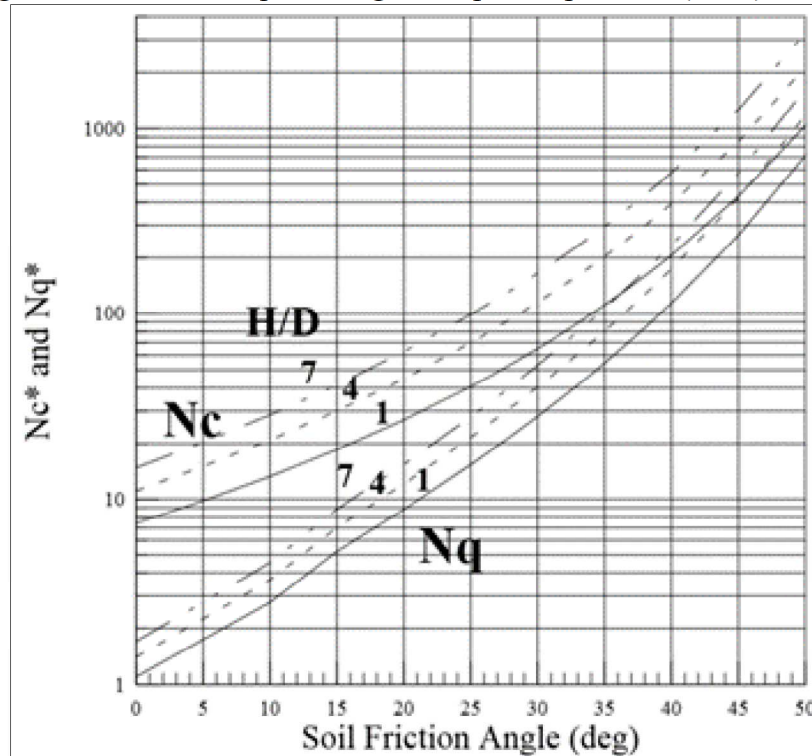
De acordo a Stephenson (1997), a tensão última de cada hélice é dada pela equação (21).

$$q_{ult} = c_i N'_c + q_i (N'_q - 1) \quad (21)$$

Conforme c_i , q_i , N'_c e N'_q definidos anteriormente.

Os valores de N'_c e N'_q podem sofrer pequenas variações de acordo a teoria adotada, mas em geral são tomados conforme a figura 31. (Stephenson, 1997)

Figura 31 – Fatores N_q e N_c sugeridos por Stephenson (1997)



Fonte: Stephenson (1997).

5.1.1.3 Formulação segundo Adams e Klym (1972)

A tensão última de cada hélice, segundo Adams e Klym, 1972, *apud* Carvalho, 2007, é dada pelas seguintes expressões:

$$q_{ult} = q_i N_q \text{ (solos arenosos)} \quad (22)$$

$$q_{ult} = N_c c_i + A_{ps} \alpha c_i \text{ (solos coesivos)} \quad (23)$$

Onde:

A_{ps} é a área perimetral do fuste da estaca;

α é o coeficiente de adesão do solo ao fuste, obtido através da tabela 4;

q_i , c_i , N_q , e N_c conforme definido anteriormente.

Segundo Carvalho (2007), Adams e Klym utilizam uma teoria simplificada para obtenção da capacidade de carga em estacas profundas.

Adams e Klym, 1972, *apud* Carvalho, 2007, recomendam a utilização do fator $N_c = 9,0$. O fator N_q pode ser obtido através da equação 5.

Tabela 4 – Valores do coeficiente de adesão em função da consistência da argila

α	Consistência
0,3	rijas
0,9	moles

Fonte: Carvalho (2007).

Para aplicação desta formulação, admite-se que as hélices têm comportamento independente, ou seja, possuem um espaçamento de pelo menos duas vezes o diâmetro da hélice. (Carvalho, 2007)

5.1.2 Capacidade de carga à tração

5.1.2.1 Formulação segundo Perko (2009)

Para Perko (2009), a capacidade de carga individual à tração pode ser obtida através da mesma formulação aplicada para estacas submetidas a esforços de compressão.

5.1.2.2 Formulação segundo Stephenson (1997)

Para Stephenson (1997), a resistência de cada hélice pode ser obtida através da equação (24).

$$q_{ult} = c_i N_c + \frac{1}{2} D_i \gamma_i N_\gamma + \gamma_i H_i N_q \quad (24)$$

Onde:

D_i é o diâmetro da hélice i ;

H_i é a profundidade da hélice i ;

γ_i , c_i , N_c , N_γ e N_q conforme definido anteriormente.

Stephenson recomenda a utilização dos seguintes valores para os fatores de capacidade de carga:

Solos coesivos:

$$H_1/D_1 > 3 \rightarrow N_c = 9,0; N_\gamma = 0; N_q = 1,0 \quad (25)$$

$$H_1/D_1 \leq 3 \rightarrow N_c = 5,7; N_\gamma = 0; N_q = 1,0 \quad (26)$$

Onde:

H_1 é a profundidade da primeira hélice;

D_1 é o diâmetro da primeira hélice.

Solos não coesivos:

N_γ e N_q variam em função do ângulo de atrito interno do solo (φ) e podem ser obtidos através das equações (5), (6) e (7).

5.1.2.3 Formulação segundo Adams e Klym (1972)

Segundo Carvalho (2007), Adams e Klym (1972) sugerem que a capacidade de carga individual à tração pode ser obtida através da mesma formulação aplicada para estacas submetidas a esforços de compressão.

5.1.2.4 Formulação segundo A.B. Chance (2014)

Segundo o manual da A.B.Chance (2014), para estacas com espaçamento entre hélices (s) igual ou superior a 3 diâmetros (D), a formulação da capacidade de carga individual é aplicável ($s/D \geq 3,0$).

A equação que descreve a capacidade de tensão última da hélice segundo a A.B. Chance (2014) está apresentada na sequência.

$$q_{ult} = c_i N_c + q_i N_q \quad (27)$$

Onde q_i , c_i e N_c conforme definido anteriormente;

O valor de N_q pode ser obtido através da seguinte equação:

$$N_q = 0,5(12\varphi_i)^{\varphi_i/54} \quad (28)$$

Onde:

φ_i é o ângulo de atrito interno do solo na hélice i.

A A.B. Chance (2014) propõe a utilização do valor de 5 vezes o diâmetro da hélice superior, como separação entre o modo de ruptura de estacas rasas e profundas.

Nos casos onde $H1/D1 \geq 5$ (estacas profundas), é recomendada a utilização do fator de carga devido a coesão (N_c) igual a 9,0.

5.1.2.5 Formulação segundo Earth Contact, 2003 *apud* Stephenson, 1997

Segundo Stephenson (1997), para a empresa Earth Contact Products a tensão última de cada hélice pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$q_{ult} = c_i N_c + q_i N_q \quad (29)$$

Onde q_i e c_i conforme definido anteriormente.

Já os valores de N_c e N_q devem ser obtidos através da tabela 5, onde estão apresentados os valores recomendados pela Earth Contact Products, 2003 *apud* Stephenson, 1997.

Tabela 5 – Valores de N_q e N_c recomendados pela Earth Contact Products

ϕ	N_c	N_q	ϕ	N_c	N_q
0	9	1	30	34	17
5	9	1	32	41	22
10	9	2	34	50	28
15	10	3	36	63	37
20	15	5	38	79	49
25	22	9	40	101	66
26	24	10	45	203	149
28	28	13	50	468	391

Fonte: Stephenson (1997).

5.1.2.6 Formulação segundo Rao, Prasad e Veeresh, 1993 *apud* Carvalho, 2007

Segundo Rao, Prasad e Veeresh, 1993, *apud* Carvalho (2007), a estaca é considerada como série de hélices distribuídas ao longo da profundidade instalada. A aplicação deste método é recomendada nos casos onde a relação entre a distância entre hélices (s) é o diâmetro médio das hélices (D_m) seja maior que dois ($s/D_m > 2$).

$$q_{ult} = c_i N_c + q_i \quad (30)$$

q_i , c_i e N_c conforme definido anteriormente.

É permitida a consideração da resistência de atrito entre o fuste da estaca e o solo nos casos onde o comprimento do fuste acima da primeira hélice esteja entre 1,5 a 2,5 vezes o diâmetro da hélice superior.

5.2 Método do cilindro de cisalhamento

Segundo Carvalho (2007), o método do cilindro de cisalhamento presume a mobilização do volume de solo localizado entre as hélices. Na ruptura, é formado uma superfície cilíndrica entre o solo e as hélices. A capacidade de carga é obtida através da soma da resistência da hélice superior (fundação tracionada) ou inferior (fundação comprimida), com a resistência do cilindro de cisalhamento.

A equação (31) é utilizada para o cálculo da capacidade de carga segundo a metodologia do cilindro de cisalhamento.

$$Q_u = Q_p + Q_f + Q_s \quad (31)$$

Onde:

Q_u é a capacidade de carga da estaca;

Q_p é a resistência da hélice superior ou inferior;

Q_f é a resistência devido ao cilindro de cisalhamento;

Q_s é a resistência devido ao fuste;

A equação acima pode ser reescrita conforme os parâmetros de resistência do solo: ângulo de atrito e coesão:

$$Q_u = \underbrace{Q_{ps} + Q_{pc}}_{Q_p} + \underbrace{Q_{fs} + Q_{fc}}_{Q_f} + \underbrace{Q_{ss} + Q_{sc}}_{Q_s} \quad (32)$$

Onde:

Q_{ps} e Q_{pc} representam a resistência da hélice superior ou inferior devido ao ângulo de atrito e à coesão, respectivamente;

Q_{fs} e Q_{fc} representam a resistência do cilindro de cisalhamento devido ao ângulo de atrito e à coesão, respectivamente;

Q_{ss} e Q_{sc} representam a resistência do fuste devido ao ângulo de atrito e à coesão, respectivamente.

Na sequência, estão indicadas algumas das metodologias desenvolvidas por diversos autores para o cálculo do cilindro de cisalhamento considerando os dois parâmetros de resistência do solo: ângulo de atrito e coesão.

5.2.1 Capacidade de carga à compressão

5.2.1.1 Formulação segundo Perko (2009)

Perko (2009) propõe a seguinte formulação para o cálculo da resistência da estaca segundo a metodologia do cilindro de cisalhamento:

$$Q_u = A_n \left(\underbrace{1,3c_n N_c}_{Q_{pc}} + \underbrace{q_n N_q}_{Q_{ps}} \right) + A_{pha} \left(\underbrace{c_f}_{Q_{fc}} + \underbrace{K_u q_1 \operatorname{tg} \varphi_f}_{Q_{fs}} \right) \quad (33)$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{Q_p} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{Q_f}$$

Onde:

q_n é a tensão efetiva sobre a última hélice;

A_{pha} é a área perimetral do cilindro de cisalhamento;

c_f é a coesão atuando no cilindro de solo formado entre as hélices;

φ_f é o ângulo de atrito interno do solo entre as hélices;

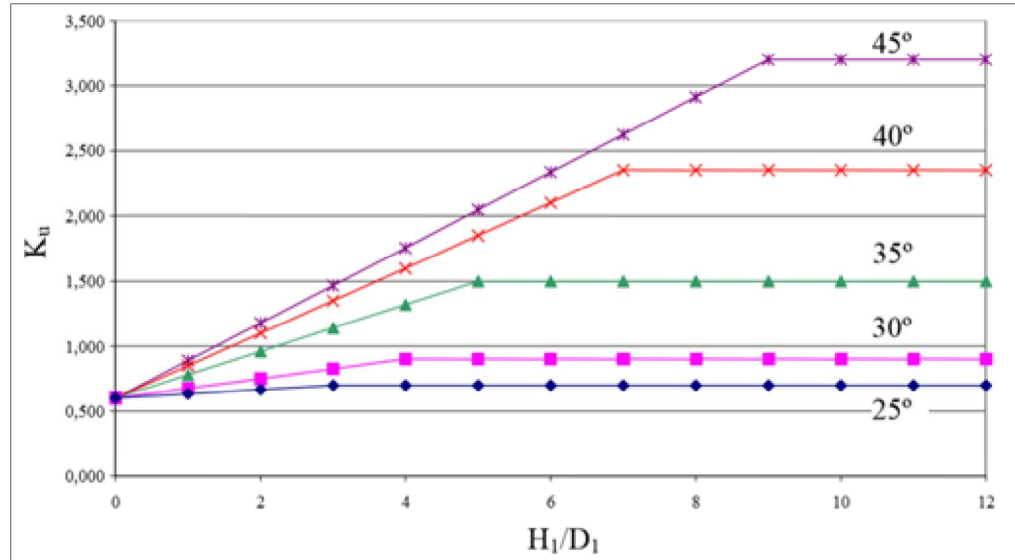
c_n é a coesão até a última hélice;

A_n é a área da última hélice.

