

# Caso de Obra de Instabilidade Dinâmica na Cravação de Estaca Metálica

Luiz Henrique Felipe Olavo

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

**RESUMO:** Apresenta-se um caso de obra em solo da formação Guabirotuba onde foi prevista uma cortina de contenção com estacas metálicas em perfil W530x66. Durante a cravação destas estacas foi observada uma vibração lateral excessiva, levando à flexão da estaca, num fenômeno de instabilidade dinâmico, também denominado drapejamento. Uma segunda estaca foi então monitorada à cravação, onde se observou a existência de tensões alternadas em faces opostas com tensão média baixa no perfil. Foram utilizados dois equipamentos, um bate-estaca hidráulico com martelo hidráulico FAMBO HR5000 e, na região abaixo de uma linha de alta tensão, um martelo de queda livre de 15kN em máquina com torre de altura reduzida. Para ambos os equipamentos foi observada a instabilidade lateral. A altura de queda dos martelos foi limitada de modo a evitar causar danos às estacas. Isto aumentou o tempo de cravação e levou a negas bastante reduzidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Instabilidade dinâmica, Estacas metálicas, Formação Guabirotuba.

**ABSTRACT:** A case study is presented of a construction project in the Guabirotuba Formation, where a retaining wall was planned using W530x66 metal piles. During the driving of these piles, excessive lateral vibrations were observed, which led to the bending of the pile, a phenomenon of dynamic instability. A second pile was then monitored during driving, observing the presence of alternating stresses on the opposite sides with a low average stress in the profile. Two pile driving devices were used: a hydraulic pile driver with a FAMBO HR5000 hydraulic hammer and, in the region below a high-voltage power line, a 15kN free-fall hammer in a reduced lead machine. Lateral instability was observed in both devices. The drop height of both hammers was limited to avoid damaging the piles. This increased the driving time and led to significantly reduced final sets.

**KEYWORDS:** Dynamic instability, Metallic piles, Guabirotuba Formation.

## 1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se um caso de obra de uma trincheira sob a Av. Comendador Franco, em Curitiba, em região da formação Guabirotuba. Para esta trincheira foi prevista uma contenção com estacas metálicas cravadas à percussão. O perfil previsto era o perfil I laminado W530x66. Este perfil possui uma altura de 525mm e uma largura de 165mm. Suas mesas possuem espessura de 11,4mm e sua alma, 8,9mm. O momento de inércia em relação ao eixo de maior inércia para a seção bruta (não descontando a espessura de sacrifício) é de  $34971\text{cm}^4$  e em relação ao eixo de menor inércia, de  $857\text{cm}^4$  além de um momento resistente mínimo de  $103,9\text{cm}^3$ , levando a um raio de giração mínimo de 3,2cm.

Para fins de comparação, a norma atual de fundações (ABNT, 2022), exige onde existe camada de argila mole, um momento resistente mínimo de  $930\text{cm}^3$ . Proporcionalmente ao módulo de elasticidade, o momento mínimo resistente para uma estaca metálica seria de  $110\text{cm}^3$ , o que não é tão diferente do valor observado para este perfil específico. Para estacas de concreto entre 20 e 30 metros, a norma exige um raio de giração de 5,4cm, 68% superior ao observado para o perfil adotado na obra.

Durante a cravação da primeira estaca já foi percebida a instabilidade lateral das estacas, com uma vibração significativa lateral, com o perfil oscilando bastante em relação ao eixo de menor inércia. As primeiras estacas foram cravadas com martelo hidráulico FAMBO HR5000 e, devido a esta instabilidade a segunda estaca teve sua cravação monitorada com equipamento do tipo PDA para definição dos critérios de cravação e evitar danos às estacas. Durante o monitoramento notou-se a alternância de tensões de compressão e tração em faces opostas do perfil, com a tensão média baixa e coerente com a baixa altura de queda adotada.

## 2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA OBRA

Buscando-se a obra em um mapa geológico, nota-se que a mesma encontra-se em área da formação Guabirotuba. Um extrato deste mapa pode ser visto na Figura 1. Observa-se que a obra encontra-se em uma região onde constam tanto a formação Guabirotuba (em amarelo escuro no mapa, sigla QPg) e solos aluvionares devido à proximidade do rio Belém (em amarelo claro, sigla QHa).

