



# METODOLOGIA PARA O CONTROLE DE QUALIDADE DOS ESTAQUEAMENTOS TIPO HÉLICE CONTÍNUA – A ROTINA SCCAP

A técnica de controle proposta fundamenta-se no autocontrole da execução dos elementos de fundação a partir da medição automatizada do trabalho realizado ou da energia necessária para a escavação de cada estaca do estaqueamento, executada com equipamento tipo hélice contínua monitorada. As rotinas propostas pela técnica SCCAP, entre as quais a medida do trabalho realizado ao escavar uma estaca, a indicação da velocidade crítica de perfuração e o controle estatístico do estaqueamento, podem orientar a perfuração e indicar durante a execução se é necessário corrigir a profundidade pré-estabelecida em projeto.

O SCCAP, incorporado ao software de monitoramento das estacas hélices contínua, parte de uma amostra coletada (trabalho realizado nas estacas deste grupo) junto ao subconjunto da população, o estaqueamento, para agrupar esses dados em uma distribuição de frequência, determinando a sua média e o seu desvio padrão. Ele permite montar critérios de aceitação em função da média e do desvio padrão, possibilitando consequentemente a realização do controle automatizado, em tempo real, do restante do estaqueamento com base em uma grandeza física, o trabalho realizado ou a energia necessária para a execução de uma estaca.

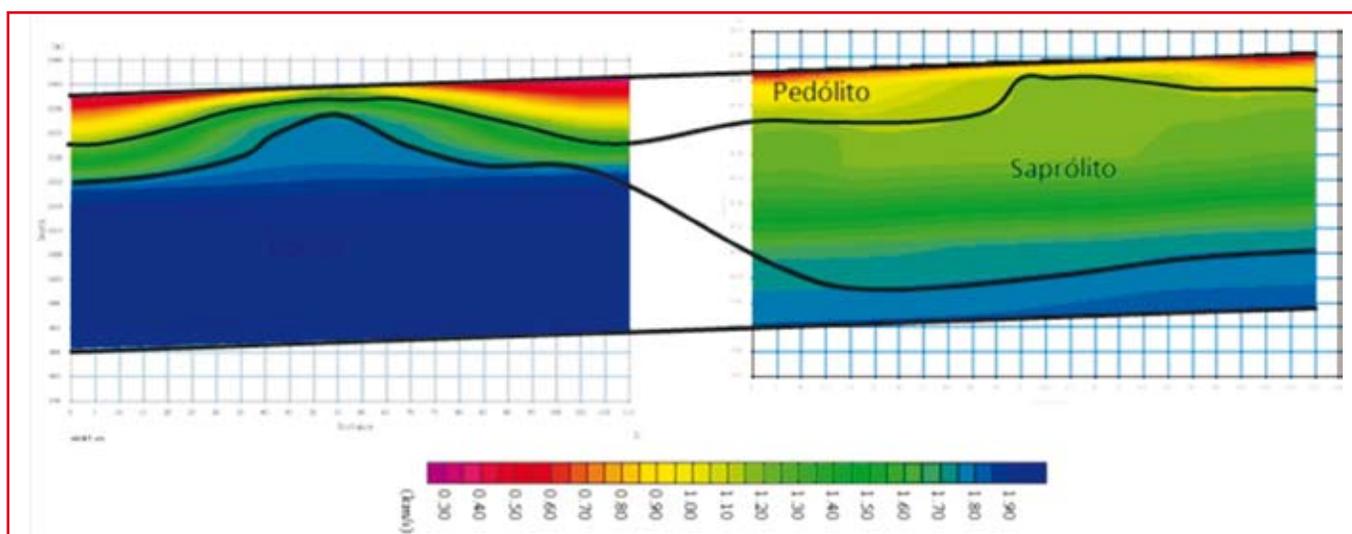
**Carlos Medeiros Silva**

EMBRE Empresa Brasileira de Engenharia e Fundações Ltda,  
[carlos@embre.com.br](mailto:carlos@embre.com.br)

**José Camapum de Carvalho**

Universidade de Brasília,  
[camapum@unb.br](mailto:camapum@unb.br)

Com a técnica proposta, o controle de execução dos elementos de fundação, da escavação à concretagem, passa a ter função mais nobre que o da simples verificação das condições de execução. Através das rotinas propostas, o executor e o projetista podem verificar o trabalho realizado



Investigação de campo – Ensaio Geofísico

que está relacionado com a capacidade de carga adotada em projeto durante a execução de cada elemento da fundação, ajustando o projeto ponto a ponto.

## CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA

No Brasil, recentemente, estão sendo empregadas estacas do tipo hélice contínua em locais com presença de nível d'água. Estas estacas devem possuir como principal vantagem o maior controle na execução quando comparadas a outros tipos de fundação. Entretanto, tem-se observado que o seu monitoramento e os dados obtidos através dele são negligenciados e, muitas vezes, usados apenas como propaganda enganosa. Segundo Albuquerque et al (2001), este tipo de fundação surgiu em meados da década de 50 nos Estados Unidos, passando a ser utilizado na Europa a partir da década de 70, chegando ao Brasil na década de 80.

Inúmeros métodos desenvolvidos para o cálculo da capacidade de carga de estacas hélice contínua foram propostos recentemente, dentre os quais podemos citar: o Método de Alonso (1996), baseado no SPT-T; o Método de Antunes & Cabral (1996) e o Método de Cabral et al (2000), baseados no SPT; o Método de Vorcaro

& Velloso (2000), que utiliza análise de regressão múltipla, dando um enfoque estatístico ao cálculo; e o Método de Bustamante & Gianeselli (1998), com base em resultados de ensaios de SPT, CPT e PMT, métodos descritos de forma resumida em Albuquerque et al (2001).

