



Proposta de um Critério Racional para Seleção de Equipamento de Estaca Hélice Contínua Baseado na Energia de Instalação

Luiz Henrique Felipe Olavo
Engenheiro Civil, ENSOLO Engenharia de Solos e Fundações Ltda, Pinhais, Brasil,
luiz@ensolo.com.br

RESUMO: O autor gostaria de propor um processo racional para seleção do equipamento a ser utilizado para execução de estacas hélice contínua, baseado na equação proposta por SILVA e CAMAPUM DE CARVALHO (2020) que correlaciona a energia de instalação com a capacidade resistente da estaca. Desta forma, os dados de entrada para o sistema seriam a capacidade esperada, a profundidade e diâmetro da estaca obtidas a partir de método semi-empírico, bem como dados do sistema de perfuração como a geometria do trado (diâmetros do trado e do tubo central, espessura das aletas, passo da hélice), número de rotações aplicadas, força descendente do equipamento e peso do trado. O número de rotações pode ser obtido impondo-se uma velocidade descendente capaz de não desconfinar o solo, obtendo-se consequentemente o torque mínimo para que este efeito indesejado não ocorra. Obviamente, cabe ao projetista e executor da obra a escolha final do equipamento, podendo ser reavaliada uma capacidade de carga mais baixa caso o torque da máquina disponível seja insuficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca hélice contínua, equipamento de perfuração, torque.

ABSTRACT: The author would like to propose a rational process for selecting the equipment to be used for the execution of continuous flight auger piles, based on the equation proposed by SILVA and CAMAPUM DE CARVALHO (2020) that correlates the installation energy with the resistant capacity of the pile. In this way, the input data for the system would be the expected capacity, the depth and diameter of the pile obtained from a semi-empirical method, as well as data from the drilling system such as the auger geometry (diameters of the auger and the central tube, blade thickness, auger pitch), number of rotations applied, equipment downforce and auger weight. The number of rotations can be obtained by imposing a descending speed capable of not loosening the soil, consequently obtaining the minimum torque so that this unwanted effect does not occur. Obviously, the final choice of equipment is up to the designer and executor of the work, and a lower load capacity may be reassessed if the available machine torque is insufficient.

KEYWORDS: Continuous flight auger pile, drilling equipment, torque.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

A estaca hélice contínua é uma das soluções mais comuns adotadas atualmente na engenharia de fundações brasileira, porém existem à disposição do mercado equipamentos de diversos portes e capacidades, dificultando a seleção de um equipamento que seja adequado à obra. Equipamentos de maior capacidade possuem custos mais elevados de transporte e operação, porém equipamentos de menor porte podem não executar as estacas de maneira segura em determinadas situações. A tabela 1 mostra as características dos equipamentos fabricados atualmente pela empresa brasileira CZM Ltda. Observa-se na tabela 1 que todos estes equipamentos seriam capazes de executar uma estaca de 50cm de diâmetro e 18 metros, porém com características muito diferentes e lembra-se ainda que existem outros fabricantes, aumentando esta gama.

Tabela 1. Equipamentos para estaca hélice contínua fabricados pela CZM Ltda. Valores marcados com * não informados (CZM, 2023)

| Modelo | Diâmetro máximo (cm) | Prof. máxima (m) | Torque (kN.m) | Força de extração (kN) | Força de pull down (kN) | Peso (kN) |
|-----------|----------------------|------------------|---------------|------------------------|-------------------------|-----------|
| EK300CFA | 120 | 38 | 330 | 1100 | * | 1020 |
| EM400CFA | 50 | 18 | 43 | 215 | * | 186 |
| EK250CFA | 80 | 28 | 177 | 626 | 316 | 800 |
| EM800/24 | 80 | 24 | 125 | 612 | 200 | 420 |
| EM1000/26 | 100 | 26 | 200 | 1000 | 300 | 550 |
| EM1000/32 | 100 | 32 | 240 | 1100 | 300 | 700 |
| ES28 | 100 | 30 | 250 | 700 | * | 560 |

Com o objetivo de garantir a segurança, a norma de fundação brasileira na sua versão anterior (ABNT, 2010) exigia características mínimas dos equipamentos. Na ocasião da revisão da norma, foi proposta pela comissão uma nova tabela mais rigorosa com as características dos equipamentos, o que desagradou aos executores por reduzir a aplicabilidade de máquinas existentes, com os executores argumentando que a resistência do solo não era levada em consideração na tabela do projeto de norma. Notou-se uma falta de um critério mais claro e objetivo para a seleção destas máquinas levando em consideração as características locais, o que levou à pesquisa atual e ao método proposto neste artigo.

