

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/293

## Caso de Obra de Correias Transportadoras de Grãos com Fundação em Estacas Pré-Moldadas em Paranaguá-PR

Luiz Henrique Felipe Olavo

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

**RESUMO:** É apresentado um caso de obra de fundação de correias transportadoras e silos graneleiros na cidade de Paranaguá-PR. As obras são lineares e ocupam grande dimensão, o que possibilitou o traçado de perfis estratigráficos para a região. Devido à altura das torres, as estacas de fundação foram dispostas em blocos de 4 a 8 estacas para cargas atuantes à compressão de até 961kN, de tração de até 626kN e esforços horizontais até 40kN por estaca. Tais cargas levaram à necessidade de armaduras especiais e emendas dimensionadas para transmitir as trações elevadas. A geologia local consiste em sedimentos marinhos, com intercalações de camadas de areia e argila, sendo que a areia varia entre média e fina. Em regiões foram encontradas areias compactas próximas à superfície, o que levou à necessidade de auxiliar a cravação do primeiro elemento com lançamento. Foram produzidas peças especiais com tubos no interior para permitir a injeção de água com alta pressão e vazão. Em outras regiões, havia argila normalmente adensada superficialmente e areia compacta abaixo, levando à necessidade de auxílio por lançamento no segundo elemento. Foi desenvolvida uma emenda especial para as estacas que permitisse a cravação inicialmente com a saída do tubo de lançamento fechado, execução da emenda e injeção de água através da segunda peça para permitir atravessar a areia compacta. Na região próxima a uma moega portuária, havia restrição quanto a vibrações. Foi feita então uma medida de vibração durante a cravação e foram definidas distâncias de segurança por seção, bem como comprimento onde a lançamento era necessária para que a vibração atingisse um valor admissível pela moega. Ao todo a obra contou com 67 ensaios de carregamento dinâmico para comprovação de desempenho, os quais permitiram reavaliar os fatores de ajuste do método semi-empírico de Decourt-Quaresma. Foi obtido o valor de 1,18 para o atrito lateral em argilas e 1,21 para o atrito lateral em areias, ambos com 95% de confiabilidade estatística. Foi observada uma redução de 53,7% no atrito lateral quando se usou o auxílio com lançamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas pré-moldadas, Paranaguá, Sedimentos marinhos, Ensaios de carregamento dinâmico, Medição de vibração.

**ABSTRACT:** A case of foundation work for conveyor belts and grain silos in the city of Paranaguá-PR is presented. The works are linear and occupy a large size, which made it possible to draw stratigraphic profiles for the region. Due to the height of the towers, the foundation piles were arranged in blocks of 4 to 8 piles for compression loads of up to 961kN and tensile loads of up to 626kN and horizontal forces of up to 40kN per pile. Such acting loads led to the need for special reinforcement and splices sized to transmit the high tractions. The local geology consists of marine sediments, with interspersed layers of sand and clay, with the sand varying between medium and fine. In regions, compact sand was found close to the surface, which led to the need to assist in driving the first element with casting. Special parts were produced with tubes inside to allow the injection of water with high pressure and flow. In other regions, there was normally consolidated clay on the surface and compact sand below, leading to the need for driving assistance in the second element. A special splice was developed for the piles that allowed driving initially with the launch tube closed, execution of the splice and injection of water through the second piece to allow it to cross the compact sand. In the region close to a port hopper, there were restrictions regarding vibrations. A vibration measurement was then made during the driving and safety distances were defined per section, as well as the length where the driving aid was necessary for the vibration to reach a value permissible by the hopper. In total, the work involved 70 dynamic loading tests to prove performance, which allowed the adjustment factors of the semi-empirical Decourt-Quaresma method to be re-evaluated. A value of 1.18 was obtained for lateral friction in clays and 1.21 for lateral friction in sands, both with 95% statistical reliability. A reduction in side friction of 53.7% was observed when jetting aid was used.

