

Envoltória Máxima de Resistência Lateral em Estacas Através do Ensaio de Carregamento Dinâmico com Energia Crescente

Rafael Marin Valverde

PDI Engenharia, São Paulo, Brasil, rafael.valverde@gmail.com

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, rafael.valverde@gmail.com

Faiçal Massad

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, faical.massad@poli.usp.br

RESUMO: O ensaio de carregamento dinâmico consiste em aplicar uma sequência de golpes no conjunto de amortecimento colocado sobre a estaca e, através destes golpes, são medidos valores de deformação específica e aceleração em função do tempo através de transdutores de força e acelerômetros de alta sensibilidade instalados no topo. O método evoluiu com o avanço da tecnologia ao longo dos anos e com o desenvolvimento de modelos numéricos, que chegam a simular a prova de carga estática na estaca ensaiada dinamicamente com a utilização de golpes com alturas de queda crescentes. O presente estudo é uma iniciativa de aprofundamento do ensaio, com enfoque no cálculo da envoltória máxima de resistência lateral mobilizada ao longo da profundidade do sistema estaca-solo pelo método numérico CAPWAP (“*Case Pile Wave Analysis Program*”). Através de um caso real com ensaios de carregamento estático e dinâmico com energia crescente, serão realizadas avaliações comparativas dos resultados obtidos através da metodologia convencional de analisar a mobilização de resistência estática de apenas um golpe, com a metodologia da envoltória máxima da resistência lateral, proposta neste estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de carregamento dinâmico, energia crescente, atrito lateral, envoltória máxima de resistência estática lateral, capacidade de carga em estacas, CAPWAP.

1 INTRODUÇÃO

A determinação da capacidade de carga e a avaliação do comportamento de um sistema estaca-solo sob carregamento axial são pontos essenciais para o projeto de fundações e eventuais tomadas de decisão durante a sua execução em uma obra. Para esse fim, foram criados inúmeros métodos e análises que são utilizados regularmente na engenharia de fundações, tais como: a) métodos analíticos, baseados em propriedades geotécnicas a partir de ensaios de laboratório; b) métodos semiempíricos que correlacionam provas de carga em estacas com dados de investigações geotécnicas; e c) provas de carga em verdadeira grandeza (ABNT, 2010). A capacidade de carga de um sistema estaca-solo, definida como sendo a somatória das resistências laterais com a resistência de ponta, relacionada às dimensões e

ao tipo de estaca escolhida, é preliminarmente estimada durante a fase do projeto de fundações a partir de parâmetros geotécnicos obtidos em laboratório e em ensaios “*in situ*”, como, por exemplo, a tradicional sondagem à percussão, largamente utilizada no cenário brasileiro.

Dentre outros aspectos em consideração à capacidade de carga, a execução e instalação das estacas no solo causam alterações nas condições geotécnicas originais. O tipo de alteração, extensão, efeitos e modificações subsequentes dependentes do tempo estão principalmente relacionados ao tipo de solo e ao método de execução das estacas. Estes métodos e considerações não são utilizados isoladamente para a determinação da carga de trabalho de um projeto de fundações. Provas de carga estáticas são executadas para medir a resposta direta de uma estaca sob carregamento axial a fim de determinar sua capacidade portante, podendo

ser realizadas tanto nos estágios iniciais do projeto, quanto na fase de execução para avaliar as considerações geotécnicas assumidas no projeto. Para avaliar o comportamento da estaca durante a fase de execução, o projetista deve determinar o período após sua instalação que se deve aguardar para que sejam realizadas as provas de carga. Dependendo das condições locais, este período pode variar de um dia a mais de uma semana.

A determinação da capacidade estática através de ensaio de carregamento dinâmico tornou-se atualmente uma prática recorrente e largamente utilizada mundo afora, com vantagens relacionadas a custo, tempo de execução e aquisição de inúmeras informações complementares a respeito da estaca ensaiada. Também conhecido como prova de carga dinâmica de alta deformação, este é um método que determina a capacidade de carga do sistema estaca-solo para carregamentos axiais. No Brasil, o ensaio de carregamento dinâmico é regido pela NBR-13208/94. Esta técnica foi desenvolvida inicialmente com o objetivo de acompanhar o processo de cravação de estacas pré-moldadas (LIKINS; RAUSCHE, 2008). Entretanto, com o avanço progressivo da tecnologia esta técnica também permite analisar a capacidade de carga de estacas moldadas “*in loco*” e fornecer informações que garantam a segurança e a integridade de estacas cravadas, bem como a eficiência do sistema de impacto utilizado.