2 Metodologia proposta

SILVA (2011) propôs que as estacas hélice contínua fossem controladas pela energia aplicada durante a sua instalação no terreno. SILVA E CAMAPUM DE CARVALHO (2020) correlacionaram a energia de instalação de uma estaca hélice contínua com a sua capacidade de carga geotécnica, através da equação 1, onde E_i é a energia de instalação (MJ), C_{ult} é a carga de ruptura da estaca (kN), α é um fator de ajuste dependente do solo (1,0 para siltes e areias e 1,20 para argilas do Distrito Federal), β é um fator de ajuste dependente do maquinário (1,00 para equipamentos CZM Bottom Drive), D é o diâmetro da estaca (m), L é o comprimento da estaca (m).

$$E_i = \left[\left(\frac{C_{ult}}{70} \right) + D^2 \cdot L \right] \cdot \alpha \cdot \beta \quad (1)$$

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





SILVA (2011) propôs que a energia de instalação fosse dada pelo trabalho realizado pelo trado durante a inserção no terreno. Este trabalho pode ser calculado pela equação 2, onde W_R é o trabalho (J), Z_b é o comprimento da estaca (m), m_{hc} é a massa do trado (kg), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), F_{di} é a força descendente aplicada ao sistema pelo equipamento (N), m é o número de voltas dado pelo trado durante a sua inserção no terreno, F_i é a força aplicada para rotacionar o helicóide (N), r é o raio da estaca (m).

$$W_R = E_i = \int_0^{Z_b} m_{hc} \cdot g \cdot dz + \int_0^{Z_b} F_{di} \cdot dz + \int_0^{m2\pi} F_i \cdot r \cdot d\theta \quad (2)$$

Propoe-se que o resultado das duas equações sejam combinados. Para isto, o valor da carga de ruptura pode ser obtido a partir de um método semi-empírico de cálculo, uma vez que esta metodologia proposta foi pensada para uso durante a etapa de projeto, anteriormente à obra. O diâmetro e comprimento da estaca são os adotados em projeto. Os valores de α e β da equação 1 ainda precisam ser confirmados para outros solos e outros tipos de equipamento.

Os dados da equação 2 incluem o comprimento da estaca, o qual provém do projeto, a massa do sistema de perfuração, a qual pode ser obtida em catálogos de fabricantes e a força descendente aplicada ao helicóide, a qual nem sempre é a máxima possível pelo equipamento, portanto recomenda-se cautela na escolha deste valor. Inclui também o número de voltas dado pelo helicóide. O produto da força tangencial aplicada (F_i) multiplicado pelo raio (r) é igual ao torque aplicado pelo equipamento ao trado. O número de voltas pode ser obtido a partir da velocidade de inserção do trado.

BRONS E KOOL (1988) citam que é fundamental que não ocorra o desconfinamento do solo para o bom desempenho de estacas hélice contínua. VIGGIANI (1993) propôs que o trado fosse inserido com uma velocidade superior à velocidade necessária para remover o solo que causasse o desconfinamento, calculando esta velocidade como se o trado se comportasse como um parafuso transportador, chamando esta velocidade de velocidade crítica. SILVA (2011) ajustou a equação que fornece o valor desta velocidade, resultando na equação 3, onde n_i é a velocidade de rotação do trado, λ o passo do helicóide, d_0 o diâmetro do tubo de concretagem e d_n o diâmetro da estaca. SILVA (2011) acrescentou o fator β_{vc} . Caso n_i seja considerado unitário, se obtém o avanço do trado para 1 volta e com isto, o número de voltas para se atingir a profundidade.

$$V_{pi,crit} = n_i \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{d_0^2}{d_n^2}\right) / \beta_{vc} \quad (3)$$

VIGGIANI (1993) propôs que a velocidade de cravação do trado removesse somente o volume equivalente ao tubo central de concretagem. SILVA (2011) propôs que também se permitisse a remoção de um volume equivalente ao empolamento do solo e à espessura das aletas do helicóide, representado pelo fator β_{vc} . O empolamento do solo pode ser obtido a partir de FABIANI (1981), reproduzido na tabela 2 e a espessura das aletas a partir de catálogos de equipamentos.