**KEYWORDS:** Precast concrete piles, Paranaguá, Marine sediments, Dynamic load tests, vibration measuring.

## 1 INTRODUÇÃO

A cidade de Paranaguá, no Paraná, conta com o maior porto em movimentação de grãos do Brasil e o segundo mais importante do país. As cargas mais importantes movimentadas no porto são soja, milho, óleo vegetal, fertilizantes e containeres, tendo movimentado um total de 58.399.285 toneladas no ano de 2022 (Portos do Paraná, 2022). Apesar de parte deste transporte ser feito pelo modal ferroviário, o volume de cargas faz com que se tenha um grande volume de tráfego de caminhões, o que apesar de necessário para alimentação do porto, se torna pouco efetivo devido à infraestrutura viária local. Para melhorar a efetividade do porto, estão sendo construídas correias transportadoras permitindo o desembarque e estocagem da carga em regiões mais afastadas, reduzindo este volume de tráfego e ganhando agilidade.

Devido ao fato de serem obras lineares, estas correias ocupam uma área de grandes proporções, o que torna o projeto de fundação das mesmas um desafio uma vez que a geologia local é composta por sedimentos marinhos e solo residual. Os sedimentos marinhos alternam camadas de argila e areia, sendo por vezes encontrada argila normalmente adensada superficialmente e por vezes areia compacta.

As correias também possuem torres altas, o que, aliado aos efeitos dinâmicos de frenagem e aceleração das correias no alto das torres e vento, se traduz em esforços horizontais e momentos aplicados à fundação. Para a fundação foram adotadas estacas pré-moldadas de concreto armado, dispostas em blocos de 4 a 8 estacas, para cargas por estaca de compressão de até 961kN, tração até 626kN e horizontais de até 40kN.

## 2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA OBRA E PERFIS ESTRATIGRÁFICOS

Foram executados furos de sondagem à percussão na posição de cada torre das correias transportadoras e adicionalmente nos silos. A posição dos furos de sondagem está indicada na Figura 1.

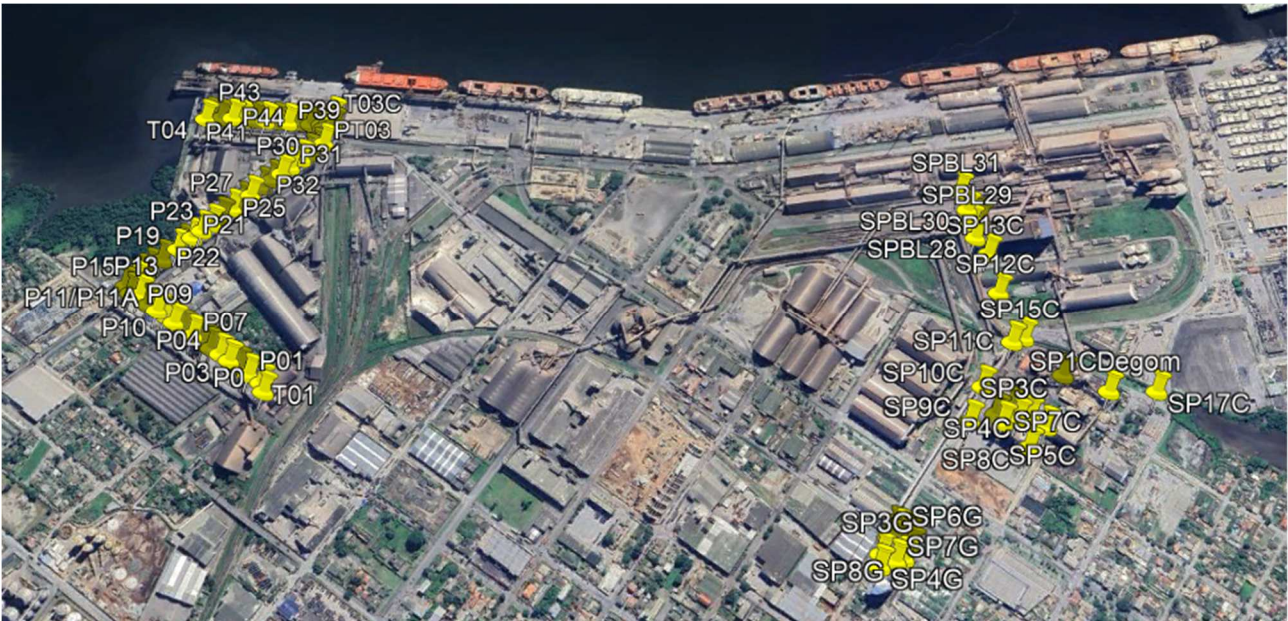


Figura 1. Posição dos furos de sondagem para as correias transportadoras e silos.