Os valores dos fatores de capacidade de carga devido à coesão e sobrecarga, N_c e N_q , podem ser obtidos através das formulações e gráficos indicados no item 5.1.1.1 deste trabalho.

K_u é o coeficiente de empuxo lateral do solo e, segundo Das (1941) pode ser obtido através da figura 32.

Figura 32 – Valores de K_u recomendados por Das (1990)



Fonte: Carvalho (2007).

5.2.1.2 Formulação segundo Stephenson (1997)

Para Stephenson (1997) a resistência da hélice inferior é dada pela equação (34) e a resistência do cilindro de cisalhamento pela equação (35).

$$Q_p = A_n \left(c_n N_c + \frac{1}{2} D_n \gamma_n N_\gamma + q_n N_q \right) \quad (34)$$

$$Q_f = (c_f A_{pha}) + \left[\frac{\pi}{2} D_a \gamma_f (H_n^2 - H_1^2) K_u \operatorname{tg} \varphi_f \right] \quad (35)$$

Onde:

D_n é o diâmetro da hélice inferior;

D_a é o diâmetro médio das hélices;

γ_n é o peso específico do solo até a profundidade da hélice inferior;

γ_f é o peso específico do solo entre as hélices;

H_n é a profundidade da hélice inferior;

$H_1, A_n, c_n, N_c, N_\gamma, q_n, N_q, c_f, A_{pha}, K_u$ e φ_f conforme definido anteriormente.

Os valores dos fatores de capacidade de carga N_c , N_γ e N_q podem ser obtidos conforme indicado no item 5.1.2.2 deste trabalho.

Portanto, a expressão que representa a capacidade de carga da estaca, segundo Stephenson (1997) é conforme indicado na sequência:

$$Q_u = A_n \left(c_n N_c + \frac{1}{2} D_n \gamma_n N_\gamma + q_n N_q \right) + (c_f A_{pha}) + \left[\frac{\pi}{2} D_a \gamma_f (H_n^2 - H_1^2) K_u \operatorname{tg} \varphi_f \right] \quad (36)$$

5.2.1.3 Formulação segundo Rao, Preasad e Shetty, 1993 *apud* Carvalho, 2007

Rao, Prasad e Shetty, 1993, *apud* Carvalho 2007, propõem que o cálculo da capacidade de carga da estaca seja realizado considerando bulbos alargados. As parcelas de resistência da hélice inferior, do cilindro de cisalhamento e do fuste são conforme apresentadas nas equações (37), (38) e (39).

$$Q_{pc} = A_n N_c c_n \quad (37)$$

$$Q_{fc} = A_{pha} c_f \quad (38)$$

$$Q_{sc} = C_a A_{ps} \quad (39)$$

$A_n, N_c, c_n, A_{pha}, c_f, c_a$ e A_{ps} conforme definido anteriormente.

Portanto, a expressão para previsão da capacidade de carga da estaca pode ser escrita como:

$$Q_u = A_n N_c c_n + A_{pha} c_f + C_a A_{ps} \quad (40)$$

C_a é a adesão do solo ao fuste, obtida através da equação (41).

$$C_a = \alpha c_i \quad (41)$$

Conforme c_i e α definidos anteriormente.

5.2.2 Capacidade de carga à tração

5.2.2.1 Formulação segundo Perko (2009)

Para Perko (2009), a capacidade de carga segundo a metodologia do cilindro de cisalhamento à tração pode ser obtida através da mesma formulação aplicada para estacas submetidas a esforços de compressão. Para a aplicação da mesma formulação, é necessário substituir a capacidade de carga da última hélice pela capacidade de carga da primeira hélice, resultando na seguinte expressão:

$$Q_u = A_1 \left(\underbrace{1,3c_1 N_c}_{Q_{pc}} + \underbrace{q_1 N_q}_{Q_{ps}} \right) + A_{pha} \left(\underbrace{c_f}_{Q_{fc}} + \underbrace{k_u q_1 \operatorname{tg} \varphi_f}_{Q_{fs}} \right) \quad (42)$$

Onde: Q_p Q_f

q_1 é a tensão efetiva sobre a primeira hélice;

A_1 é a área da primeira hélice;

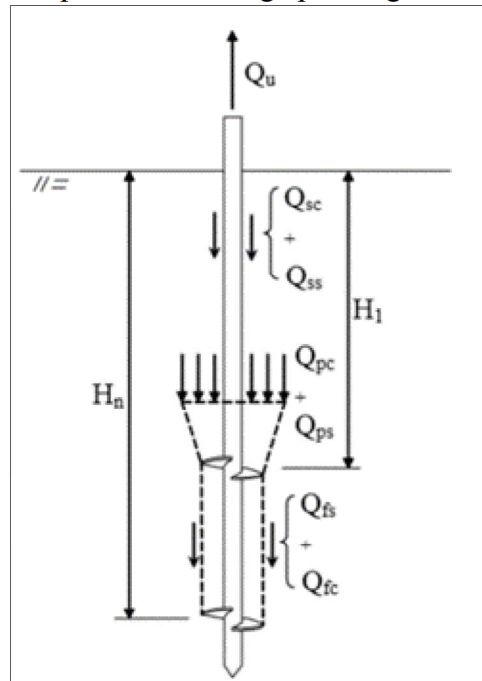
c_1 é a coesão atuante na primeira hélice;

$N_c, N_q, A_{pha}, c_f, k_u$ e φ_f conforme definido anteriormente.

5.2.2.2 Formulação segundo Mooney, Adamczak e Clemence, 1985 *apud* Carvalho, 2007

Mooney, Adamczak e Clemence, 1985, *apud* Carvalho 2007, propõem que a capacidade de carga para siltes seja tomada de acordo ao realizado para argilas, porém com a consideração de uma parcela relativa ao ângulo de atrito, conforme proposto por Mitsch e Clemence (1985).

Figura 33 – Capacidade de carga para argilas e siltes



Fonte: Carvalho (2007).

Segundo Mitsch e Clemence, 1985, *apud* Carvalho 2007, a capacidade de carga devida ao ângulo de atrito interno do solo pode ser calculada conforme descrito na sequência.

Para estacas rasas H_1/D_1 menor do que 5, o cálculo da resistência da hélice superior devido ao ângulo de atrito (Q_{ps}) pode ser realizado através da equação (43).

$$Q_{ps} = \pi \gamma_1 K_u \operatorname{tg} \varphi_1 \cos^2 \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) \left(\frac{D_1 H_1^2}{2} + \frac{H_1^3 \operatorname{tg}(\varphi_1/2)}{3} \right) + W_s \quad (43)$$

Onde:

γ_1 é o peso específico do solo sobre a primeira hélice;

K_u, φ_1, D_1 e H_1 conforme definido anteriormente;

W_s é o peso do solo na zona de ruptura e é calculado conforme proposto de Das (1990) através da equação (44).

$$W_s = \gamma_1 \left\{ \frac{\pi}{3} H_1 \left[(D_1^2) + \left(D_1 + 2H_1 \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right)^2 + D_1 \left(D_1 + 2H_1 \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right] \right\} \quad (44)$$

Onde γ_1, φ_1, D_1 e H_1 conforme definido anteriormente.

De acordo com Das (1941), a magnitude do valor da capacidade de carga da primeira hélice pode ser escrita de forma adimensional, conforme equação (45).

$$F_q = \frac{Q_{ps}}{\gamma_1 A_1 H_1} \quad (45)$$

Onde:

F_q é o fator adimensional que expressa a magnitude da capacidade de carga da primeira hélice;

Q_{ps}, γ_1, A_1 e H_1 conforme definido anteriormente.

Para estacas profundas, onde a relação H_1/D_1 é maior do que 5, o cálculo da resistência da hélice superior devido ao ângulo de atrito (Q_{ps}) pode ser calculado através da equação (45), utilizando os valores de K_u recomendados por Das (1941).

A resistência devida ao atrito em areias atuando no cilindro de solo formado entre as hélices (Q_{fs}) pode ser expressa pela equação (46).

$$Q_{fs} = \frac{\pi}{2} D_a \gamma_f (H_n^2 - H_1^2) K_u \operatorname{tg} \varphi_f \quad (46)$$

$D_a, \gamma_f, H_n, H_1, K_u$ e φ_f conforme definido anteriormente.

Segundo Carvalho (2007), em estacas profundas a resistência devida ao atrito lateral do fuste (Q_{ss}) com o solo pode ser significativa, já para estacas rasas, esta parcela é desconsiderada.

$$Q_{ss} = A_{ps} \left(\frac{q_1}{2} \right) K_u \operatorname{tg} \varphi_1 \quad (47)$$

A_{ps}, q_1, K_u e φ_1 conforme definido anteriormente.

Segundo Mooney, Adamczak e Clemence, 1985, *apud* Carvalho 2007, a resistência da primeira hélice devida à coesão em argilas (Q_{pc}) pode ser calculada conforme a equação (48).

$$Q_{pc} = A_1 c_1 N_c \quad (48)$$

A_1 e c_1 conforme definido anteriormente.

O valor de N_c recomendado para $H1/D1 > 5$ é em média 9,4.

Já a resistência devida à coesão que atua no cilindro formado entre as hélices (Q_{fc}) é obtida através da seguinte expressão:

$$Q_{fc} = c_f A_{pha} \quad (49)$$

c_f e A_{pha} conforme definido anteriormente.

A resistência devida à adesão do solo ao fuste da estaca (Q_{sc}) pode ser obtida através da equação (50).

$$Q_{sc} = A_{ps} C_a \quad (50)$$

C_a e A_{ps} conforme definido anteriormente.

A formulação proposta por Mooney, Adamczak e Clemence, 1985 *apud* Carvalho, 2007, fica conforme indicado na sequência.

$$Q_u = Q_{ps} + Q_{pc} + Q_{fs} + Q_{fc} + Q_{ss} + Q_{sc} \quad (51)$$

5.3 Método do torque

A grandeza física associada ao movimento de rotação de um determinado corpo em razão da ação de um binário de forças é denominada torque.

Segundo Carvalho (2007), existe também o método que correlaciona o torque de instalação com fatores empíricos para determinação da capacidade de carga da estaca, do sistema estaca-solo. Os fatores empíricos são obtidos através de relações estatísticas e são válidos tanto para solos arenosos quanto para solos argilosos.

A expressão que correlaciona o torque com a capacidade de carga é conforme a equação (52).

$$Q_u = k_t T \quad (52)$$

Onde:

k_t é o valor do fator empírico que correlaciona o torque e a capacidade de carga da estaca;

T é o torque de instalação.

Segundo Wilson, 1950, *apud* Tshua, 2007, a correlação indicada pela equação (52) foi largamente difundida no mercado por uma empresa que fabrica e instala estacas helicoidais, a A.B. Chance.

De acordo a Hoyt e Clemence, 1989, *apud* Carvalho, 2007, os valores do fator de torque podem ser obtidos da tabela 6. Para os autores, apesar do método do torque ter sido desenvolvido empiricamente, sem muitos esclarecimentos teóricos, a correlação entre o torque e a capacidade de carga tem sido utilizada com sucesso na construção de milhares de estacas durante as últimas décadas.

Tabela 6 – Valores de k_t em função do diâmetro do fuste

Diâmetro do fuste	k_t
< 89 mm	33 m ⁻¹
89 mm	23 m ⁻¹
219 mm	9,8 m ⁻¹

Fonte: Carvalho (2007).

Perko (2009) recomenda os valores para o fator empírico K_t apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Valores de k_t em função do diâmetro do fuste

Diâmetro do fuste	k_t
76 mm	23 m ⁻¹
64 mm	30 m ⁻¹

Fonte: Perko (2009).

Os valores para o coeficiente k_t indicados acima, foram obtidos através de ensaios de prova de carga realizados pelos autores. De uma maneira geral, os fabricantes de estaca helicoidal, devido à experiência e ao banco de dados dos resultados de ensaios, fornecem os valores de k_t para as estacas que comercializam. Em muitos casos, o fabricante também realiza o dimensionamento da estaca, a instalação e a validação através dos ensaios de rotina.

Segundo estudos realizados por Tshua (2007), para areias há uma grande influência da compactação da areia no fator de torque. Nos resultados de ensaios obtidos pela autora, a capacidade de carga e o torque de instalação aumentam com o acréscimo de número e das dimensões das hélices.

Tshua e Aoki (2007), através de resultados de ensaios, afirmam que a magnitude de k_t decresce com o acréscimo das dimensões da haste da estaca e do ângulo de atrito do solo arenoso.

