



## Energia de execução de estacas hélice contínua como variável para confiabilidade das fundações

Darym Júnior Ferrari de Campos  
Engenheiro Civil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, Brasil,  
darymjuniorgmail.com

José Camapum de Carvalho  
Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, camapumdecarvalho@gmail.com

Paulo Ivo Braga de Queiroz  
Professor Adjunto, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, pi@ita.br

José Antonio Schiavon  
Professor Adjunto, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil,  
schiavon@ita.br

Dimas Betioli Ribeiro  
Professor EBTT, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil,  
dimas@ita.br

Vinicius Resende Domingues  
Engenheiro Civil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, Brasil,  
vinicius.rdomingues@gmail.com

Luan Carvalho Sena Monteiro Ozelim  
Engenheiro Civil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, Brasil, luanoz@gmail.com

**RESUMO:** A estaca hélice contínua (EHC) é um método de fundação profunda altamente versátil e de elevada produtividade. Rápida, silenciosa e praticamente sem vibrações, esta técnica é uma das mais utilizadas do Brasil, adequando-se principalmente em projetos urbanos ou áreas ambientalmente sensíveis. Em termos tecnológicos, contempla o controle em tempo real da energia de execução para cada estaca perfurada, e se bem utilizada, pode substituir ou relacionar outras variáveis de difícil mensuração, sendo capaz de absorver as diversas influências a que uma estaca estará submetida imediatamente no momento de sua execução. Comumente define-se em projeto uma ou mais cotas de assentamento para distintos grupos de estacas, passível de incertezas. Dessa forma, esse tipo controle se torna interessante ao levar em conta tal complexidade do solo, que pode mudar significativamente mesmo em uma pequena região. Ao definir uma energia de execução total ótima, as estacas passam a ter critérios de parada individualizadas, afetando diretamente os custos e a produtividade, elevando a confiabilidade. A partir dos dados espacializados de dezenas de estacas, desenvolveram-se códigos capazes de automatizar os cálculos necessários para a obtenção das energias de execução, relacioná-las com as capacidades de carga aferidas pelas provas de carga e sondagens, e prever, por meio de estudos estatísticos, possíveis influências no comportamento dos procedimentos executivos da implementação da fundação.

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





**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas Hélice Contínua, Energia de Execução, Capacidade de Carga, Fundações.

**ABSTRACT:** The continuous flight auger pile (CFAP) is a highly versatile and productive deep foundation method. Fast, silent and virtually vibration-free, this technique is one of the most widely used in Brazil, and is particularly suitable for urban projects or environmentally sensitive areas. In technological terms, it contemplates the Real-Time Operation System (ROTS) control of the execution energy for each drilled pile, and if well used, it can replace or relate other variables that are difficult to measure, being able to absorb the various influences to which a pile will be subjected immediately at the time of its execution. It is common to define in the foundation design one or more settlement levels for different groups of piles, subject to uncertainties. Thus, this type of control becomes interesting when taking into account such complexity of the soil, which can change significantly even in a small region. By defining an optimal total execution energy, the piles have individualized stopping criteria, directly affecting costs and productivity, increasing reliability. From the spatialized data of several piles, codes were developed capable of automating the calculations necessary to obtain the execution energies, relate them to the bearing capacities measured by load tests and soundings, and predict, through statistical studies, possible influences on the behavior of the executive procedures of the foundation implementation.

**KEYWORDS:** Continuous Flight Auger Piles, Execution Energy, Bearing Capacity, Foundations.

## 1 Introdução

Os projetos atuais de fundação se restringem a cálculos locais, em regiões específicas do terreno, o que muitas vezes pode levar ao sobredimensionamento ou subdimensionamento das estacas de fundação e contenção haja vista a variabilidade espacial do maciço. Em outras palavras, o que é seguro em um trecho pode não ser bom no global da obra. Quando se considera a utilização de estacas do tipo hélice contínua, o próprio controle da energia de execução pode se mostrar como uma solução de maior confiabilidade para a fundação. O valor da energia de execução não deve ser somente definido, mas também capaz de ser relacionado com os resultados dos ensaios de campo, como as provas de carga e sondagens. Esse controle pode representar uma ferramenta para auxiliar projetistas e engenheiros na adequação dos projetos às realidades de campo.