A Figura 2 mostra um dos perfis longitudinais traçados para a obra. Os demais perfis não são apresentados devido à falta de espaço. Este perfil é da Avenida Bento Rocha, entre os pilares P11/P11A e T03C.

É possível observar na Figura 2 a alternância de camadas de argila e areia, sendo também possível observar a existência de uma camada de argila orgânica sobre o solo residual. A existência desta camada compressível fez com que fosse necessário apoiar as fundações das correias e silos sobre o solo residual, abaixo da mesma, sendo que o peso das camadas superiores de solo foi considerado como sendo atrito negativo, sendo adotado o método unificado de projeto conforme descrito por Fellenius (2024).

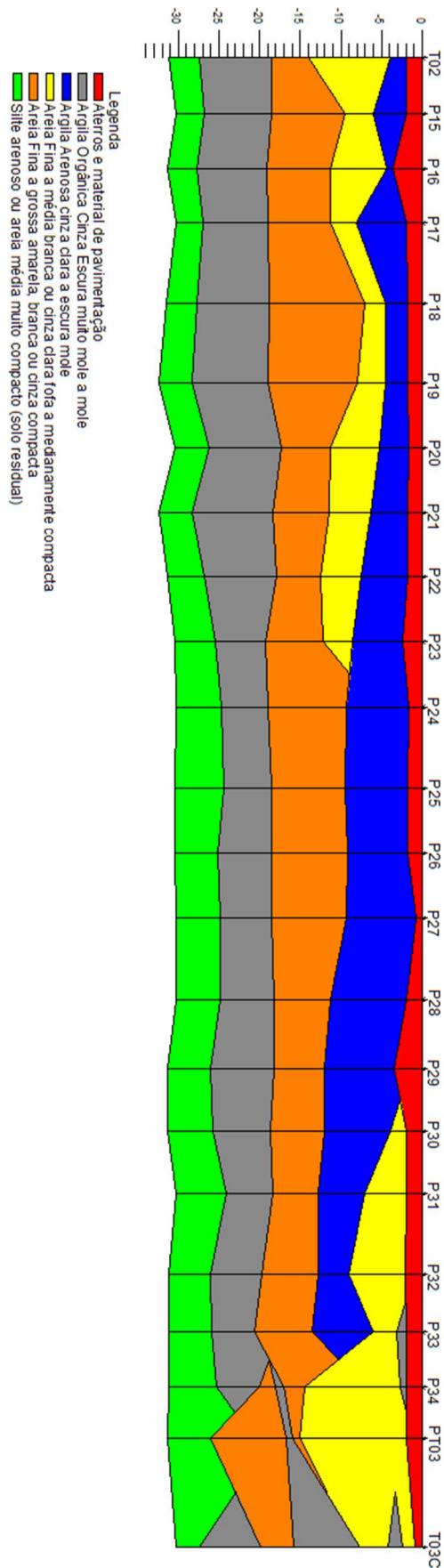


Figura 2. Perfil longitudinal da Avenida Bento Rocha, com indicação das camadas de solo, com exagero vertical de 3.

### 3 ESTACAS PRÉ-MOLDADAS

Devido à presença de argila normalmente adensada, de baixa consistência e também devido à necessidade de se armar estacas longas, foram adotadas estacas pré-moldadas de concreto armado. Observou-se, porém, em alguns pontos a presença de areias compactas, as quais deveriam ser atravessadas para a garantia de um comprimento que atendessem aos esforços de tração e o apoio abaixo das camadas de argila normalmente adensada, o que não seria possível com uma cravação sem auxílio. Para este auxílio foi utilizado o procedimento de lançamento.