Segundo Silva (2014) foram desenvolvidas outras expressões analíticas, com base em modelos teóricos para correlacionar o torque com a capacidade de carga da estaca: Tshua (2007), Ghaly e Hanna (1991), Perko (2009), Rao (1989), porém, estas teorias não serão abordadas nesse trabalho.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de comparar os resultados obtidos através das metodologias de previsão de capacidade de carga (capacidades individuais, cilindro de cisalhamento e método do torque) com os resultados obtidos através de provas de carga realizadas em campo, foram utilizados os materiais relacionados na sequência.

6.1 Contextualização das informações

As informações de ensaio que serão apresentadas nesta pesquisa foram fornecidas pela empresa Torcisão Comercial e Industrial de Aços Ltda, e são referentes a um dos empreendimentos em que a empresa forneceu estacas helicoidais, localizado no estado de Minas Gerais.

Foram fornecidas pela Torcisão as informações relativas ao solo (sondagem SPT), informações referentes à configuração da estaca helicoidal aplicada e relativas à prova de carga realizada na estaca logo após sua instalação.

6.2 Caracterização do solo

De maneira a entender as características do solo onde foi instalada a estaca helicoidal, será tomado como referência o ensaio SPT (Standard Penetration Test).

A sondagem SPT em estudo, foi realizada até a profundidade de 16,45m e não apresentou nível d'água. O solo foi classificado como areia siltosa até aproximadamente o quinto metro de ensaio, e como silte arenoso nos demais metros.

Nos cinco primeiros metros de ensaio o solo se mostrou muito fraco ($N_{SPT} \leq 2$) e nos demais metros o solo apresentou resistência mediana (N_{SPT} entre 4 e 13).

Um resumo do ensaio SPT realizado pode ser visualizado na tabela 8. O relatório completo do ensaio pode ser obtido no Anexo A deste trabalho.

Tabela 8 – Ensaio SPT

PROFUNDIDADE (m)	NSPT	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
1	2/34	Areia siltosa fina
2	2	
3	2/32	
4	2	
5	2	
6	4	Silte arenoso fino
7	4	
8	6	
9	6/33	
10	7	Silte arenoso pouco argiloso fino
11	7	
12	10	
13	7/31	
14	8	Silte pouco arenoso
15	11	
16	13/31	

Fonte: Adaptado de Torcisão (2018).

Devido à ausência de ensaios específicos, os parâmetros de resistência do solo e o peso específico serão obtidos através das correlações com o ensaio SPT, conforme formulações e tabelas indicadas na sequência.

Para obtenção da coesão (não drenada) em função do ensaio SPT, Godoy e Teixeira (1996) propõem a equação (53).

$$c_u = N_{SPT} \quad (53)$$

Onde:

c_u é a coesão não drenada do solo (tf/m²);

N_{SPT} é a resistência à penetração obtida no ensaio SPT.

Para obtenção do ângulo de atrito interno do solo será utilizada a formulação proposta por Teixeira (1996).

$$\varphi = \sqrt{20N_{SPT}} + 15 \quad (54)$$

Onde:

φ é o ângulo de atrito interno do solo (°);

N_{SPT} é a resistência à penetração obtida no ensaio SPT.

O peso específico de solos argilosos e arenosos respectivamente, podem ser obtidos através das tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Peso específico de solos argilosos

N (golpes)	Consistência	Peso específico (KN/m³)
≤ 2	Muito mole	13
3 - 5	Mole	15
6 - 10	Média	17
11 - 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Godoy (1972).

Tabela 10 – Peso específico de solos arenosos

N (golpes)	Consistência	Peso específico (KN/m³)		
		Areia seca	Úmida	Saturada
< 5	Fofa			
5 - 8	Pouco compacta	16	18	19
9 - 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta			
> 40	Muito compacta	18	20	21

Fonte: Godoy (1972).

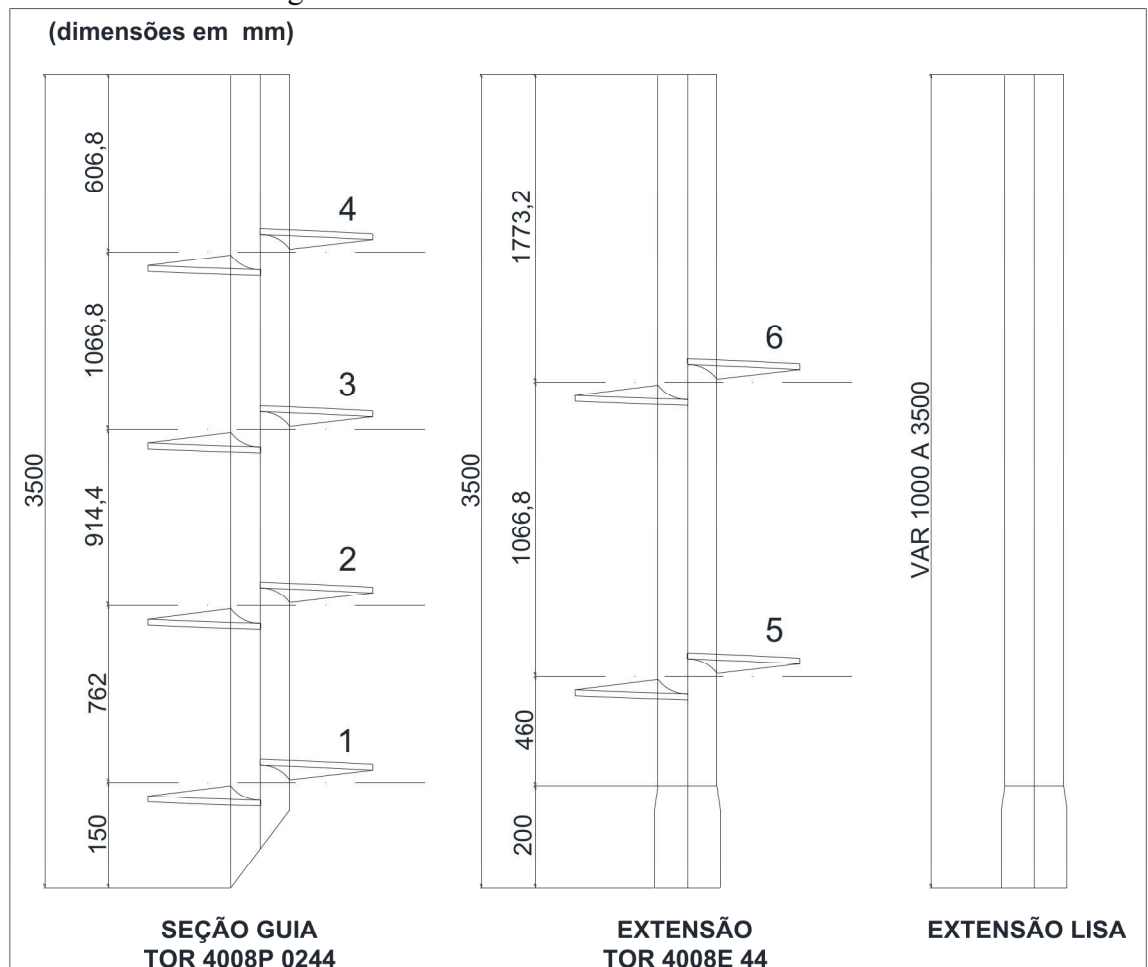
6.3 Caracterização da estaca

A estaca para qual serão realizados os estudos é pertencente ao catálogo da empresa Torcisão, possui comprimento total de 18,0m e suas principais características estão indicadas na sequência.

A estaca é composta por uma seção guia do modelo TOR 4008P 0244 com 3,5m de comprimento, por uma extensão com hélices do tipo TOR 4008E 44 também com 3,5m de comprimento, e por extensões lisas complementares.

Na sequência, de maneira a facilitar o entendimento, a figura 34 apresenta um croqui ilustrativo da estaca helicoidal em estudo.

Figura 34 – Estaca helicoidal em estudo



Fonte: Adaptado de Torcisão (2018).

Os diâmetros e o passo das hélices podem ser obtidos através da tabela 11.

Tabela 11 – Diâmetro e passo das hélices

HÉLICE	DIÂMETRO		PASSO (mm)
	in	mm	
1	10"	254	95
2	12"	304,8	95
3	14"	355,6	95
4	14"	355,6	95
5	14"	355,6	95
6	14"	355,6	95

Fonte: Adaptado de Torcisão (2018).

O tubo que compõe a estaca possui diâmetro externo de 101,6mm e espessura de 7,1mm.

Segundo a fabricante da estaca, é recomendado o valor de $7,0ft^{-1}$ para o fator empírico que correlaciona o torque e a capacidade de carga da estaca (k_t).

Para maiores detalhes dos componentes da estaca, poderá ser consultado o Anexo B deste trabalho.

6.4 Instalação da estaca

Segundo a empresa fabricante da estaca (Torcisão), a estaca foi instalada com o auxílio de um motor hidráulico acoplado a uma retroescavadeira, e para medir o torque, lançou-se mão de um torquímetro, devidamente aferido.

Na instalação, seguiu-se a seguinte sequência de componentes para obter o torque mínimo especificado em projeto: 1 seção guia TOR 4008P 0244, 1 extensão com hélices TOR 4008E 44, 2 extensões lisas de 3,5m de comprimento, 1 extensão lisa de 2,5m de comprimento e por fim, 2 extensões lisas de 1,0m de comprimento.

A estaca foi instalada no solo até os 18,0m de profundidade, quando foi atingido o torque mínimo especificado em projeto, que, para este caso, possui o mesmo valor do torque máximo suportado pela estaca: 16000lbf.ft.

A tabela 12 apresenta a variação do torque medido ao longo da profundidade da estaca.

Tabela 12 – Variação do torque ao longo da profundidade

COMPRIMENTO (m)	TORQUE (lbf.ft)
1	1500
2	2000
3	2850
4	3100
5	4000
6	4800
7	5300
8	6700
9	7400
10	8380
11	9500
12	10100
13	11000
14	12100
15	13070
16	14000
17	15000
18	16350

Fonte: Adaptado de Torcisão (2018).

6.5 Provas de Carga

Para a estaca em estudo foi realizada a prova de carga à tração. Segundo a empresa executora do ensaio (Torcisão), foram utilizados os seguintes equipamentos para realização dos ensaios:

1. Dispositivo hidráulico para aplicação de carga;
2. Manômetro;
3. Viga metálica de reação para apoio do dispositivo hidráulico de aplicação de carga;
4. Extensômetros para medir os deslocamentos.

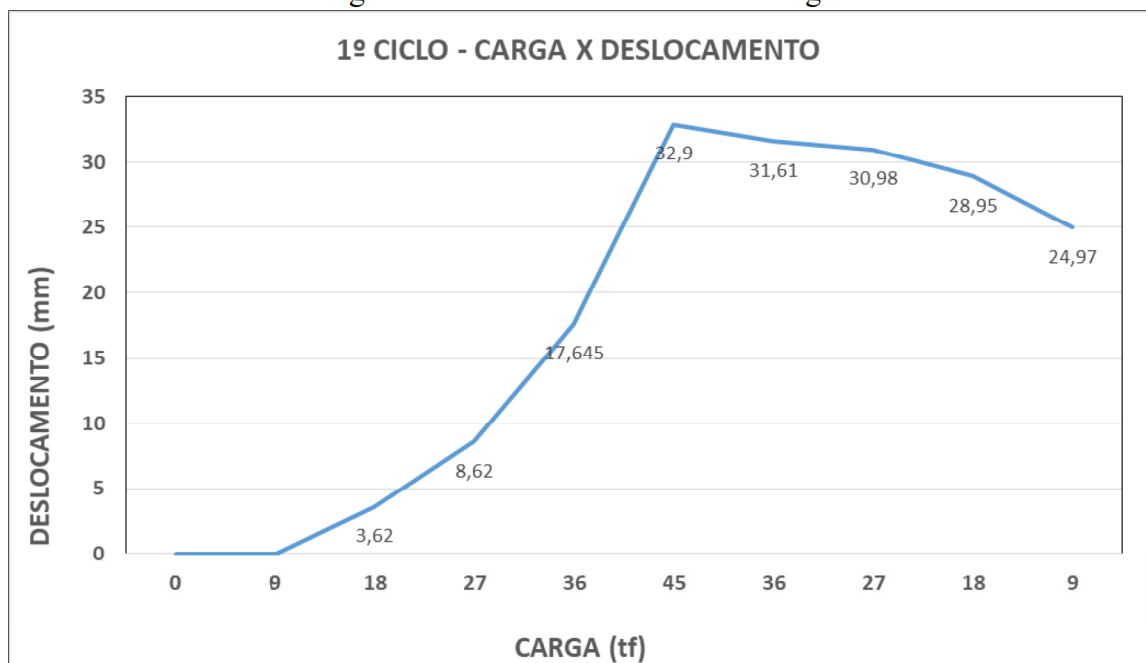
Como parâmetro máximo para o deslocamento, foi adotado o valor de 50mm, indicado pelas Recomendações Técnicas para Instalação e Manutenção de Estacas Metálicas Helicoidais. (Cigrè, 2018)

O ensaio foi realizado em três ciclos, o primeiro e segundo ciclos para a carga de tração máxima de 45000kgf, sendo primeiramente aplicada a carga de ajuste para eliminar eventuais folgas que possam existir no sistema. Após a aplicação da carga de ajuste, foram zerados os sistemas de leitura de deslocamentos (extensômetros).