Entretanto, não foi encontrada nenhuma proposta ou rotina de controle que relacione o trabalho realizado ou a energia dissipada durante a execução das estacas com a sua capacidade de carga.

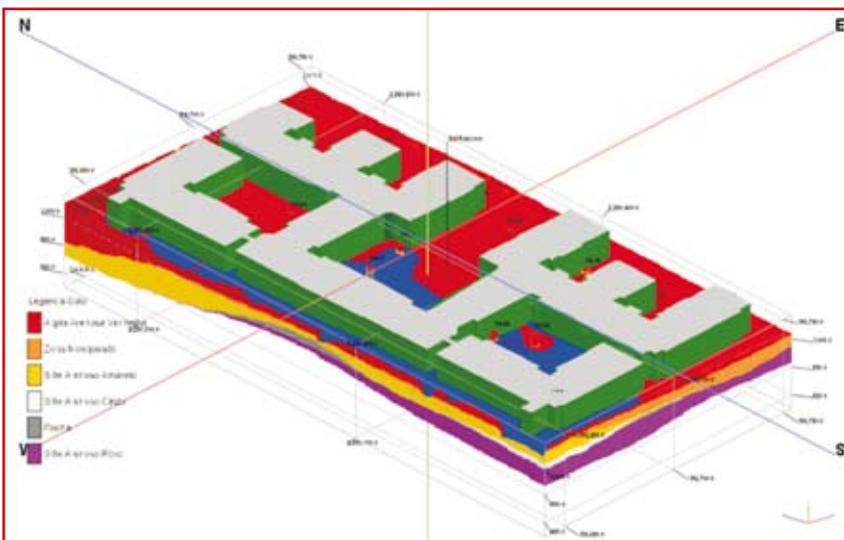
Algumas metodologias empíricas sobre o controle de qualidade através do torque para verificação do desempenho de ancoragens helicoidais utilizadas em linhas de transmissão de energia podem ser encontradas. Estas ancoragens possuem técnicas de instalação que se assemelham a de uma estaca hélice contínua. Tsuha (2006, 2007), através dos resultados dos ensaios de modelagem física em centrífuga, verificou a relação teórica entre o torque de instalação durante a cravação e a capacidade de carga a tração das estacas hélices cravadas em solos arenosos, sinalizando que pode existir uma relação entre o torque acumulado, a energia dissipada ou o trabalho realizado durante a escavação de uma estaca hélice e sua capacidade de carga.

Araujo et al (2009) procuraram compreender o comportamento e a interação entre o torque e o solo do Distrito Federal. Eles analisaram resultados de provas de carga e suas relações entre o torque obtido durante a escavação de uma estaca, o NSPT e a capacidade de carga para solos de uma obra edificada na orla no lago Paranoá, em Brasília, no complexo hoteleiro Ita Brasil (veja figura 4). Eles perceberam que sob condições controladas o torque acumulado, o SPT médio ao longo da estaca e a capacidade de carga são dependentes e proporcionais.

Existem grandes semelhanças entre o processo de cravação/escavação das estacas helicoidais e a escavação das estacas hélices contínua, principalmente no processo de introdução da ferramenta no solo. É possível também afirmar que ambos realizam trabalho (W) pela atuação de uma força, neste caso variável, que provoca deslocamento e conseqüentemente a introdução do trado no solo. Todo o trabalho gerado nesta operação é dissipado pela ação do atrito e pela energia gasta na desestruturação do solo, tratando-se, portanto, de um processo onde a energia gerada não é conservada.

Mecanismo semelhante a este é obtido na cravação de um amostrador padrão durante um ensaio NSPT, onde quase toda energia é dissipada pelo atrito amostrador-solo. Mas é preciso lembrar que as forças de atrito, aqui consideradas "forças não-conservativas", tentem a dissipar a energia mecânica realizando trabalho negativo. Entretanto, a energia total, em seu sentido amplo, se conserva, pois as forças de atrito são convertidas em calor que também é uma forma de energia.

Um alerta para a importância do impulso durante a execução de uma estaca hélice foi feito por Araujo et al (2009). Eles lembraram que uma força ou um torque de pequena magnitude, aplicado durante um grande espaço de tempo, pode gerar o mesmo