A presença superficial de areia compacta com argila mole abaixo fez com que a cravação fosse já iniciada com lançamento, por exemplo na região entre o P31 e o PT03 da figura 2. Este procedimento foi adotado na região mais próxima ao porto. Afastando-se do porto, porém, encontra-se superficialmente argila normalmente adensada sobrejacente a camada de areia compacta, como por exemplo na região entre o P17 e o P30. Nesta região a cravação com lançamento desde a superfície não apresenta efetividade pelo fato da argila não se desagregar com os jatos de água, bem como a camada de argila acabar entupindo os tubos de lançamento. Além disso, a lançamento nesta região deveria ser mantida até profundidades que não eram atingíveis pelo primeiro elemento de composição da estaca.

Para sanar estes problemas, a estaca tinha um primeiro elemento com tubos internos, mas era cravada com uma tampa para evitar a entrada de argila. Foi desenvolvida uma emenda com continuidade para esta tubulação, permitindo a cravação com lançamento após a emenda. Desta forma, após a realização da solda, a estaca era levantada para expulsão da tampa e a água era lançada até profundidades da ordem de 20 metros ou em casos específicos até 26 metros, quando era feita a segunda emenda e a cravação prosseguia à percussão. Foi tomado o cuidado de se lançar areia em volta da estaca assim que a lançamento fosse encerrada. Um modelo exemplificando este procedimento se encontra na figura 3.

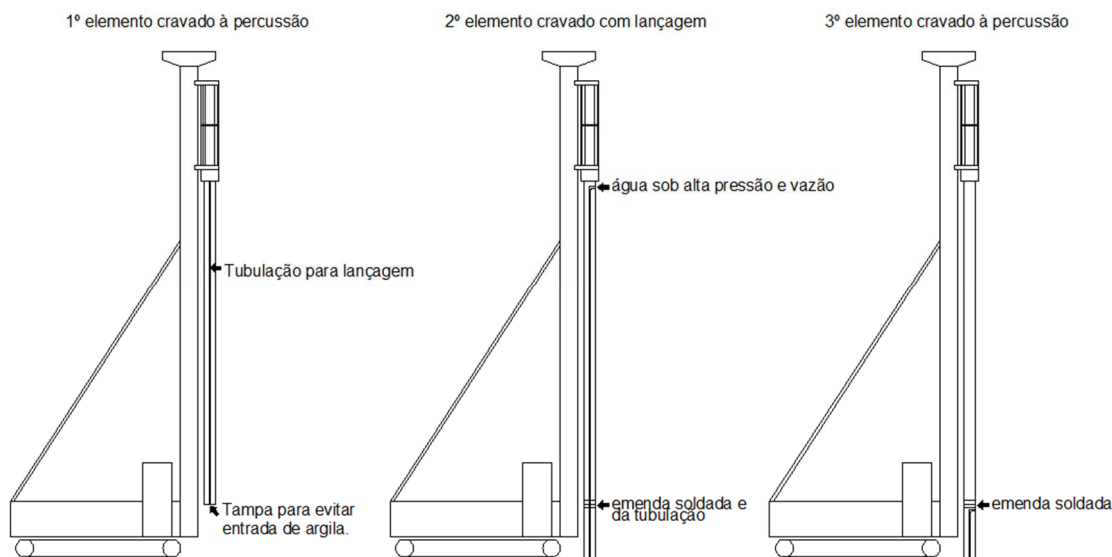


Figura 3. Modelo esquemático do procedimento adotado. Neste caso a cravação teve início à percussão, com um segundo elemento cravado com auxílio da lançamento e o terceiro novamente à percussão.

### 4 ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO E REAVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE CÁLCULO

Foram executados ao todo 67 ensaios de carregamento dinâmico. Os ensaios foram feitos em todas as torres da correia transportadora e mais alguns ensaios nos silos. Com base nos ensaios realizados, o método de Decourt-Quaresma (1978) foi reavaliado e calibrado para maior precisão das estimativas de atrito lateral com vistas à garantia da segurança à tração das estacas e otimização das armaduras e anéis de emenda. Os ensaios foram feitos com energia crescente e foram analisados todos os golpes aplicados uma vez que foi identificada a perda gradativa do set-up da estaca. Foram levados em consideração os máximos valores de atrito lateral por golpe, conforme proposto por Valverde (2018). Os ensaios seguiram o disposto na NBR 13208 (ABNT, 2007).

