

Modelagem Analítica do Controle de Estacas Hélice Contínuas utilizando o Software Mathematica

Mylane Viana Hortegal

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, myvhorteg@gmail.com

André Luis Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, abrasil@unb.br

RESUMO: No Brasil ao se falar em fundação de obras residenciais ou comerciais, é comum notar a execução de estacas hélices contínuas devido à produtividade e consequente avanço no prazo da construção. Porém, faz-se necessário atentar para a metodologia executiva desse tipo de estaqueamento e principalmente os parâmetros obtidos durante a execução das estacas hélice contínua. A falta de controle acaba por acarretar problemas no desempenho das estacas, além da perda da capacidade de carga dessas estacas. Para isso, propõe-se nesse trabalho um estudo analítico para o controle de estacas hélice contínua, com a utilização de um sistema computacional que combina manipulação simbólica, cálculo numérico, cálculo gráfico e uma sofisticada linguagem de programação, através do programa Mathematica. Esse é um programa que surgiu nos anos 80, sendo a primeira versão comercial realizada pelo Wolfram Research Inc.. Para a obtenção desse controle, utilizou-se os parâmetros do processo executivo da estaca hélice contínua, além de parâmetros associados à estaca, como o torque, o diâmetro, o comprimento da estaca, o módulo do solo, a energia, a velocidade de perfuração, a resistência do solo, a variação de pressão arterial do operador, entre outros, além da obtenção da capacidade de carga obtida a através de correlações com a energia dispendida no processo executivo e de parâmetros geotécnicos obtidos de literatura. Os dados oriundos da estaca hélice contínua e do processo executivo foram obtidos a partir de um caso de obra em que os maquinários dispunham de instrumentação e total controle dos parâmetros executivos. Desta forma, obteve-se as correlações entre cada um dos parâmetros de modo que foi possível fixar um ou mais parâmetros para posterior entendimento do comportamento do estaqueamento, a obtenção da capacidade de carga a partir de dados de energia, ou torque dispendido durante a execução da estaca hélice contínua, além de ser permitido notar a veracidade de respostas quando do controle de dados incertos em valores reais e verdadeiros no caso das estacas hélice contínua.

PALAVRAS-CHAVE: Analítico, Mathematica, Hélice Contínua

1 INTRODUÇÃO

As estacas hélice contínua atualmente são demandadas como solução de fundação em obras executadas nos centros urbanos devido à confiabilidade e a necessidade de se transmitir elevados carregamentos para os solos, muitas vezes, saturados e estruturalmente instáveis, o que nem sempre é possível por meio de algumas

soluções de fundações como estacas Franki, Strauss ou ainda Broca.

Considerando a vantagem de aliar a alta produtividade à ausência de vibração, a baixa frequência de ruídos e ao controle de qualidade na execução, essas características asseguram o comportamento previsto no projeto de fundações.

Para tanto, a medida do trabalho é um elemento de controle do comportamento dessas estacas.

Assim, pesquisadores e empresas vêm buscando uma forma de verificar e analisar esse dado para entender o comportamento da interação solo-estaca no que tange os aspectos de garantia da confiabilidade na execução e na qualidade dos estaqueamentos.

Ao se falar em controle dos estaqueamentos, vários autores citam ensaios no elemento estrutural ou até mesmo no maciço terroso, no intuito de verificar a sua interação. Porém, para estacas hélice contínua, o que se observa é a falta de informações bibliográficas ou ainda dados referentes ao controle no processo executivo.

Brown et al. (2007) citam que em estacas hélice contínua o controle ocorre desde o processo de perfuração até a fase de concretagem. Na perfuração é necessário atentar para que o volume de solo transportado não seja excessivo, e que o operador junto ao engenheiro deve registrar a taxa de perfuração do trado no solo, considerando que se baseia na teoria de um parafuso se fim. Os autores relatam que sempre ocorrem incertezas quanto à essa taxa, uma vez que ela é estimada durante a fase de projeto e construção, e obtida através da experiência dos profissionais. Sendo os valores reais da taxa definidos através de dados de prova de carga e pré-furos.