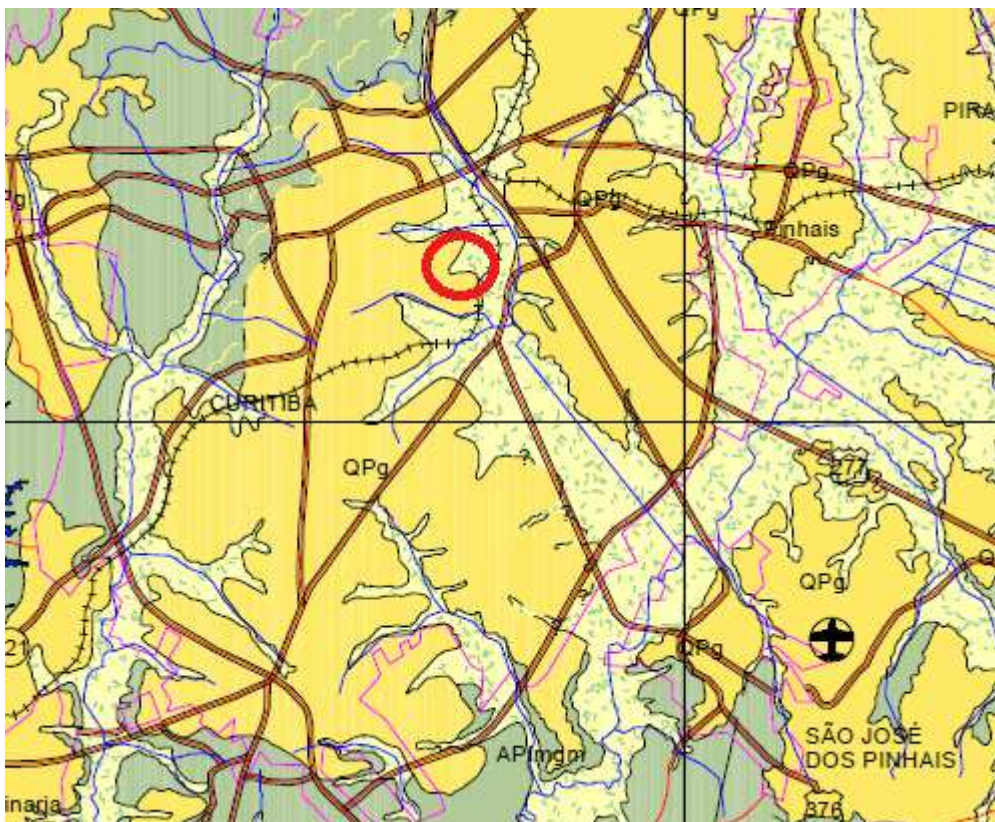


Figura 1. Localização da obra em um mapa geológico (adaptado de Mineropar, 2006)

Ainda na etapa de projeto, foram executados 3 furos de sondagem SPT, cujos índices encontram-se na Figura 2. Dos três furos, apenas um indicou 0,15m de argila orgânica aluvionar, enquanto os outros dois apenas encontraram solo da formação Guabirotuba. A obra encontra-se em uma cota mais alta que o rio Belém, o que justifica a ausência de solo aluvionar, pois está acima da cota de inundação. A Av. Comendador Franco neste local ocupa uma área em meia encosta com um dos lados da trincheira em cota cerca de 10 metros acima do outro lado, o que pode ser notado na Figura 2.

É possível observar índices de resistência bastante elevados já nos primeiros metros. Esta é uma característica comum em solos da formação Guabirotuba, como também foi observado no sítio experimental da formação Guabirotuba, no campus da UFPR (Kormann, 2002). As sondagens indicaram solos argilo-siltosos com alguma fração pequena de areia fina. A cor do solo é cinza-esverdeada e a plasticidade é baixa.

## 3 ESTACAS METÁLICAS

Estacas metálicas são uma solução comum para fundação e contenção. Para contenções são usadas em cortinas de perfis pranchados (também conhecida como contenção do tipo Berlin) ou como estacas prancha, quando possuem encaixes e formam um paramento contínuo.

Se, por um lado, para fundações normalmente usam-se perfis H, com boa estabilidade em ambas as direções, para contenções é comum o uso de perfis I, uma vez que o esforço final atuante durante a vida útil da obra possui uma direção prioritária e existe travamento na direção transversal com a viga de coroamento e vigas de apoio de tirantes. São encontrados no mercado perfis I e H, bem como estacas prancha, de várias dimensões, havendo uma gama de perfis que podem ser escolhidos pelo projetista para cada obra, em função de disponibilidade de espaço, resistência estrutural necessária e peso, que é relacionado com o custo da peça.