Como não houve deslocamento excessivo da estaca, o terceiro ciclo foi realizado para a carga de tração máxima de 58500kgf (valor 30% maior que o utilizado no primeiro e segundo ciclos). No terceiro ciclo do ensaio, foi medido um deslocamento da estaca superior aos 50mm, caracterizando, de acordo ao parâmetro de deslocamento máximo adotado, a carga de ruptura da estaca (será considerada como carga de ruptura para este estudo a carga de 54000kgf).

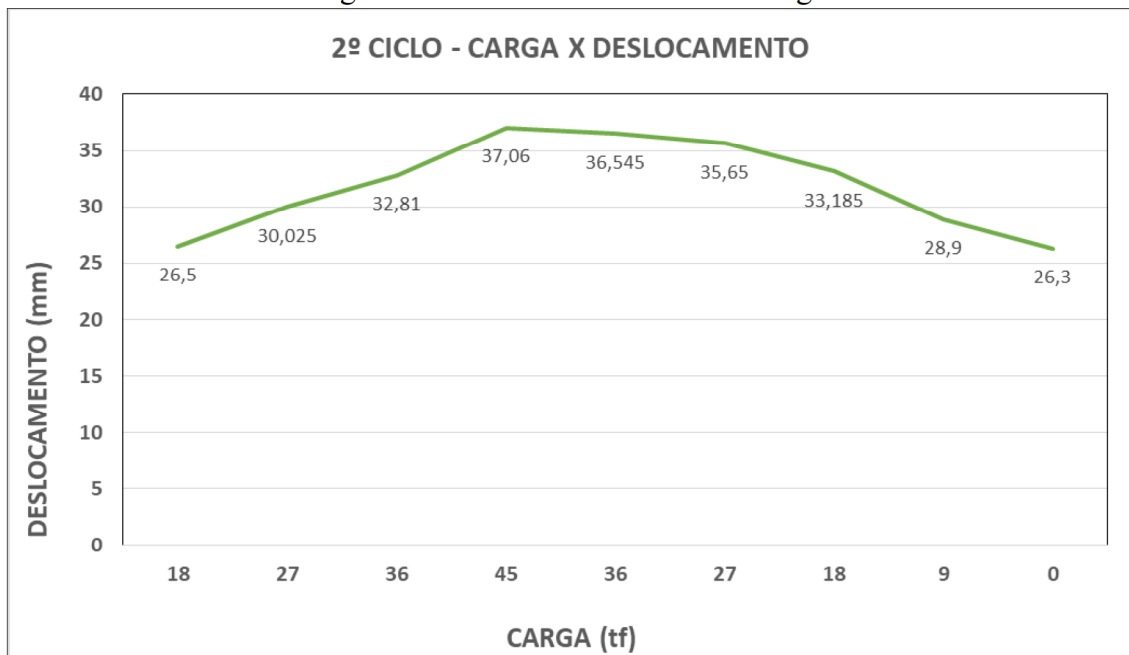
Na sequência, estão apresentados os gráficos que representam os resultados do ensaio de tração realizado na estaca.

Figura 35 – Gráfico do 1º ciclo de carga



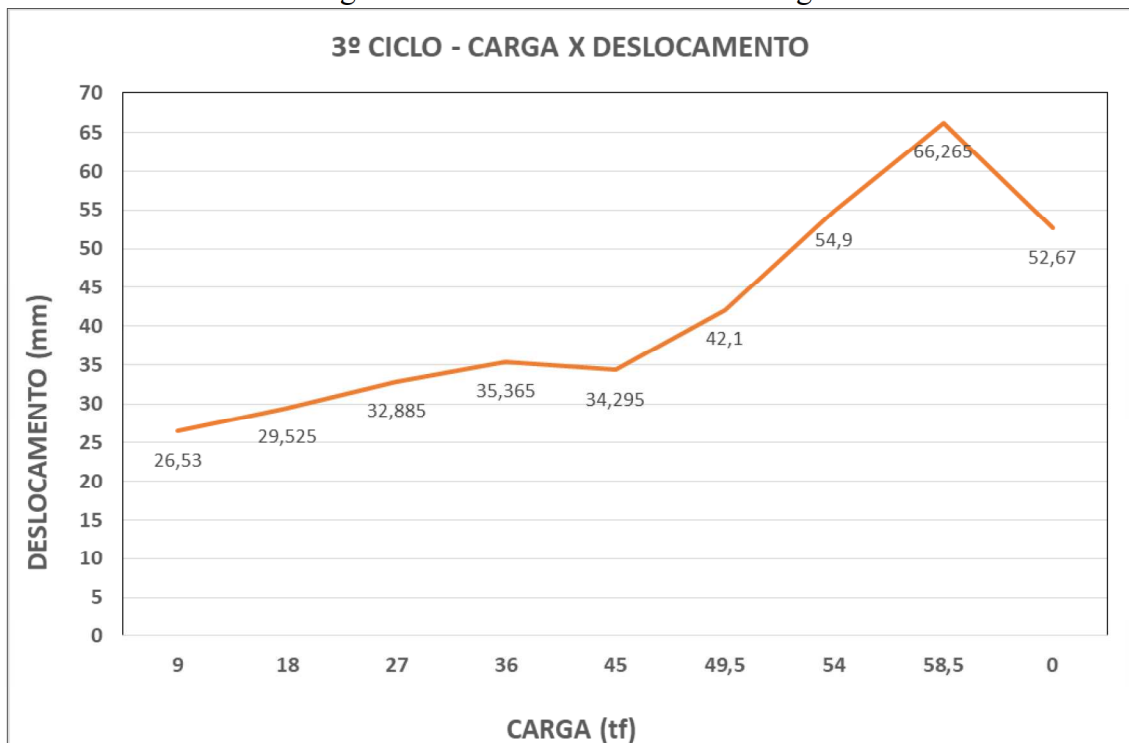
Fonte: O Autor (2018).

Figura 36 – Gráfico do 2º ciclo de carga



Fonte: O Autor (2018).

Figura 37 – Gráfico do 3º ciclo de carga



Fonte: O Autor (2018).

6.6 Metodologias de previsão de capacidade de carga

Para estimar a capacidade de carga da estaca helicoidal em estudo, serão empregadas as metodologias citadas no item 5 deste trabalho. Como o ensaio realizado foi de tração, serão utilizadas apenas as metodologias que abordam a resistência da estaca ao arrancamento.

De maneira a auxiliar os cálculos segundo as metodologias propostas, foi utilizado o *software* Excel.

7. COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE PREVISÃO DE CAPACIDADE DE CARGA E A PROVA DE CARGA

Neste capítulo, será realizado o comparativo entre os resultados obtidos através das metodologias de previsão de capacidade de carga e o resultado do ensaio de tração realizado na estaca em estudo.

7.1 Métodos de previsão de capacidade de carga

De maneira a estimar a capacidade de carga à tração da estaca helicoidal, foram empregadas as seguintes metodologias:

- Capacidade de carga individual das hélices: Perko (2009), Stephenson (1997), Adams e Klym (1972), A.B. Chance (2014), Earth Contact (2003) e Rao, Prasad e Veeresh (1993);
- Cilindro de cisalhamento: Perko (2009) e Mooney, Adamczak e Clemence (1985);
- Método do torque.

7.2 Premissas adotadas para o cálculo da capacidade de carga

Na sequência são apresentadas as premissas que serão adotadas para o desenvolvimento dos cálculos.

- Para a estaca em estudo, a relação entre a profundidade (H) e o diâmetro da hélice superior (D) é igual a 36. Sendo assim, pode-se admitir que o modo de ruptura será conforme descrito para a fundação profunda, de acordo a Das (1990): $(H1/D1)_{cr}=5$;
- Para os cálculos das capacidades de carga à tração, será desconsiderada a resistência devido o atrito entre o fuste da estaca e o solo;
- As estacas foram numeradas de acordo ao proposto pelo fabricante da mesma, portanto, será adotada a orientação indicada na figura 34 deste trabalho;

- O fator de capacidade de carga N_c será tomado igual a 9, conforme sugerido por Skempton (1951) e A.B. Chance (2014), para todas as metodologias de previsão de capacidade de carga, salvo quando houver um valor específico indicado pela própria metodologia;
- A tabela 13 apresenta as características das hélices da estaca, bem como as profundidades em que foram instaladas, e as características do solo na cota de instalação. Como a sondagem SPT foi realizada até o 16º metro, para o estudo em questão, foi realizada a extrapolação dos resultados até o 18º metro (profundidade de assentamento da estaca helicoidal);
- Os parâmetros de resistência e peso específico apresentados foram obtidos conforme proposto no item 6.2 deste trabalho;
- Como o solo presente no local da instalação da estaca (silte) não pode ser classificado como puramente arenoso ou puramente coesivo, a fim de se estabelecer um comparativo, serão tomadas as resistências para os dois tipos de solo, obtidas através das metodologias de previsão da capacidade de carga. Portanto, na tabela 13, estão indicados os parâmetros de resistência associados ao solo arenoso e ao solo coesivo (ângulo de atrito e coesão, respectivamente).

Tabela 13 – Características das hélices

HÉLICE	DIÂMETRO (m)	PASSO (m)	ÁREA (m ²)	PROFUNDIDADE (m)	COESÃO (tf/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)	PESO ESPECÍFICO (tf/m ³)
1	0,25	0,095	0,05	17,85	13	31,1	1,70
2	0,30	0,095	0,07	17,09	13	31,1	1,70
3	0,36	0,095	0,10	16,17	13	31,1	1,70
4	0,36	0,095	0,10	15,11	11	29,8	1,70
5	0,36	0,095	0,10	14,04	8	27,6	1,60
6	0,36	0,095	0,10	12,97	7	26,8	1,60

Fonte: O Autor (2018).

7.2.1 Método da capacidade de carga individual

Segundo as metodologias de previsão de carga, a capacidade de carga à tração da estaca em estudo, para a consideração do solo como coesivo ou como arenoso, é conforme indicado na tabela 14.

Tabela 14 – Capacidade de carga estaca – capacidade de carga individual

FORMULAÇÃO	SOLO ARENOSO (tf)	SOLO COESIVO (tf)
PERKO (2009)	40,62	37,24
Stephenson (1997)	59,79	49,29
Adams e Klym (1972)	16,71	49,14
A.B. Chance (2014)	50,46	
Earth Contact (2003)	177,02	
Rao, Prasad e Veeresh (1993)	50,13	

Fonte: O Autor (2018).

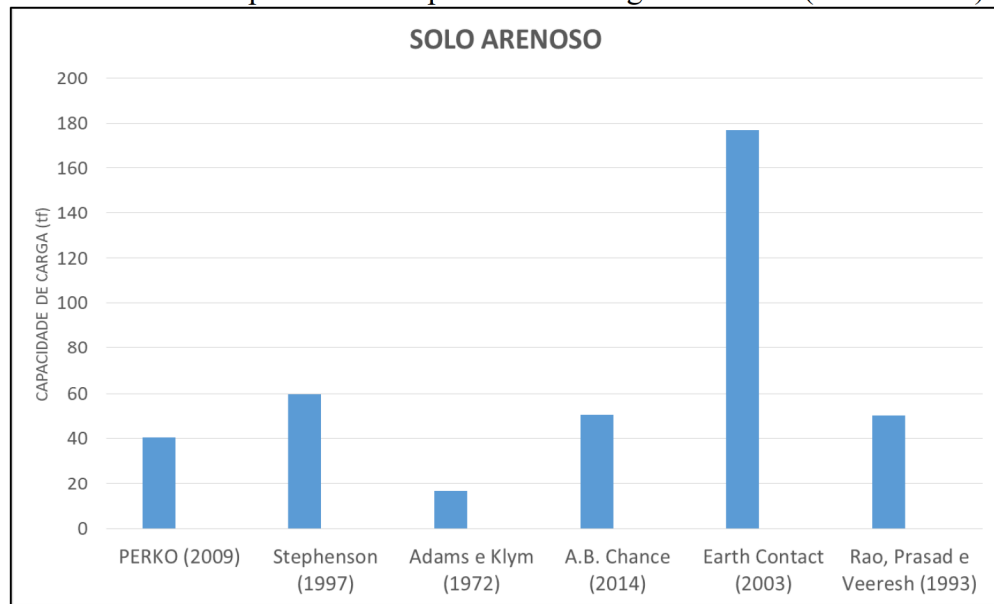
Perko (2009), Stephenson (1997) e Adams e Klym (1972), fazem distinção das formulações para os solos arenosos e para os solos coesivos. Já a A.B. Chance (2014), Earth Contact (2003) e Rao, Prasad e Veeresh não fazem esta diferenciação para obtenção da resistência geotécnica da estaca.