Modelo 3D baseado nos ensaio de campo sondagens SPT e Rotativa

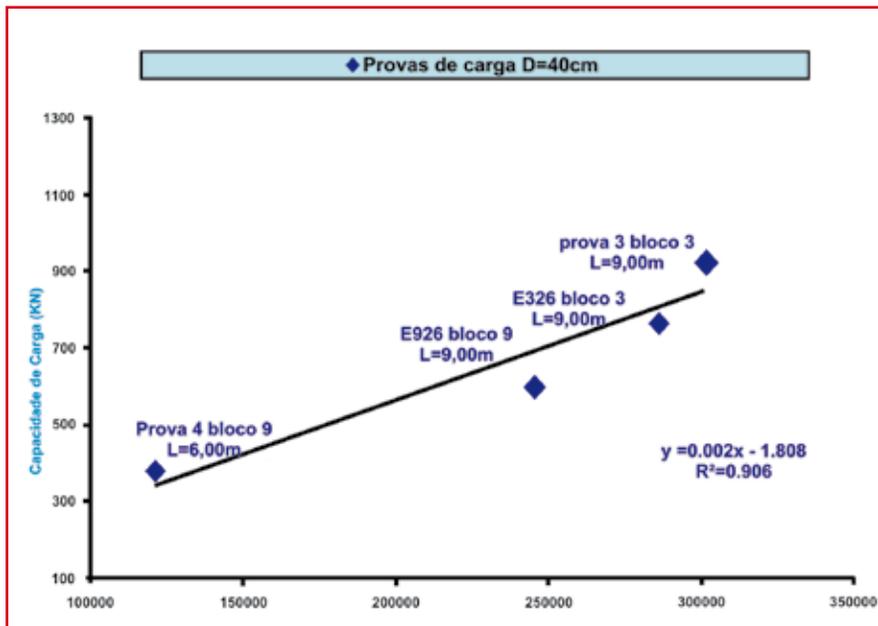


Figura 1 – Capacidade de carga última vs. torque acumulado – Linha de tendência linear

deslocamento provocado por uma força ou um torque de magnitude elevada aplicado em um curto intervalo de tempo.

Entretanto, é possível afirmar que o trabalho nos dois casos é equivalente, pois o deslocamento final será o mesmo, ou seja, a potência, que é o trabalho realizado por unidade de tempo, está diretamente ligada ao conceito acima apresentado. Uma máquina de maior potência gera um torque de grande magnitude e realizará em menor tempo o trabalho necessário para escavar uma estaca, quando comparada a uma máquina de menor potência que precisará de mais tempo para escavá-la.

Em uma máquina hélice contínua, o torque disponibilizado é dependente da potência dos motores mecânicos, da bomba hidráulica, das cilindradas dos motores hidráulicos, das relações entre o pião e a engrenagem do cabeçote, dentre outros fatores.

Araujo et al (2009) executaram seis provas de carga em estacas com diâmetro de 40 cm, com o objetivo de verificar a relação entre o torque, a pressão de injeção e a capacidade de carga. Do total das estacas ensaiadas, três foram executadas com profundidade de 9,00 m, cota de assentamen-

to da obra, e uma com 6,00 m, com as pressões médias de injeção de concreto adotadas na obra, ou seja, foram monitoradas e concretadas com pressão de injeção de concreto variando entre 0,3 e 1,0 bar, pressão comumente utilizada na região. Outras duas estacas foram executadas variando-se a pressão, uma com pressão média de injeção de 5,0 bar e outra com pressão de injeção próxima de zero, visando observar a influência dessa pressão na capacidade de carga.

É importante salientar que Araujo et al (2009) controlaram a velocidade de avanço da hélice e a rotação propositalmente, procurando manter estas duas importantes variáveis sob controle. Eles mantiveram a velocidade de avanço entre 150 m/h e 180 m/h e a rotação entre 6 e 8 r.p.m., minimizando o efeito do impulso. Este é um procedimento de difícil implantação durante a execução de uma obra, mas que conduziu o experimento a resultados satisfatórios (veja figura 1).

Todas as análises de capacidade de carga das estacas feitas por Araújo et al (2009) foram realizadas através do torque acumulado. Acreditava-se, naquele momento, que a grandeza a ser controlada era o torque, pois deveria estar diretamente relacionada com a

capacidade de carga, o que de fato ocorre quando as condições de execução estiverem sendo controladas. Observou-se que os valores de carga última, obtidos nas provas de carga e correspondente à deformação equivalente a 10% do diâmetro, são correlacionáveis com o torque acumulado, somatória do torque médio obtido metro a metro durante a execução da estaca. Esta relação apresentou correlação satisfatória.

## INFLUÊNCIA NA CAPACIDADE DE CARGA

Outros fatores podem influenciar de forma positiva ou negativa a capacidade de carga da estaca, pois durante a cravação/escavação podem ser adotados procedimentos inadequados. Como exemplo, podemos ver que Viggiani (1989) propôs uma velocidade crítica para o avanço da escavação, onde a velocidade não deve ser inferior a este limite, abaixo desta velocidade, que é função das dimensões da hélice e de sua rotação, porque pode haver descompressão do solo.

Também é preciso evitar o excesso de paralisação durante a escavação com a hélice girando, operação conhecida na prática da engenharia de fundações como alívio. Este procedimento transporta o solo para a superfície, reduzindo o nível de confinamento da hélice. Ressalta-se ainda que a pressão de injeção do concreto contribui para aumentar ou diminuir a capacidade de carga das estacas, pré-adensando o solo circunvizinho à estaca ou quebrando a estrutura de determinados tipos de solo como, por exemplo, o da argila porosa de Brasília.

Até a escolha do equipamento está diretamente ligada ao bom desempenho das fundações. Verifica-se que, em algumas obras, onde o equipamento está subdimensionado, utiliza-se o artifício de retirada total da hélice para limpeza total ou parcial do trado, possibilitando assim a finalização da escavação. Nestes casos,

não há mais a execução uma estaca tipo hélice contínua.

Logo, fica evidente que a capacidade de carga está ligada a diversos fatores, e não apenas ao torque ou ao trabalho medido durante a escavação. Mas para estacas hélices executadas dentro de condições técnicas recomendadas e controladas, o torque acumulado e, principalmente, o trabalho realizado durante a escavação de uma estaca, pode ser uma ferramenta útil para a tomada de decisões durante e após a sua execução.

A variabilidade geotécnica em termos de resistência NSPT na obra analisada pode ser verificada na figura 2. Esta variabilidade obrigou a adoção de profundidades variáveis no projeto de fundações com o intuito de manter a mesma capacidade de carga para estacas com o mesmo diâmetro.