Novos conceitos foram incorporados na NBR 6122 (ABNT, 2019) – Projeto e Execução de Fundações. A análise, que era exclusivamente garantida pelo coeficiente de segurança, fundamentado no determinismo, passou a ser elaborada também por métodos probabilísticos, reconhecendo que não é possível lidar apenas com a verdade absoluta e que riscos existem e precisam ser definidos e avaliados.

Propõe-se neste artigo o estudo do comportamento geotécnico do maciço de solo e das estacas de uma obra localizada em Brasília-DF sob o ponto de vista energético. Todo o processo de perfuração das estacas da fundação foi controlado por um mesmo conjunto máquina-operador. Como forma a facilitar a leitura e o entendimento das análises dos dados, espacializou-se por meio do software RockWorks® os resultados dos ensaios realizados em campo. A partir dos dados espacializados, utilizou-se o *software* Mathematica® para o desenvolvimento de códigos capazes

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



de automatizar os cálculos necessários para a obtenção das energias de execução, relacioná-las com as capacidades de carga aferidas pelas provas de carga e prever, por meio de estudos estatísticos, possíveis influências no comportamento dos procedimentos executivos da obra.

## 2 Fundação do tipo estaca hélice contínua

A utilização da EHC surgiu nos Estados Unidos na década de 50, sendo posteriormente difundida em toda Europa e Japão na década de 80, sendo executada pela primeira vez no Brasil em 1987 (Antunes & Tarozzo, 1996). A evolução crescente dos seus equipamentos e da sua tecnologia tornou uma das soluções de fundação profunda mais adotadas no Brasil, contando com uma diversidade de opções de diâmetros e profundidades. Em termos tecnológicos, possibilita o monitoramento eletrônico durante todas as fases de execução.

### 2.1 Controle do estaqueamento pela energia de execução

Na execução de um estaqueamento escavado, pode-se obter diversas informações da perfuração de cada estaca por meio de um relatório de controle. Essas informações representam parâmetros obtidos pelos relatórios gerados a partir da perfuratriz, tornando-se possível associar a energia aplicada em cada estaca executada com a confiabilidade destas, de modo a controlar o estaqueamento realizado em um projeto. Dessa forma, a utilização da energia de execução se trata da aplicação de uma técnica de controle energético visando garantir que a capacidade de carga de projeto de uma fundação se concretize na obra.

Silva (2011) menciona que a quantificação da energia de execução ou trabalho realizado dependerá primeiramente do entendimento do sistema. O trabalho total realizado pelas forças externas é representando por uma grandeza escalar. A partir do torque aplicado ao helicóide e o braço de alavanca, assim como a velocidade angular e de perfuração do trado, determina-se o trabalho da força tangencial, que é o produto escalar da força pelo deslocamento ao longo da profundidade. Por fim, tem-se a força gravitacional e a força descendente, que é a energia mecânica aplicada ao helicóide. A representação do cálculo do trabalho total realizado é observado pela Equação 1.

$$W_R = \int_0^{Z_b} mhc \cdot g \cdot dZ + \int_0^{Z_b} F_{di} \cdot dZ + \int_0^{m2\pi} F_i \cdot r \cdot d\theta \quad (1)$$

em que:  $W_R$  = trabalho realizado ou energia necessária para escavar uma estaca [J];  $Z_b$  = comprimento da estaca [m];  $mhc$  = massa do sistema de escavação [kg];  $g$  = aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];  $F_{di}$  = força descendente aplicada ao helicóide [N];  $F_i$  = força transversal ao eixo da estaca [N];  $r$  = raio da estaca hélice [m];  $m$  = número de voltas do helicóide durante escavação.

Ramos (2011), Silva (2011) e Ferrari de Campos (2016 e 2022) mencionam que o controle energético em estacas hélice contínua e o uso da metodologia nomeada SCCAP contribui para a redução do risco da obra ao reduzir a probabilidade de falha do sistema resistente. O método representa um controle automatizado, em tempo real (ROTS), que registra a energia ou trabalho realizado pelas forças aplicadas ao helicóide durante a execução de cada estaca do estaqueamento, trazendo para a prática da engenharia de fundações conceitos estatísticos.