Silva (2011) através da lei de conservação de energia, propôs uma metodologia e equações para quantificar a energia ou o trabalho realizado para escavar uma estaca, tornando possível estabelecer uma metodologia de monitoramento para os estaqueamentos escavados. A metodologia desenvolvida pelo autor foi chamada de SCCAP (Silva, Camapum de Carvalho, Araújo e Paolucci), e consiste em incrementar as equações de trabalho realizado ou energia necessária para escavar uma estaca ao sistema SACI a fim de garantir a uniformização dos estaqueamentos em termos de energia, capacidade de carga e deformabilidade.

Silva et al. (2012) determinam que a partir do sistema de transferência de calor presente na execução de uma estaca helicoidal, é possível obter a energia através da integração volumétrica em função da variação da

temperatura do solo. Assim, tem-se que a energia total do sistema será obtida por:

$$E_{sist} = \iiint_V \rho_s \cdot C_{ps} \cdot [T_s(r, z, t) - T_s(r, z, 0)] \cdot dV \quad (1)$$

onde,

E_{sist} = energia total do sistema [J];

ρ_s = densidade do solo [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

C_{ps} = calor específico do solo [$\text{J} \cdot \text{m}^{-30} \cdot \text{C}^{-1}$];

T_s = temperatura do solo [$^{\circ}\text{C}$];

(z, r, t) = coordenadas cilíndricas [m,m,s];

r = raio do trado da hélice [m];

z = profundidade [m];

t = tempo [s];

V = volume.

A partir da energia total do sistema, faz-se necessário entender o comportamento do solo durante a execução da estaca, ou seja, busca-se conhecer a resistência do solo no momento em que a estaca é executada. Silva et al. (2012) mostraram que as condições geotécnicas e estruturais devem ser consideradas, uma vez que o posicionamento da superfície resistente do solo varia em função das propriedades geológica-geotécnicas do solo.

2 IMPORTÂNCIA DO TORQUE E DA CAPACIDADE DE CARGA

O torque pode ser medido indiretamente através da monitorização da queda de pressão através de um motor hidráulico, sendo a queda de pressão determinada por leitura da pressão de entrada e subtraindo a pressão de retorno (Perko, 2009). Um exemplo da correlação entre a queda de pressão através de um motor e o torque é mostrado na Figura 1, em que cada motor tem uma correlação única entre torque e capacidade, e os fabricantes costumam oferecer diferentes relações teóricas. Ressalta-se que as curvas de correlação dependem das diferentes viscosidades do fluido hidráulico, das velocidades de fluxo e das temperaturas operacionais.

Dentre os parâmetros obtidos durante o processo executivo desse tipo de estaca, o torque apresenta correlações com a força cisalhante e a capacidade do solo.

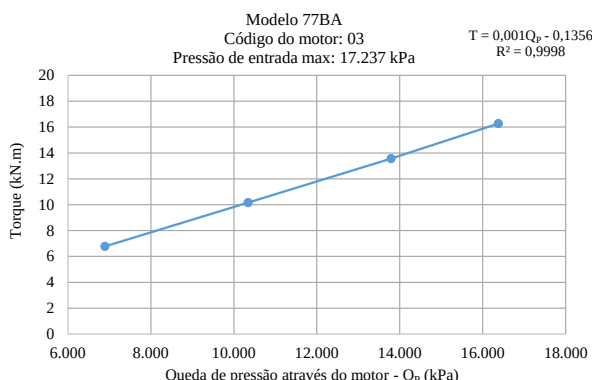


Figura 1. Exemplo de relação torque-pressão do fabricante (modificado - Perko, 2009)

As correlações do torque com a capacidade de carga do solo existem desde 1960. A primeira publicação foi apresentada na 12ª Conferência Internacional sobre Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundação no Rio de Janeiro por Hoyt e Clemence (1989), em que a partir da análise de 91 provas de carga em 24 tipos de solo, foi apresentada uma relação empírica conforme a Equação 2 a seguir.

$$Q_{ult} = k.T \quad (2)$$

onde, k é um parâmetro que depende do fuste da hélice, e independe do número e do tamanho das placas, além da condição de solo.

Na análise do sistema geotécnico, nota-se que esse é um sistema termodinâmico, por apresentar um estado de equilíbrio em que os parâmetros ambientais, tais como pressão e temperatura, impostas na maior parte da composição do sistema. Esta abordagem é utilizada para prever a estabilidade do sistema e o impacto da mudança de condições ambientais. Na termodinâmica, a energia total do sistema é dada pela soma do total de energia cinética e potencial das moléculas no sistema, sendo que a primeira lei da termodinâmica é a aplicação do princípio da conservação de energia.

