

# A importância de apresentar ao menos duas soluções técnicas de fundações para livre escolha do proprietário

Jean Felix Cabette

Eng. Civil M.Sc., Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, [jeancabette@benaton.com.br](mailto:jeancabette@benaton.com.br)

Daniel Kina Murakami

Eng. Civil M.Sc., Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, [daniel.murakami@benaton.com.br](mailto:daniel.murakami@benaton.com.br)

**RESUMO:** Este artigo compara a sustentabilidade de duas soluções para fundações profundas mais utilizados no território nacional em uma obra no bairro Itaim Paulista, São Paulo - SP. A solução com estacas Hélice Contínua foi idealizada considerando 4 estacas por pilar com diâmetro de 700 mm (carga de até 1.500 kN por estaca) e comprimento médio de 32 m, totalizando 8.960 metros lineares e um consumo estimado de 3.400 m<sup>3</sup> de concreto (sem sobreconsumo) ou 4.400 m<sup>3</sup> (com sobreconsumo de 1.000 m<sup>3</sup>). Já a solução com estacas pré-moldadas de concreto considerou 6 estacas por pilar com diâmetro de 380 mm (vazadas com parede de 90 mm), carga de até 1.000 kN por estaca, comprimento médio de 28 m, totalizando 11.760 metros lineares e um consumo estimado de 950 m<sup>3</sup> de concreto. A comparação demonstra que a utilização de estacas pré-moldadas de concreto apresenta uma redução de aproximadamente 78% no consumo de concreto (3.450 m<sup>3</sup>) em relação à solução com estacas hélice contínua, tornando-se a alternativa mais sustentável e auxiliando o proprietário na escolha da solução ideal para a obra.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas Pré-moldadas, Estacas Hélice Contínua, Métodos semi empíricos, ensaios de carregamento dinâmicos (ECD), sustentabilidade

**ABSTRACT:** This paper compares the sustainability of two deep foundation solutions widely used in Brazil for a project site in the Itaim Paulista neighborhood of São Paulo, SP. The Continuous Flight Auger (CFA) pile solution was designed considering 4 piles per column with a diameter of 700 mm (design load up to 1,500 kN per pile) and an average length of 32 m. The total pile length was 8,960 meters and an estimated concrete overbreak was 3,400 m<sup>3</sup> (excluding overbreak) or 4,400 m<sup>3</sup> (including 1,000 m<sup>3</sup> overbreak). The precast concrete pile solution considered 6 piles per column with a diameter of 380 mm (hollow with a 90 mm wall), a design load of up to 1,000 kN per pile and an average length of 28 m. The total pile length was 11,760 meters and an estimated concrete overbreak was 950 m<sup>3</sup>. The comparison shows that using precast concrete piles results in a reduction of approximately 78% in concrete consumption (3,450 m<sup>3</sup>) compared to the CFA pile solution, making it the more sustainable alternative and aiding the owner in choosing the ideal solution for the project.

**KEYWORDS:** Precast Piles, Continuous Flight Auger Piles, Semi-empirical methods, dynamic loading tests (DLT), sustainability

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o instituto de pesquisa britânico Chatham House (Rodgers, 2018), o cimento é fonte de aproximadamente 8% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub>. Se sua indústria fosse um país, seria o terceiro maior emissor desse gás, no mundo, atrás apenas de China e Estados Unidos.

A emissão de CO<sub>2</sub> varia de país para país e depende da tecnologia/matéria-prima empregada na produção. O Brasil tem hoje um fator de emissão de aproximadamente 610 kg CO<sub>2</sub>/ton cimento; a Espanha, 698 kg CO<sub>2</sub>/ton cimento; a Inglaterra, 839 kg CO<sub>2</sub>/ton cimento; e a China, 848 kg CO<sub>2</sub>/ton cimento. (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2024).

Nesse contexto a racionalização de projetos de fundações, atua diretamente na redução de emissões de CO<sub>2</sub>, tornando mais sustentável as fundações que serão executadas;

## 2 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo apresentar uma comparação de duas soluções técnicas em fundações profundas, facilitando a análise do proprietário da obra para escolha de forma independente e isenta. Será apresentada essa comparação em um caso de obra localizado no Itaim Paulista, SP.