## O MÉTODO SCCAP

No método executivo e de monitoramento tradicional, a profundidade de escavação é previamente fixada pelo projetista e geralmente não é alterada durante a execução. No entanto, em um perfil com geologia estrutural dobrada, como é o caso do Distrito Federal, tal prática pode conduzir a erros significativos, principalmente quando o solo não amostrado, solo entre furos de sondagem, apresenta baixa resistência.

O método SCCAP busca eliminar esse risco por meio do controle de cada estaca durante o próprio processo de escavação. O equipamento utilizado foi um EM 60, de fabricação CZM Foundation Equipment, que efetua a transferência de torque para a ferramenta de perfuração, hélice, por meio de um cabeçote de rotação posicionado ao pé da torre de perfuração, Botton Drive CFA. A posição do cabeçote possibilita a utilização de uma força axial descendente, pull down, para auxiliar a escavação em solos resistentes.

Foi utilizado o sistema de monitoramento SACI, da Geodigitus, que é

Profundidade (m)	Número de golpes por camada											
	Furo 01	Furo 02	Furo 03	Furo 04	Furo 05	Furo 06	Furo 07	Furo 08	Furo 09	Furo 10	Furo 11	Furo 12
1	7	6	6	6	7	6	7	7	4	8	7	4
2	4	4	5	5	3	5	6	2	4	4	7	3
3	2	4	2	5	4	5	4	4	2	4	6	4
4	2	4	4	7	4	7	4	4	5	7	7	4
5	4	6	6	10	6	10	4	5	8	10	8	7
6	4	6	8	15	7	15	8	8	10	12	10	10
7	8	7	4	18	8	18	14	9	8	4	6	5
8	7	7	13	13	9	13	14	9	9	4	4	8
9	5	11	30	30	29	30	6	11	6	6	4	10
10	14	24	30	30	9	30	4	11	9	8	7	11
11	32	12	32	32	10	32	7	12	22	11	14	11
12	58	31	56	56	12	56	11	9	19	17	14	14
13		52			12		15	15	15	20	18	21
14					16		18	19	18	23	22	24
15					18		20	23	21	31	22	29
16					20		22	21	29	44	29	48
17					22		19	24	48		48	
18					23		22	41				
19					38		29					
20							43					

Figura 2 – Variabilidade de resistências NSPT da obra analisada

constituído por um computador e vários sensores, descritos em Costa et al (2008). O monitoramento permite a obtenção, através de sensores, dos seguintes dados: profundidade, tempo, inclinação da torre, velocidade de penetração do trado, velocidade de rotação do trado, pressão do óleo, velocidade de retirada (extração) da hélice, volume de concreto lançado e pressão do concreto.

É importante lembrar que o sistema não informa diretamente o torque, sendo necessário converter a pressão de óleo (bar) medida no sistema em torque (N.m) e, para tanto, é necessário conhecer a especificação dos motores hidráulicos, dos redutores e a relação entre o pião do redutor e da engrenagem do cabeçote. No caso, transformando a pressão obtida máxima do sistema em torque, verificou-se que o maquinário pode produzir torque de até 66750 N.m.

O fato observado por Araújo (2008), quando comparou provas de cargas e torque acumulado em obras distintas produzidas por diferentes conjuntos (operador/mquinário), que o fator tempo está diretamente ligado a potência do equipamento e influencia diretamente a medida do torque, motivou a procura por uma grandeza que não dependesse do impulso (veja figura 1), no caso, o trabalho realizado ou a energia mecânica dissipada durante a escavação da estaca, pois esta depende apenas das forças aplicadas e do deslocamento da hélice.

Observando a execução de uma estaca hélice, pode-se afirmar que, ao final da escavação de uma estaca, a energia total dissipada ou o trabalho total realizado é a somatória do trabalho realizado pelas forças aplicadas no helicóide (trado), com o trabalho realizado pela força descendente (pull down) e mais a energia potencial inicial do sistema em relação à cota final de escavação. O trabalho produzido pela energia potência e pela força descendente, pull down, será considerado constante, pois ainda não foram instalados sensores de pressão no pistão de aplicação do pull down.

Também é importante lembrar que o primeiro depende apenas da cota final da estaca, e, o segundo, produzido pela força descendente, depende basicamente do procedimento adotado em cada conjunto, operador/mquinário. Procedimento que será inicialmente considerado como rotina de execução adotada em cada obra, pelo menos até que se possa monitorar esta grandeza para verificar a sua influência na metodologia SCCAP proposta.

Partindo-se das hipóteses acima consideradas, monitorou-se o trabalho realizado durante a escavação das estacas, que é o produto escalar do vetor força pelo vetor deslocamento. Isso quer dizer que se o ponto de aplicação da força sofrer um deslocamento finito desde a posição "a", cota inicial, até a posição "b", cota final, segundo um

determinado percurso, caminho percorrido "r", o trabalho realizado pela força será aproximadamente:

$$W = \int_a^b F \cdot dr + m_t g l_e + \int_a^b F \cdot dl_e$$

onde,  $r = \pi \cdot d$   $d$  = diâmetro do trado  
 $l_e$  = comprimento da estaca

em que, o integral, é um integral curvilíneo, pois o caminho do trado, neste caso, é o perímetro do trado multiplicado pelo número de voltas dadas

pelo helicóide durante a escavação da estaca.

A aquisição automatizada dos dados, trabalho realizado durante a escavação de uma estaca, foi implementada no software de monitoramento das estacas, permitindo a rápida aquisição de dados e consequentemente o tratamento e a análise dos dados.