Desta maneira, para viabilizar o estudo comparativo, serão admitidas as mesmas resistências obtidas através das metodologias propostas pelas A.B. Chance (2014), Earth Contact (2003) e Rao, Prasad e Veeresh (1993) para a consideração do solo em estudo como arenoso ou como coesivo.

De acordo às resistências calculadas para o solo arenoso, pode-se observar que houve certa aproximação dos resultados obtidos através das metodologias propostas pelos autores. As resistências propostas por Adams e Klym (1972) e Earth Contact (2003), apresentaram grande variação em relação à média das demais resistências obtidas. Fato este, que pode ser explicado pela simplificação nos cálculos para estacas profundas proposta pelo método de Adams e Klym (1972) e pelos valores elevados dos coeficientes de capacidade de carga propostos pela Earth Contact (2003).

Os resultados da resistência geotécnica da estaca para o solo arenoso, de acordo às metodologias empregadas, estão apresentados graficamente pela figura 38.

Figura 38 – Gráfico comparativo da capacidade de carga individual (solo arenoso)

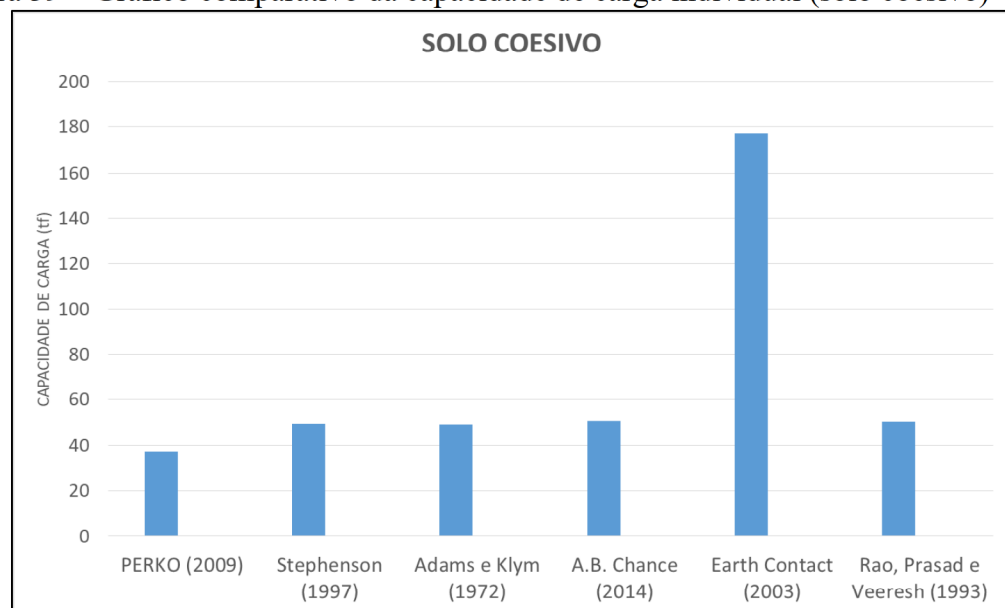


Fonte: O Autor (2018).

Já para a consideração do solo em estudo como coesivo, a resistência prevista por Adams e Klym (1972) se aproximou da média obtida através das demais metodologias. A previsão de resistência proposta pela Earth Contact (2003) manteve-se elevada, assim como observado para a consideração do solo como arenoso.

Os resultados para o solo coesivo estão apresentados graficamente pela figura 39.

Figura 39 – Gráfico comparativo da capacidade de carga individual (solo coesivo)



Fonte: O Autor (2018).

Os cálculos detalhados realizados para a previsão de capacidade de carga da estaca à tração segundo o método da capacidade de carga individual estão apresentados no Anexo C.

7.2.2 Método do cilindro de cisalhamento

Segundo as metodologias de previsão de carga, a capacidade de carga à tração da estaca em estudo, para a consideração do solo como coesivo ou como arenoso é conforme indicado na tabela 15.

Tabela 15 – Capacidade de carga estaca – cilindro de cisalhamento

FORMULAÇÃO	SOLO ARENOSO (tf)	SOLO COESIVO (tf)
Perko (2009)	94,67	53,15
Mooney, Adamczak e Clemence (1985)	81,37	

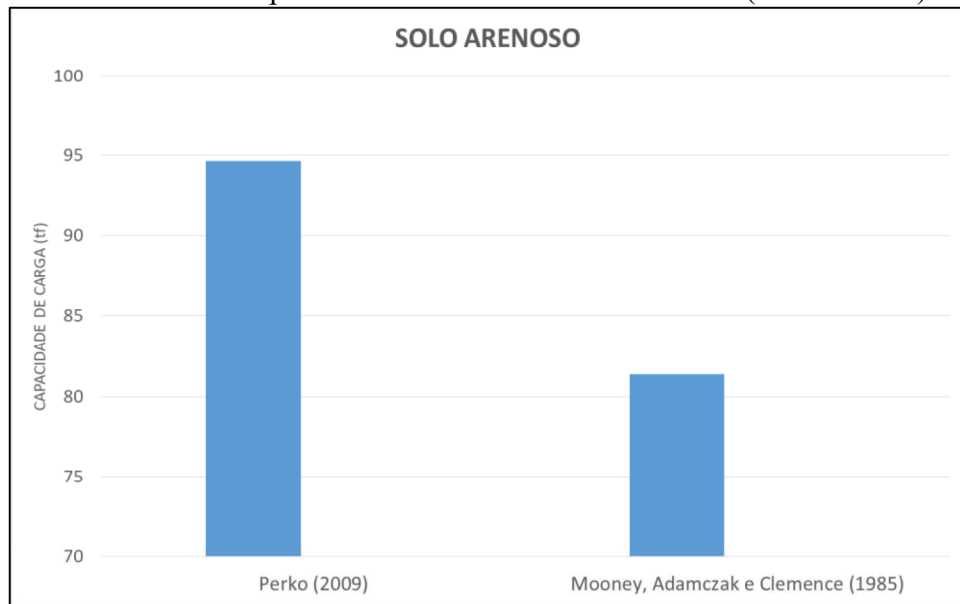
Fonte: O Autor (2018).

A simplificação realizada para a metodologia da capacidade de carga individual, será admitida também para a resistência obtida através da formulação de Mooney, Adamczak e Clemence (1985). Desta maneira, será considerada a mesma capacidade de carga à tração da estaca para o solo arenoso e para o solo coesivo.

De acordo aos resultados obtidos, pode-se observar que houve diferença de aproximadamente 13tf entre as resistências calculadas através das metodologias propostas por Perko (2009) e Mooney, Adamczak e Clemence (1985), quando considerado o resultado para o solo arenoso.

Os resultados para o solo arenoso estão apresentados graficamente pela figura 40.

Figura 40 – Gráfico comparativo do cilindro de cisalhamento (solo arenoso)

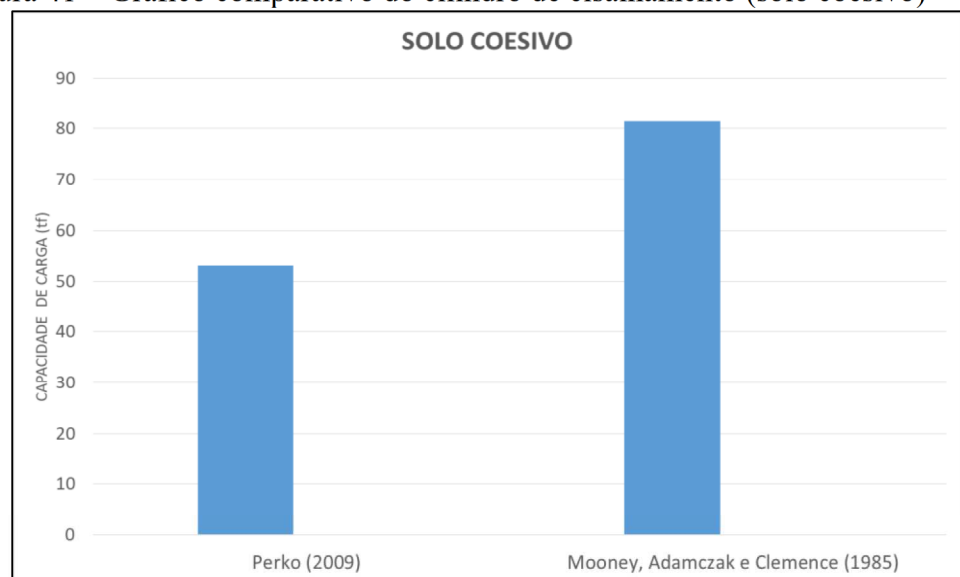


Fonte: O Autor (2018).

Já para o solo coesivo, mantendo-se o mesmo resultado obtido por Mooney, Adamczak e Clemence (1985), as resistências obtidas foram divergentes em aproximadamente 28 tf.

Os resultados para o solo coesivo estão apresentados graficamente pela figura 41.

Figura 41 – Gráfico comparativo do cilindro de cisalhamento (solo coesivo)



Fonte: O autor (2018).

Os cálculos detalhados realizados para a previsão de capacidade de carga da estaca segundo o método do cilindro de cisalhamento estão apresentados no Anexo D.

7.2.3 Método do torque

De acordo ao método do torque, ao valor do coeficiente empírico (k_t) proposto pelo fabricante da estaca, e ao torque obtido durante a instalação, pode-se estimar a capacidade de carga conforme as expressões indicadas na sequência.

Torque obtido na instalação da estaca: $T = 16350 \text{ lbf.ft.}$

Coeficiente que correlaciona o torque com a capacidade de carga: $k_t = 7,0 \text{ ft}^{-1}$.

$$Q_u = k_t T \quad (50)$$

$$Q_u = 7,0 \cdot 16350 \quad (51)$$

$$Q_u = 114450 \text{ lb} \text{ (51,91 tf)} \quad (52)$$

7.3 Comparativo

A fim de se estabelecer um comparativo, foram consideradas as resistências obtidas através das metodologias apresentadas anteriormente e a prova de carga realizada na estaca em estudo. Como o solo presente no local da instalação da estaca (silte) não pode ser classificado como puramente arenoso ou puramente coesivo, foram tomadas as resistências para os dois tipos de solo, obtidas através das metodologias de previsão da capacidade de carga.

A tabela 16 apresenta um resumo das resistências obtidas através das metodologias estudadas e do resultado da prova de carga.

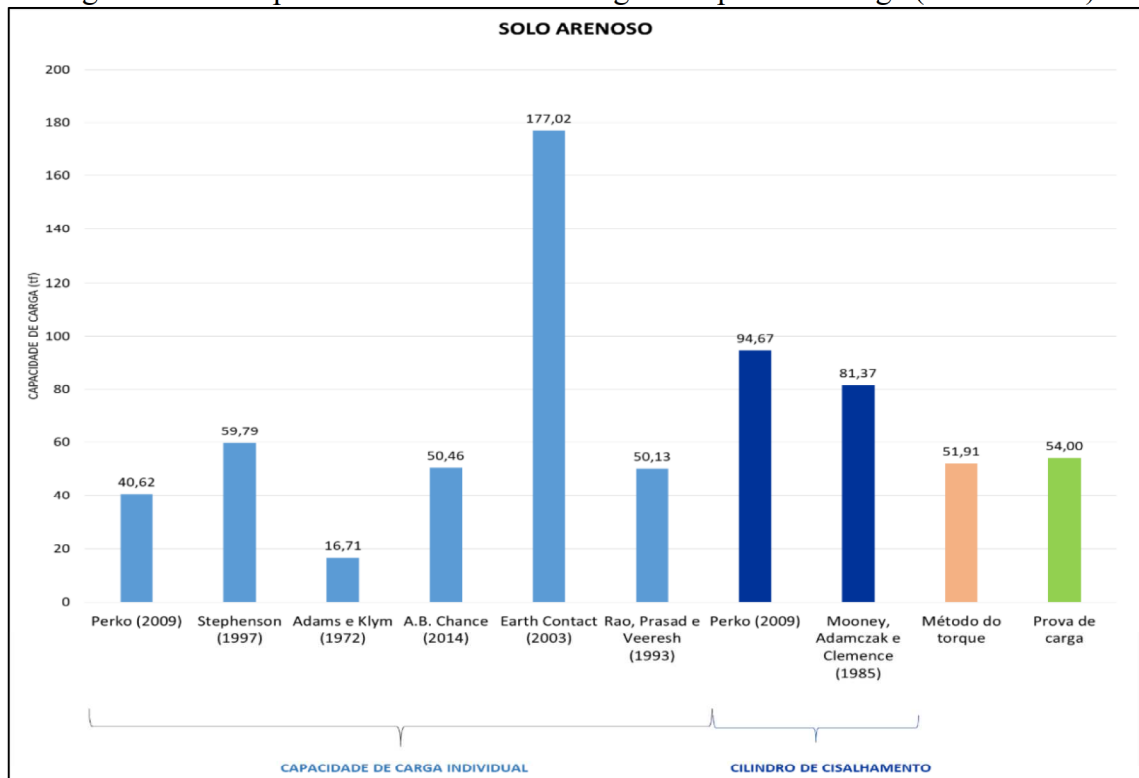
Tabela 16 – Resumo das resistências obtidas

METODOLOGIA	AUTOR	RESISTÊNCIA (tf)	
		Solo Arenoso	Solo Coesivo
Capacidade de carga Individual	Perko (2009)	40,62	37,24
	Stephenson (1997)	59,79	49,29
	Adams e Klym (1972)	16,71	49,14
	A.B. Chance (2014)	50,46	50,46
	Earth Contact (2003)	177,02	177,02
	Rao, Prasad e Veeresh (1993)	50,13	50,13
Cilindro de cisalhamento	Perko (2009)	94,67	53,15
	Mooney, Adamczak e Clemence (1985)	81,37	81,37
Método do torque	Método do torque	51,91	51,91
Prova de Carga	Prova de carga	54,00	54,00

Fonte: O Autor (2018).