VIGGIANI (1993) ainda concluiu que é necessária a aplicação de um empuxo descendente efetivo para que seja possível obter uma velocidade similar à crítica. Este empuxo varia com a profundidade e seu valor máximo é dado pela equação 4, onde γ é o peso específico do solo, N_q é

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



um fator de capacidade de carga, k é um coeficiente de empuxo e ϕ é o ângulo de atrito do solo. Durante a execução, esta força descendente é aplicada pelo peso do trado somado ao pull-down da máquina.

Tabela 2. Influência do empolamento após a escavação (FABIANI, 1981)

| Tipo de Solo | Estado do solo | Fator de empolamento | | |
|----------------|----------------|----------------------|-------|------------|
| Areia | Natural | 1,00 | 1,11 | 0,95 |
| | Solta | 0,90 | 1,00 | 0,86 |
| | compactada | 1,05 | 1,17 | 1,00 |
| Argila | Natural | 1,00 | 1,43 | 0,90 |
| | Solta | 0,70 | 1,00 | 0,63 |
| | compactada | 1,11 | 1,59 | 1,00 |
| Estado do solo | | natural | solta | compactada |

$$Q_{max} = \gamma \cdot d_n^3 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot \frac{N_q^2}{k \cdot t \cdot g \phi} \cdot \frac{d_0^4}{d_n^4} \quad (4)$$

Propõe-se que o fator β_{vc} seja dado pelo fator de empolamento obtido pela tabela 2, considerando-se a variação do estado do solo para um solo em estado solto, majorado por um mais a razão entre a espessura da aleta e o passo do helicóide.

3 Exemplos de Aplicação

Supondo-se uma estaca com 50cm de diâmetro e 15 metros de comprimento para uma carga de ruptura geotécnica de 1900kN em solo argiloso da região de Brasília. Considera-se equipamento do tipo CZM Bottom Drive. Nesta condição, o parâmetro α vale 1,2 e o parâmetro β vale 1,0. Substituindo os valores na equação 1, se obtém uma energia de instalação de 37MJ.

Com base na equação 4 determina-se o valor da força axial descendente a ser aplicado para a garantia de obtenção da velocidade crítica conforme VIGGIANI (1993). Considerou-se o peso específico do solo igual a 14kN/m³, um ângulo de atrito interno de 20°. Considerando k igual ao coeficiente de empuxo no repouso (1-sen ϕ), obtém-se k igual a 0,65. N_q foi obtido a partir da proposição de TERZAGHI (1943), com o valor de 6,4. O valor de d_0 , diâmetro do tubo central de concretagem foi obtido a partir de CASAGRANDE (2023), com o valor de 0,1778m. Desta forma, se obtém um valor de força descendente aplicada de 0,48kN.

Ainda a partir de CASAGRANDE (2023) tem-se que a massa de um segmento de trado com 3 metros é de 540kg e da ponteira é de 325kg. Considerando-se que a ponteira possui 1,5 metro e somando-se mais 5 segmentos de trado, tem-se que o peso deste conjunto é de 30,3kN, portanto não será considerado uso da força descendente da máquina uma vez que somente o peso do trado já garante uma força maior que a calculada pela equação 4.

Com base na equação 3 obtém-se a velocidade necessária para não se desconfinar o terreno. Neste caso, em função da velocidade de rotação. De acordo com CASAGRANDE (2023), o passo do helicóide é de 0,4 metro. A espessura da chapa é de 0,015 metro, equivalente a 3,75% do passo. Considerando-se que o solo é uma argila em condição natural, pela tabela 2 tem-se um fator de empolamento de 1,43, o que ajustado à espessura do trado leva a um fator β_{vc} de 1,48. Isto leva à conclusão que, para cada volta, o trado deve avançar 0,24 metro. Ou seja, a velocidade crítica é

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





igual à velocidade de rotação multiplicada por 0,24. Como cada volta avança 0,24 metro, para que seja atingidos os 15 metros, são necessárias 62,5 voltas do helicóide.