Para subsidiar as análises realizou-se uma prova de carga estática sobre a estaca E12-D, bloco D, de uma obra

realizada em Brasília, Distrito Federal (veja figura 3), ensaiada de acordo com a NBR 13131/91. A estaca ensaiada apresentava diâmetro de 0,4 m e comprimento de 10,16 m que, devido ao subsolo existente na obra, foi executada a partir da cota -5,00 m, cota referenciada na sondagem da figura 2.

É apresentado nas tabelas 1 e 2 o trabalho necessário para executar dois conjuntos de estacas com diâmetro de 40 e 50 cm na obra estudada. No caso analisado, entre as estacas de 50 cm, 75 estão com 13,00 m, 59 com 11,00 m e 9 com 10,00 m de profundidade. Entre as estacas de 40 cm, 25 estão com 13,00 m, 13 com 11,00 m e 11 com 10,00 m de profundidade. O comprimento variável tenta compensar os dobramentos geológicos encontrados e registrados nas sondagens, e as estacas, apesar de apresentarem profundidades distintas, foram projetadas com capacidades de carga semelhantes.

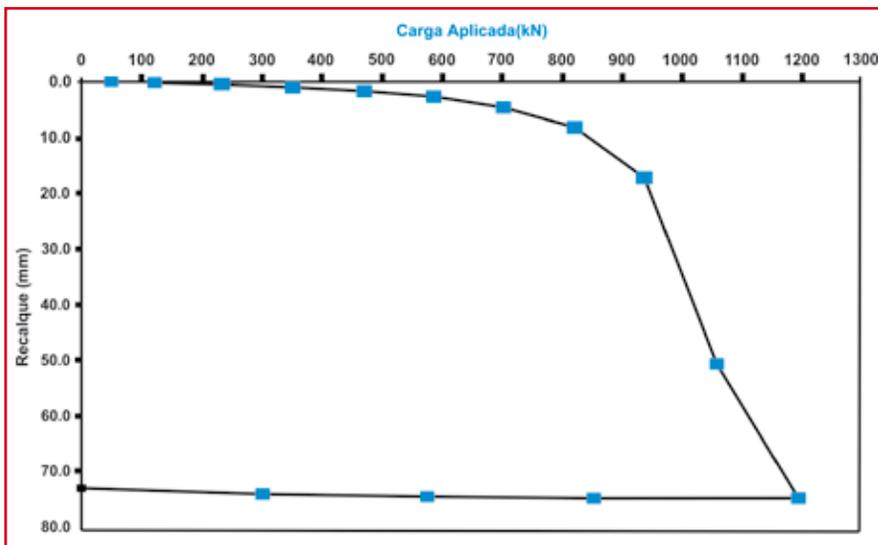


Figura 3 – Prova de carga realizada sobre a estaca tipo hélice contínua E12-D

	a	b	c	d	e	f	g
1	5.5	3.4	6.5	6.2	8.6	6.7	4.5
2	5	5	4.2	4.1	4.7	6.5	5.7
3	5	5.4	5	4.7	4.7	7	5.1
4	8.1	5.3	5.2	5.9	6.8	8	5.1
5	6.1	5.7	4.1	6.9	8.8	9.4	4.7
6	5	5.7	5.7	7.3	6.9	7.5	5.9
7	3.6	5.8	5.6	7.3	8.6	6.5	6.1
8	4.3	6	8.2	5.8	8.4	6.7	5.8
9	4.6	6.9	6.4	5.8	7.5	5.2	7
10	4.9	6.1	6.5	7	7.8	5.3	7.4
11	4.1	7.5	7.3	11.7	6.7	6.4	6.9
12	3.6	6.6	5.7	12.8	6.5	6.2	8.2
13	8.4	7.2	7.6	9.2	6.5	7.1	6.8
14	5.4	6.3	8.7	4.9	6.5	9	
15	5.8	6	8.7	3.4	6.5	8.9	
16	4.8	5.7	9.3	5	8.5	8.9	
17	5.9	8.5	6.6	4.2	8.6	8.5	
18	4.9	8.8	5.7	5	7.3	8.5	
19	4.9	7.3	4.9	4.7	7.3	7.8	
20	6.7	7.1	6.4	4.5	5.7	7.1	

Tabela 1 – Trabalho necessário para execução de 133 estacas de 50cm do residencial Ilhas Maurício em MJ

	a	b	c	d	e
1	6	2.7	7.5	2.9	6.9
2	6.4	3.5	6.6	2.8	6.9
3	3.9	6.3	5.1	4.3	7.8
4	6.3	6.8	3.1	4.9	6.5
5	5.8	4.7	3.6	5.6	6.1
6	3.6	4.8	3.8	8.8	5.4
7	4	4.9	5.1	6.6	6.7
8	4.9	4.3	3.8	7.6	6.5
9	5.8	6.1	5.1	7.1	6.6
10	5.1	8.2	4.3	8.5	7.2

Tabela 2 – Trabalho necessário para execução de 50 estacas de 40 cm no residencial Ilhas Maurício, em MJ

Esta população de estacas apresenta as características demonstradas na tabela 3: medidas de tendência central, média e mediana, o primeiro e o segundo momento das populações, desvio padrão e variância.

	estacas 40cm	estacas 50cm
Média	5.56	6.35
Mediana	5.70	6.40
Desvio Padrão	1.56	1.45
Variância	2.42	2.11

Tabela 3 – Características estatísticas das populações compostas pelas estacas de 40 e 50 cm em MJ

Fica claro, então, que o trabalho realizado ou a energia mecânica dissipada para executar uma estaca pode ser monitorado através de software apropriado, e que a utilização dos dados, e principalmente as características estatísticas desta população, o estaqueamento, podem ser utilizados para o controle de qualidade do estaqueamento.

A técnica de controle proposta se fundamenta no monitoramento da execução do estaqueamento, na orientação e correção de procedimentos durante a execução de cada estaca, utilizando como base o banco de dados obtido durante o monitoramento das estacas e as suas características estatísticas.

As rotinas propostas pela técnica SCCAP baseiam-se, principalmente, na medida do trabalho realizado ao escavar uma estaca, através de rotinas incorporadas ao software de monitoramento das estacas hélices contínua. Parte-se da comprovação de que o trabalho realizado em cada estaca do estaqueamento, executado por um determinado processo do conjunto máquina/operador, forma uma população que, quando agrupada, enquadra-se em uma distribuição normal, permitindo montar critérios de aceitação em função da média e do desvio padrão da população ou de uma amostra coletada desta população.

O conceito de processo de execução pode ser considerado universal. Assim, seja para a fabricação de um automóvel, uma partida de xadrez e até mesmo para o processo de execução de uma estaca, o conceito pode ser estendido. Particularmente, o processo de executar uma estaca pode ser representado por um sistema provido de entradas e saídas. As de entrada são representadas pelas variáveis de entrada ou parâmetros de processo (causas), como a potência do equipamento, a operação, as características geotécnicas, entre outras; e as de

saída por características de qualidade (efeito), como a capacidade de carga.

A qualidade e segurança que se deseja em um estaqueamento é que essencialmente cumpra os requisitos para os quais foi projetado, ou seja, que tenha capacidade de carga adequada e apresente deformabilidade dentro dos limites pré-estabelecidos, sem grandes variabilidades. Neste contexto, existem dois aspectos importantes relacionados a qualidade do estaqueamento: a qualidade do projeto e a qualidade da execução, ou qualidade de conformidade, que representa a adequação do estaqueamento ou da estaca em relação aos valores especificados no projeto, que são a capacidade de carga e previsão de recalque.

Controlar o processo de execução do estaqueamento é, acima de tudo, controlar sua qualidade. Consiste, preferencialmente, na:

- Avaliação do desempenho real através de provas de carga.
- Comparação do desempenho real com as previsões.
- Adoção de rotinas que garantam que o desempenho de cada estaca seja próximo do esperado.

Logo, as rotinas propostas pelo SCCAP introduzem no software de monitoramento da hélice contínua o conceito de controle de qualidade, que é manter o status quo, isto é, conferir ao processo de execução de um estaqueamento condições para que as estacas individualmente atinjam a capacidade de carga planejada.

O conjunto de rotinas propostas pelo SCCAP foi introduzido no software que controla o sistema de monitoramento SACI, da Geodigitus, visando garantir qualidade e condições para que as diretrizes de projeto sejam atendidas, destacando-se:

- Indicação, em tempo real, durante a escavação das estacas, da velocidade crítica para o

avanço da escavação Viggiani (1989); abaixo desta velocidade, que é função das dimensões da hélice e de sua rotação, pode-se ter descompressão do solo.

- A medição automática do torque e do trabalho realizado (dado) durante a execução de cada estaca do estaqueamento (população).
- O tratamento estatístico de uma amostra pré-estabelecida do subconjunto de dados da população, o estaqueamento, obtendo as medidas de tendência central e os momentos da amostra.
- A orientação da operação durante a escavação de cada estaca, indicando quando ela deve ter sua cota de apoio aumentada. Estacas que não estejam atendendo as condições pré-estabelecidas, em termos de trabalho mínimo realizado.
- A sinalização da velocidade máxima de extração, garantindo que o volume de concreto, mais o superconsumo que caracteriza cada tipo de solo, seja suficiente para o preenchimento adequado das estacas.
- Indicar para o projetista se a obra apresenta, ou não, regiões onde provavelmente as características geotécnicas são diferentes, ou seja, fazem parte de populações diferentes com média e desvio padrão discrepantes.

Preferencialmente, deve-se coletar a amostra próximo a uma prova de carga, pois assim pode-se associar as propriedades estatísticas desta amostra com a capacidade real de uma estaca. Quando não for possível esta associação, sugere-se que a amostragem seja feita em região com características geotécnicas conhecidas, como por exemplo, privilegiando regiões onde as sondagens são confiáveis e que apresentem pouca variabilidade.

Escolhida a região a ser amostrada e o seu tamanho, agrupa-se os dados por classe, ajustando-os a uma distribuição normalizada como a distribuição normal ou a de student, dependendo do seu tamanho. Consequentemente, pode-se calcular a sua média ( $\mu$ ) e o seu desvio padrão ( $\sigma$ ), permitindo que critérios de confiabilidade e aceitação sejam montados.

De uma forma geral, a validação da amostra coletada no universo do estaqueamento consiste em obter uma amostra que represente as condições gerais do projeto de fundação, portanto, é fundamental que a amostra represente o estaqueamento, prioritariamente, em termos de capacidade de carga. A confiabilidade da amostra é um conceito muito menos intuitivo, mas extremamente importante. Relaciona à “representatividade” do resultado encontrado na amostra com o de toda a população.

Logo, conhecidas as características estatísticas da amostra, média e desvio padrão, pode-se determinar critérios de aceitação para o estaqueamento. Estes critérios devem ser determinados pelo projetista e dependem do grau de incerteza da execução e das

características geotécnicas, e podem ser rigorosos ou não. Por exemplo, a NBR 12.655/96, Preparo, Controle e Recebimento de Concreto, estabelece critérios de aceitação para os lotes de concreto, dependendo do grau de controle do processo.

Critérios de aceitação devem ser discutidos e propostos, a partir do uso do SCCAP em outras regiões, propiciando a formação de bancos de dados maiores e consistentes. No momento, o SCCAP incorporado no software de monitoramento SACI, da Geodigitus, traz em sua primeira versão, três critérios:

1. Será aceita a estaca que, ao atingir a profundidade mínima de projeto, tenha realizado durante a escavação da estaca um trabalho necessário e medido ( $w$ ) maior que a média ( $\mu$ ) dos trabalhos medidos da amostra ( $W \geq \mu$ ).
2. Será aceita a estaca que, ao atingir a profundidade mínima de projeto, tenha realizado durante a escavação da estaca um trabalho necessário e medido ( $w$ ) maior que a média ( $\mu$ ) mais o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos trabalhos medidos da amostra ( $W \geq \mu + \sigma$ ).

3. Será aceita a estaca que, ao atingir a profundidade mínima de projeto, tenha realizado durante a escavação da estaca um trabalho necessário e medido ( $w$ ) maior que a média ( $\mu$ ) mais duas vezes o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos trabalhos medidos da amostra ( $W \geq \mu + 2\sigma$ ).

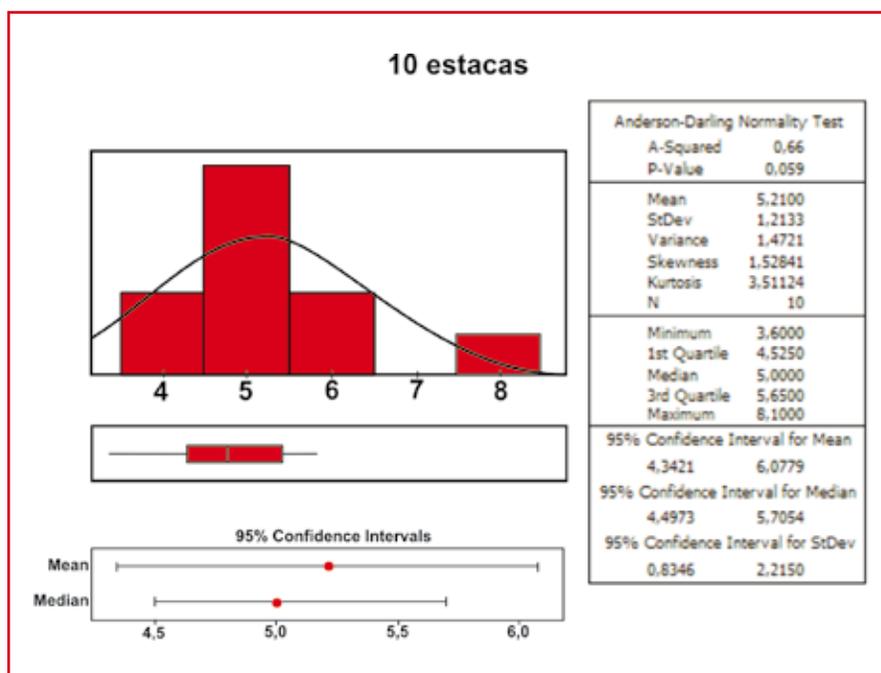
O estaqueamento analisado foi executado sem adoção dos critérios acima propostos para permitir as análises estatísticas apresentadas, em especial à de normalidade.

Para as análises, foram aplicados os critérios 1 e 2 no banco de dados das tabelas 1 e 2, onde foi retirada uma amostra de cada população. Para a amostra das estacas com 40 cm de diâmetro utilizou-se os dados, trabalho realizado, obtidos durante a escavação das estacas com 10,00 m de profundidade, pois executou-se na obra uma prova de carga sobre uma estaca com essas características. Esses resultados encontram-se delimitados nas colunas “c” e “d” da tabela 2.

A amostra retirada para representar as estacas com 50 cm de diâmetro foi obtida durante a execução das 10 primeiras estacas escavadas na obra, todas com 13,00 m de comprimento. Estes dados estão localizados entre as linhas 1 e 10, na coluna “a” da tabela 1. Foram escolhidas as 10 primeiras estacas, pois a partir da metodologia SCCAP espera-se que todas as estacas de um estaqueamento tipo hélice contínua sejam submetidas ao controle de qualidade.

Foi aplicado nas duas amostras o teste de normalidade Anderson & Darling (veja figura 4). Como resultado do teste foi necessário expurgar um dos dados coletados para a amostra com as estacas com 50 cm de diâmetro (8,1 MJ). Ele está localizado na linha 4, coluna “a” da tabela 1, reduzindo a amostra para 9 dados.

As medidas de tendência central, média e mediana, e o primeiro e o



**Figura 4 – Teste de normalidade Anderson & Darling na amostra com 10 estacas de 50 cm**

	estacas 40cm	estacas 50cm
Média	3.97	4.89
Mediana	3.80	5.00
Desvio Padrão	0.84	0,70
Variança	0.71	0.50

**Tabela 4 – Características estatísticas das amostras normalizadas coletadas no estaqueamento em MJ**

segundo momento das populações, desvio padrão e variança, são apresentados na tabela 4.