Em geral, o golpe com a máxima capacidade de carga mobilizada na estaca durante o ensaio é aquele escolhido para ser analisado pelo método numérico CAPWAP, que fornece uma simulação do ensaio de carregamento estático e determina a resistência estática mobilizada como se a estaca tivesse recebido apenas aquele único golpe desde o final de sua cravação ou instalação, desconsiderando alterações das propriedades do solo causadas por golpes anteriores de menor energia. Durante o ensaio de carregamento dinâmico e aplicação dos golpes, três fenômenos ocorrem: (i) em cada golpe aplicado as resistências de atrito lateral e de ponta mudam devido aos efeitos no solo; (ii) cada golpe ativa diferentes níveis de resistência devido à variação da energia aplicada; (iii) há um aumento das tensões residuais a cada novo

golpe aplicado e um aumento na penetração da estaca (RAUSCHE; RICHARDSON; LIKINS, 1996). O sistema de impacto deve transmitir energia suficiente para que seja mobilizada toda a resistência de ponta e de atrito lateral. Porém, a aplicação de golpes com alturas de queda crescentes não mobiliza tais resistências em seus golpes iniciais (baixa energia) e os efeitos dinâmicos causados pelos golpes alteram as propriedades do solo. Assim, mobilizações dinâmicas podem ocorrer apenas na aplicação dos últimos golpes, enquanto que os golpes de menor energia podem ter alterado as condições iniciais do solo em camadas próximas ao topo da estaca e dos sensores instalados no fuste (RAUSCHE; RICHARDSON; LIKINS, 1996). Isto resulta em alteração das propriedades do solo, que não será levada em conta na análise CAPWAP de um único golpe. Portanto, o método da envoltória máxima de resistência lateral, que será mostrado neste estudo, utiliza a análise CAPWAP em todos os golpes aplicados e tem como objetivo recuperar a informação de atrito e/ou resistência de ponta perdidos ou não mobilizados nos sucessivos golpes durante o ensaio de carregamento dinâmico.

2 ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO

O ensaio de carregamento dinâmico consiste em aplicar uma sequência de golpes no conjunto de amortecimento colocado sobre a estaca e medir valores de deformação específica e aceleração em função do tempo através de transdutores de força e acelerômetros de alta sensibilidade instalados a uma distância mínima estabelecida por norma (ABNT, 2006).



Figura 1. Sensores do PDA instalados no fuste da estaca

Após a aplicação dos golpes gerados pelo sistema de impacto, os sensores registram a deformação e a aceleração do material e enviam para o PDA (“*Pile Driving Analyzer*”), que processa e calcula os sinais de força e de velocidade do golpe registrados. Dentre as informações obtidas através do processamento dos dados está a resistência à penetração (RMX) da estaca calculada através do método simplificado “CASE”, bem como a energia máxima do golpe, verificação de anomalia estrutural do material que compõe a estaca, valores máximos de tensão no fuste e na ponta.

Dados adquiridos em campo podem posteriormente ser analisados pelo modelo matemático CAPWAP. Os resultados desta análise incluem a capacidade estática simulada e a distribuição de resistência dos segmentos do sistema estaca-solo.

3 O MÉTODO NUMÉRICO “CAPWAP”

O CAPWAP é programa computacional que usa um modelo matemático cujos resultados são baseados na qualidade do ajuste entre uma curva de alguma variável calculada e esta mesma variável medida pela aquisição do sinal no topo da estaca (“*Match Quality*”).

CAPWAP é citado na norma brasileira da ABNT, NBR 13208/2007, item 6.3 (Registro, interpretação e análise de dados):

“6.3.4 Os resultados das análises numéricas tipo CAPWAP® devem incluir as seguintes informações básicas: [...] g) modelo de cargas mobilizadas versus deslocamentos, usando-se o modelo do solo e da estaca.”