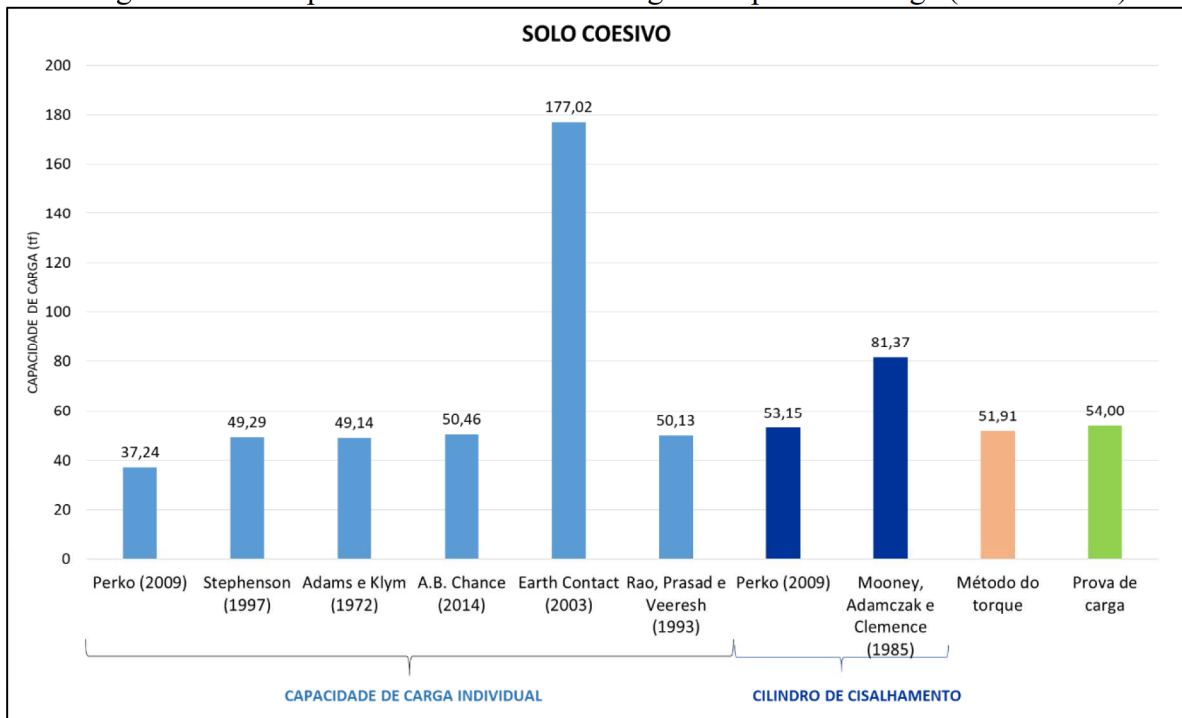
As figuras 42 e 43 demonstram graficamente a variação das capacidades de carga para o solo arenoso ou coesivo segundo as metodologias estudadas.

Figura 42 – Comparativo entre as metodologias e a prova de carga (solo arenoso)



Fonte: O Autor (2018).

Figura 43 – Comparativo entre as metodologias e a prova de carga (solo coesivo)



Fonte: O Autor (2018).

A tabela 17 apresenta a relação entre as resistências obtidas e o resultado da prova de carga realizada na estaca em estudo.

Tabela 17 – Relação previsão capacidade de carga e resultado prova de carga

METODOLOGIA	AUTOR	COMPARATIVO			
		Solo Arenoso (tf)	Relação metodologia/prova de carga	Solo Coesivo (tf)	Relação metodologia/prova de carga
Capacidade de carga Individual	Perko (2009)	40,62	0,75	37,24	0,69
	Stephenson (1997)	59,79	1,11	49,29	0,91
	Adams e Klym (1972)	16,71	0,31	49,14	0,91
	A.B. Chance (2014)	50,46	0,93	50,46	0,93
	Earth Contact (2003)	177,02	3,28	177,02	3,28
	Rao, Prasad e Veeresh (1993)	50,13	0,93	50,13	0,93
Cilindro de cisalhamento	Perko (2009)	94,67	1,75	53,15	0,98
	Mooney, Adamczak e Clemence (1985)	81,37	1,51	81,37	1,51
Método do torque	Método do torque	51,91	0,96	51,91	0,96

Fonte: O Autor (2018).

De acordo à tabela 17, pode-se concluir que se o solo for considerado arenoso, a previsão de resistência que mais converge com o resultado da prova de carga é a obtida através do método do torque, seguida pela metodologia das capacidades individuais proposta pela A.B. Chance (2014) e por Rao Prasad e Veeresh (1993).

Já para a consideração do solo como coesivo, a previsão de resistência que mais se aproxima do resultado da prova de carga é a obtida através da metodologia do cilindro de cisalhamento proposta por Perko (2009), seguida do método do torque e da metodologia das capacidades individuais proposta pela A.B. Chance (2014) e por Rao Prasad e Veeresh (1993).

Destaca-se que para ambas classificações de solo (arenoso e coesivo), as previsões de resistência que mais se aproximaram do resultado da prova de carga foram as obtidas através do método do torque e através da metodologia das capacidades de carga individuais, segundo A.B. Chance (2014) e segundo Rao, Prasad e Veeresh (1993).

Em contrapartida, as previsões que mais divergiram do resultado da prova de carga foram as obtidas segundo a metodologia das capacidades de carga individuais proposta pela Earth Contact (2003), seguida da metodologia do cilindro de cisalhamento proposta por Perko (2009) e por Mooney, Adamczak e Clemence (1985).

As demais metodologias não se aproximaram tanto do resultado da prova de carga, mas também não foram demasiadamente divergentes.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que, apesar do crescimento da aplicação de estacas helicoidais, ainda não há o conhecimento necessário do comportamento destas estacas em solo brasileiro.

Os trabalhos desenvolvidos acerca do assunto ainda não são suficientes para compreender e desenvolver metodologias de cálculo da capacidade de carga das estacas aplicadas à realidade nacional. Devido à esta deficiência de métodos, as empresas que dimensionam e aplicam as estacas no Brasil lançam mão das metodologias desenvolvidas por diversos autores, calibradas através dos ensaios realizados em diversas estacas com geometrias variáveis. E de maneira a validar as aplicações, são realizados pelas empresas os ensaios de tração e compressão em todas as estacas aplicadas.

Neste trabalho foram apresentadas as principais características das estacas helicoidais, as vantagens e desvantagens de sua aplicação, a influência de sua geometria e instalação no solo, e os principais métodos para previsão da capacidade de carga geotécnica da estaca. Após realização deste estudo, percebeu-se que diversos fatores podem influenciar na capacidade geotécnica das estacas helicoidais frente aos esforços de tração e compressão, são eles: profundidade da estaca, diâmetro das hélices, espaçamento entre hélices, efeitos causados no solo pela instalação, etc.

Com o intuito de conhecer melhor as metodologias de previsão de capacidade de carga à tração comumente utilizadas, foi elaborado um comparativo entre os métodos propostos por diversos autores e o resultado de uma prova de carga realizada em uma estaca instalada e ensaiada pela empresa Torcisão. Os resultados mostraram que existe uma variação grande entre as previsões de capacidade de carga fornecidas pelas metodologias e a capacidade de carga real, observada no ensaio realizado em campo. Vale ressaltar que foi realizado apenas o estudo de um caso e que para obtenção de uma tendência de comportamento, seria necessária uma amostragem muito maior. Para isso, é importante que sejam realizadas parcerias entre as instituições de ensino e pesquisa com as empresas que atuam no mercado brasileiro, só assim, seria possível desenvolver uma metodologia adequada para aplicação em nosso país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12131: Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 6484: Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos**. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR-6122: Projeto e execução de estruturas de fundação**. Rio de Janeiro, 2010.

ADAMS, J. I.; KLYM, T. W. (1972). **A study of anchorages for transmission tower foundations**. Canadian Geotechnical Journal, v9.

ASEL-TECH. – **Pipeline screw anchor system**. Disponível em: <http://www.asel-tech.com/products-anchor.html>. Acesso em: 04/01/2018.

CARLOS, Gustavo D. (2013). **Dimensionamento de estacas helicoidais**. 132p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia, Universidade da Beira Interior, Corvilhã.

CARVALHO, Igor P. (2007). **Estudo teórico e experimental da capacidade de carga à tração e compressão de estacas metálicas helicoidais**. 205p. Dissertação de mestrado – Departamento de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CHANCE, A.B. (2014). **Technical Design Manual**. Centralia, Missouri, Estados Unidos.

CIGRÉ. (2018). **Recomendações técnicas para instalação e manutenção de estacas metálicas helicoidais**. GT-B2-Fundações, Cigré, Brasil.

DAS, Braja M (1941). **Earth anchors**. Flórida: J. Ross Publishing.

DÉCOURT, L; QUARESMA, A. R. (1978). **Capacidade de carga de estacas a partir de valores SPT**. Proc. VI COBRAMSEF, Rio de Janeiro.

GODOY, N.S.; TEIXEIRA, A.T. (1996). **Análise, projeto e execução de fundações rasas. Fundação: teoria e prática**. Hachich, Ed. Pini Ltda, São Paulo.

HOYT, R. M.; CLEMENCE, S. P. (1989). **Uplift capacity of helical anchors in soil**. 12th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, Brasil.

KANAI, S. (2007). **Aismic retrofitting applications by means of multi-helix micropiles**. Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba, Japão.

KULHAWY, F. H. (1985). **Uplift Behavior of Shallow Soil Anchors – An Overview**. Detroit: Proceedings of a session sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers.

MATA DE SANTA GENEVRA TRANSMISSÃO S.A. – **Empreendimento**. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.msgtrans.com.br/empreendimento.html>. Acesso em: 04/03/2018.

MEYERHOF, G. G. (1951). **The Ultimate Bearing Capacity of Foundations**. Geotechnique, Vol. 2, nº4.

NEVES, Alessandro M. (2015). **Probabilidade de ruína em estacas helicoidais nas fundações de torres de linhas de transmissão de energia elétrica**. 89p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de Maringá, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

PERKO, Howard A. **A practical guide to design and instalation**. New Jersey: John Wiley e Sons: 2009.

SANTOS, Thiago C. (2013). **Efeito da configuração das hélices na capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solo tropical**. 171p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, Bruno C. (2014). **Estimativa da capacidade de carga à tração de estacas helicoidais com base no ensaio SPT**. 361p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

STEPHENSON, Richard W. (1997). **Helical foundations and tie backs**. University of Missouri-Rolla, Missouri.

SYSTEMS, Helical P. (2010). **Helical Pile Engineering Handbook**. Canadá.

TERZAGHI – **Investigação Geotécnica**. Disponível em: <<http://www.terzaghi.eng.br/servicos/investigacao-geotecnica/>>. Acesso em 04 out. 2017.

TORCISÃO COMERCIAL E INDUSTRIAL DE AÇOS LTDA (2018) – **Informações das estacas, sondagens e ensaios**.