Com o objetivo de se calibrar o método de cálculo empregado, foram escolhidos os ensaios realizados que tivessem conseguido mobilizar a estaca, abrindo a nega, bem como os que apresentavam bom alinhamento entre o martelo e a estaca, indicado pela variação pequena entre os sinais dos dois sensores de força. Ao todo esta análise envolveu 9 estacas.

Foram comparados os valores de atrito lateral medido e previsto para as camadas de argila e de areia separadamente. Foi calculado o valor de ajuste, equivalente ao valor medido dividido pelo previsto. Foi inferida a variação do valor médio através do teorema do limite central, onde a média assume uma distribuição normal com média igual à média das observações e com desvio padrão igual ao desvio padrão das observações dividido pela raiz do número de elementos. Foi buscada uma confiabilidade estatística para a média de 95%. A variabilidade observada foi elevada. A figura 4 mostra os resultados para todas as estacas nos trechos de argila. Está indicado na Figura 4 também o método original (abaixo da linha de igualdade, em linha tracejada) e a média dos pontos (acima da linha de igualdade, em linha pontilhada azul, com 95% de confiabilidade estatística).

Observa-se na figura 4 dois pontos muito acima da linha de igualdade entre os valores previstos e medidos. Estes dois pontos referem-se à argila da camada mais profunda, para as duas únicas estacas deste banco de dados onde ela foi encontrada. Retirando-se as duas da análise, tem-se o gráfico da figura 5. Nesta situação, o valor do coeficiente de ajuste ficou em 1,18 com 95% de confiabilidade estatística. A análise não foi feita para a camada inferior de argila devido à pequena quantidade de pontos, porém é seguro dizer que, apesar das duas camadas terem valores semelhantes de SPT, não apresentam o mesmo comportamento, o que ficou evidente nos ensaios dinâmicos.

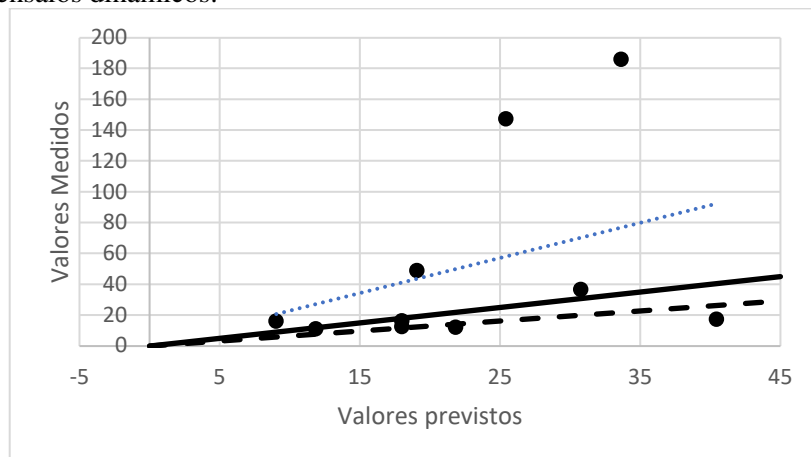


Figura 4. Relação entre os valores previstos e medidos para o modelo calibrado para todas as argilas.