Na engenharia geotécnica, a primeira lei considera que a variação da energia interna é igual ao calor adicionado ao sistema mais o trabalho realizado. Ao considerar a primeira lei da termodinâmica aplicada para a instalação de uma estaca hélice contínua (tal como um sistema de adiabática), tem-se que a energia pode ser expressa como o trabalho realizado pela força descendente, que é igual ao aumento

da sua energia interna, e uma função do estado do sistema. Considerando ainda a energia exercida durante a instalação da estaca hélice contínua pode ser obtida considerando energia de penetração e a energia de perda dos sistema, sendo dada por:

$$E_{instalação} = E_{penetração} + E_{perda} \quad (3)$$

Considerando que a energia de carregamento é igual à energia de penetração, a capacidade de carga pode ser dada por:

$$C = \frac{6\pi k (2\pi T + F_{di} p) \left[r^2 + \sum_{i=1}^m (R_i^2 - r^2) \right]}{3\pi k^2 \left[r^2 + \sum_{i=1}^m (R_i^2 - r^2) \right] + 8\pi^2 \alpha \left[3r^3 \lambda + \sum_{i=1}^m (R_i^3 - r^3) t_i \right]} \quad (4)$$

Onde,

C é a capacidade de carga [kN];

k é o coeficiente de proporcionalidade entre a energia de carga e da capacidade de carga, assumido como linear;

T é o torque [kN.m];

F_{di} é a força descendente [kN];

p é o passo da lâmina [mm / rev];

r é o raio do cubo [m];

R_i é o raio do helicóide [m];

m é o número total de hélices;

α é a constante de proporcionalidade entre o torque devido ao cisalhamento ao longo do tubo e a tensão de penetração;

λ é o comprimento efetivo do tubo [m];

t_i é a espessura da hélice [m].

3 METODOLOGIA

O trabalho consiste em analisar a energia e a capacidade de carga das estacas hélice contínuas através da aplicação do mathematica por meio de modelos analíticos e estatística, o que permitirá um controle mais denso e real da qualidade dos estaqueamentos executados, e a possibilidade de implementação nos maquinários de campo, além de ter a sua forma de programar em C++ mais fácil de ser utilizada para futura implementação nos maquinários.

3.1 Escolha das variáveis

Com o levantamento dos parâmetros existentes durante o procedimento de execução das estacas hélice contínuas, escolheu-se as variáveis de campo presentes no processo executivo e variáveis geotécnicas do solo.

Com a preparação dos intervalos fez-se a análise analítica das energias totais e capacidade de carga para duas condições de solo.

3.2 Dados da obra

A obra utilizada no presente trabalho estava situada em Brasília, com controle total dos parâmetros executivos. A obra equivale a uma construção comercial com a execução de aproximadamente 500 estacas hélice contínua, com diâmetros variando de 30 a 80cm, e profundidade de 30 m no máximo.

Considerando a impossibilidade de execução de ensaios durante o andamento da obra, os dados relacionados aos parâmetros geotécnicos do solo foram obtidos de literatura, correlacionando com os dados de SPT reais obtidos da obra, perfazendo um total de 45 ensaios de sondagem.

3.3 Análise Analítica

O software utilizado no trabalho foi o MATLAB® da empresa The Mathworks, Inc, será utilizado o programa Mathematica 10.2, que é um sistema computacional que combina manipulação simbólica, cálculo numérico, cálculo gráfico e uma sofisticada linguagem de programação (Silveira, 1998). É um programa que surgiu nos anos 80, com a primeira versão comercial realizada pelo Wolfram Research Inc. em 1988. Em janeiro de 1991 foi criada a versão 2.0 e em 1992, a versão 2.1.

4 RESULTADOS

Para a análise foram utilizadas duas condições de solo presentes na obra estuda e com complementação de parâmetros geotécnicos

obtidos de literatura quando da ausência de dados laboratoriais.

Na Figura 2 nota-se que quanto maior o módulo de elasticidade do solo maior será a energia dispendida para o processo de cravação da estaca.