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



## 2.2 Capacidade de carga

A capacidade de carga ou carga última admissível de uma estaca é definida pela somatória das cargas ou solicitações máximas que serão suportadas pelo atrito lateral e pela ponta, podendo ser determinada por meio de métodos teóricos (analíticos), métodos semi-empíricos e ainda pelos métodos práticos de ensaio em campo, como a prova de carga e o SPT (Magalhães, 2005). O modo eficaz para representação da capacidade de carga das estacas é dado por meio das provas de carga, no entanto, a avaliação de todo o estaqueamento se torna inviável por questões financeiras e de prazo, existindo assim determinada limitação quanto a representatividade do conjunto de estacas em relação às que não foram ensaiadas. Sendo assim, a relação da energia de execução de cada estaca com a capacidade de carga aferida pelas provas de carga e sondagens busca minimizar tal questão.

Durante a execução de um estaqueamento, geram-se perturbações na interface solo-estaca e são impostas deformações elásticas, permanentes e residuais em seu entorno, dificultando o entendimento e a modelagem. Sendo assim, criam-se características únicas para aquela interface, mas com comportamento populacional (estaqueamento) passíveis a um controle e verificação estatística. Tais características, como a própria capacidade da estaca, comprimento e energia de execução necessária podem ser agrupadas em um histograma, a fim de representar informações previamente sintetizadas em uma distribuição de frequência (Silva, 2011).

Nessa pesquisa, verificaram-se, segundo o método de Van der Veen (1953), os resultados de três provas de carga estáticas com carregamento lento. As análises de capacidade de carga foram fundamentadas em espacializações do estaqueamento, resultados de SPT e energia de execução das estacas.

## 2.3 Análise de risco

A análise de risco significa estimar ou subsidiar a teoria da decisão, analisando os mecanismos pelos quais possam sobrevir e estimando a extensão, a amplitude e a probabilidade de concretização dos seus efeitos (Rowe, 1987). Assim, tais conceitos inferem-se sobre a probabilidade de sucesso ou insucesso de uma estrutura e a sua consequência, cuja segurança normalmente é expressada em termos da sua probabilidade de ruptura.

De acordo com Caldeira (2005), não existe um procedimento padrão de avaliação e identificação de risco aplicável para todos os tipos de projetos. Escolher o método dependerá da abordagem que é mais aceitável para o tipo de problema, de dados disponíveis, do grau em que há dependência de julgamento subjetivo e ainda dos critérios que serão utilizados para julgar ou não se o risco é aceitável. Atualmente, com a extinção do conceito de risco zero nas obras de engenharia, têm-se o tratamento estatístico dos dados como forma complementar de demonstrar domínio sob os problemas da engenharia.

## 3 Metodologia

As etapas necessárias para o entendimento da metodologia proposta são ilustradas no fluxo de trabalho da Figura 1. Na sequência, são apresentados os resultados e análises para cada etapa.

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



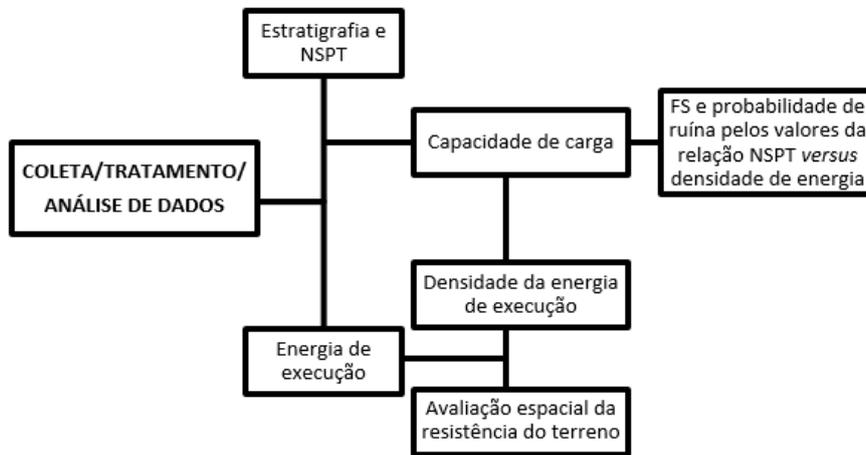


Figura 1. Fluxo da proposta metodológica.

## 4 Resultados

A pesquisa teve como base um edifício residencial localizado em Brasília-DF, contemplando-se a execução de 316 EHC, 3 provas de carga e 4 sondagens SPT. Vale destacar que todas as estacas tiveram 50cm de diâmetro e a profundidade das estacas variando entre 8-14m. Ilustra-se na Figura 2(a) a espacialização do solo a partir da interpolação dos resultados estratigráficos das sondagens, além do local de cada teste realizado, bem como as provas de carga. Na Figura 2(b) foi escolhido um corte estratégico na direção das provas de carga, facilitando a visualização e a compreensão das camadas de solo próximas a cada teste. De forma análoga, espacializou-se na Figura 3 os resultados do NSPT das sondagens.

A Figura 4 apresenta os resultados das curvas carga *versus* recalque em escala aritmética para as estacas ensaiadas, observando-se assim o comparativo dos resultados em termos do recalque último medido em função da carga aplicada, além da extrapolação das curvas.

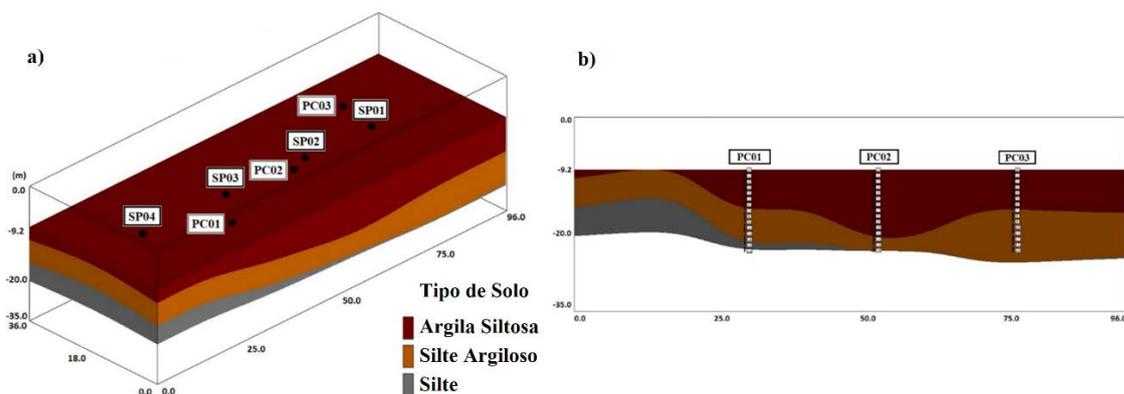


Figura 2. a) Espacialização 3D com base no SPT; b) Seção do perfil estratigráfico nas PCs.

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



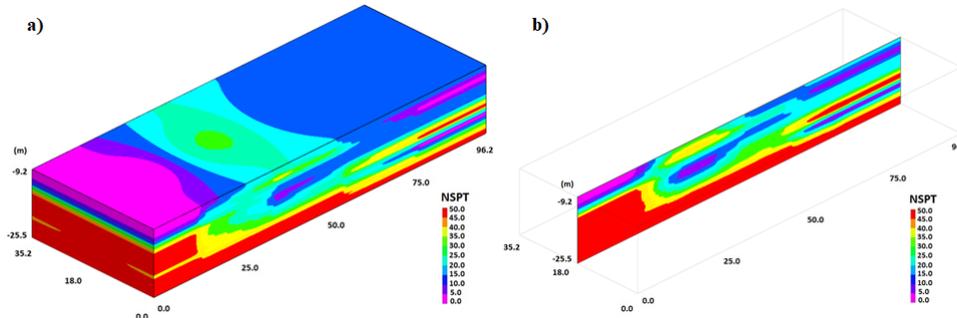


Figura 3. a) Espacialização 3D com base no SPT; b) Seção do perfil estratigráfico nas PCs.

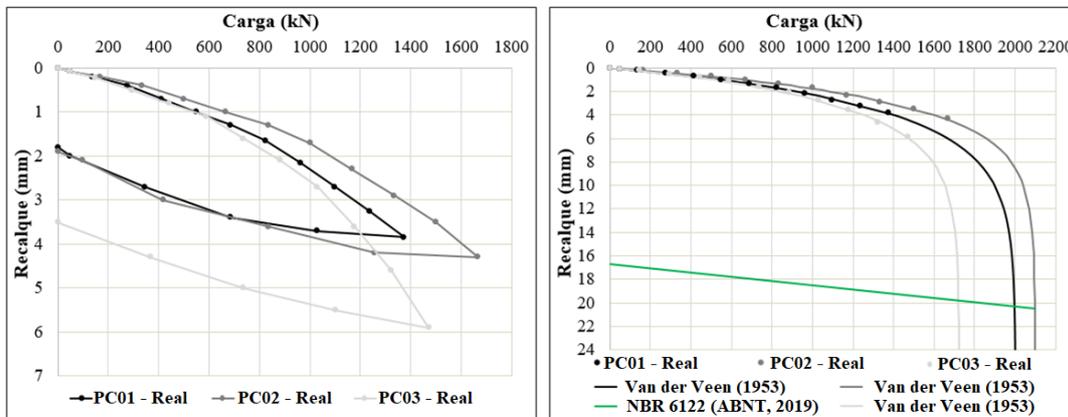


Figura 4. a) Curvas carga versus recalque; b) Extrapolação das curvas carga versus recalque.

Utilizou-se o critério de ruptura da NBR 6122 (ABNT, 2019) por meio da extrapolação das curvas pelo método de Van der Veen (1953). Para a PC01, a carga de ruptura foi estimada em 204tf, apresentando um FS de 2.34. Para a PC02 foi estimada em uma carga de ruptura de 214tf com um FS de 2.10 e, por fim, a PC03 resultou em uma carga de ruptura de 175.8tf e FS de 1.91.

Criou-se um código por meio do *software* Mathematica® capaz de calcular a energia de execução de forma acumulada e metro a metro. Verifica-se por meio dos gráficos traçados na Figura 5, a título de exemplificação, como geraram-se as energias das estacas de fundação.

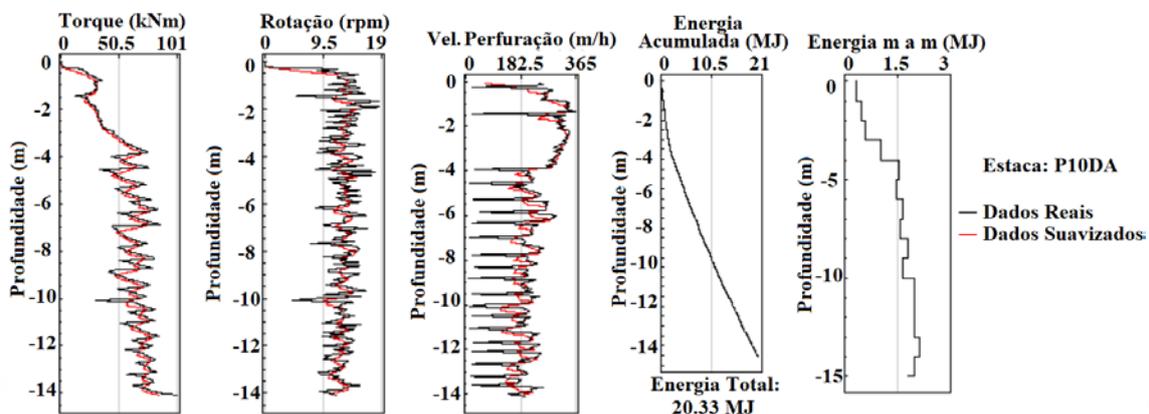


Figura 5. Energia de execução calculada: Estaca de fundação.

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



Após os cálculos, obtiveram-se os valores totais de energia de execução. Para um melhor entendimento de como essa energia irá se comportar, foi criado um mapa de calor espacializado a partir dos valores de energia total interpolados na área do terreno. Individualmente, cada estaca em fase de perfuração possui um determinado volume, dado pela profundidade escavada, de acordo com a geometria das hélices. Normalizou-se a energia total por volume das estacas de fundação, neutralizando então o efeito do comprimento. O resultado é ilustrado na Figura 6, com destaque em vermelho para as provas de carga.