3.1 Modelo da Estaca Pelo CAPWAP

O CAPWAP permite calcular as tensões e movimentos dividindo a estaca em N_p (Figura 2) segmentos de propriedades uniformes e de aproximadamente um metro de comprimento. Cada elemento (i) possui um tempo de propagação da onda (Δt_i). Assim sendo, a velocidade de propagação da onda para um elemento de estaca é definido pela Expressão 1.

$$c_i = \sqrt{E_i / \rho_i} \quad (1)$$

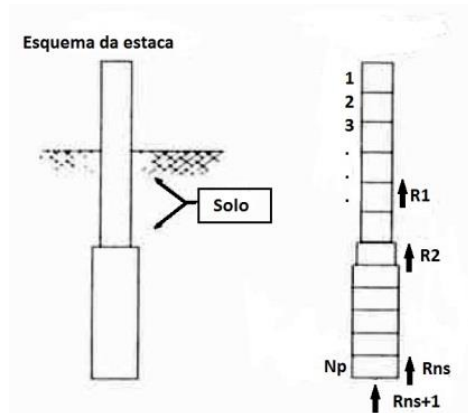


Figura 2. Divisão de elementos da estaca no CAPWAP

onde:

E: módulo de elasticidade da estaca;

ρ : densidade de massa.

Assim, o comprimento de cada segmento se relaciona com Δt_i :

$$\Delta L_i = \Delta t_i \cdot c_i \quad (2)$$

Os segmentos da estaca são considerados linearmente elásticos. Na análise CAPWAP, são registradas as propagações das ondas descendentes e ascendentes. A superposição destas ondas é feita conforme a mecânica das ondas. As forças ascendentes e descendentes são somadas e as velocidades de propagação equivalem às suas diferenças divididas pela impedância da estaca no segmento i.

3.2 Modelo do Solo Pelo CAPWAP

O modelo separa o solo em elementos de atrito lateral (N_s) e a resistência de ponta. O modelo simplificado de Smith (1960) representou estes elementos de atrito lateral como elementos massa-mola (Figura 3) e amortecedor que requerem três parâmetros em cada elemento: a resistência máxima mobilizada, R_{ui} (ou resistência última de cada elemento), q_i (“*quake*”), definido como a parcela de deformação elástica do solo e o fator de amortecimento J_i (ou *damping*). O “*quake*” é importante para o cálculo do deslocamento estático, pois é a distância que a estaca deve se deslocar para baixo até que se atinja a resistência última mobilizada de um determinado golpe de cada elemento de solo (RAUSCHE *et al.*, 1994).

A capacidade de carga estática total (R_{ut}) da estaca é a somatória dos valores de R_{ui} , resistências dos elementos do fuste e da ponta.

O modelo de resistência do solo de Smith (1960) considera o movimento da estaca para calcular as tensões. Ao sofrer o impacto, a estaca exerce uma resistência que movimenta o solo.

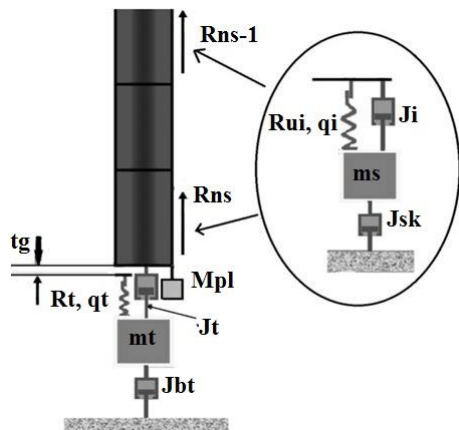


Figura 3. Representação do solo pelo CAPWAP

Na Figura 3 tem-se:

J_i e J_t : coeficientes de amortecimento do solo no fuste e na ponta da estaca;

M_{pl} : “embuchamento” de solo na ponta;

tg : vazio entre a ponta da estaca e o solo;

R_{ns} : elementos de solo com valores de resistência e “quake” (R_{ui} e q_i);

3.3 Cálculo da Resistência Estática Mobilizada Pelo CAPWAP

A figura 4 mostra a relação entre a resistência estática e o deslocamento da estaca.