## 3 METODOLOGIA

Na fase conceitual de projeto, foram estimadas as cargas dos dois tipos de estacas com base nos métodos semi-empíricos já consagrados na literatura nacional. Posteriormente, após a aprovação do projeto em estacas pré-moldadas, foi realizado o monitoramento “cravabilidade” com o equipamento PDA (Pile Driving Analyzer) para definição dos critérios de cravação para que a estaca atingisse a profundidade de projeto, de forma a minimizar as quebras de estacas (Murakami e Cabette, 2022, 2023a, 2023b), com a utilização do “Protocolo Benaton” (Cabette e Murakami 2023).

## 4 COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES DE FUNDAÇÕES

Há de se destacar alguns pontos relevantes entre as soluções com estacas Hélice Contínua e estacas Pré-moldadas, com destaque para o subsolo onde serão empregadas para avaliar qual solução se encaixa melhor, posteriormente a questão de racionalização de concreto e certificação técnica através de ensaios para comprovação de desempenho das fundações;

### 4.1 Hélice Contínua

Em relação às estacas hélice contínua convém destacar os seguintes aspectos na etapa de concepção e aprovação do projeto de fundações:

- ✓ Mobilização/desmobilização de Perfuratriz;
- ✓ Execução da perfuração;
- ✓ Diária da Equipe de Perfuração;
- ✓ Fornecimento de óleo diesel;
- ✓ Fornecimento de concreto e bomba;
- ✓ Sobre consumo de concreto (cerca de 30%);
- ✓ Moldagem de corpos de prova para envio ao laboratório de concreto;
- ✓ Fornecimento de armadura (aço cortado, dobrado, montado);
- ✓ Bota-fora de solo (adicional referente ao fator de empolamento de 20%);
- ✓ Retro escavadeira à disposição;
- ✓ Ajudantes à disposição (colocação de armadura e auxílio)
- ✓ Arrasamento de estacas;
- ✓ Bota fora de concreto arrasado;
- ✓ Mobilização de bate-estaca para ensaio de carregamento dinâmico (PDA);
- ✓ Ensaios de carregamento dinâmico (ECD) com análise CAPWAP (bate-estacas ou martelo precisa ser contratado), a execução do ensaio não pode ser realizada no final da execução, se faz necessário aguardar tempo de cura da estaca e bloco para realização do ensaio, na grande maioria dos casos o ensaio é executado após o equipamento de perfuração da Hélice ter sido desmobilizado da obra, o que impede melhorias no projeto ou execução de reforços no caso das sondagens não refletirem a realidade;
- ✓ Execução de prolongamento nas estacas para realização de ensaio dinâmico ( $f_{ck} > 35\text{Mpa}$ );
- ✓ Prova de Carga Estática obrigatório acima de 200 estacas;

### 4.2 Pré-Moldada de Concreto

Em relação às estacas pré-moldadas de concreto convém destacar os seguintes aspectos na etapa de concepção e aprovação do projeto de fundações:

- ✓ Mobilização/desmobilização de bate-estaca;
- ✓ Fornecimento de estacas pré-moldadas;
- ✓ Cravação de estacas pré-moldadas;
- ✓ Diária da Equipe de Cravação;
- ✓ Emendas soldadas (variável conforme comprimento cravado, considerar acima de 10 metros pelo menos uma emenda);
- ✓ Sobra de estacas pré-moldadas (variável de acordo com cada sondagem, em valores gerais estima-se de 5% a 10%);
- ✓ Bota-fora de estacas (fator adicional de vazios 30%);
- ✓ Quebra de estacas (usual 3% a 5%);
- ✓ Arrasamento de estacas;
- ✓ Ensaios de carregamento dinâmico (ECD com análise CAPWAP (bate-estacas já está na obra) e pode ser realizado a qualquer momento inclusive durante a cravação (Cravabilidade), permitindo inclusive alterar o processo de cravação da estaca, essa praticidade permite maior agilidade na solução tanto para melhoria do projeto quando para execução de reforços no caso das sondagens não refletirem a realidade, pois o equipamento de execução das estacas ainda esta na obra;
- ✓ Prova de Carga Estática obrigatório acima de 200 estacas;

Além disso, a estaca pré-moldada possui melhor qualidade do material (concreto é vibrado e há a possibilidade de inspeção visual em todas as peças a serem cravadas), enquanto que na estaca hélice o concreto não é vibrado, pode ter contaminação do concreto com solo durante a execução (danos na estaca que podem ser detectados por ensaios de integridade (PIT) e/ou ensaios dinâmicos (ECD)).