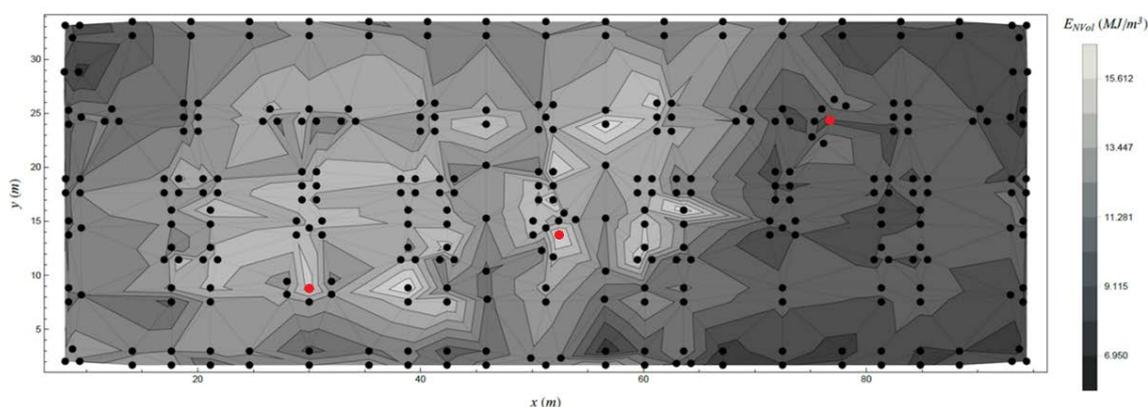


Figura 6. Espacialização da densidade de energia de execução das estacas de fundação.

## 5 Análise dos resultados

A energia de execução, independentemente do critério de ruptura, é uma proporção direta da capacidade de carga da estaca, seja ela prevista por métodos de dimensionamentos, seja aferida por meio de provas de carga. Pretende-se validar essa relação a partir dos dados obtidos na pesquisa, gerando-se análises do comportamento geotécnico mais próximo da realidade.

### 5.1 Relação NSPT versus energia de execução

Para a relação entre o NSPT e a energia de execução utilizaram-se os dados acumulados, que são os valores totais de energia devido a cada metro de execução. Como forma de representar essa relação, necessitou-se dos seguintes passos: 1) A partir da espacialização do modelo NSPT (Figura 3), obteve-se o perfil tridimensional para cada estaca ao posicioná-las no respectivo modelo; 2) No cálculo de densidade de energia de execução, obteve-se os valores para cada estaca; e 3) Com os valores individuais gerados de NSPT e densidade de energia de execução, determinou-se a curva que relaciona o NSPT e a densidade de energia de execução acumulados.

Utilizou-se a curva do ajuste médio  $NSPT_{Acum} = 2,593 E_{NVolAcum}$ , com  $R^2 = 0.96$ , demonstrada com o intervalo de confiança ao nível de 95% (Figura 7). É possível observar que o ajuste linear é representativo da relação, pois o  $R^2$  é próximo de 1.

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



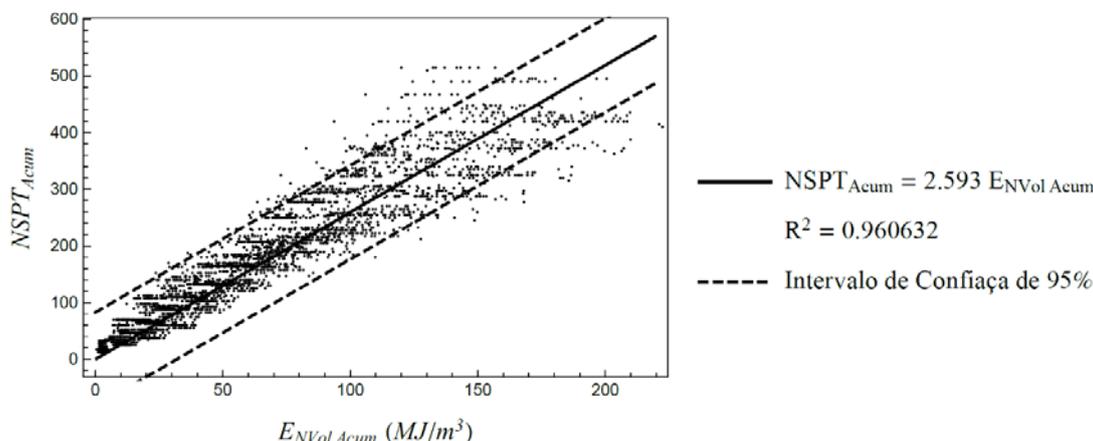


Figura 7. NSPT acumulado *versus* densidade de energia acumulada com IC de 95%.

## 5.2 Cálculo da capacidade de carga por meio dos métodos semi-empíricos

Com base nos valores espacializados para o número de golpes NSPT das três estacas ensaiadas em campo por meio de provas de carga, calculou-se por meio de métodos semi-empíricos a previsão da capacidade de carga, comparando-os com os valores gerados pelas provas de carga. Observa-se na Tabela 1 os resultados.