TSHUA, Cristina H. (2007). **Modelo teórico para o controle de capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solo arenoso**. 275p. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

VELLOSO, Dirceu; LOPES, Francisco. Concepção de obras de fundações. In: HACHICH, Waldemar et al. **Fundações: Teoria e Prática**. São Paulo: Pini, 1998, p. 211-225.

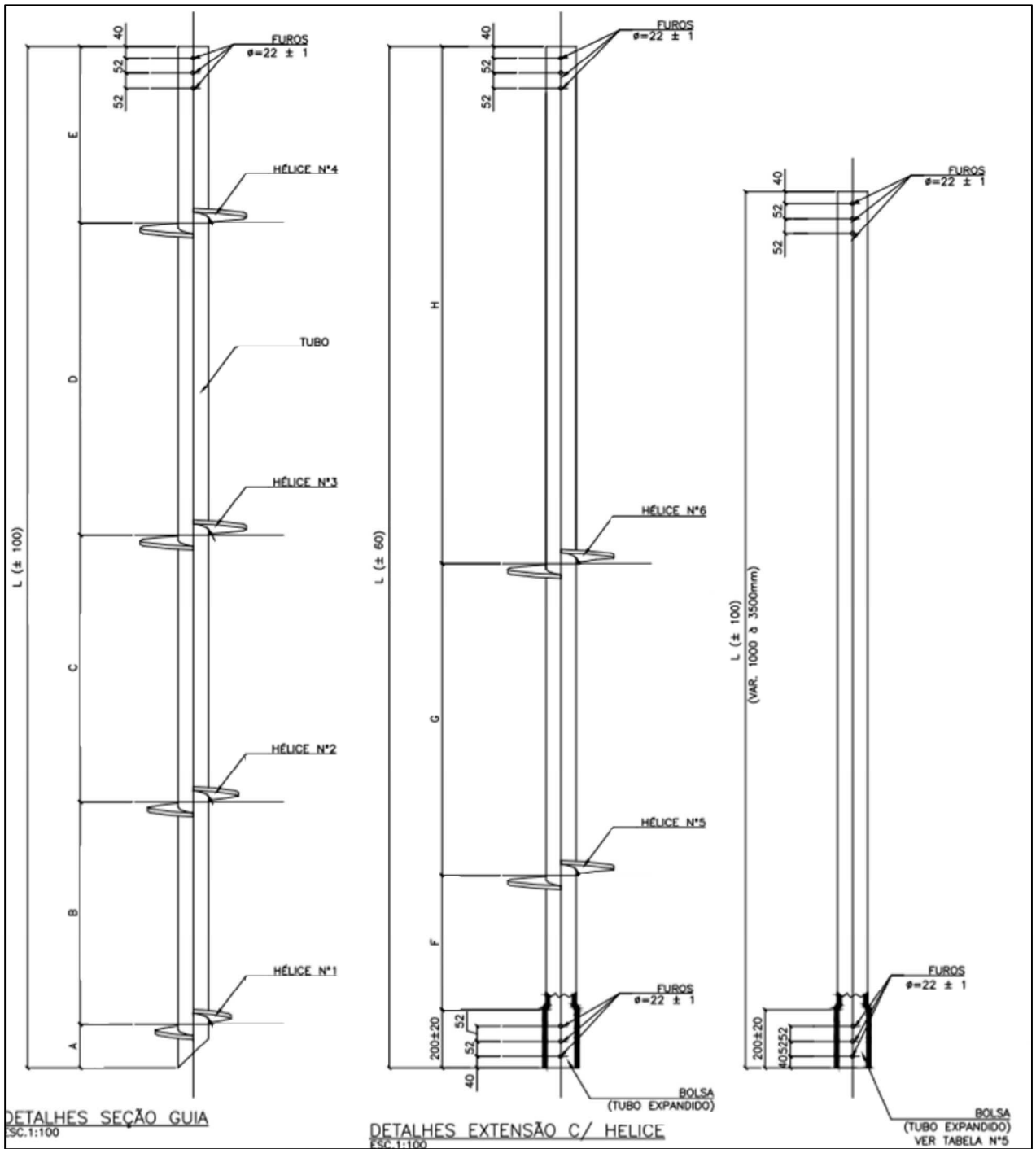
VÉRTICE ENGENHARIA – **Estacas metálicas helicoidais**. São Paulo, 2015 Disponível em: <http://www.verticebr.com.br/.html>. Acesso em: 10/03/2018.

YOUNG, Jessica. (2012). **Uplift capacity and displacement of helical anchor in cohesive soil**. 177p. Dissertação de mestrado – Oregon University, Oregon.

ANEXO A – Sondagem SPT em estudo

BOLETIM DE SONDAGEM									
CLIENTE: VEREDAS TRANSMISSORA DE ELETRICIDADE					PREFIXO: MG-0001.01				
LOCAL: LT 500 kV RIO DAS ÉGUAS - PIRAPORA - MG					RELATORIO: RE 2110/17		ANEXO: 4.2		
ESCALA: 1:125		DATA: 13/11/2017		DESENHISTA: <i>JG</i>		VISTO: <i>H</i>		ENGENHEIRO: <i>e</i>	
ENSAIO: SONDAGEM A PERCUSSÃO		NUMERO: SP - T30/2			COTA: + fornecido pelo cliente		ARQUIVO: DS 9260 - 13/11/17 - VEREDAS - SP-T30/2.DWG		
COTA EM RELAÇÃO AO R.N.	AMOSTRA	PENETRAÇÃO: (golpes/30 cm)				TORQUE (kgf.m)		REVESTIMENTO: Ø = 76,2mm (3")	
		1ª e 2ª penetrações		Torque : kgf.m - M		R	M	AMOSTRADOR: Ø interno = 37,0 mm	
		2ª e 3ª penetrações		Torque : kgf.m - R				Ø externo = 48,0 mm	
NÍVEL D'ÁGUA		Nº DE GOLPES		GRÁFICO				PELO: 65 kg - Altura de queda = 75,0 cm	
		1ª e 2ª	2ª e 3ª	10	20	30	40		
	1	4/32	2/34						
	2	2	2					Areia siltosa, fina, amarelada, fofa.	
	3	2/37	2/32					4,46	
	4	2/33	2					5,45	
	5	2/32	2					Areia siltosa, fina, amarelada e avermelhada, fofa.	
	6	4/33	4						
	7	4/31	4					Silte arenoso, fino, avermelhado, fofa à pouco compacto.	
	8	5	6						
	9	5/31	6/33					9,48	
	10	5	7						
	11	6	7						
	12	7	10					Silte arenoso, pouco argiloso, fino, avermelhado, pouco à medianamente compacto.	
	13	6	7/31					13,46	
	14	7	8						
	15	9	11					Silte pouco arenoso, avermelhado, pouco à medianamente.	
	16	10	13/31					* Limite de sondagem.	
								Paralisação por solicitação do cliente.	
								1) Houve perda d'água aos 6,00 à 8,00m.	
								COORDENADAS	
								E	N
								369.860,42	8.438.157,45
PROFUNDIDADE DO NÍVEL DA ÁGUA (m)		AMOSTRA NÃO RECUPERADA		RECUPERAÇÃO ROD (%)		O/N O AMOSTRADOR PENETROU "N" cm SOB O PESO DAS HASTES			
INICIAL		FINAL		FRAGMENTOS N°/m		P/N O AMOSTRADOR PENETROU "N" cm SOB O PESO DAS HASTES + PESO BATENTE			
30/10/2017		30/10/2017		REVESTIMENTO		RECUPERAÇÃO NULA			
NFE		NFE		NFO		NÍVEL D'ÁGUA NÃO FOI OBSERVADO			
NFE		NFE		NFE		NÍVEL D'ÁGUA NÃO FOI ENCONTRADO			

ANEXO B – Projeto da estaca helicoidal em estudo



ANEXO C – Metodologia capacidade de carga individual

PERKO (2009)

$$Q_u = \sum_n q_{ult} A_i$$

$q_{ult} = 11 \lambda_{SPT} N_{70}$ SOLOS FINOS Qu = **37,24** tf
 $q_{ult} = 12 \lambda_{SPT} N_{70}$ SOLOS GRANULARES Qu = **40,62** tf

HÉLICE	DIÂMETRO (m)	PASSO (m)	ÁREA (m ²)	PROFUNDIDADE (m)	COESÃO (tf/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)	PESO ESPECÍFICO (tf/m ³)
1	0,25	0,095	0,05	17,85	13	31,1	1,70
2	0,30	0,095	0,07	17,09	13	31,1	1,70
3	0,36	0,095	0,10	16,17	13	31,1	1,70
4	0,36	0,095	0,10	15,11	11	29,8	1,70
5	0,36	0,095	0,10	14,04	8	27,6	1,60
6	0,36	0,095	0,10	12,97	7	26,8	1,60

HÉLICE 1

H1= **0,762** m
 D1= **0,25** m
 A1= **0,05** m²

NSPT= **13**

Aspt = **0,62** tf/m²/golpe/30cm

SOLOS FINOS Quilt= **4,433** tf
 SOLOS GRANULARES Quilt= **4,836** tf

HÉLICE 2

H1= **0,91** m
 D1= **0,30** m
 A1= **0,07** m²

NSPT= **13**

Aspt = **0,62** tf/m²/golpe/30cm

SOLOS FINOS Quilt= **6,2062** tf
 SOLOS GRANULARES Quilt= **6,7704** tf

HÉLICE 3

H1= **1,0668** m
 D1= **0,36** m
 A1= **0,1** m²

NSPT= **13**

Aspt = **0,62** tf/m²/golpe/30cm

SOLOS FINOS Quilt= **8,866** tf
 SOLOS GRANULARE Quilt= **9,672** tf

HÉLICE 4

H1= **1,0668** m
 D1= **0,36** m
 A1= **0,1** m²

NSPT= **11**

Aspt = **0,62** tf/m²/golpe/30cm

SOLOS FINOS Quilt= **7,502** tf
 SOLOS GRANL Quilt= **8,184** tf

HÉLICE 5

H1= **1,0668** m
 D1= **0,36** m
 A1= **0,1** m²

NSPT= **8**

Aspt = **0,62** tf/m²/golpe/30cm

SOLOS FINOS Quilt= **5,456** tf
 SOLOS GRANULARES Quilt= **5,952** tf

HÉLICE 6

H1= **1,8** m
 D1= **0,36** m
 A1= **0,1** m²

NSPT= **7**

Aspt = **0,62** tf/m²/golpe/30cm

SOLOS FINOS Quilt= **4,774** tf
 SOLOS GRANULARE Quilt= **5,208** tf

Stephenson (1997)

$$q_{ult} = c_i N_c + \frac{1}{2} D_i \gamma_i N_\gamma + \gamma_i H_i N_q$$

$$Q_u = \sum_n q_{ult} A_i$$

Qu= 59,79 tf

SOLOS NÃO COESIVOS

Qu= 49,29 tf

SOLOS COESIVOS

HÉLICE 1

H1= 0,762 m
D1= 0,25 m
A1= 0,05 m²

c= 13 tf/m²
φ= 31 °
γ= 1,7 tf/m³

Nc= 9 Nc= 9
Nq= 20,63 Nq= 0
Ny= 18,56 Ny= 1

qult= 7,38 tf SOLOS NÃO COESIVOS

qult= 5,86 tf SOLOS COESIVOS

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

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

$$N_\gamma = (N_q - 1) tan(1,4\phi)$$

Solos coesivos:

$$H_i/D_i > 3 \rightarrow N_c=9,0; N_\gamma=0; N_q=1,0$$

$$H_i/D_i \leq 3 \rightarrow N_c=5,7; N_\gamma=0; N_q=1,0$$

Solos não coesivos:

N_c e N_q variam em função do ângulo de atrito interno do solo (φ)

HÉLICE	DIÂMETRO (m)	PASSO (m)	ÁREA (m ²)	PROFUNDIDADE (m)	COESÃO (tf/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)	PESO ESPECÍFICO (tf/m ³)
1	0,25	0,095	0,05	17,85	13	31,1	1,70
2	0,30	0,095	0,07	17,09	13	31,1	1,70
3	0,36	0,095	0,10	16,17	13	31,1	1,70
4	0,36	0,095	0,10	15,11	11	29,8	1,70
5	0,36	0,095	0,10	14,04	8	27,6	1,60
6	0,36	0,095	0,10	12,97	7	26,8	1,60

HÉLICE 2

H1= 0,9144 m
D1= 0,3 m
A1= 0,07 m²

c= 13 tf/m²
φ= 31 °
γ= 1,7 tf/m³

Nc= 0 Nc= 9
Nq= 20,63 Nq= 0
Ny= 18,56 Ny= 1

qult= 2,58 tf SOLOS NÃO COESIVOS

qult= 8,21 tf SOLOS COESIVOS

HÉLICE 5

H1= 1,0668 m
D1= 0,36 m
A1= 0,1 m²

c= 8 tf/m²
φ= 27,6 °
γ= 1,6 tf/m³

Nc= 9 Nc= 9
Nq= 14,09 Nq= 0
Ny= 10,46 Ny= 1

qult= 9,91 tf SOLOS NÃO COESIVOS

qult= 7,23 tf SOLOS COESIVOS

HÉLICE 3

H1= 1,0668 m
D1= 0,36 m
A1= 0,1 m²

c= 13 tf/m²
φ= 31 °
γ= 1,7 tf/m³

Nc= 9 Nc= 9
Nq= 20,63 Nq= 0
Ny= 18,56 Ny= 1

qult= 16,01 tf SOLOS NÃO COESIVOS

qult= 11,73 tf SOLOS COESIVOS

HÉLICE 6

H1= 1,8 m
D1= 0,36 m
A1= 0,1 m²

c= 7 tf/m²
φ= 26,8 °
γ= 1,6 tf/m³

Nc= 9 Nc= 9
Nq= 12,92 Nq= 0
Ny= 9,15 Ny= 1

qult= 10,28 tf SOLOS NÃO COESIVOS

qult= 6,33 tf SOLOS COESIVOS

HÉLICE 4

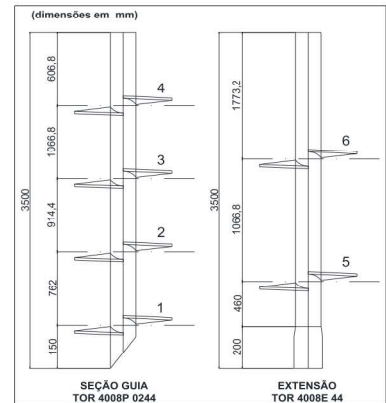
H1= 1,0668 m
D1= 0,36 m
A1= 0,1 m²

c= 11 tf/m²
φ= 29,8 °
γ= 1,7 tf/m³

Nc= 9 Nc= 9
Nq= 17,99 Nq= 0
Ny= 15,15 Ny= 1

qult= 13,63 tf SOLOS NÃO COESIVOS

qult= 9,93 tf SOLOS COESIVOS



Adams e Klym (1972)

$$q_{uit} = q_i N_q \text{ SOLOS ARENOSOS}$$

$$q_{uit} = N_c c_i + A_{ps} \alpha c_i \text{ SOLO COESIVOS}$$

$$Q_{ult} = 16,71 \text{ tf}$$

$$Q_u = \sum_{i=1}^n q_{uit} A_i$$

$$Q_{ult} = 49,14 \text{ tf}$$

Desconsiderado o atrito entre o fuste da estaca e o solo
 Recomendada a utilização de $N_c=9,0$
 para ambos tipos de solo

$$N_q = \begin{cases} 1 & \text{se } \phi = 0 \\ N_q e^{\pi \tan \phi} & \text{se } \phi > 0 \end{cases}$$

HÉLICE 1

H1= 0,762 m
 D1= 0,25 m
 A1= 0,05 m²

c= 13 tf/m²
 ϕ = 31 °
 γ = 1,7 tf/m³

SOLO ARENOSO
 Nc= 9,00
 Nq= 20,63
 Ny= 18,56

SOLOS ARENOSOS Qult= 1,34 tf

SOLOS COESIVOS Qult= 5,85 tf

HÉLICE	DIÂMETRO (m)	PASSO (m)	ÁREA (m ²)	PROFUNDIDADE (m)	COESÃO (tf/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)	PESO ESPECÍFICO (tf/m ³)
1	0,25	0,095	0,05	17,85	13	31,1	1,70
2	0,30	0,095	0,07	17,09	13	31,1	1,70
3	0,36	0,095	0,10	16,17	13	31,1	1,70
4	0,36	0,095	0,10	15,11	11	29,8	1,70
5	0,36	0,095	0,10	14,04	8	27,6	1,60
6	0,36	0,095	0,10	12,97	7	26,8	1,60

HÉLICE 2

H1= 0,9144 m
 D1= 0,3 m
 A1= 0,07 m²

c= 13 tf/m²
 ϕ = 31 °
 γ = 1,7 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 20,63
 Ny= 18,56

SOLOS ARENOSOS Qult= 2,24 tf

SOLOS COESIVOS Qult= 8,19 tf

HÉLICE 3

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²

c= 13 tf/m²
 ϕ = 31 °
 γ = 1,7 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 20,63
 Ny= 18,56

SOLOS ARENOSOS Qult= 3,74 tf

SOLOS COESIVOS Qult= 11,70 tf

HÉLICE 4

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²

c= 11 tf/m²
 ϕ = 29,8 °
 γ = 1,7 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 17,99
 Ny= 15,15

SOLOS ARENOSOS Qult= 3,26 tf

SOLOS COESIVOS Qult= 9,90 tf

HÉLICE 5

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²

c= 8 tf/m²
 ϕ = 27,6 °
 γ = 1,6 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 14,09
 Ny= 10,46

SOLOS ARENOSOS Qult= 2,40 tf

SOLOS COESIVOS Qult= 7,20 tf

HÉLICE 6

H1= 1,8 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²

c= 7 tf/m²
 ϕ = 26,8 °
 γ = 1,6 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 12,92
 Ny= 9,15

SOLOS ARENOSOS Qult= 3,72 tf

SOLOS COESIVOS Qult= 6,30 tf

A.B. Chance (2014)

$$q_{ult} = (c_i N_c + q_i N_q)$$

Qult= 50,46 tf

$$Q_u = \sum_n q_{ult} A_i$$

HÉLICE 1

Recomendada a utilização de Nc=9,0

$$N_q = 0,5(12\phi_i)^{2/s+}$$

H1=	0,762	m
D1=	0,25	m
A1=	0,05	m ²
c=	13	tf/m ²
φ=	31	°
v=	1,7	tf/m ³

Nc=	9,00
Nq=	1,46
Ny=	0,44

Qult= 5,94 tf

HÉLICE	DIÂMETRO (m)	PASSO (m)	ÁREA (m ²)	PROFUNDIDADE (m)	COESÃO (tf/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)	PESO ESPECÍFICO (tf/m ³)
1	0,25	0,095	0,05	17,85	13	31,1	1,70
2	0,30	0,095	0,07	17,09	13	31,1	1,70
3	0,36	0,095	0,10	16,17	13	31,1	1,70
4	0,36	0,095	0,10	15,11	11	29,8	1,70
5	0,36	0,095	0,10	14,04	8	27,6	1,60
6	0,36	0,095	0,10	12,97	7	26,8	1,60

HÉLICE 2

H1=	0,9144	m
D1=	0,3	m
A1=	0,07	m ²
c=	13	tf/m ²
φ=	31	°
v=	1,7	tf/m ³

Nc=	9,00
Nq=	1,46
Ny=	0,44

Qult= 8,35 tf

HÉLICE 3

H1=	1,0668	m
D1=	0,36	m
A1=	0,1	m ²
c=	13	tf/m ²
φ=	31	°
v=	1,7	tf/m ³

Nc=	9,00
Nq=	1,46
Ny=	0,44

Qult= 11,97 tf

HÉLICE 4

H1=	1,0668	m
D1=	0,36	m
A1=	0,1	m ²
c=	11	tf/m ²
φ=	29,8	°
v=	1,7	tf/m ³

Nc=	9,00
Nq=	1,37
Ny=	0,33

Qult= 10,15 tf

HÉLICE 5

H1=	1,0668	m
D1=	0,36	m
A1=	0,1	m ²
c=	8	tf/m ²
φ=	27,6	°
v=	1,6	tf/m ³

Nc=	9,00
Nq=	1,23
Ny=	0,18

Qult= 7,41 tf

HÉLICE 6

H1=	1,8	m
D1=	0,36	m
A1=	0,1	m ²
c=	7	tf/m ²
φ=	26,8	°
v=	1,6	tf/m ³

Nc=	9,00
Nq=	1,18
Ny=	0,14

Qult= 6,64 tf

Earth Contact (2003)

$$q_{ult} = (c_i N_c + q_i N_q)$$

$$Q_u = 177,02 \text{ tf}$$

$$Q_u = \sum_n q_{ult} A_i$$

HÉLICE 1

H1= 0,762 m
 D1= 0,25 m
 A1= 0,05 m²
 c= 13 tf/m²
 φ= 31 °
 γ= 1,7 tf/m³

Nc= 34,00
 Nq= 17,00
 Ny= 15,13

Qult= 23,20 tf

HÉLICE 2

H1= 0,9144 m
 D1= 0,3 m
 A1= 0,07 m²
 c= 13 tf/m²
 φ= 31 °
 γ= 1,7 tf/m³

Nc= 34,00
 Nq= 17,00
 Ny= 15,13

Qult= 32,79 tf

HÉLICE 3

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²
 c= 13 tf/m²
 φ= 31 °
 γ= 1,7 tf/m³

Nc= 34,00
 Nq= 17,00
 Ny= 15,13

Qult= 47,28 tf

HÉLICE 6

H1= 1,8 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²
 c= 7 tf/m²
 φ= 26,8 °
 γ= 1,6 tf/m³

Nc= 24,00
 Nq= 10,00
 Ny= 6,91

Qult= 19,68 tf

Valores de N_q e N_c recomendados pela Earth Contact Products

φ	N _c	N _q	φ	N _c	N _q
0	9	1	30	34	17
5	9	1	32	41	22
10	9	2	34	50	28
15	10	3	36	63	37
20	15	5	38	79	49
25	22	9	40	101	66
26	24	10	45	203	149
28	28	13	50	468	391

HÉLICE	DIÂMETRO (m)	PASSO (m)	ÁREA (m ²)	PROFUNDIDADE (m)	COESÃO (tf/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)	PESO ESPECÍFICO (tf/m ³)
1	0,25	0,095	0,05	17,85	13	31,1	1,70
2	0,30	0,095	0,07	17,09	13	31,1	1,70
3	0,36	0,095	0,10	16,17	13	31,1	1,70
4	0,36	0,095	0,10	15,11	11	29,8	1,70
5	0,36	0,095	0,10	14,04	8	27,6	1,60
6	0,36	0,095	0,10	12,97	7	26,8	1,60

HÉLICE 4

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²
 c= 11 tf/m²
 φ= 29,8 °
 γ= 1,7 tf/m³

Nc= 28,00
 Nq= 13,00
 Ny= 10,70

Qult= 33,16 tf

HÉLICE 5

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²
 c= 8 tf/m²
 φ= 27,6 °
 γ= 1,6 tf/m³

Nc= 24,00
 Nq= 10,00
 Ny= 7,19

Qult= 20,91 tf

Rao, Prasad e Veeresh (1993)

$$q_{uit} = (c_i N_c + q_i)$$

$$Q_u = 50,13 \text{ tf}$$

$$Q_u = \sum_n q_{uit} A_i$$

HÉLICE 1

H1= 0,762 m
 D1= 0,25 m
 A1= 0,05 m²

c= 13 tf/m²
 φ= 31 °
 γ= 1,7 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 20,63
 Ny= 18,56

Qult= 5,91 tf

HÉLICE	DIÂMETRO (m)	PASSO (m)	ÁREA (m ²)	PROFUNDIDADE (m)	COESÃO (tf/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)	PESO ESPECÍFICO (tf/m ³)
1	0,25	0,095	0,05	17,85	13	31,1	1,70
2	0,30	0,095	0,07	17,09	13	31,1	1,70
3	0,36	0,095	0,10	16,17	13	31,1	1,70
4	0,36	0,095	0,10	15,11	11	29,8	1,70
5	0,36	0,095	0,10	14,04	8	27,6	1,60
6	0,36	0,095	0,10	12,97	7	26,8	1,60

HÉLICE 2

H1= 0,9144 m
 D1= 0,3 m
 A1= 0,07 m²

c= 13 tf/m²
 φ= 31 °
 γ= 1,7 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 20,63
 Ny= 18,56

Qult= 8,30 tf

HÉLICE 3

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²

c= 13 tf/m²
 φ= 31 °
 γ= 1,7 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 20,63
 Ny= 18,56

Qult= 11,88 tf

HÉLICE 4

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²

c= 11 tf/m²
 φ= 29,8 °
 γ= 1,7 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 17,99
 Ny= 15,15

Qult= 10,08 tf

HÉLICE 5

H1= 1,0668 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²

c= 8 tf/m²
 φ= 27,6 °
 γ= 1,6 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 14,09
 Ny= 10,46

Qult= 7,37 tf

HÉLICE 6

H1= 1,8 m
 D1= 0,36 m
 A1= 0,1 m²

c= 7 tf/m²
 φ= 26,8 °
 γ= 1,6 tf/m³

Nc= 9,00
 Nq= 12,92
 Ny= 9,15

Qult= 6,59 tf