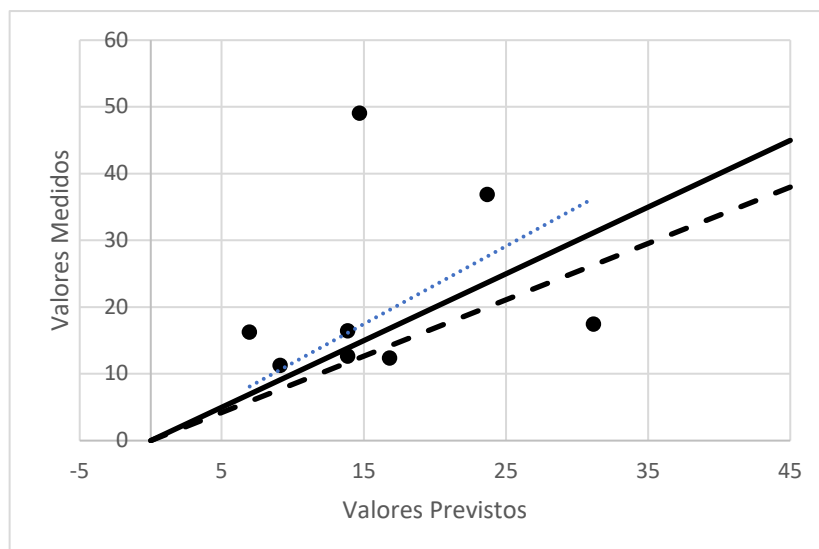


Figura 5. Relação entre os valores previstos e medidos para o modelo calibrado para a argila da camada superior. Em azul a média dos pontos e na linha tracejada o método de cálculo original.

A figura 6 mostra o ajuste para todas as estacas em todas as camadas de areia. Percebe-se também grande variabilidade. Foi feita então a análise separada da areia superficial, onde foi utilizada a cravação com lançamento e a areia mais profunda, onde a cravação foi feita totalmente à percussão de modo a se avaliar a interferência o efeito do método de instalação da estaca. Para esta situação foi encontrado um valor do coeficiente de ajuste de 0,56. Esta situação encontra-se na Figura 7.

A figura 8 por sua vez, mostra as demais estacas em areia, onde a cravação foi feita sem auxílio. Foi obtido um coeficiente de ajuste de 1,21. Dividindo-se o coeficiente de ajuste dos segmentos de estacas onde foi utilizada a lançamento pelo segmento onde a cravação foi sem auxílio percebe-se uma redução na resistência prevista em 53,7% apesar dos cuidados de se lançar areia em volta da estaca assim que a lançamento era interrompida.

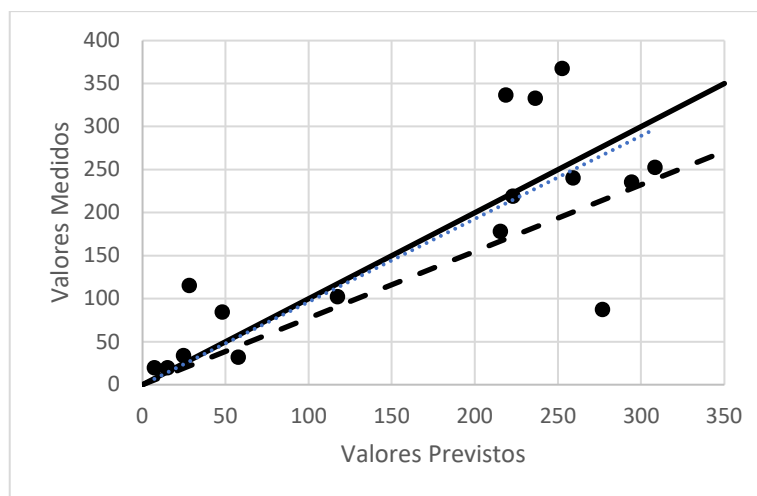


Figura 6. Gráfico relacionando os valores medidos e previstos para os segmentos de estaca em areia.

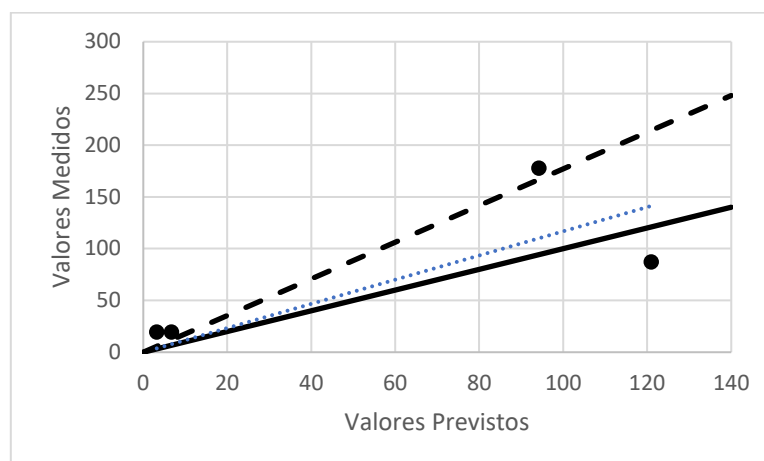


Figura 7. Gráfico relacionando os valores medidos e previstos para os segmentos de estaca em areia em região onde foi utilizado o auxílio de cravação por lançamento.