## 5 CASO DE OBRA

### 5.1 Descrição da obra

A obra em questão era composta por 70 pilares com esforços a compressão de até 6.000kN por pilar. O subsolo local era composto uma camada de argila mole até cerca de 12 metros de profundidade, seguido por uma camada de solo arenoso com  $N_{spt}$  crescente com a profundidade até cerca de 32 metros de profundidade.

Na fase de projeto foram realizados dois estudos técnicos:

- ✓ Hélice contínua – 4 estacas por pilar com estacas de 700 mm de diâmetro para 1.500 kN;
- ✓ Pré-moldada – 6 estacas por pilar com estacas circulares vazadas de 380 mm de diâmetro para 1.000 kN;

Estes estudos tiveram como parâmetros os métodos semi-empíricos Decourt e Quaresma (1982) e o método proposto por Aoki e Velloso (1975), que utilizam resultados de sondagens a percussão de simples reconhecimento.

### 5.2 Estimativas Decourt & Quaresma (1982) e Aoki & Velloso (1985)

A tabela 1 indica a previsão de capacidade de carga da estaca hélice contínua com seção de 700 mm. Para o cálculo dos comprimentos foi considerado apenas a parcela de atrito lateral das estacas, conforme a NBR 6122, obtendo comprimento médio de 32 m:

Tabela 1. Estimativa da capacidade de carga através de métodos semi-empíricos para estaca hélice

Estimativa da Capacidade de Carga das estacas a compressão (kN)					Comprimento Estimado por sondagem (metros)
Sondagem	Decourt & Quaresma (1982)		Aoki e Velloso (1975)		
	Ruptura (kN)	Admissível (kN)	Ruptura (kN)	Admissível (kN)	
SP-01	3079	1539	2339	1170	32
SP-02	3042	1521	2353	1176	32
SP-03	3137	1569	2361	1181	32
SP-04	3203	1602	2574	1287	32

A tabela 2 indica a previsão de capacidade de carga da estaca pré-moldada com seção circular vazada de 380mm de diâmetro. Com base nos cálculos, os comprimentos médios foram de 28 m:

Tabela 2. Estimativa da capacidade de carga através de métodos semi-empíricos para estaca pré-moldada

Estimativa da Capacidade de Carga das estacas a compressão (kN)					Comprimento Estimado por sondagem (metros)
Sondagem	Decourt & Quaresma (1982)		Aoki e Velloso (1975)		
	Ruptura (kN)	Admissível (kN)	Ruptura (kN)	Admissível (kN)	
SP-01	2292	1146	2407	1204	28
SP-02	2150	1075	2408	1204	28
SP-03	2038	1019	2139	1069	28
SP-04	2099	1049	2315	1158	27

Com base na previsão de capacidade de carga realizada através dos métodos semiempíricos Décourt & Quaresma (1982) e Aoki & Velloso (1985), foi observado que os valores obtidos através desses métodos atenderia a solicitação de projeto de 1.000kN para os dois tipos de fundações. Entretanto, a solução em estacas hélice apresentariam comprimentos maiores e maior consumo de concreto. O proprietário da obra acabou optando pela solução em estacas pré-moldadas de concreto.

### 5.3 Solução em estacas pré-moldadas

Após definida a solução em estacas pré-moldadas foi adotado o “Protocolo Benaton” (Cabette e Murakami, 2023) com a realização de ensaios dinâmicos (ECD) para definição dos critérios de cravação de forma rápida e ágil no início da obra e posteriormente realizado controle e segurança das fundações, conforme observa-se nas figuras de 1 a 4.

Observou-se cargas mobilizadas variando de 2.072kN até 2.450kN nos ensaios dinâmicos (ECD) (NBR 13208) realizados na obra, os quais atendem as premissas da ABNT NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações com fator de segurança global superior a 2,0, assim como a confirmação da previsão da capacidade de carga adotada na fase de projeto, com resultado final mais sustentável.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos na obra através da solução em estacas pré-moldadas de concreto. De acordo com o gráfico da figura 1, é possível verificar a variação estatística dos comprimentos cravados executados na obra.

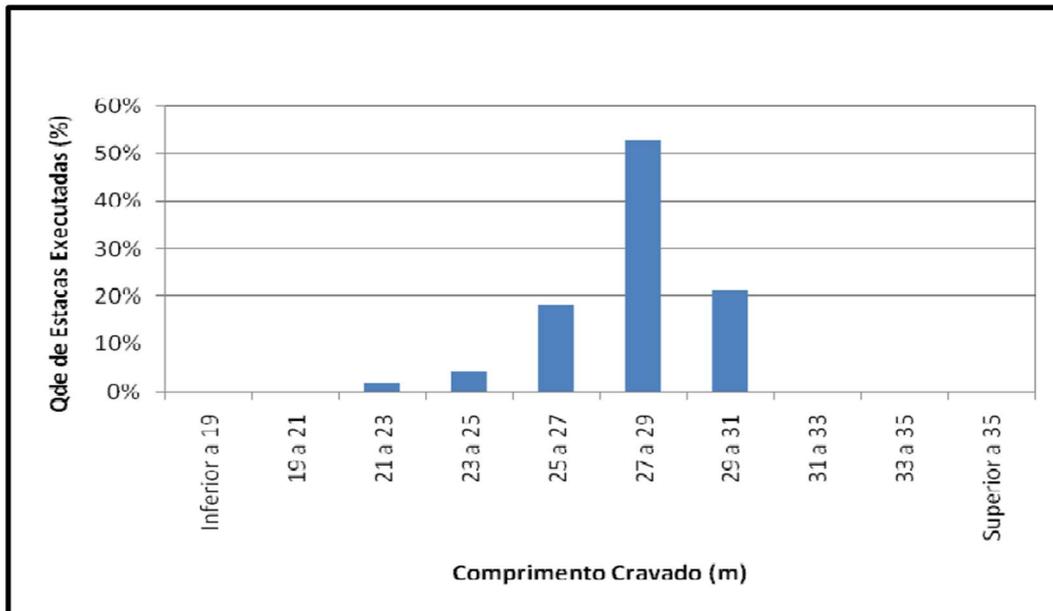


Figura 1. Variação estatística dos comprimentos cravados na obra

No gráfico da figura 2, pode-se observar a variação estatística das nega p/ 10 golpes obtidas na obra.

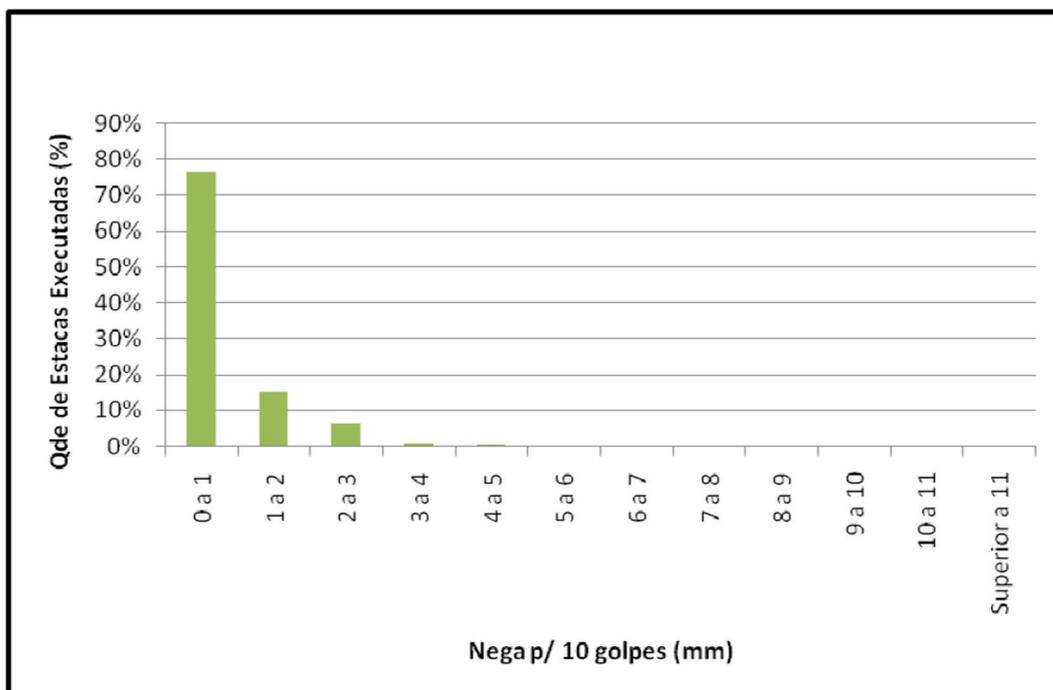


Figura 2. Variação estatística das nega p/ 10 golpes obtidas na obra.

Com auxílio do gráfico da Figura 3, é possível verificar a variação estatística dos repiques obtidos na obra.

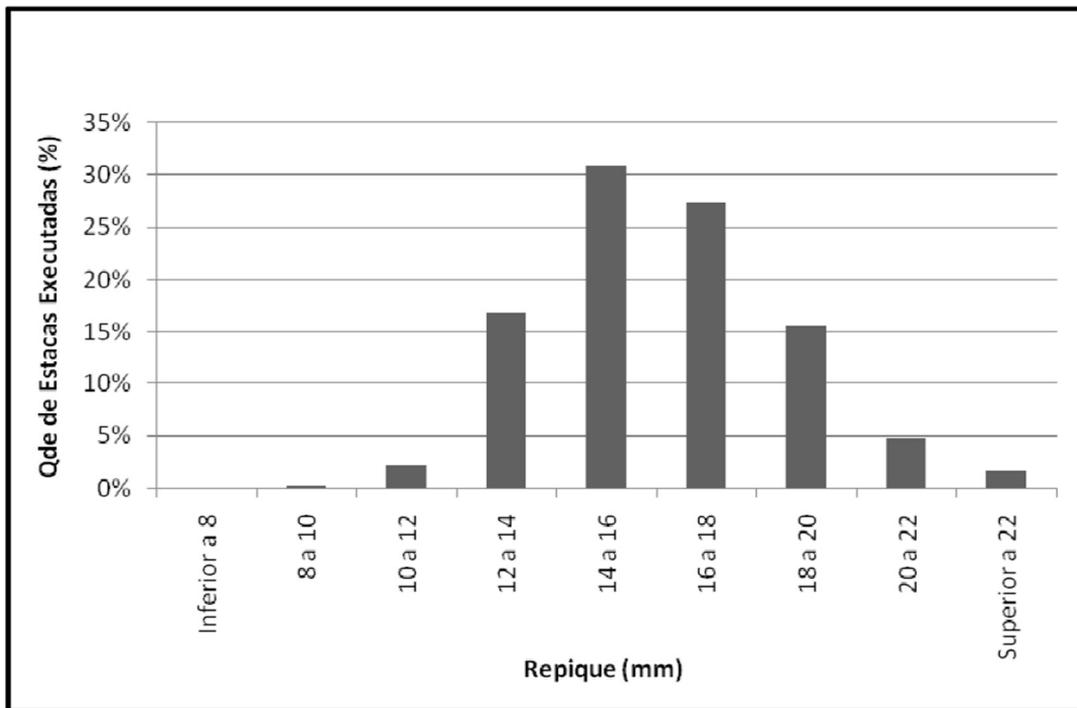


Figura 3. Variación estadística dos repiques obtidos na obra.

Com auxílio do gráfico da Figura 4, é possível verificar as cargas mobilizadas nos ensaios dinâmicos (ECD) executados na obra de acordo com o comprimento cravado de cada estaca ensaiada. Notam-se que os ensaios indicaram fator de segurança maior que 2, conforme preve a NBR 6122.

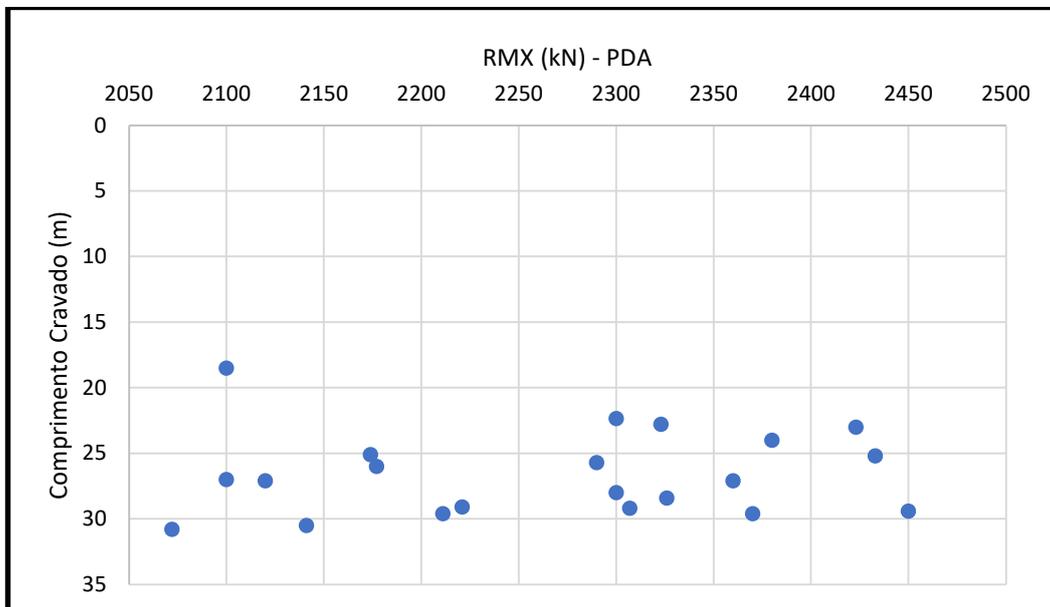


Figura 4. Ensaio dinâmico em função do comprimento cravado.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à apresentação de pelo menos duas soluções em fundações profundas ao proprietário devidamente amparado por equipe técnica qualificada, o mesmo escolheu a solução em estacas pré-moldadas de concreto, dessa forma foi possível proporcionar uma redução sustentável de 3.450m<sup>3</sup> de concreto (78%) de

forma segura. Um dos pontos principais quanto a decisão da escolha do tipo de fundação foi devido a praticidade da estaca pré-moldada quanto a execução dos ensaios para avaliação das cargas mobilizadas se atendiam o projeto em plenitude.

Neste caso de obra, a cicratização do solo (efeito set up) ocorria de forma rápida, sendo que após aproximadamente 40 minutos do término da cravação já eram observadas cargas mobilizadas com fator de segurança superior à 2;

Fazendo a consideração de que cada metro cúbico de concreto consome cerca de 400kg de cimento no caso das estacas Hélice Contínua, e que cada tonelada de cimento produzida emite cerca de 610kg de CO<sub>2</sub>, tem-se uma redução no teor de emissão de CO<sub>2</sub> em cerca de 842 toneladas de CO<sub>2</sub>;

A segurança e a uniformidade do estaqueamento foram asseguradas pelo rigoroso controle da cravação, utilizando o "Protocolo Benaton" (Cabette e Murakami, 2023). A medição da nega e do repique elástico permitiu a aplicação consistente do critério de paralisação das estacas, atendendo às premissas da norma de fundações (NBR 6122).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Benaton Specialist pela autorização dos dados necessários para a elaboração deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOKI, N. e VELLOSO, D. A.; An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles.; Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, vol. 1, 1975.
- Aoki, N.; A new dynamic load test concept.; Drivability of piles (1): 1-4, Proc. Discussion Session 14, Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng. (12), Rio de Janeiro, 1989
- Aoki, N.; Determination of Pile Capacity of Driven Piles on the Dynamic Increasing Energy Test,” D.Sc. thesis, University of São Paulo at São Carlos School of Engineering, São Carlos, Brazil, 1997(in Portuguese)
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13208; Estacas Ensaio de carregamento dinâmico, Rio de Janeiro, 2007.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6122; Projeto e Execução de Fundações, Rio de Janeiro, 2022.
- Cabette, J. F., Murakami, D. K. (2023) Estacas Pré Moldadas de concreto cravadas em São Vicente: Procedimentos executivos e desafios superados. 10º Seminário de Fundações Especiais e Engenharia Geotécnica. São Paulo, SP.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R. Capacidade de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT. Anais do 6º COBRAMSEF, Rio de Janeiro, vol.1, p. 45-53, 1978.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R., Como calcular (rapidamente) a capacidade de carga de uma estaca. Revista Construção São Paulo, n1800, Agosto, 1982, Separata.
- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (2024) Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO<sub>2</sub>. São Paulo, SP. Disponível em: <https://www.poli.usp.br/noticias/1527-cimento-producao-mundial-pode-dobrar-sem-aumentar-co2.html#:~:text=A%20emiss%C3%A3o%20de%20CO2%20varia%20de%20pa%C3%ADs%20para%20pa%C3%ADs,kg%20CO2%2Fton%20cimento.> (acesso em 11/04/2024)
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2022) Pile Installation Difficulties in Soils with Large Toe Quakes. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, SP.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2023a) The Benefits of Pile Driving Monitoring for Precast Concrete Piles. 10º Seminário de Fundações Especiais e Engenharia Geotécnica. São Paulo, SP.

Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2023b) O Benefício do PDA na Redução de Custos em Obras de Pequeno Porte. 10º Seminário de Fundações Especiais e Engenharia Geotécnica. São Paulo, SP.

Rodgers, Lucy (2018) Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba. BBC News Brasil. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753> (acesso em 11/04/2024)