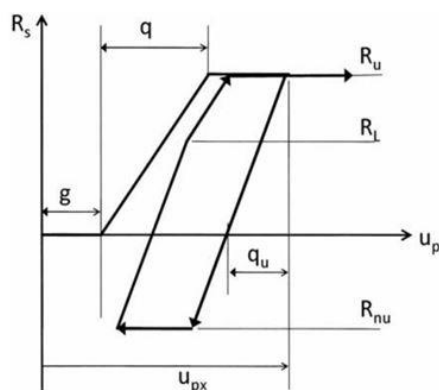


Figura 4. Curva de resistência estática por deslocamento

À medida que um elemento da estaca move-se para baixo a resistência pode eventualmente

permanecer nula por algum vazio existente, graficamente representado por “g” (“*resistance gap*”) e, a partir daí, aumentar linearmente por uma distância q (“*quake*”) no eixo das abcissas, até atingir a máxima resistência estática mobilizada deste elemento, R_u , e mantém-se constante até atingir o deslocamento máximo, u_{px} . A seguir ocorre a fase de descarregamento com um coeficiente angular definido pelo “*quake*” de descarregamento, q_u (“*unloading quake*”) no eixo dos deslocamentos até uma resistência negativa, R_{nu} (RAUSCHE *et al.*, 2010). As forças de resistência do solo causam reflexões de mesma magnitude e direções opostas em um tempo $(2 \cdot x)/c$, onde x é a profundidade do elemento de solo. A distribuição da resistência lateral máxima mobilizada no golpe para todos os elementos é diretamente determinada pela aquisição de porções de reflexões entre o tempo de impacto e o tempo da reflexão da onda ascendente. Essas informações são suficientes para simular a curva carregamento-deslocamento.

4 DADOS OBTIDOS E ANÁLISES

Neste ítem são apresentados os dados obtidos em provas de carga, sondagem e análises relevantes a respeito da envoltória máxima de resistência lateral ao longo da profundidade de um caso de obra portuária situada no Estado de São Paulo. A estaca é pré-moldada de concreto, circular, vazada com diâmetro externo de 80 cm e parede de 15 cm, cravada com 43,32 m de comprimento. Os ensaios dinâmico e estático foram realizados, respectivamente, 8 dias e 70 dias após a instalação da estaca.

4.1 Subsolo no Terminal Portuário

O subsolo local é composto por uma camada superficial de argila SFL muito mole, marinha, com cerca de 22 m de espessura, sobreposta a areia fina, pouco siltosa ou pouco argilosa, fofa a medianamente compacta (SPT variando de 7 a 22 golpes), com cerca de 10 m de espessura, seguida de camada argila transicional (AT), com SPT da ordem de 5. Informações sobre estes tipos de sedimentos podem ser encontrados em MASSAD (2009).

4.2 Prova de Carga Estática

A capacidade de carga do sistema na prova de carga estática foi de 8.570 kN, cuja curva é mostrada na Figura 5.

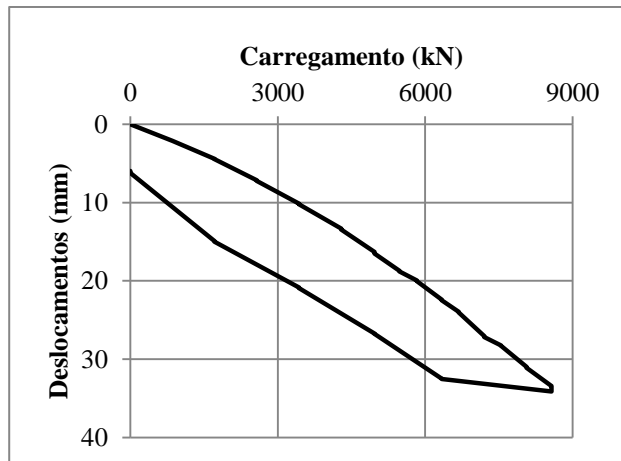


Figura 5. Curva carregamento-deslocamento na prova de carga estática

4.3 Ensaio Dinâmico e Análise CAPWAP

O último golpe aplicado, correspondente à máxima mobilização de resistência foi utilizado para a análise CAPWAP. Dentre os resultados, Capwap gera uma curva de carregamento por deslocamento simulando uma prova de carga estática após a obtenção do melhor ajuste “*Match Quality*” que, neste caso, foi de 0,65. Dessa forma é possível realizar uma comparação gráfica entre a curva simulada pela análise CAPWAP e a curva obtida na prova de carga estática, conforme mostrada na Figura 6.