## 5 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO PRÓXIMO À MOEGA E DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO

Como a moega ferroviária existente tinha restrição quanto a vibrações, foi feita uma medida durante a cravação de uma estaca da fundação de uma torre localizada a aproximadamente 90 metros da moega. Como haviam torres mais próximas, este resultado foi utilizado para permitir a previsão da vibração causada pela cravação das estacas e permitir os ajustes no projeto de modo a não causar danos e foi feita nova medição de

vibrações para uma estaca cravada nas torres próximas à moega para verificação da efetividade das medidas adotadas.

Foi calibrado o modelo de Robinson (2006) que correlaciona a velocidade de pico de partícula (PPV) com a resistência total à cravação dividida pela impedância da estaca e a distância da ponta da estaca ao ponto onde se quer saber a vibração dividida pelo raio da estaca, ou no caso em estudo onde se usaram estacas de seção quadrada, foi dividido pela metade do lado. O valor da velocidade de pico foi limitado a 15mm/s, limite este constante na norma NBR 9653 (ABNT, 2018).

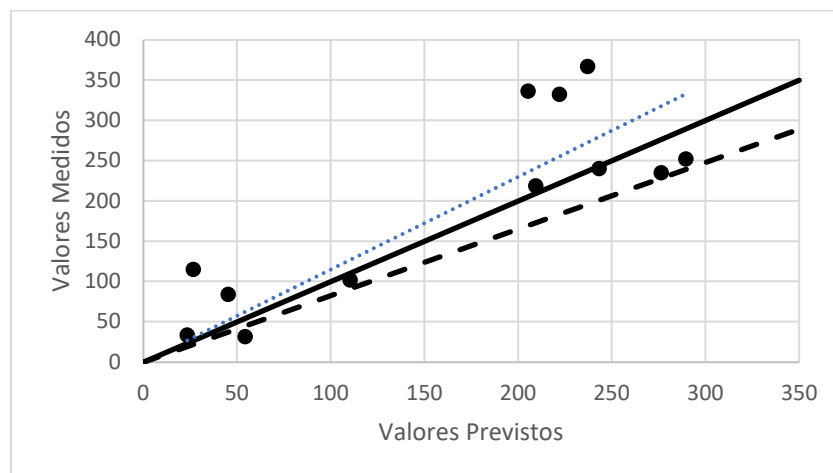


Figura 8. Gráfico relacionando os valores medidos e previstos para os segmentos de estaca em areia onde não foi utilizada lançamento.

Para evitar danos à estrutura da moega durante a execução da fundação dos pilares mais próximos, localizados a cerca de 12 metros da estrutura, a seção da estaca foi limitada a 30x30cm<sup>2</sup>, sendo utilizadas mais estacas nos blocos. Além disso, foi utilizada lançamento desde o início da cravação até cerca de 13,50 metros, sendo utilizada uma peça de 14,0 metros de comprimento como primeiro elemento, mesmo nesta região sendo possível cravar as estacas sem o auxílio.

Foi feita nova medição de vibração quando se estava cravando as estacas do bloco mais próximo à moega para controle e foi possível perceber que a lançamento conduziu a valores de vibração similares ao ruído ambiente e que as vibrações medidas foram próximas ou inferiores às previstas, sendo menores logo após a lançamento. A Figura 9 mostra os valores da velocidade de pico de partícula (PPV) dividida pela impedância da estaca e pela resistência total à cravação versus a metade do lado da estaca dividida pela distância em linha reta até a ponta da mesma.