Tabela 1. Resultados dos métodos adotados para a carga de ruptura.

Provas de carga	Carga de ruptura (tf) – Métodos utilizados			
	NBR 6122:2010	Aoki e Velloso (1975)	Décourt e Quaresma (1996)	Antunes e Cabral (1996)
PC1	175,8	147,7	297,6	202,4
PC2	214,0	167,9	339,8	230,6
PC3	204,0	167,5	354,6	228,0

Comparando-se os resultados das cargas de ruptura pelas três provas de carga ensaiadas com os resultados gerados pelos métodos semi-empíricos, destaca-se que o método de Antunes e Cabral (1996) foi o que mais se aproximou do resultado final experimental, sendo assim o motivo da sua escolha. Para garantir ainda mais a aproximação dos resultados, ajustou-se os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  para minimizar o erro médio entre a carga de ruptura prevista pelo método e a carga aferida na prova de carga. Determinou-se para as camadas de Argila Siltosa e Silte Argiloso  $\beta_1 = 0,025\%$  e  $\beta_2 = 1,5$ ; e para a camada de Silte  $\beta_1 = 0,0235\%$  e  $\beta_2 = 1,25$ .

## 5.3 Cálculo da capacidade de carga por meio da energia de execução

Aliando-se a relação da Figura 7 com o método ajustado da capacidade de carga real das estacas ensaiadas, tornou-se possível calcular a capacidade de carga por meio da energia de execução para todas as estacas de fundação. Para cada cálculo, os perfis espacializados foram utilizados, juntamente com os coeficientes ajustados. De forma a facilitar a visualização dos valores, espacializou-se na Figura 8 as cargas de ruptura no terreno.

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



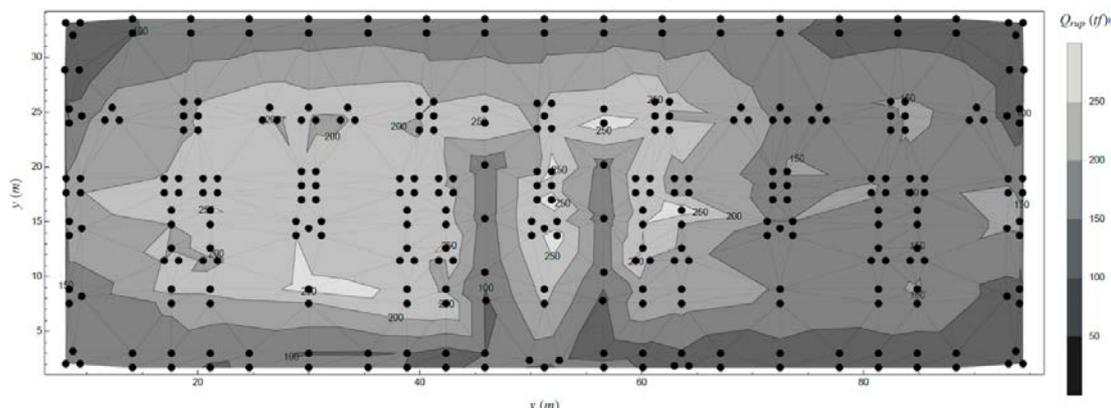


Figura 8. Mapa de calor das cargas de ruptura por meio da densidade de energia de execução.

#### 5.4 Previsão do fator de segurança e análise de risco por meio da energia de execução

Existem dois cenários para os quais as solicitações e as resistências definem-se de forma determinística: o de segurança e o de ruína. Caso o projeto de fundação ou a própria execução fossem elaborados e controlados a partir de suas características estatísticas, representadas por valores médios junto as suas respectivas variâncias, poderia identificar-se cenários que transitariam entre os estados de segurança e ruína. Desde o início, buscou-se mensurar os dados em termos de energia de execução, trazendo maior confiabilidade para o estaqueamento e aceitabilidade para as tomadas de decisão quanto à segurança da obra.

Os fatores de segurança referem-se as tensões de ruptura calculadas na Figura 8, englobando-se no cálculo as cargas de trabalho previamente estabelecidas pelo projeto de cargas nos pilares. Assim, para os blocos de fundação, dividiu-se a carga final de trabalho para cada estaca em relação à sua carga de ruptura. Os resultados são observados na Figuras 9, destacando-se de vermelho a estaca com o menor valor.

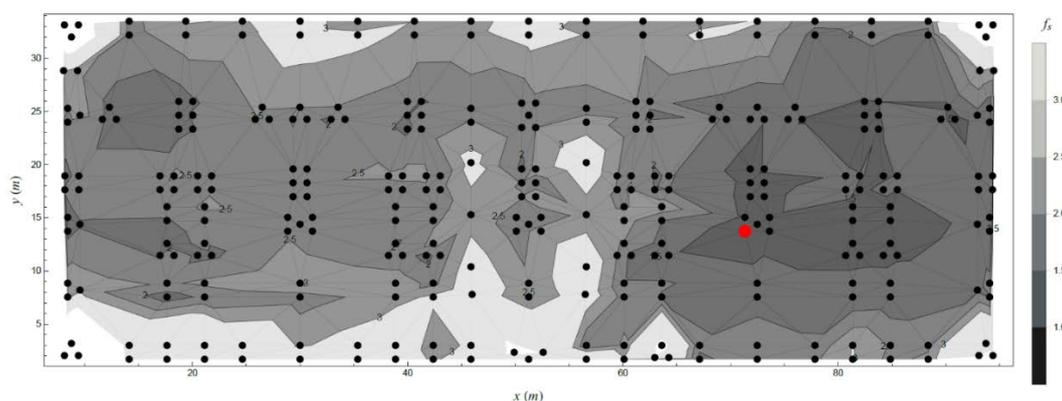


Figura 9. Mapa de calor dos fatores de segurança a partir da densidade de energia de execução.

Percebe-se que os menores valores dos FS calculados nesse caso se mostram abaixo do mínimo permitido, mas acima de 1. Essa diferença é justificável pela dispersão de dados entre a relação no NSPT acumulado *versus* densidade de energia de execução. De acordo com Aoki (2008), a condição geral para a não ocorrência de ruína exige o valor médio do FS maior que um.

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



## 6 Conclusão

A metodologia de análise da presente pesquisa representa um avanço no controle informatizado da energia de execução e avaliação de desempenho de estacas tipo hélice contínua, propondo-se um mecanismo de confiabilidade complementar aos projetos de fundação, que podem agregar valor às análises em termos de segurança e ruína.

Constatou-se a existência de uma boa correlação entre a densidade de energia de execução acumulada e os valores de NSPT acumulados, sendo possível averiguar a capacidade de carga a partir dos resultados das provas de carga. Ainda, destaca-se, que nas análises em termos de energia, os fatores de segurança calculados se mostraram adequados aos requisitos mínimos em termos de segurança e probabilidade de ruína. Entretanto, algumas estacas resultaram em valores abaixo do esperado, o que condiz com o real desempenho das fundações estimados a partir das análises de energia. As análises propostas com a incorporação do conceito de energia de execução das estacas não substituem o juízo do engenheiro geotécnico, mas podem ser um elemento de grande relevância para o auxílio na identificação e mitigação dos riscos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6122. (2019). *Projeto e Execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Antunes, W. R.; Cabral, D. A. (1996). Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua. 3º SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, (pp. 105-109). São Paulo, SP.
- Caldeira, L. (2005). Metodologias de Análise de Risco. Aplicações em Geotecnia. II Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia: Modelação e Segurança em Geotecnia, (pp. 31-55).
- Ferrari de Campos, D. J. (2016). *Energia de execução de estacas hélice contínua como ferramenta de avaliação da competência do terreno*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 307/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 126p.
- Magalhães, P. H. (2005). *Avaliação dos métodos de capacidade de carga e recalque de estacas hélice contínua via provas de carga*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-141/05, Departamento Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 243 p.
- Ramos, R. E. (2011). *Análise do Comportamento Energético de Estacas Monitoradas Tipo Hélice Contínua*. Monografia de projeto final. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 96 p.
- Rowe, W. D. (1987). *Alternative risk evaluation paradigms*. In: HAIMES, Yacov Y. & STAKHIV, Eugene Z. Risk analysis and management of natural and man-made hazards. American Society of Civil Engineers, 1-21.
- 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.
- Van Der Veen, C. (1953). The bearing capacity of a pile. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOILS MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING (pp. 84-90). Zurich: 2.
- W. R. Antunes.; H. Tarozzo. (1996). *Fundações: Teoria e prática* (2ª ed.). São Paulo, SP: PINI.

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