## CONCLUSÃO

Comparando o trabalho realizado ( $w$ ) em cada estaca durante a sua escavação (tabelas 1 e 2) com a média ( $\mu$ ) do trabalho necessário para executar as estacas da amostra, critério 1 ( $W \geq \mu$ ), observa-se que, excluídas as estacas que fizeram parte da amostragem, 4 estacas com diâmetro de 40 cm e 14 com diâmetro de 50 cm realizaram trabalho acumulado menor que a média obtida nas amostras e seriam recusadas, ou seja, deveriam ser aprofundadas até superar a média obtida nas amostras.

Utilizando o critério 2, mais rigoroso, onde só é aceitável a estaca se o trabalho realizado ( $w$ ) for maior que a média ( $\mu$ ) mais o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos trabalhos realizados nas estacas da amostra ( $W \geq \mu + \sigma$ ), observa-se que, excluídas as estacas que fizeram parte da amostragem, seriam recusadas 8 estacas com diâmetro de 40 cm e 32 com diâmetro de 50 cm.

Como os resultados apresentados nas tabelas 1 e 2 foram ordenados na sequência cronológica de execução do estaqueamento, e sabendo-se que o estaqueamento foi executado sequencialmente até cobrir toda área do empreendimento, é possível verificar, por exemplo, na tabela 1, que as estacas recusadas pelo critério 1 e 2 estão agrupadas, ou seja, são estacas vizinhas que provavelmente estão implantadas em regiões com NSPT médio menor que o esperado. As regiões recusadas pelo critério 2 estão circuladas na tabela 1.

As rotinas de controle de qualidade propostas pela metodologia SCCAP, que se fundamentam no autocontrole da execução dos elementos de fundação a partir da medição automatizada do trabalho realizado ou da energia necessária para a escavação de cada estaca do estaqueamento e na aplicação de formulações que auxiliam a execução do estaqueamento, vêm se mostrando de grande importância nas obras, garantido qualidade a todo o processo, da escavação a concretagem, procurando manter principalmente os preceitos do projeto.

Entre as rotinas destacam-se a orientação da perfuração, indicando a velocidade mínima que a estaca deve ser perfurada para evitar o desconfinamento; o monitoramento da concretagem, com a orientação da extração da hélice através da contabilização do concreto injetado e da pressão de injeção do concreto.

Com a metodologia SCCAP é possível monitorar e corrigir a profundidade de cada estaca do estaqueamento. Nas obras onde foi aplicada de forma experimental, verificou-se que existe relação entre o torque e a capacidade de carga quando as condições são controladas (rotação e velocidade), e que o trabalho realizado durante a escavação, grandeza que não sofre com a influência do impulso, também está diretamente relacionado com a capacidade de carga.

As rotinas implantadas no software de monitoramento das estacas hélices medem facilmente o trabalho realizado durante a escavação das estacas, construindo um banco de dados que, agrupado em uma distribuição de frequência normalizada, pode ter suas características estatísticas calculadas e utilizadas no controle de qualidade do estaqueamento.

A aplicação de conceitos físicos e das características estatísticas na engenharia de fundações podem trazer segurança e confiabilidade para as obras monitoradas, superando pro-

blemas como o da variabilidade estratigráfica do solo e garantindo que as condições de projeto, capacidade de carga e recalque, sejam atendidas individualmente por todas as estacas. As rotinas aqui apresentadas podem representar um avanço no controle tecnológico da estacas hélices e das fundações profundas, pois os conceitos apresentados podem ser aplicados a outros tipos de estacas. 

## LEITURAS COMPLEMENTARES

ABNT Brasil (1991). Estacas – NBR-13131. Prova de Carga Estática. Metodologia Brasileira.

ABNT Brasil (1996). Concreto – NBR 12.655/96. Preparo, controle e recebimento. Metodologia Brasileira.

Albuquerque, P. J. R.; Massad, F.; Carvalho, D.; Ferreira, M. A. M. (2001). Comportamento à Compressão de Estacas Escavadas, Hélice Contínua e Hélice tipo Ômega, em Solo Residual de Diabásio. Campinas, São Paulo, SP.

Araújo, G. S. (2008). Análise da Capacidade de Carga de Estaca Hélice Contínua em Função do Torque, da Pressão de Injeção de Concreto e Parâmetros do. Monografia de Projeto Final em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 74 p.

Araújo, G. S.; Silva, C. M.; Camapum de Carvalho, J.; Paolucci, H. V. N. (2009). Capacidade de Carga em Estaca Hélice Contínua em Função do Torque Obtido Durante a Execução. I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste, I Geocentro, Goiânia-GO.

Costa, C. M. C. ; Tavares, C. A. A. ; Mota, N. M. B.; Ribeiro, L. F. M. (2008). Análise Comparativa entre o NSPT e o Torque obtido no monitoramento de estacas hélice contínua. In: SEFE VI – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, 2008.

CZM Foundation Equipment, hélice contínua EM-60, [www.czm.com.br](http://www.czm.com.br).

Geodigitus, Instrumentos Eletrônicos para Procedimentos em Fundações e Sondagens, [www.geodigitus.com.br](http://www.geodigitus.com.br).

Tsuha, C. H. C. (2006). Aoki, N. Fundações em estacas metálicas helicoidais. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, v. 2, p. 839-843.

Tsuha, C. H. C. (2007). Modelo Teórico para Controle da Capacidade de Carga à Tração de Estacas Metálicas. Tese de Doutorado em desenvolvimento na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Viggiani, C. (1989). Terreni ed Opere de Fondazione Della Cittadella Postale Nel Centro Direzionale de Napoli. Revista Italiana de Geotécnica 23, No. 3, p.121-145.