Substituindo estes valores na equação 2 e considerando-se que a força aplicada ao helicóide é constante, obtém-se para uma energia de instalação de 37MJ, um produto $F_i.r$ igual a 93.064N.m, que é o torque mínimo necessário para que o equipamento execute adequadamente esta estaca. Da tabela 1, tem-se que todos os equipamentos teriam trado com diâmetro e comprimento suficiente para esta execução, porém a máquina EM400CFA não teria torque suficiente, restando executar a estaca com algum dos outros modelos.

Da mesma forma, caso se fosse executar uma estaca com o mesmo diâmetro e carga de ruptura, porém em um solo mais resistente, onde se obtivesse a carga em 5 metros. Por ser um solo mais resistente, considerou-se um ângulo de atrito interno de 32° , o que leva a um valor de N_q de 23,2, e peso específico de 18kN/m^3 . Neste caso, pela equação 4 chega-se a uma força descendente de 6,47kN.

Considerando-se a adoção de apenas dois segmentos de trado e mais a ponteira, tem-se um peso do conjunto de 14,1kN, já superior ao necessário. Pela tabela 2, considerando-se solo equivalente ao compactado, o fator de empolamento passa a ser de 1,59, o que leva a valor de β_{vc} de 1,65. Pela equação 1 a energia de instalação passa a ser de 34MJ. A velocidade crítica, para este novo fator de empolamento passa a ser equivalente a um avanço por rotação de 0,21 metro. Para este avanço por rotação, serão necessárias 23,6 rotações para se atingir os 5 metros de profundidade.

Substituindo-se estes valores na equação 2, tem-se que o produto $F_i.r$ necessário é de 228.816N.m, sendo este o valor do torque necessário para a execução da estaca. Das máquinas listadas na tabela 1, apenas a EK300CFA, a EM1000/32 e a ES28 possuem capacidade para executar esta estaca nesta situação.

Em uma condição intermediária, em um solo com duas camadas onde a camada superior seja equivalente ao primeiro exemplo e vá até 10 metros de profundidade e a camada inferior seja equivalente ao segundo exemplo, indo até a ponta da estaca, que foi considerada com 12 metros.

Fazendo-se uma proporção com o primeiro exemplo, tem-se que a primeira camada seria responsável por uma capacidade de carga por atrito lateral de 1270kN, enquanto a segunda seria responsável por 630kN e analisando-se as camadas separadamente, tem-se que a energia de instalação seria de $24,8 + 11,4 = 36,2\text{MJ}$. Considerou-se que o trado foi montado da mesma forma como no primeiro exemplo.

Para a camada superior, para uma energia de 24,8MJ, da mesma forma como foi feito para o primeiro exemplo, obtém-se um torque de 93.499N.m. Para a segunda camada, para uma energia de 11,4MJ, da mesma forma como foi feito no segundo exemplo, porém considerando-se o trado montado como no primeiro exemplo, obtém-se um torque de 189.972N.m, o que impede o uso, além da EM400CFA do primeiro exemplo, mas também da EK250CFA e da EM800/24.

Nota-se que as características geométricas do trado influenciam no resultado. Tomando o exemplo 1 e usando-se trados com diferentes passos, tem-se o quarto exemplo de aplicação, cujo

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

resultado está expresso na tabela 3, ainda desconsiderando-se o maior peso dos trados de menor passo.

Tabela 3. Influência do passo do trado no torque a ser aplicado para uma energia de instalação de 37MJ.

| Diâmetro (m) | Comprimento (m) | Massa do trado (kg) | Passo (m) | β_{vc} | Torque (N.m) |
|--------------|-----------------|---------------------|-----------|--------------|--------------|
| 0,50 | 15 | 3025 | 0,10 | 1,64 | 22.200 |
| 0,50 | 15 | 3025 | 0,20 | 1,54 | 47.289 |
| 0,50 | 15 | 3025 | 0,30 | 1,50 | 72.706 |
| 0,50 | 15 | 3025 | 0,40 | 1,48 | 96.942 |
| 0,50 | 15 | 3025 | 0,50 | 1,47 | 123.756 |
| 0,50 | 15 | 3025 | 0,60 | 1,47 | 149.141 |

Os resultados da tabela 3 foram plotados graficamente na figura 1, onde é possível perceber uma relação linear entre as duas grandezas.