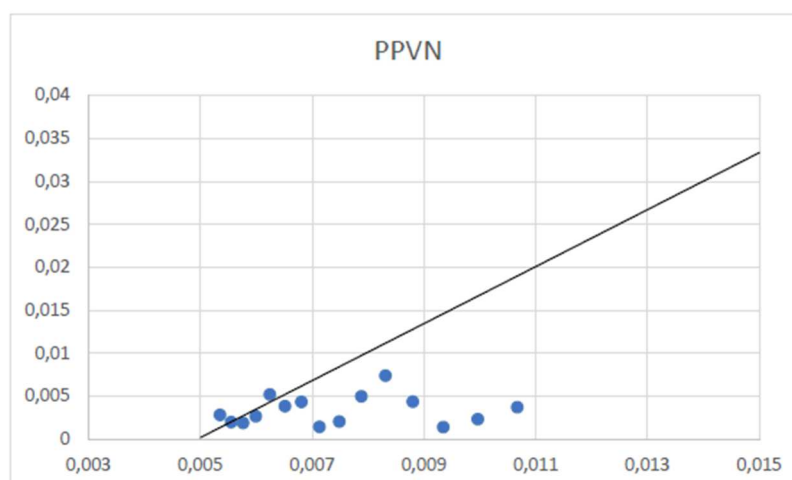


Figura 9. Gráfico mostrando no eixo das abcissas a relação entre metade do lado da estaca e a distância à ponta da estaca sendo cravada e no eixo das ordenadas a velocidade de pico de partícula horizontal no sentido alinhado com a estaca dividida pela resistência total à cravação dividida pela impedância da estaca.

## 6 CONCLUSÕES

O presente artigo mostrou um caso de obra na cidade de Paranaguá, Paraná, onde foram adotadas estacas pré-moldadas para fundação de torres de correias transportadoras e silos. As estacas tiveram a cravação feita à percussão e onde havia areia compacta foi utilizado o auxílio por lançamento.

Ao todo foram executados na obra 67 ensaios de carregamento dinâmico. Destes 67 ensaios foram escolhidas 9 estacas para calibração do método de cálculo de Decourt e Quaresma (1978). Para o atrito lateral em argilas, foi encontrado o valor de ajuste de 1,18 enquanto para areias foi encontrado o valor de 1,21. Este coeficiente de ajuste para argilas é válido para a camada mais próxima da superfície, sendo que a argila da camada mais profunda apresentou aderência superior, indicando se tratar de outro material, com origem geológica distinta, apesar dos valores semelhantes de  $N_{SPT}$ , devendo ser alvo de pesquisas futuras.

Da mesma forma, o coeficiente de ajuste de 1,21 para areias diz respeito às areias onde a cravação foi feita à percussão. Onde foi adotada a lançamento, observa-se um coeficiente de ajuste de 0,56, indicando uma redução no atrito lateral de 53,7%, apesar dos cuidados executivos adotados.

Na região próxima à moega ferroviária foi feita uma medida de vibração com o objetivo de se calibrar o método de Robinson (2006). Foi feita também uma medição de vibração durante a cravação de uma das estacas mais próximas, que indicou a efetividade das medidas tomadas. Na região da moega, as estacas tiveram sua seção limitada a 30x30cm<sup>2</sup> e foi adotada lançamento até um comprimento de 13,50 metros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). NBR 13208. *Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico*. 12p. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 9653. *Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*. Versão corrigida. 16p. Rio de Janeiro.
- Decourt, L., Quaresma, A.R. (1978). *Capacidade de Carga de Estacas a Partir de Valores SPT*, Anais, VI Cobramsef, Rio de Janeiro
- Fellenius, B.H. (2024). *Basics of Foundation Design*. Electronic Edition, January 2024. Disponível em <https://www.fellenius.net/papers/436%20The%20Red%20Book,%20Basics%20of%20Foundation%20Design%202024.pdf>, em 09 de Abril de 2024.
- Portos do Paraná (2022). Relatório de Sustentabilidade. Disponível em [https://www.portosdoparana.pr.gov.br/sites/portos/arquivos\\_restritos/files/documento/2024-02/appa\\_rs2022\\_pi\\_pt\\_v2.4.pdf](https://www.portosdoparana.pr.gov.br/sites/portos/arquivos_restritos/files/documento/2024-02/appa_rs2022_pi_pt_v2.4.pdf), em 02 de Março de 2024.
- Robinson, B.R. (2006). *Models for prediction of surface vibrations from pile driving records*. Dissertação de mestrado. North Carolina State University.
- Valverde, R.M. (2018). *Envoltória máxima de resistência lateral em estacas através do ensaio de carregamento dinâmico com energia crescente*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP.