

# ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA: CORRELAÇÕES ENTRE A MONITORAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS<sup>(1)</sup>

Alberto Alonso Lázaro<sup>(2)</sup>

Claudio Michael Wolle<sup>(3)</sup>

## RESUMO

As estacas hélice contínua, introduzidas no Brasil em 1987, tiveram uma utilização crescente nos últimos anos. Os estudos do comportamento dessas estacas tem crescido na mesma proporção, com a realização de inúmeras provas de carga e de eventos técnicos específicos, tratando desse assunto.

Este artigo apresenta resultados de uma pesquisa experimental, onde 10 casos de obras são estudados, pelo relacionamento da monitoração de 105 estacas com 31 sondagens com o objetivo de se utilizar os elementos da monitoração da execução de estacas hélice contínua, como respaldo às previsões de capacidade de carga das mesmas.

Palavras-chave: fundações, estacas hélice contínua e sondagens.

## INTRODUÇÃO

As estacas hélice contínua, introduzidas no Brasil em 1987, tiveram uma utilização crescente nos últimos anos. Paralelamente a essa aceitação pelo meio técnico, ocorreu também uma intensificação das pesquisas a respeito do seu comportamento, através da realização de provas de carga, inclusive instrumentadas, com o objetivo de se estabelecer os mecanismos de transferência de carga ao longo do fuste e na ponta das estacas, e permitir a elaboração de métodos para a previsão da carga limite de ruptura e dos recalques decorrentes dos carregamentos.

No presente trabalho procurou-se estabelecer relações entre os resultados obtidos na monitoração, durante a perfuração de estacas hélice contínua, e as sondagens executadas nas proximidades dessas estacas.

## OBJETIVO

Na Engenharia de Fundações, no Brasil, a estimativa do comprimento das estacas era feita de maneira empírica, até princípios da década de 70, época na qual os procedimentos de controle utilizados restringiam-se aos gráficos de cravação e as negas. Em 1975 surge o primeiro método brasileiro de estimativa de transferência de carga em estacas, num trabalho dos engenheiros Nelson Aoki e Dirceu de Alencar Velloso (AOKI & VELLOSO, 1975), cuja sistemática foi utilizada pela maioria dos métodos que vieram à seguir. Essa sistemática estipula que a carga de ruptura (PR) é admitida igual à soma de duas parcelas, sendo uma a carga resistida por atrito lateral ao longo do fuste da estaca (PL) e outra a parcela resistida pelo solo na ponta da estaca (PP), sendo esses valores definidos por:

$PR = PL + PP$  = carga de ruptura total estipulada;

$PL = U \Sigma \Delta l \cdot r_l$  = parcela de carga resistida por atrito lateral ao longo do fuste da estaca;

$PP = A \cdot r_p$  = parcela de carga resistida pela ponta da estaca;

$U$  = perímetro da seção transversal da estaca;

$A$  = área da seção transversal da estaca, na região da ponta;

$r_l$  = tensão média de adesão (ou atrito lateral) entre a estaca e o solo, na camada de espessura  $\Delta l$ ;

$r_p$  = capacidade de carga do solo na cota de apoio da estaca;

---

<sup>(1)</sup>Trabalho apresentado no SEFE V–Seminário de Fundações Especiais e Geotecnia–São Paulo– SP Novembro/2004 - Volume I – Pg. 57.

<sup>(2)</sup>Alberto Alonso Lázaro, Geólogo, Mestre em Engenharia Geotécnica, Esteio Engenharia e Fundações Ltda

<sup>(3)</sup> Claudio Michael Wolle, Engenheiro, Consultor de Engenharia Geotécnica, Professor Doutor da Escola Politécnica da USP

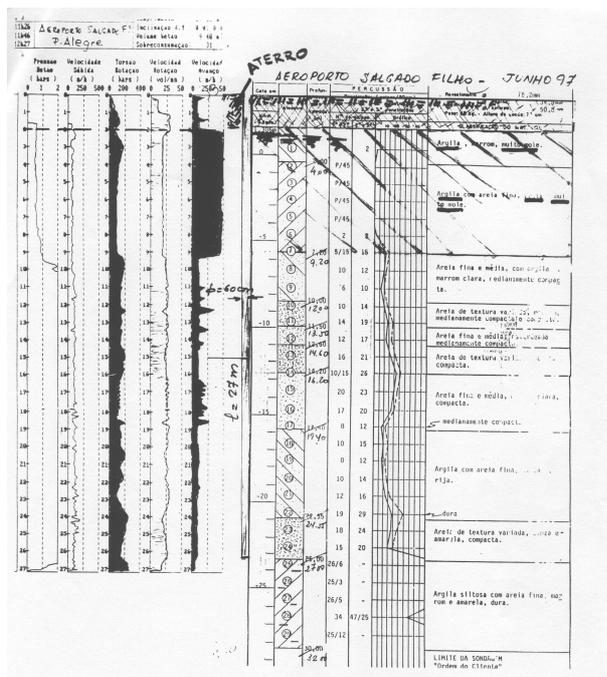


Figura 1 – Controle de execução de estacas hélice contínua (proposição) (ALONSO, 2001)

A diferença entre os diversos métodos semi-empíricos está na estimativa de  $r_1$  e  $r_p$ , que são obtidas utilizando-se geralmente resultados de ensaios CPT, SPT e SPTT; para casos em que não estão disponíveis ensaios de CPT e SPTT, os autores desses métodos apresentam tabelas de correlação entre esses ensaios e o ensaio SPT (VELLOSO & ALONSO, 2000).

Para VELLOSO (2000), no caso das estacas hélice contínua, a folha de controle da monitoração, poderia substituir os tradicionais e valiosos diagramas de cravação de que se dispõe no caso de estacas cravadas. Este autor ainda sugere, para a interpretação dessa folha de controle, uma ênfase no relacionamento entre torque e avanço.

Em VELLOSO & ALONSO (2000) é apresentada a descrição de um procedimento de comparação de resultados de monitoração de perfuração de estacas hélice contínua com resultados da sondagem mais próxima. Trata-se de uma comparação qualitativa entre as curvas de pressão e de velocidade de avanço, procurando-se manter a velocidade de rotação constante, e a curva de resistência à penetração  $N$  da sondagem. Observa-se pelo gráfico apresentado na Figura 1 que quando a resistência do terreno é menor, a velocidade de avanço é maior e a pressão registrada é menor. Já, se comparando com trechos das curvas em que a resistência do terreno é maior, a velocidade de avanço é menor e a pressão do sistema hidráulico da mesa rotativa é maior, dando respaldo à previsão de capacidade de carga elaborada com base nessa sondagem.

A grande diversidade de equipamentos existentes em nosso mercado, e o fato de o valor de pressão registrado referir-se à pressão do sistema hidráulico da mesa rotativa, durante a perfuração e não ao torque aplicado à ponteira da hélice, são considerados fatores que diminuem a confiabilidade desse procedimento (ALONSO, 2001).

Nessa pesquisa propõe-se o estabelecimento de relações entre os resultados obtidos na monitoração, durante a perfuração de estacas hélice contínua, e as sondagens executadas nas proximidades dessas estacas.

Com base em resultados médios de pressão, velocidade de rotação e velocidade de avanço procurou-se desenvolver um índice  $M$ , resultante da monitoração da perfuração de uma estaca, que se correlacionaria com um outro índice  $S$ , o qual é resultante da multiplicação dos valores de SPT, por um fator que varia em função do tipo de solo em que foi realizado o ensaio SPT, no sentido de se correlacionar o efeito de adesão do solo com a resistência de perfuração que o mesmo apresenta na execução deste tipo de estaca. A nomenclatura utilizada procurou associar os índices aos seus condicionantes básicos:

$M$  – monitoração e  $S$  – solo.

O índice denominado S, já citado, que é resultante da multiplicação dos valores de SPT, por um fator que varia em função do tipo de solo em que foi realizado o ensaio SPT, no sentido de se correlacionar o efeito de adesão do solo com a resistência de perfuração que o mesmo apresenta na execução deste tipo de estaca.

Para essa correlação foi desenvolvido um outro índice FM (“fator de máquina”), que teria um valor específico para cada tipo de equipamento utilizado na perfuração.

Como os vários métodos de previsão de capacidade de carga em estacas baseiam-se em valores médios de SPT, e considerando a menor confiabilidade associada a valores pontuais, seja do SPT, seja da própria monitoração da perfuração das estacas, do que as médias desses valores, procurou-se desenvolver correlações que utilizam tais valores médios, objetivando-se uma contribuição que possa vir a ser mais efetiva para uma melhor utilização dos resultados de monitoração de estacas hélice contínua, na prática da Engenharia de Fundações.

## **CONDUÇÃO DOS TRABALHOS**

### **Metodologia de aquisição de dados**

Para realizar a pesquisa proposta foi elaborada uma planilha de coleta de dados de monitoramento de estacas hélice contínua, que contem:

- a localização da obra, bem como a formação geológica em que a mesma está assentada;
- os elementos da estaca executada como: n° do pilar, n° da estaca, a data da execução, seu diâmetro (em cm), a profundidade atingida (em m), a cota de operação e sua carga de trabalho (em kN);
- os elementos executivos que são: marca e modelo da perfuratriz, seu torque máximo, o modelo do equipamento de monitoração e a empresa executora;
- a identificação da sondagem com seu n°, a data de execução, a empresa executora, o n° do relatório, a cota em que foi executada e a distância da estaca estudada;
- a pressão do sistema hidráulico (em bar), atingida durante a perfuração, foi coletada de metro em metro, buscando-se o valor mais representativo do trecho;
- a rotação desenvolvida (em rpm) também foi coletada de metro em metro;
- a velocidade de avanço da perfuração é o elemento que apresenta maior dificuldade de avaliação, pois o gráfico não se apresenta de forma contínua, tendo-se optado por registrar o tempo de perfuração, e o resultado da divisão da profundidade da estaca por esse tempo, de modo a se obter a velocidade de avanço média em m/min;
- a sondagem foi registrada com os valores de SPT e classificação do solo, de metro em metro, e o trecho apresentado é o coincidente com o do fuste da estaca em estudo, com a correção das cotas da sondagem e de execução da estaca.

Foram calculados os valores médios da pressão do sistema hidráulico da máquina, durante a perfuração da estaca (em bar), da rotação desenvolvida, da velocidade de avanço e do ensaio SPT.

### **Casos de obra estudados**

Os trabalhos de pesquisa foram efetuados com dados de obras executadas com o equipamento marca CMV, modelo TH18, sob a coordenação do autor, e para as quais estava disponível uma maior quantidade de informações.

A Tabela 1 enumera essas obras, identificando-se os locais onde foram executadas, os tipos de solos perfurados, os diâmetros utilizados e as profundidades atingidas. No total foram estudadas 10 obras, com 105 estacas e 31 sondagens.

Obra nº Local Cidade-UF	Formação geológica Tipo De solo	nº de sondagens	Diâmetros utilizados (cm)
		nº de estacas	Profundidades (m)
1 B. Fundação S. Caetano – SP	Complexo Pilar Siltos arenosos SR	2	40, 70 e 80
		7	12 e 12,5
2 Higienópolis Bauru – SP	Grupo Bauru Areias finas Pouco argilosas	3	40, 50 e 60
		10	10 a 15
3 Vila Beatriz S. Paulo – SP	B. Sed. S. Paulo Argilas siltosas e areias	3	70, 80 e 90
		8	18
4 Vila Augusta Guarulhos – SP	B. Sed. S. Paulo Argilas siltosas e areias	4	60, 70 e 80
		15	17
5 Itaquera S. Paulo – SP	B. Sed. S. Paulo Argilas siltosas	4	40, 70, 80 e 90
		12	10,5 a 13,5
6 Centro Osasco – SP	B. Sed. S. Paulo Argilas siltosas e areias	3	50 e 80
		5	12 a 16
7 Botafogo Rio de Janeiro – RJ	Granito P. de Açucar Argilas e Areias (SR)	4	40, 60 e 80
		12	9,45 a 15,19
8 J. Botânico Rio de Janeiro – RJ	Granito Corcovado Siltos arenosos e Siltos argilosos (SR)	3	50 e 60
		16	12 a 18
9 Itaim Paulista S. Paulo – SP	B. Sed. S. Paulo Argilas siltosas e areias	2	30
		6	12,5 a 15
10 Barra Funda S. Paulo – SP	B. Sed. S. Paulo Argilas siltosas e areias	3	50 e 60
		14	14

Tabela 1 – Relação e características das obras estudadas.

## Desenvolvimento da pesquisa

### Obtenção do índice M

A partir dessa aquisição de dados passou-se ao desenvolvimento da fórmula do índice M - que deve ser resultante da equalização dos elementos registrados na monitoração da perfuração de cada estaca.

O objetivo de se desenvolver o índice M é de se poder efetuar comparações entre resultados de monitoração de estacas hélice contínua, executadas com um mesmo equipamento, num mesmo tipo de terreno, com variações de pressões aplicadas, rotações desenvolvidas e diâmetros perfurados.

A primeira fórmula estudada foi a seguinte:

$$M1 = \frac{100 \cdot P}{R \cdot AL \cdot \emptyset} \quad \text{Fórmula (1)}$$

sendo,

**M1** – índice resultante da monitoração da perfuração da estaca, com a aplicação da Fórmula (1);

**P** – pressão média registrada no sistema hidráulico durante a perfuração, em bar;

**R** – velocidade de rotação média de perfuração, em rpm;

**AL** – velocidade de avanço linear médio durante a perfuração, em m/min;

**∅** – diâmetro da perfuração, em cm.

Com essa fórmula foram obtidos valores de M para todas as estacas estudadas, e calculado o valor médio de M para cada sondagem utilizada. A seguir verificou-se qual a dispersão percentual obtida entre os valores de M e o valor médio de M em cada sondagem, classificando-se essas dispersões em quatro categorias, a saber: dispersões menores que 10%, entre 10% e 20%, entre 20% e 30% e maiores que 30%. A tabulação dessas dispersões é mostrada na Tabela 2.

A dispersão obtida com essa fórmula foi considerada muito elevada, e então procurou-se introduzir coeficientes, expoentes e fatores aditivos aos valores componentes da fórmula, buscando-se diminuir essas dispersões e obter a equalização de resultados.

Foram encontradas 2 fórmulas de M com baixas dispersões de entre valores de M e o valor médio de M para cada sondagem utilizada, a saber:

$$M2 = \frac{100 \cdot P}{(R^{0,8} + 15) \cdot (AL^{0,8} + 1,5) \cdot \emptyset} \quad \text{Fórmula (2)}$$

**M2** – índice resultante da monitoração da perfuração da estaca, com a aplicação da Fórmula (2)

e,

$$M3 = \frac{100 \cdot (P + 34)}{(R^{0,8} + 15) \cdot ((0,8 \cdot AL)^{0,5} + 1,5) \cdot (\emptyset^{0,7} + 10)} \quad \text{Fórmula (3)}$$

**M3** – índice resultante da monitoração da perfuração da estaca, com a aplicação da Fórmula (3)

As dispersões obtidas com a aplicação das Fórmulas (2) e (3) nas estacas em estudo são mostradas na Tabela 2.

### Obtenção do índice FM

O próximo passo foi o de desenvolver uma correlação entre o índice M, resultante do monitoramento da perfuração das estacas e os valores médios de SPT e S obtidos nas sondagens próximas a essas estacas. Essa correlação deverá ser expressa por um índice denominado FM (Fator de Máquina), o qual deve estar associado ao comportamento do equipamento. Para cada equipamento em utilização no nosso meio dever-se-á, pois, encontrar um valor para FM.

Para isto, inicialmente as estacas que foram executadas com o mesmo diâmetro e profundidade, estavam vinculadas à mesma sondagem e tinham o mesmo valor de SPT médio, foram agrupadas em 48 grupos, sendo calculado o valor médio de M para cada grupo.

A primeira correlação estudada foi a seguinte:

$$FM1 = 10 \cdot M2_m / SPT_m \quad \text{Fórmula (4)}$$

onde:

**FM1** – fator de máquina, que correlaciona o índice  $M2_m$  com o SPT médio ao longo do fuste da estaca, com a aplicação da Fórmula (4)

**$M2_m$**  – valor médio de M2, resultante da monitoração da perfuração das estacas, que estão referenciadas à mesma sondagem,

**$SPT_m$**  – valor médio dos resultados de ensaios SPT, ao longo do fuste da estaca.

Essa fórmula foi aplicada no universo de 48 grupos, foi calculada a dispersão percentual dos valores de FM calculados para cada grupo em relação ao valor do FM médio, calculado para os 48 grupos, obtendo-se as dispersões que são relatadas na Tabela 3.

O valor médio encontrado para **FM1** pela Fórmula (4) foi **2,429**.

A dispersão obtida com essa fórmula foi considerada muito grande, e em seguida foram adicionados coeficientes, expoentes e fatores aditivos, aos valores componentes da fórmula, buscando com suas variações, obter uma diminuição dessas dispersões e a equalização de resultados.

A fórmula para obtenção do índice FM ficou então assim:

$$\mathbf{FM2 = 10 \cdot (M2_m^{0,5} + 3) / (SPT_m^{0,5} + 6) \quad \text{Fórmula (5)}}$$

**FM2** – fator de máquina, que correlaciona o índice  $M2_m$  com o SPT médio ao longo do fuste da estaca, com a aplicação da Fórmula (5)

Na Tabela 3 são apresentadas as dispersões de FM2 com a aplicação da Fórmula (5).

O valor médio encontrado para **FM2** pela Fórmula (5) foi **4,832**.

Com o objetivo de minimizar as dispersões encontradas procurou-se considerar uma característica, que é reconhecida pelos executores de estacas hélice, ou seja, o fato de que a dificuldade na perfuração está bastante associada à coesão do solo em que a estaca está sendo executada. Assim, passou-se a trabalhar com o índice S, obtido pela ponderação dos valores de SPT com coeficientes que variam com os tipos de solo, procurando considerar este efeito de alteração da resistência à perfuração do solo, pelas máquinas de hélice contínua. A experiência mostra que os solos mais coesivos apresentam uma dificuldade maior para a sua desagregação durante a perfuração e para o transporte do material pela hélice. Nos solos granulares, que são menos coesivos, o que acontece é o inverso, a desagregação pelo trabalho de avanço da hélice, e o transporte desse material pela mesma, encontram menor dificuldade do que a oferecida pelos solos coesivos.

O índice S foi adotado multiplicando-se um fator de correção aos valores de SPT nas sondagens; o índice Smed é a média dos valores de S em cada sondagem.

Na Fórmula (4) foi substituído o valor SPT<sub>m</sub> pelo de Smed1 (média dos valores de S1 em cada sondagem) e os coeficientes inicialmente adotados para a ponderação dos valores de SPT em função do tipo de solo foram os seguintes:

Para argilas:  $S1 = 1,0 \times SPT$  ;

Para siltes argilosos:  $S1 = 0,8 \times SPT$  ;

Para siltes arenosos:  $S1 = 0,6 \times SPT$  ;

Para areias:  $S1 = 0,4 \times SPT$  .

A nova montagem da fórmula para o fator FM é a seguinte:

$$\mathbf{FM3 = 10 \cdot M2_m / Smed1 \quad \text{Fórmula (6)}}$$

onde:

**FM3** – fator de máquina, que correlaciona o índice  $M2_m$  com o índice Smed1, com a aplicação da Fórmula (6)

**Smed1** – valor médio dos resultados calculados de S1, ao longo do fuste da estaca.

Os resultados obtidos com essa nova formulação são mostrados na Tabela 3.

O valor encontrado para **FM3** pela fórmula (6) foi **3,225**.

Nota-se que, assim como no caso da aplicação Fórmula (4), para o fator FM1, a dispersão foi muito elevada. Novamente aplicou-se a mesma metodologia para reduzir esta dispersão. Assim, substituindo os valores SPT<sub>m</sub> pelos de Smed1 correspondentes na Fórmula (5) e mantendo os coeficientes de conversão de SPT em S1 elaborou-se a montagem da Fórmula (7) a saber:

$$\mathbf{FM4 = 10 \cdot (M2_m^{0,5} + 3) / (Smed1^{0,5} + 6) \quad \text{Fórmula (7)}}$$

**FM4** – fator de máquina, que correlaciona o índice  $M2_m$  com o índice Smed1, com a aplicação da Fórmula (7)

Na Tabela 3 podemos ver as dispersões de FM4 com a aplicação da Fórmula (7).

O valor médio encontrado para **FM4** pela Fórmula (7) foi **5,105**.

### **Obtenção do índice Scale**

Nesse trabalho, a partir dos elementos registrados durante a perfuração de estacas hélice contínua, como: a pressão média do sistema hidráulico durante a perfuração (P), a rotação média da mesa rotativa (R), o

avanço linear médio (AL) e o diâmetro da perfuração ( $\emptyset$ ), pode-se calcular o valor de M, que procura representar a resistência à perfuração da estaca oferecida pelo terreno.

Com o tratamento de resultados de SPT, podemos obter o índice S, que é resultante da multiplicação do valor de SPT, por um fator, que varia em função do tipo de solo em que foi realizado o ensaio, no sentido de correlacionar o efeito de adesão do solo, com a resistência de perfuração que o mesmo apresenta. Ao valor médio dos resultados de S, num trecho de sondagem, foi atribuída a denominação Smed.

Correlacionando valores de M (resultante da monitoração de estacas), com valores de Smed (resultante das sondagens realizadas nas proximidades das respectivas estacas) chegou-se a um valor de FM médio, que tem com elemento comum o modelo de equipamento que realizou as perfurações ora estudadas.

Prosseguindo a pesquisa, procurou-se desenvolver um índice Scal (S calculado – resultante da monitoração da perfuração de estaca) que pudesse ser comparado com o índice Smed (S medido – resultante da sondagem próxima à estaca em referência).

A partir da Fórmula (7),

$$FM4 = 10 \cdot (M2_m^{0,5} + 3) / (Smed1^{0,5} + 6) \quad \text{Fórmula (7),}$$

onde:

$$FM4 = 5,105 \quad (\text{valor médio obtido});$$

M2<sub>m</sub> é substituído por M2 obtido pela fórmula (2),

$$M2 = \frac{100 \cdot P}{(R^{0,8} + 15) \cdot (AL^{0,8} + 1,5) \cdot \emptyset} \quad \text{Fórmula (2),}$$

e

**Smed1** – valor médio de S1, obtido pelo produto dos valores de SPT por fatores de correção, que variam em função do tipo de solo, a saber:

para argilas	– S1 = SPT x 1,00 ;
para siltes argilosos	– S1 = SPT x 0,80 ;
para siltes arenosos	– S1 = SPT x 0,60 ;
para areias	– S1 = SPT x 0,40 .

Isolou-se o índice Smed1 no primeiro membro da equação representada pela Fórmula (7), substituiu-se o termo FM4 pelo seu valor médio (5,105) e obteve-se a seguinte expressão:

$$Smed1 = ((10 \cdot (M2^{0,5} + 3) / 5,105) - 6)^2,$$

nessa expressão substituiu-se o termo Smed1 pelo termo Scal1, e obteve-se a fórmula (8):

$$Scal1 = ((10 \cdot (M2^{0,5} + 3) / 5,105) - 6)^2 \quad (8)$$

onde:

**Scal1** – índice S calculado, obtido pelos resultados da monitoração

de estaca hélice contínua, utilizando-se valores de M2 e FM4, com o objetivo de se comparar com o índice S medido (Smed1), obtido pelos resultados de sondagem próxima à estaca em referência.

**M2** – Índice M obtido pela Fórmula (2).

Aplicou-se a Fórmula (8) nos resultados de monitoração das 105 estacas em estudo, obtendo-se valores de Scal1 e comparou-se com os respectivos valores de Smed1. Foram calculadas as dispersões percentuais de Scal1 em relação ao respectivo Smed1.

Na Tabela 4 as dispersões encontradas estão registradas.

A seguir buscando-se uma menor dispersão de resultados, montou-se uma planilha em que todos os coeficientes das fórmulas puderam ser modificados, assim como os fatores de correção para obtenção de Smed à partir do SPT.

As fórmulas obtidas foram as seguintes:

$$M4 = \frac{100 \cdot (0,9 \cdot P)^{0,8}}{R^{1,2} \cdot (0,9 \cdot AL)^{0,5} \cdot \emptyset^{1,1}} \quad \text{Fórmula (9)}$$

**M4** – índice M obtido pela Fórmula (9)

Conversão de SPT em S2:

- Argilas  $S2 = SPT \cdot 1,0$  ;
- Siltes argilosos  $S2 = SPT \cdot 0,8$  ;
- Siltes arenosos  $S2 = SPT \cdot 0,5$  ;
- Areias  $S2 = SPT \cdot 0,4$  .

$$FM5 = 10 \cdot ((1,1 \cdot M4)^{0,5} + 3,2) / ((1,1 \cdot Smed2)^{0,5} + 6) \quad \text{Fórmula (10)}$$

**FM5** – fator de máquina, que correlaciona o índice M4 com o índice Smed2, com a aplicação da Fórmula (10)

**Smed2** – valor médio dos resultados calculados de S2, ao longo do fuste da estaca.

**FM5 = 5,165 (valor médio calculado)**

$$Scalc2 = ((10 \cdot (M4^{0,5} + 3,2) / 5,165) - 6)^2 \quad \text{Fórmula (11)}$$

**Scalc2** – índice Scalc obtido com a aplicação da Fórmula (11)

Assim como foi efetuado com a Fórmula (8) aplicaram-se as Fórmulas (9), (10) e (11) nos resultados de monitoração das 105 estacas em estudo, obtendo-se valores de Scalc2. Compararam-se os resultados com os respectivos valores de Smed2 e foram calculadas as dispersões percentuais de Scalc2 em relação ao respectivo Smed2.

Na Tabela 2 são apresentadas as dispersões encontradas nos resultados de M4 com a utilização da Fórmula (9).

Na Tabela 3 estão as dispersões de resultados de FM5 com a Fórmula (10).

Na Tabela 4 as dispersões percentuais entre Scalc2 e Smed2, com a aplicação da Fórmula (11), estão registradas.

Prosseguindo o estudo, trabalhou-se com fórmulas que determinavam o valor de Scalc a partir dos elementos registrados pela monitoração, quais sejam: a pressão média (P), a rotação média (R), o avanço linear médio (AL) e o diâmetro da estaca ( $\emptyset$ ), o tempo de perfuração (T), o volume perfurado (V) e a profundidade atingida (L); ponderando-se ainda fatores de conversão de SPT em S.

As formulações que apresentaram as menores dispersões entre Scalc e Smed são as seguintes:

### Scalc3

Conversão de SPT em S3:

- Argilas  $S3 = SPT \cdot 1,0$
- Siltes argilosos  $S3 = SPT \cdot 0,75$
- Siltes arenosos  $S3 = SPT \cdot 0,5$
- Areias  $S3 = SPT \cdot 0,5$

$$Scalc3 = \frac{P}{R \cdot (AL)^{0,5} \cdot (0,01 \cdot \emptyset)^{0,85}} \quad \text{Fórmula (12)}$$

**Smed3** – valor médio dos resultados calculados de S3, ao longo do fuste da estaca.

### Scalc4

Conversão de SPT em S4:

- Argilas  $S4 = SPT \cdot 1,0$
- Siltes argilosos  $S4 = SPT \cdot 0,7$
- Siltes arenosos  $S4 = SPT \cdot 0,55$
- Areias  $S4 = SPT \cdot 0,55$

$$Scalc4 = \frac{0,225 \cdot P \cdot (1,1 \cdot T + 2)}{R^{0,7} \cdot (V + 1)^{0,9}} \quad \text{Fórmula (13)}$$

**Smed4** – valor médio dos resultados calculados de S4, ao longo do fuste da estaca.

**T** – Tempo de perfuração da estaca em min ,

**V** – Volume perfurado em m<sup>3</sup>.

### Scalc5

Conversão de SPT em S5:

- Argilas S5 = SPT . 1,1

- Siltes argilosos S5 = SPT . 0,7

- Siltes arenosos S5 = SPT . 0,5

- Areias S5 = SPT . 0,4

$$\text{Scalc5} = \frac{0,9 \cdot P \cdot (T+2)}{(R+1) \cdot L \cdot (0,01 \cdot \emptyset)^{1,1}} \quad \text{Fórmula (14)}$$

**Smed5** – valor médio dos resultados calculados de S5, ao longo do fuste da estaca.

**L** – profundidade atingida pela perfuração em m.

### Scalc6

Conversão de SPT em S6:

- Argilas S6 = SPT . 1,0

- Siltes argilosos S6 = SPT . 0,7

- Siltes arenosos S6 = SPT . 0,6

- Areias S6 = SPT . 0,5

$$\text{Scalc6} = \frac{4 \cdot (1,05 \cdot P - 26) \cdot T^{0,5}}{R \cdot (L + 1) \cdot \emptyset} + 1 \quad \text{Fórmula (15)}$$

**Smed6** – valor médio dos resultados calculados de S6, ao longo do fuste da estaca.

Na Tabela 4 as dispersões percentuais entre Scalc2 e Smed2, com a aplicação das Fórmula (11), (12), (13), (14) e (15) estão registradas.

## RESULTADOS DA PESQUISA

Nas Tabelas 2, 3 e 4 estão as dispersões obtidas com a utilização de cada fórmula desenvolvida.

Fórmula	Índice	< 10%	>10% e <20%	>20% e <30%	>30%
(1)	M1	30 29%	25 24%	17 16%	33 31%
(2)	M2	69 66%	24 23%	10 10%	2 2%
(3)	M3	81 77%	21 20%	3 3%	0 0%
(9)	M4	40 38%	35 33%	18 17%	12 11%

Tabela 2 – Dispersões dos resultados do índice M

Fórmula	Índice	< 10%	>10% e <20%	>20% e <30%	>30%
(4)	FM1	7 15%	7 15%	4 8%	30 63%
(5)	FM2	31 65%	15 31%	2 4%	0 0%
(6)	FM3	4 8%	7 15%	7 15%	30 63%
(7)	FM4	33 69%	15 31%	0 0%	0 0%
(10)	FM5	36 75%	11 23%	1 2%	0 0%

Tabela 3 – Dispersões dos resultados do índice FM

Fórmula	Índice	< 10%	>10% e <20%	>20% e <30%	>30% e <40%	>40%
(8)	Scalc1	11 10% 10% acum.	20 19% 30% acum.	12 11% 41% acum.	15 14% 55% acum.	47 45% 100% acum.
(11)	Scalc2	11 10% 10% acum.	28 27% 37% acum.	13 12% 50% acum.	16 15% 65% acum.	37 35% 100% acum.
(12)	Scalc3	13 12% 12% acum.	17 16% 29% acum.	24 23% 51% acum.	16 15% 67% acum.	35 33% 100% acum.
(13)	Scalc4	21 20% 20% acum.	11 11% 31% acum.	15 14% 45% acum.	2 2% 47% acum.	56 53% 100% acum.
(14)	Scalc5	13 12% 12% acum.	14 13% 26% acum.	22 21% 47% acum.	9 9% 55% acum.	47 45% 100% acum.
(15)	Scalc6	12 11% 11 acum.	9 9% 20% acum.	29 28% 48% acum.	19 18% 66% acum.	36 34% 100% acum.

Tabela 4 – Dispersões dos resultados do índice Scalc

### Fatores que interferem nos resultados da monitoração

Os fatores que interferem nos resultados da monitoração de estacas hélice contínua, e na sua correlação com os resultados das sondagens, podem ser classificados em 3 grupos, quanto aos solos e as sondagens, quanto aos aspectos mecânicos e quanto aos aspectos executivos.

Fatores relativos aos solos e as sondagens:

- a heterogeneidade dos solos, principalmente dos solos residuais, podem prejudicar o estabelecimento de relações entre os resultados das sondagens e os da monitoração;
- a execução de estacas em cotas diferentes das da execução das sondagens, por exemplo quando a sondagem foi executada na cota do terreno natural e a estaca foi executada após a escavação do terreno, essa escavação pode causar um alívio do terreno, alterando sua resistência e alterando também os resultados da monitoração;
- a energia de cravação do ensaio SPT, que pode variar dependendo do local e da empresa executora, pode dificultar o estabelecimento de correlações entre os resultados de sondagens e de monitoração.

Fatores relativos aos aspectos mecânicos:

- a precisão dos sensores e sua variação entre os equipamentos, podem não ter muita importância para a execução da perfuração, mas podem influenciar de maneira considerável as correlações entre sondagens e monitoração;
- quanto ao desgaste dos motores propulsores dos equipamentos e do sistema hidráulico, o mesmo afeta a capacidade máxima do equipamento não interferindo nos resultados da monitoração, ou seja os sensores medem as pressões e rotações realmente atingidas, e não os valores máximos possíveis de serem atingidos;
- quanto ao desgaste do ferramental, este tem importância relevante, principalmente quanto ao tipo e a eficiência das garras de corte da ponteira, ou seja, se as garras estão desgastadas, o equipamento será mais solicitado, maior pressão hidráulica e torque serão aplicados, e o tempo de perfuração será maior, em comparação com o desempenho do equipamento e ferramental, que esteja em condições normais.

Fatores relativos aos aspectos executivos:

- a experiência do operador e o seu grau de conhecimento dos solos que serão perfurados, podem interferir nos resultados da monitoração, ou seja, com o objetivo de se evitar o travamento da composição de perfuração no terreno, a perfuração pode ser excessivamente cautelosa, provocando um aumento do tempo de perfuração sem alteração da pressão e da rotação registradas;
- o uso do prolongador pode acarretar o mesmo efeito que a perfuração muito cautelosa, além do tempo gasto com a operação de transferência da mesa rotativa para a parte superior do prolongador; temos a necessidade de se esvaziar parcialmente o trado, antes da entrada do prolongador na perfuração, para se evitar um “embuchamento” de solo no contato entre o topo do trado e o trecho inferior do prolongador, pois no trecho do prolongador não ocorre o transporte do solo para a superfície, e esta operação provoca um aumento do tempo de perfuração;
- a execução de estacas em solos com resistência alta e muito coesivos, também pode alterar o tempo de perfuração das mesmas, pois ocorre a necessidade do alívio de perfuração, ou seja, a manutenção da rotação sem avanço da perfuração, até que a pressão se reduza, possibilitando a retomada do avanço.

## CONCLUSÕES

A pesquisa permitiu chegar a algumas conclusões a respeito das correlações entre a monitoração de estacas hélice contínua e as características dos solos, esta pesquisa pretendeu ser uma contribuição ao meio técnico, carente de publicações sobre o assunto.

As conclusões serão divididas em tópicos, a saber:

- acerca do índice M;
- acerca do índice FM;
- acerca do índice Scal;
- considerações finais; e
- sugestões para futuras pesquisas.

### Acerca do índice M

Os bons resultados obtidos com as formulações para determinação de M2 e M3, permitem afirmar:

- é possível a correlação de elementos coletados com a monitoração de estacas hélice contínua, num mesmo ambiente (região de influência de uma mesma sondagem), utilizando um mesmo equipamento e um mesmo ferramental de perfuração;
- as formulações utilizando valores médios de pressão, rotação e avanço linear mostraram-se corretas em sua utilização;
- as maiores dispersões com M2 e M3 estão em obras em que ocorrem solos residuais, que se caracterizam pela sua heterogeneidade, e também estão relacionados com tempos de perfuração discrepantes;
- a formulação de M3 apresentou uma dispersão menor que a de M2, mas os componentes da fórmula perdem muito do seu significado.

### **Acerca do índice FM**

Os melhores resultados foram obtidos com os índices FM2 e FM4, permitindo afirmar que:

- é possível a correlação entre o índice M, resultante da monitoração de estacas hélice contínua e resultados de sondagens;
- a formulação de FM2, que relaciona bem valores da M e resultados de SPT, em que 65% dos resultados tiveram uma dispersão menor que 10% e 96% dos resultados tiveram uma dispersão menor que 20%;
- a formulação de FM3, que relaciona valores de M com Smed, melhorou os resultados de FM2, mostrando a eficiência dos fatores de conversão de SPT para S1.

### **Acerca do índice Scalc**

Os resultados obtidos com as formulações do índice Scalc permitem afirmar:

- as dispersões encontradas nas 6 formulações de Scalc foram muito acentuadas em relação aos valores correspondentes de Smed;
- uma das causas para as dispersões acentuadas pode estar no fato de terem sido utilizados valores médios de pressão, rotação, avanço linear, que tendem a esconder as suas peculiaridades;
- outro aspecto a ser considerado refere-se ao fato de os dados coletados para este estudo, não terem sofrido nenhum tratamento ou escolha prévia, e não foi registrada nenhuma ocorrência de fato que pudessem alterar os resultados;
- os registros discrepantes de tempo de perfuração contribuíram para a ocorrência destas dispersões acentuadas.

### **Considerações finais**

Finalizando, pode-se concluir que:

- o índice M (M2 ou M3) é uma ferramenta útil para se comparar resultados de monitoração de estacas hélice contínua executadas numa mesma obra, com o mesmo equipamento, porque este índice consegue relacionar de forma coerente, os elementos de pressão, rotação, avanço linear (Profundidade/Tempo) e o diâmetro da estaca, num mesmo ambiente (região de influência de uma estaca);
- as formulações de FM (FM2 e FM4) mostraram que os fatores de conversão de SPT para S, levando-se em consideração o tipo de solo, são válidos para se ajustar valores de resistência à penetração dinâmica do amostrador no ensaio SPT aos valores de resistência à perfuração do solo com o equipamento de hélice contínua;
- as dispersões encontradas com as formulações do índice Scalc desaconselham a utilização prática desses índices no atual estágio de pesquisa;
- a principal causa das dispersões encontradas no desenvolvimento do índice Scalc com relação ao índice Smed, reside nas discrepâncias verificadas nos registros dos tempos de perfuração;
- as discrepâncias nos registros dos tempos de perfuração, podem ser atribuídas a fatores mecânicos, desgaste do ferramental de perfuração, e a fatores executivos, alívio de perfuração provocados pela utilização do prolongador e pela perfuração de solos com alta resistência e coesivos.

### **Sugestões para futuras pesquisas**

Para o prosseguimento desta pesquisa sugere-se que seja procurado o aprimoramento de um índice do tipo Scalc, que relacione dados de monitoramento com resultados de sondagem, preocupando-se em registrar as ocorrências que podem levar a resultados discrepantes, principalmente no que se refere ao tempo de perfuração, como a confiabilidade das sondagens, a eficiência do ferramental, a utilização do prolongador e as situações em que ocorre o alívio da perfuração.

O balizamento destas correlações através da análise conjunta de outras informações, em especial aquelas resultantes de outros ensaios “in situ”, como o CPT, ou ainda de provas de carga realizadas sobre estacas hélice contínua, poderá lançar nova luz sobre estes estudos, seja no sentido de encorajar a continuação da busca de tais correlações, seja no sentido de limitar os procedimentos de monitoração e o uso de índices, como o “M” e o “FM”, aqui desenvolvidos, a terem seu uso restrito ao controle de execução deste tipo de fundação.

Finalizando, sugere-se ainda que os estudos ora realizados e os índices aqui desenvolvidos sejam testados também em outras obras, nas quais venham a ser utilizados outros equipamentos de execução de estacas hélice, assim como em terrenos com características diversas dos aqui apresentados.

## **AGRADECIMENTO**

Os autores agradecem ao Engº Helvio Tarozzo, da Esteio Engenharia e Fundaoes Ltda, pelo apoio e contribuiao determinantes para a realizaao deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALONSO, U. R. Reflexões sobre os principais tipos de fundaoes de uso corrente. In: WORKSHOP PRÁTICA DE FUNDAOES PROFUNDAS. 2001, São Paulo. SINDUSCON-SP. 11p.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. Um método aproximado para estimativa da capacidade de carga de estacas. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOILS MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5o, 1975, Buenos Aires, Proceedings..., Buenos Aires, 1975. v.1, p.367-376.

LÁZARO, A. A. Estacas hélice contínua: correlaoes entre a monitoraao e características dos solos. Dissertaao de mestrado – EPUSP, 2003, 256p.

VELLOSO, D. A . Fundaoes: projetos, execuao, patologia e reforço. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAOES ESPECIAIS -SEFE IV, 4o, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo, A.B.M.S.,2000a. v.2, p.1-10.

VELLOSO, D.A.; ALONSO, U.R. Previsão, controle e desempenho de fundaoes. In: NEGRO Jr. et. al. Previsão de desempenho x Comportamento real. São Paulo: NRSP/ABMS, 2000. p. 95-139.