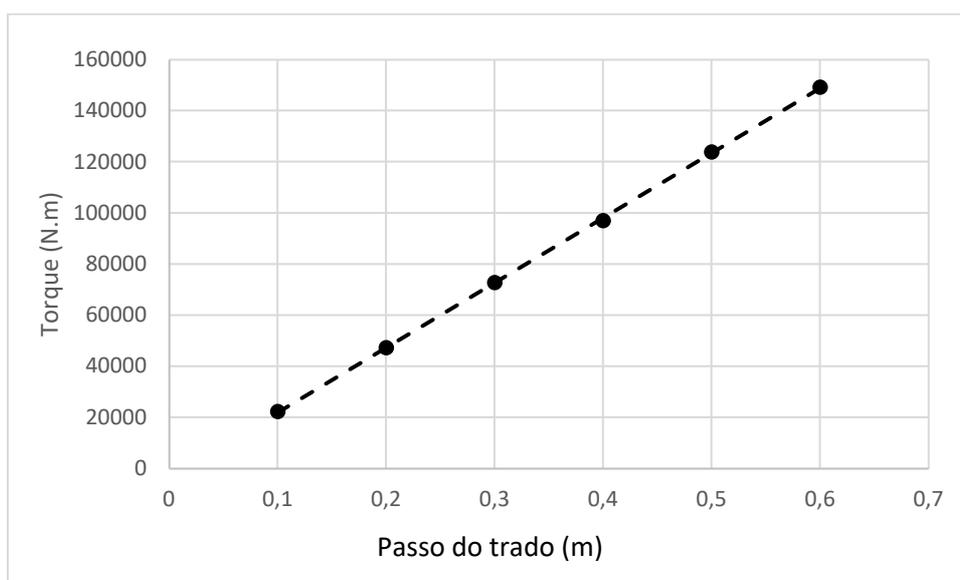


Figura 1. Gráfico do torque versus o passo do trado, onde se observa um comportamento linear.

Como quinto exemplo de aplicação, é variado o diâmetro das estacas, considerando-se que aos 15 metros todas atingiriam uma carga de ruptura equivalente ao dobro da carga para uma tensão média de 5MPa. Foi considerado um solo argiloso uniforme e os trados conforme CASAGRANDE (2023). É possível perceber que o torque necessário aumenta com o quadrado do diâmetro.

Como sexto e último exemplo de aplicação, foi feita a previsão do torque necessário para se executar a estaca do primeiro exemplo, porém em solo arenoso. Pela equação 1, foi obtida uma energia de instalação de 30,9MJ. Como esperado, o valor é 20% menor que o necessário para solo argiloso, em função da diferença no valor do fator α .

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Tabela 4. Resultados obtidos para diferentes diâmetros.

| Diâmetro (m) | Comprimento (m) | Massa do trado (kg) | Capacidade de carga (kN) | Energia de Instalação (MJ) | β_{vc} | Torque (N.m) |
|--------------|-----------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|--------------|
| 0,40 | 15 | 2655 | 1250 | 24,3 | 1,49 | 47.970 |
| 0,50 | 15 | 3025 | 1900 | 37,0 | 1,48 | 90.883 |
| 0,60 | 15 | 3270 | 2800 | 54,5 | 1,47 | 178.201 |
| 0,70 | 15 | 3655 | 3850 | 74,8 | 1,48 | 295.322 |
| 0,80 | 15 | 3925 | 5000 | 97,2 | 1,48 | 393.602 |

Os dados da tabela 4 foram plotados graficamente na figura 2, onde é possível perceber que o torque cresce com o quadrado do diâmetro da estaca na situação do exemplo da tabela 4.

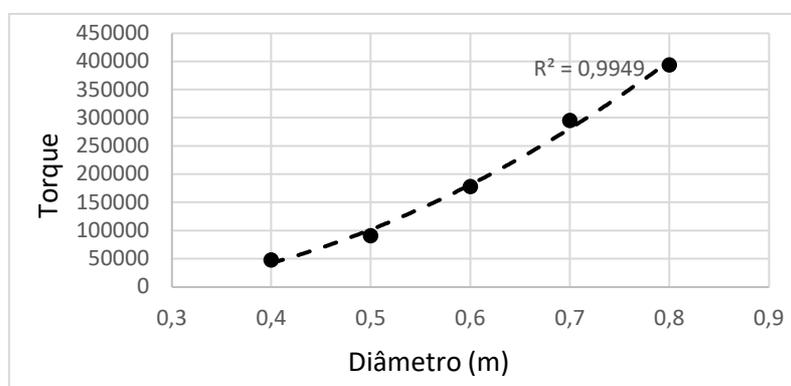


Figura 2. Relação entre diâmetro e torque para um solo argiloso de resistência uniforme, onde se vê bom ajuste a uma função polinomial de grau 2.

Para um solo arenoso, o fator de empolamento dado pela tabela 2 é de 1,11, o que leva a um valor de β_{vc} igual a 1,15. Neste caso, a cada volta do helicóide, o mesmo deve penetrar 0,304 metros. Com este valor de penetração por volta, se obtém um número de voltas para se atingir 15 metros igual a 49,3, 21,1% a menos que o número de voltas necessário para a estaca em solo argiloso, devido ao menor fator de empolamento.

O valor do torque obtido nesta situação é de 98.776N.m, contra 93.064N.m necessários para a estaca em argila. O maior valor de torque obtido foi devido à maior velocidade por conta do menor número de voltas aplicadas devido ao menor fator de empolamento. Mesmo com uma energia de instalação 20% menor, o fator de empolamento foi significativo.

Obviamente, cabe ao projetista e executor, definir quanto pode ser tolerado de desconfinamento do solo e também conhecer quais equipamentos estão disponíveis na região, podendo limitar o comprimento e capacidade da estaca em função da velocidade desejada e dos equipamentos disponíveis. Lembra-se ainda que os valores de torque previstos são os efetivamente aplicados ao trado e não os nominais da máquina, os quais podem se reduzir com o tempo em função da manutenção.

4 Conclusões

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





O método proposto foi coerente ao indicar que é preciso uma máquina de maior capacidade para executar estacas em um solo mais resistente. Foi também coerente quando se consideraram duas camadas de solo com capacidades diferentes, podendo ser adotado com qualquer número de camadas.

Como relatado por SILVA (2011), os fatores de empolamento citados por FABIANI (1981) e constantes da tabela 2 ainda precisam ser melhor estudados, porém são uma referência inicial a ser considerada. Para os fatores apresentados, o menor fator de empolamento para solo arenoso conduziu a um valor maior de torque que para solo argiloso, mesmo considerando-se que a energia de instalação em solo arenoso é 20% menor que em solo argiloso.

Ainda é preciso correlacionar valores dos fatores α e β para solos diferentes dos do Distrito Federal. Existem pesquisas sobre capacidade de carga de estacas hélice em diferentes geologias, porém poucas possuem os dados de perfuração para que seja possível obter a energia de instalação, sendo interessante que esta informação também seja disponibilizada nos estudos.

Foi possível perceber um crescimento linear do torque necessário com o passo do trado bem como um crescimento do torque com o quadrado do diâmetro.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao Engenheiro Carlos Medeiros Silva pelas sugestões na redação deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010) NBR 6122. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro.
- Brons, K.F., Kool, A.F. (1988) *Methods to improve the quality of auger piles. Deep Foundations on Bored and Auger Piles*. Van Impe (ed). Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 814 6.
- Fabiani, B. (1981). Construção de Edifícios. Notas de aula. Primeira parte. São Paulo.
- Casagrande S.P.A. (2023). *Foundation drilling tools*, disponível em <https://www.casagrandegroup.com/wp-content/uploads/2018/12/DRILLING-TOOLS-min.pdf>, acessado em 05/07/2023.
- CZM Ltda (2023). Relação de equipamentos para estaca hélice contínua, disponível em www.czm.com.br, acessado em 24/06/2023.
- Silva, C. M. (2011) Energia e confiabilidade aplicadas aos estaqueamentos tipo hélice contínua. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Brasília. 311f.
- Silva, C.M., Camapum de Carvalho, J (2020) Método semi-empírico para a capacidade de carga das estacas tipo hélice contínua com base na energia de instalação. XX COBRAMSEG Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais. Campinas.
- Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley. Nova Iorque.
- Viggiani, C. (1993). *Further experiences with auger piles in Naples area*. Deep Foundations on Bored and Augered Piles. Balkema, Rotterdam, pp. 445-455

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