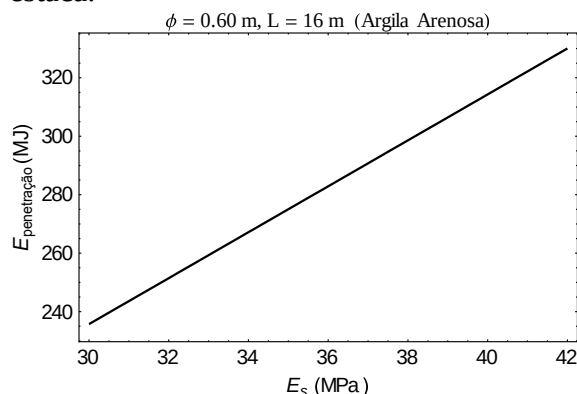


Figura 2. Variação Energia de penetração com o módulo de elasticidade do solo

O mesmo comportamento é observado na Figura 3, tendo que quanto maior o módulo de elasticidade do solo maior será a energia dispendida para o processo de cravação. Os valores de energia tendem a ser menores em função do formato do material ser mais arredondado e não apresentar coesão como o material argiloso.

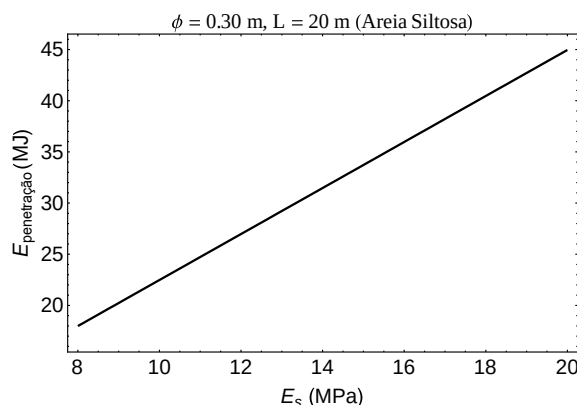


Figura 3. Variação Energia de penetração com o módulo de elasticidade do solo

A Figura 4 apresenta uma relação do comprimento da estaca com a energia de penetração, para um solo areno siltoso e diâmetro da estaca de 0,30m. Percebe-se que quanto maior o módulo do solo, maior a necessidade de cravação da estaca e maior a energia dispendida.

A Figura 5 apresenta uma relação do comprimento da estaca com a energia de

penetração, para um solo argila arenosa e diâmetro da estaca de 0,30m. Percebe-se que quanto maior o módulo do solo, maior a necessidade de cravação da estaca e maior a energia dispendida. A energia tende a ser bem maior em materiais argilosos em virtude da coesão do material e grau de aderência do solo no trado durante o processo de perfuração.

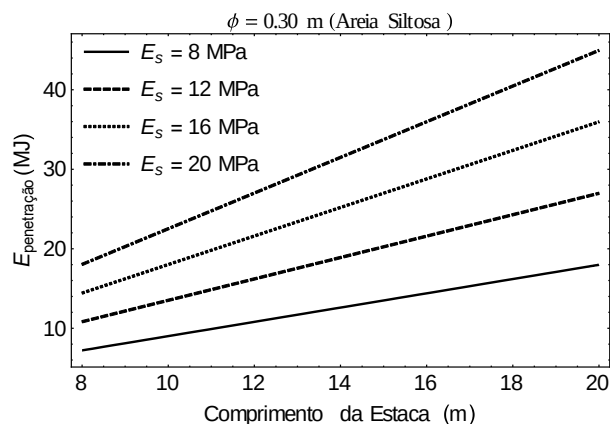


Figura 4. Variação Comprimento com energia de penetração

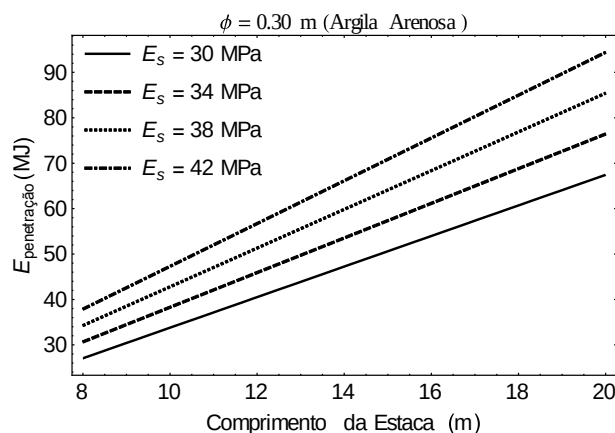


Figura 5. Variação Comprimento com energia de penetração

A Figura 6 apresenta uma relação da profundidade da estaca com a capacidade de carga, para um solo areno siltoso e diâmetro da estaca de 0,80m. Percebe-se que quanto maior o módulo do solo, maior a necessidade de cravação da estaca e maior a capacidade de carga gerada. Considerando que a capacidade de carga está relacionada ao comprimento da estaca, maior comprimento tende a refletir maior carga.