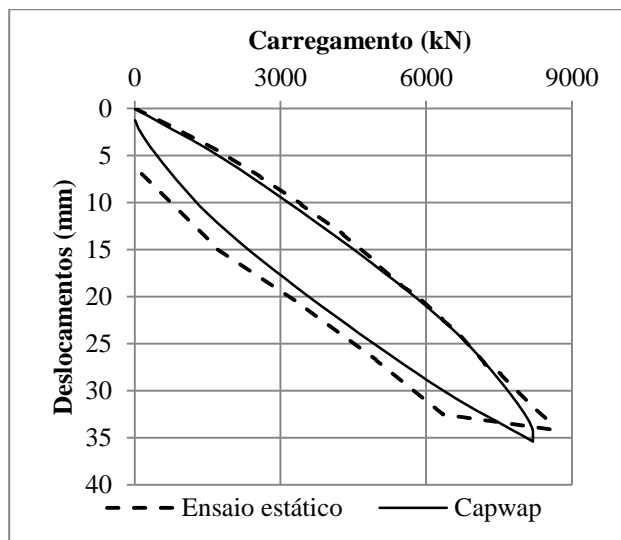


Figura 6. Comparação entre prova de carga estática e análise estática simulada pelo CAPWAP

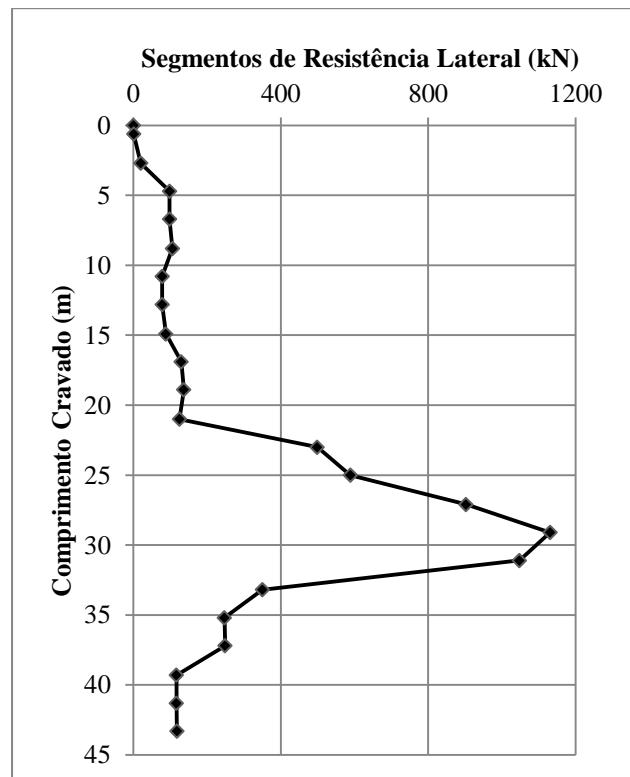


Figura 7. Resistência lateral ao longo da profundidade

A Figura 7 mostra a distribuição do atrito lateral ao longo do fuste da estaca, com valores consistentes com o perfil do subsolo, em particular, na camada de areia, entre 22 m e 33 m, com um aumento abrupto da resistência lateral dos elementos do sistema estaca-solo.

O CAPWAP indicou em uma capacidade mobilizada de 8.200 kN, com 1.874 kN de contribuição de ponta (23%) e 6.326 kN de atrito lateral (77%).

4.4 Método da Envoltória Máxima de resistência Lateral Através do CAPWAP

A metodologia proposta neste trabalho trata da determinação da envoltória máxima de resistência lateral a partir de todos os sinais obtidos em um ensaio de carregamento dinâmico com alturas de queda crescentes. Para isso, são apresentados os resultados de cada análise CAPWAP de todos os golpes aplicados na estaca, para avaliar o desenvolvimento da mobilização da resistência lateral ao longo da profundidade e o comportamento do sistema estaca-solo em todos os segmentos.

Foram aplicados 9 (nove) golpes partindo de 20 cm de altura de queda até 120 cm, essa última sendo repetida mais 3 vezes.

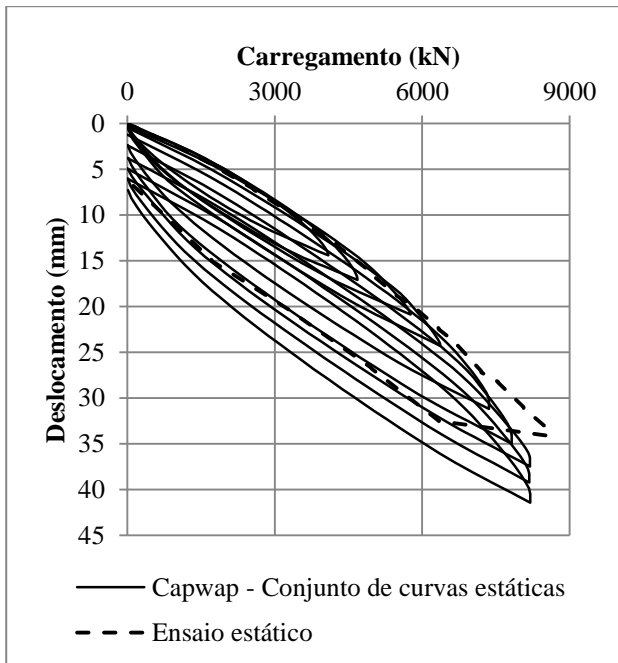


Figura 8. Correlação entre prova de carga estática e o conjunto de curvas simuladas pelo CAPWAP

A curva da prova de carga estática (PCE) está representada em linha tracejada na Figura 8 e o conjunto de curvas em linhas contínuas representa a análise estática simulada pelo CAPWAP de todos os golpes, com energia crescente, aplicados durante o ensaio de carregamento dinâmico. O deslocamento final de uma curva estática simulada pelo CAPWAP a partir de um golpe aplicado no ensaio dinâmico é o início da curva do golpe subsequente, simulando uma prova de carga cíclica. Além da curva estática simulada, cada golpe foi analisado individualmente, resultando em uma distribuição de resistência lateral ao longo da profundidade (Figura 9).

Ao comparar as Figuras 6 e 8, é possível notar que existe um bom ajuste com a curva da prova de carga estática na fase de carregamento, tanto para análise CAPWAP de apenas um golpe (Figura 6) quanto na aplicação da sequência de golpes com energia crescente (Figura 8) e que não houve indícios de ruptura, em particular na prova de carga estática, com carga máxima mobilizada de 8.570 kN.

À medida que a energia aplicada durante o ensaio dinâmico aumenta, nota-se, na Figura 9, que a resistência lateral diminui ao longo do fuste e a resistência na ponta da estaca vai sendo mobilizada gradativamente. A cada golpe aplicado durante o ensaio, o solo sofre alterações e perde parte da resistência

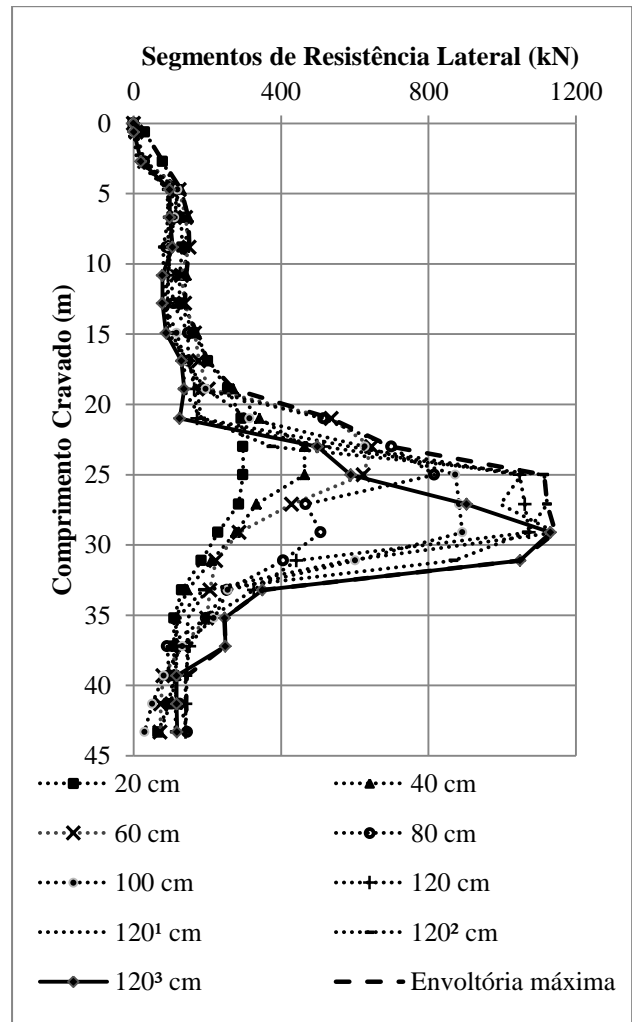


Figura 9. Resistência lateral vs. profundidade para golpes com energia crescente

recuperada durante a fase de cicatrização.

A Figura 9 evidencia algumas considerações a respeito do atrito lateral: (a) golpes com menores alturas de queda tendem a apresentar maiores mobilizações de resistência lateral nos primeiros elementos do sistema (golpes de 20 cm a 80 cm mobilizaram maiores resistências estáticas laterais até aproximadamente 24 metros de profundidade); (b) os primeiros 20 metros de profundidade mostram uma redução gradativa do atrito lateral à medida que a energia aplicada no golpe aumenta, até um limite mínimo, onde mostra evidências do processo de amolgamento do solo nos trechos iniciais, com solo de argila mole; (c) os golpes iniciais não são capazes de mobilizar a resistência máxima de todos os elementos do fuste, e na segunda metade de elementos do sistema, as resistências laterais dos golpes iniciais são baixas. Nestes casos, o “quake” lateral foi decrescente em direção à ponta da

estaca, indicando que esses golpes não foram suficientes para mobilizar o máximo da resistência lateral em camadas inferiores.

A Figura 10 permite comparar graficamente a resistência lateral mobilizada no último golpe de 120 cm com os máximos das resistências obtidas no método da envoltória máxima. Quanto maior o número de análises, mais suavizada é a curva resultante da envoltória máxima. Corroborando as afirmações feitas acima, é possível notar que os golpes anteriores ao de máxima energia aplicada mobilizaram resistências laterais maiores nas camadas superiores a trinta metros de profundidade.

Tabela 1. Resultados obtidos

Ensaio	Resistência máxima mobilizada (kN)		
	Atrito	Ponta	Total
Prova de Carga Estática	-	-	8.570
CAPWAP Individual	6.326	1.874	8.200
Envoltória Máxima	8.676	1.874	10.550

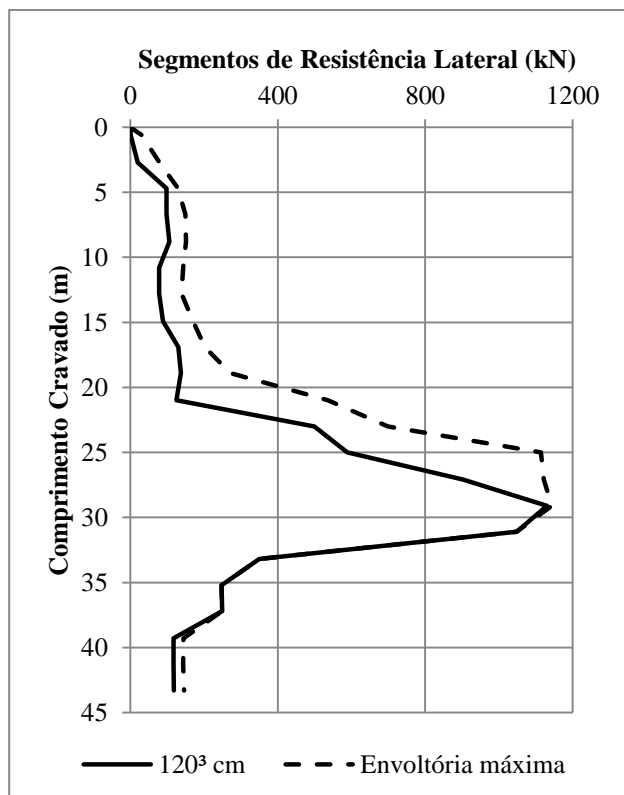


Figura 10. Resistência lateral do último golpe vs envoltória máxima da Figura 9

A Tabela 1 mostra que houve um aumento significativo do atrito lateral considerando

valores máximos de atrito lateral, isto é, da envoltória máxima dos pontos da Figura 9. A contribuição da ponta se mantém a mesma da análise CAPWAP do último golpe.

5 CONCLUSÃO

Em geral, o uso da análise CAPWAP limita-se ao último golpe aplicado de uma cravação ou ao golpe de maior mobilização de resistência estática obtida durante um ensaio. Entretanto, esta prática não faz uso de todo o potencial de um ensaio de carregamento dinâmico (FELLENUS, 2015).

A distribuição do atrito lateral ao longo da profundidade em conjunto com a aplicação de golpes com alturas de queda crescentes possibilita a aplicação do método da envoltória máxima da resistência lateral para avaliar o comportamento do sistema estaca-solo ensaiado e estimar com maior precisão a máxima capacidade de carga estática lateral mobilizada. Para tanto, utiliza-se a resistência lateral calculada para os golpes de menor energia nas camadas superiores do sistema estaca-solo e as resistências calculadas em camadas inferiores do sistema para os golpes de maior energia. Quanto mais análises CAPWAP forem realizadas, maior será a precisão da envoltória máxima.

O método da envoltória máxima mostra que a análise CAPWAP de um único golpe pode subestimar os valores de resistência lateral e que sua utilização pode resultar em economia nas fundações de uma obra, tanto para reavaliar o comprimento estabelecido no projeto de fundações quanto em casos em que o resultado da capacidade de carga da análise CAPWAP de um golpe não tenha atingido o coeficiente de segurança estabelecido em projeto. Vale ressaltar que tal método não pode ser aplicado em caso de relaxação na ponta e deve-se atentar a possíveis erros para não superestimar o valor de resistência lateral obtido no método da envoltória máxima.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12131: estacas - prova de carga**

- estática - método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006. 8 p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: projeto e execução de fundações**, Rio de Janeiro, 2010. 91 p.
- SMITH, E. A. L. Pile Driving Analysis by the Wave Equation. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v. 86, 1960.
- FELLENIUS, B. H. **Basics of foundation design**. 432 p. ed. [S.l.]: Eletronic Edition, 2015.
- LIKINS, G.; RAUSCHE, F. **What constitutes a good PDA test?** Application of Stress Wave Theory to Piles. Lisbon: J.A. Santos. 2008. p. 403-407.
- MASSAD, F. **Solos Marinhos da Baixada Santista - Características e Propriedades Geotécnicas**. São Paulo: Editora de Textos, 2009.
- RAUSCHE, F. et al. Static Pile Load-Movement from Dynamic Measurements. **Proceedings of Settlement '94; Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments: College Station, TX**, June 1994. 291-302.
- RAUSCHE, F. et al. Static and Dynamic Models for CAPWAP Signal Matching. **The art of foundation engineering practice, Geotechnical Special Publication**, Reston, v. 198, p. 534-553, Janeiro 2010. ISSN ASCE.
- RAUSCHE, F.; RICHARDSON, B.; LIKINS, G. E. Multiple Blow CAPWAP Analisis of Pile Dynamic Records. **Proceedings of the Fifth International Conference on The Application of Stress Wave Theory to Piles**, Orlando, FL, p. 144 -162, 1996.