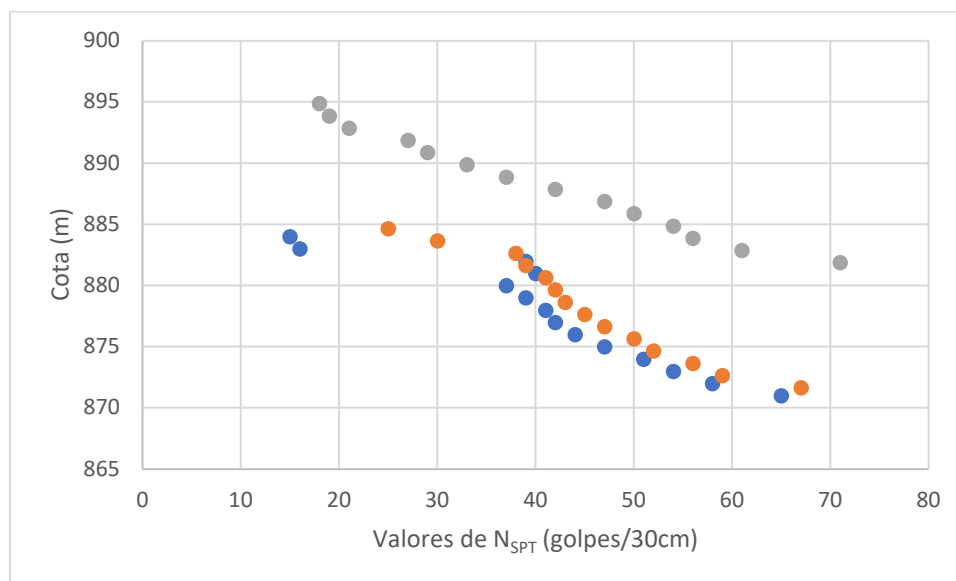


Figura 2. Valores de  $N_{SPT}$  obtidos nas sondagens executadas na etapa de projeto.

Estacas metálicas podem ser cravadas através de percussão, que é a maneira mais comum e universal, podendo ser usadas em vários tipos de solo, incluindo argilas moles a rijas e areias. Podem também ser cravadas por vibração, o que é muito efetivo em solos arenosos e pouco efetivo em argilas, tendo desempenho tanto pior quanto mais rija for a argila. E podem ser cravadas à reação, por prensagem, o que possui limitações no tamanho da reação necessária para a cravação.

No presente estudo de caso, o solo é uma argila dura a rija e por este motivo foi optado pela cravação com percussão. Inicialmente foi utilizado um martelo hidráulico FAMBO HR5000, com massa de pilão de 5000kg, sendo que existe uma linha de alta tensão na Av. Comendador Franco e haviam estacas a serem cravadas embaixo desta linha. Para estas estacas foi utilizado um bate-estaca de queda livre, com torre reduzida e martelo de 1500kg de massa. O bate-estaca hidráulico foi programado para a obra devido a uma exigência do cliente pelo fato do serviço precisar ser feito rapidamente em função da obra interditar uma das vias da Avenida Comendador Franco, principal saída de Curitiba em direção ao litoral de Santa Catarina.

#### 4 INSTABILIDADE DINÂMICA

Logo na cravação da primeira estaca foi observada uma vibração lateral excessiva, num fenômeno denominado de drapejamento. Drapejar, conforme o dicionário pode ser descrito como “movimentar-se com ondulações (bandeira, pano de vela) quando batido pelo vento” (Oxford Languages, 2025). O termo drapejamento constava da norma técnica de fundações (ABNT, 1996), sendo substituído pelo termo instabilidade dinâmica na revisão de 2010 (ABNT, 2010), porém é um termo ainda encontrado em alguns livros.

Devido a esta vibração e por receio de causar danos à estaca, a primeira estaca teve sua cravação interrompida e uma segunda estaca foi preparada para a cravação com a instalação de um sistema de monitoramento através do uso do equipamento de PDA (Pile Driving Analyser). A instrumentação indicou tensões médias baixas, coerentes com a altura de queda que estava sendo utilizada, porém indicou tensões alternadas de compressão e tração em faces opostas do perfil, como pode ser visto nas Figuras 3 e 4.

Observa-se na Figura 4 que existe uma componente de flexão alta no início da aplicação do golpe, mas que logo em seguida torna-se uma vibração, com as tensões alternando entre compressão e tração na mesma face. A tensão máxima de compressão no golpe mostrado na Figura 4 é de 605,9MPa, muito superior à tensão de escoamento do material da estaca.





Figura 3. Tensões médias no perfil, com compressão média máxima de 92,4MPa e tração média máxima de 20,3MPa.

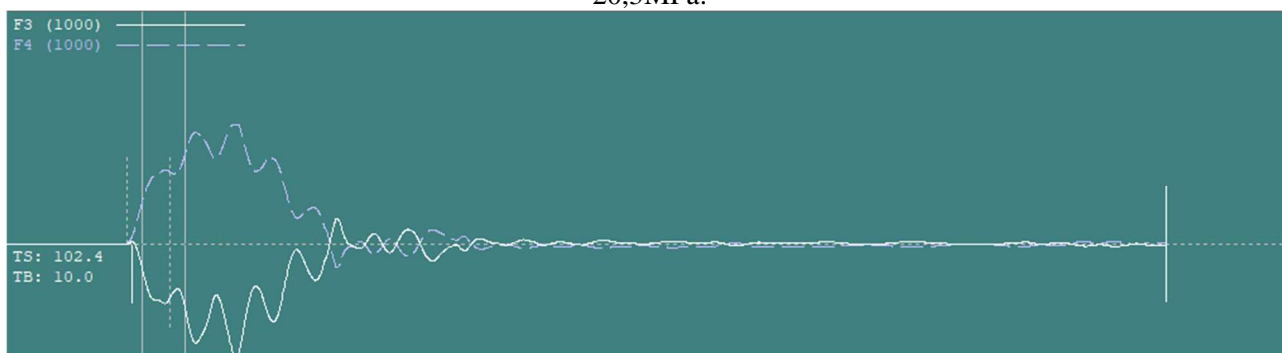


Figura 4. Tensões em faces alternadas da estaca, indicando tensões opostas em lados opostos (componente alta de flexão).

Para amenizar o problema, a altura de queda foi reduzida no início da cravação. Para o martelo hidráulico, a altura de queda foi limitada a 20cm até uma profundidade de 3 metros. Até os 4 metros foi limitado a 40cm e a altura máxima adotada foi de 60cm. Foram cravadas 16 estacas com o martelo hidráulico, devido à posição da linha de alta tensão. Os perfis foram içados com 12 metros e a profundidade final variou entre 7,60 e 9,85, com média de 8,58 metros. Todas as estacas foram cravadas até uma nega de 1mm/golpe com 60cm de altura.

A maioria das estacas, porém, foi cravada sob a linha de alta tensão com o martelo de queda livre de 1500kg. A peça inicial adotada possuía 4 metros e as demais 2,50 metros no máximo e isto, por si só, reduziu a vibração, ainda que a mesma ainda tenha sido observada. A altura de queda também foi variável ao longo da cravação. Os comprimentos obtidos variaram entre 6,30 e 9,30 metros, com média de 8,02 metros. A nega adotada foi de 0,5mm/golpe com 3 metros de altura de queda.

A carga dos tirantes foi revista em função da ficha da cortina ter ficado mais curta que a prevista em projeto.

## 5 CONCLUSÕES

Foi apresentado um caso de obra de estacas metálicas em solo da formação Guabirotuba onde foi observada instabilidade dinâmica durante a cravação das estacas. O perfil adotado era o W530x66, com uma altura de 525mm, uma largura de 165mm, momento de inércia em relação ao eixo de menor inércia, de 857cm<sup>4</sup> e um momento resistente mínimo de 103,9cm<sup>3</sup>, levando a um raio de giração mínimo de 3,2cm. A norma de fundações atual (ABNT, 2022) para estacas de concreto em camada de argila mole, com comprimentos entre 20 e 30 metros pede raio de giração mínimo de 5,4cm, 68% maior.

Na obra foram adotados dois equipamentos bate-estacas, um hidráulico com pilão de 5000kg e um queda-livre com pilão de 1500kg para trabalho sob uma linha de alta-tensão. A altura de queda foi limitada principalmente no início da cravação para ambas as máquinas. As estacas foram cravadas até um critério de nega que o perfil suportasse e os tirantes da obra foram redimensionados de modo a combater a ficha menor que a especificada em projeto.



Sugere-se que a norma de fundações seja revista considerando um raio de giração mínimo também para estacas metálicas. O problema foi observado em região sem a presença de solos moles e o fato de serem encontrados solos resistentes logo no início da cravação, com a peça toda sem confinamento lateral, agravou o problema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações. Emenda 1*. Rio de Janeiro.
- Kormann, A.C.M. (2002). *Características Geomecânicas da Formação Guabirotuba*. Tese de doutorado. Escola Politécnica USP. São Paulo.
- Mineropar (2006). Carta geológica do Paraná, Folha de Curitiba, escala 1:250.000.
- Oxford Languages (2025). Dicionário online. Consultado em 02/06/2025, em <https://languages.oup.com/oxford-global-languages/>