A Figura 7 apresenta uma relação da profundidade da estaca com a capacidade de carga, para um solo argila arenosa e diâmetro da

estaca de 0,80m. Percebe-se que quanto maior o módulo do solo, maior a necessidade de cravação da estaca e maior a capacidade de carga gerada. Considerando que o solo tende a dar maior atrito lateral, a capacidade de carga reflete em maior valor obtido.

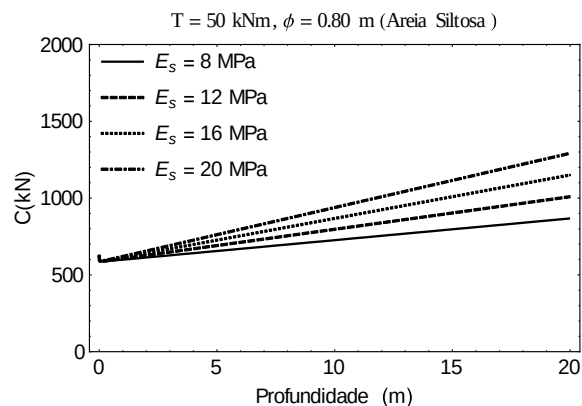


Figura 6. Variação Comprimento com energia de penetração

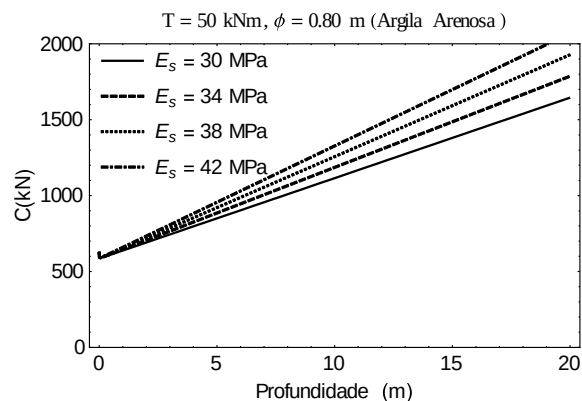


Figura 7. Variação da profundidade com a Capacidade de carga com energia de penetração

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou um estudo analítico do controle do estaqueamento hélice contínua com a utilização do mathematica, em que foi possível através de equações de energia analisar o comportamento da estaca para cada parâmetro estudado.

Percebeu-se que estacas com maior profundidade tendem a ter maior dispêndio de energia de penetração quando em solos de alto módulo de elasticidade. Tal comportamento se assemelha na comparação com a capacidade de carga das estacas, em que solos com maior módulo de elasticidade tendem a ter maior

capacidade de carga quando se aumenta a profundidade do estaqueamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- BROWN, D. A., DAPP, S. D., THOMPSON, W. R., LAZARTE, C. A. (2007). *Design and Construction of Continuous Flight Auger (CFA) Piles*. Geotechnical Engineering No. 8.
- HOYT, R.M., CLEMENCE, S.P. (1989). *Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil*. Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil Vol. 2, pp. 1019–1022.
- PERKO, Howard A. (2009). *Helical piles: A practical guide to design and installation*. J. Wiley, New Jersey, 528p.
- SILVA, C.M. (2011). *Energia e Confiabilidade Aplicadas aos Estaqueamentos Tipo Hélice Contínua*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-070/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 311p.
- SILVA, C. M.; CAVALCANTE, A. L. B.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2012). *On Modelling Continuous Flight Auger Pilings by means of Energy*. International Journal of Science and Engineering Investigations, v. 1, p. 11-16.
- SILVA, C. M.; CAVALCANTE, A. L. B.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2012). *On Modelling Continuous Flight Auger Pilings by means of Energy*. International Journal of Science and Engineering Investigations, v. 1, p. 11-16.
- SILVEIRA, F. A. R. (1998). *Utilização do Mathematica como Ferramenta de Apoio ao Ensino de Matemática*. Dissertação de Mestrado, Inst. De Informática, PUCRS, 129f.