

Sobreposição da Capacidade de Carga de Estacas pela Envoltória Máxima de Resistência Lateral – Estudo de Caso na Baixada Santista, SP

Rafael Marin Valverde

Sócio diretor da PDI Engenharia

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

Faiçal Massad

Professor Titular Sênior, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, faical.massad@poli.usp.br

RESUMO: A estimativa da capacidade de carga de uma estaca através do ensaio de carregamento dinâmico se tornou frequente e largamente utilizado no cenário brasileiro nas últimas décadas. Para o caso de estacas cravadas por impacto, o ensaio de carregamento dinâmico pode ser realizado tanto no final da cravação quanto após um determinado período de repouso, a fim de garantir resistência adicional por conta da cicatrização do solo. Ao final da cravação, camadas de solos coesivos, que envolvem a estaca, encontram-se em seu estado mais perturbado e é esperado que o atrito lateral tenha seu menor valor, sendo a capacidade de carga (ou a carga mobilizada) predominantemente proveniente por resistência de ponta. Com a cicatrização do solo, uma parcela da carga por atrito lateral é recuperada. Entretanto, nestas condições, a energia do sistema de cravação pode não ser capaz de mobilizar toda a resistência de atrito e de ponta. O artigo apresenta um estudo de caso de uma estaca na Baixada Santista, submetida a ensaios tanto na fase de final de cravação quanto em diversos períodos de repouso, e propõe a alternativa de sobreposição dos resultados destes diversos ensaios a fim de se determinar a máxima carga mobilizada. Para os ensaios realizados na recravação faz-se uso do Método da Envoltória Máxima de Resistência Lateral (Valverde, 2018) e são feitas comparações entre: a) o procedimento da sobreposição dos resultados; b) o método tradicional de se avaliar apenas o último golpe; e c) uma prova de carga estática.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de carregamento dinâmico, envoltória máxima de resistência lateral, capacidade de carga de estacas, CAPWAP.

ABSTRACT: The estimation of the load capacity of a pile through the dynamic load test has become frequent and widely used in Brazil in the last decades. In the case of driven piles, the dynamic loading test can be performed both at the end of the driving and after a certain rest period in order to guarantee additional resistance of the system due to the soil setup. At the end of pile driving, the surrounding soil is in its most disturbed state and the lateral resistance is expected to have its lowest value; therefore the mobilized load capacity predominantly comes from toe resistance. With the soil setup, a portion of the lateral resistance is recovered; however the energy of the driving system may not be able to mobilize all the lateral and toe resistances under these conditions. This paper presents a case study of a pile in Santos Coastal Plain, where tests were performed at the end of driving and in several rest periods, and proposes an alternative of superposition of these several test results in order to determine the maximum mobilized load in the pile-soil system. For the tests performed during rest periods, the Maximum Envelope of Lateral Resistance Method (Valverde, 2018) is used and comparisons are made between: a) the procedure of the superposition of the results; b) the traditional method of evaluating only the last blow; and c) a static load test.

KEYWORDS: Dynamic load test, maximum envelope of lateral resistance, pile load capacity, CAPWAP.

1 Introdução

O ensaio de carregamento dinâmico tradicional, baseado na teoria da propagação de onda unidimensional, consiste em aplicar uma sequência de golpes de energia constante usando sensores de deformação e aceleração instalados no topo da estaca. O ensaio tradicional evoluiu com o avanço da

tecnologia e a introdução do método de energia crescente (Aoki, 1997). O presente estudo fundamenta-se nos métodos de energia crescente e na Envoltória Máxima de Resistência Lateral (Valverde, 2018) a fim de recuperar resistências mobilizadas, ao longo do fuste, de golpes anteriores ao de maior energia, em ensaios de carregamento dinâmico realizados na cravação e em diversos períodos de repouso na mesma estaca.

É apresentado um caso de obra na Baixada Santista, envolvendo estaca de aço, de grandes dimensões. Além de uma prova de carga estática, foram realizados 6 (seis) ensaios de carregamento dinâmico na mesma estaca, com martelo hidráulico Junttan HHK (90kN), com alturas de queda variando de 20 a 120 cm, no final de cravação e após repouso consecutivos de 3 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas e ao final de 216 horas (9 dias). Os ensaios em diversos períodos de repouso possibilitaram a avaliação do desenvolvimento do atrito lateral ao longo do tempo e uma análise do "set-up", ambas apresentadas por Valverde (2018) e Valverde e Massad (2018-a). O objetivo do presente artigo é propor a sobreposição dos resultados destes diversos ensaios e fazer comparações tanto com o método tradicional, de se avaliar apenas o último golpe, quanto com uma prova de carga estática.

1 Procedimentos e metodologias

1.1 Ensaio de carregamento dinâmico e análise CAPWAP

Os dados do ensaio de carregamento dinâmico, obtidos em campo, podem posteriormente ser analisados pelo CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program), um programa computacional cujos resultados incluem, entre outros, uma análise estática simulada da curva carga-recalque e a distribuição da resistência ao longo da profundidade. Estes resultados são baseados na qualidade do ajuste entre a curva de uma variável calculada e esta mesma variável medida pela aquisição do sinal no topo da estaca, chamado "Match Quality".

O CAPWAP permite calcular as tensões e movimentos dividindo a estaca em segmentos de propriedades uniformes, considerados linearmente elásticos e de aproximadamente um metro de comprimento. São registradas as propagações das ondas descendentes e ascendentes e a sua superposição é feita conforme a teoria da equação da onda. As forças ascendentes e descendentes são somadas e as velocidades de deslocamentos equivalem às suas diferenças divididas pela impedância da estaca em cada segmento (Rausche *et al.*, 1994). O deslocamento e a velocidade de cada segmento de estaca em relação ao solo são a base para a determinação da resistência oferecida pelo solo. O modelo do solo inclui conjuntos de massa-molas e amortecedores para representar o atrito lateral e a resistência de ponta e foi originalmente desenvolvido por Smith (1960).

1.2 Ensaios dinâmicos no final de cravação e na recravação

No caso de estacas cravadas, os ensaios dinâmicos são realizados durante a aplicação de impactos de um martelo, seja no final da cravação ou após um período de repouso. Conforme foi mencionado, dentre outros resultados obtidos no ensaio, são estimadas as parcelas de atrito lateral ao longo do fuste e da resistência de ponta. As corretas interpretações dos resultados relativos à capacidade de carga (ou à carga mobilizada) de uma estaca dependem de dois fatores: (a) da recuperação da resistência do solo ao longo do tempo; e (b) da energia aplicada ser suficiente para mobilizar todas as resistências durante o ensaio. O primeiro fator é comum para qualquer tipo de ensaio, seja de natureza dinâmica ou estática. Já o segundo fator, na situação de um martelo sem energia suficiente para mobilizar toda a resistência, seria como uma prova de carga estática interrompida antes da ruptura devido a uma limitada capacidade de aplicação de carga e do seu sistema de reação (Hussein *et al.*, 2002).

A cravação de estacas por impacto de um martelo pode mudar drasticamente as condições geotécnicas naturais do solo. Dependendo do tipo de solo, a cravação pode trazer aumento de poropressão, efeitos de densificação em solos não-coesivos, amolgamento em solos predominantemente argilosos e siltosos. Em solos argilosos, o amolgamento e a alteração do estado de tensões ao redor da estaca torna mais fácil a cravação em sua fase inicial. Com o passar do tempo, após a instalação, a dissipação de poropressão gera um ganho de resistência por atrito lateral, podendo resultar em um aumento significativo da capacidade de carga da estaca (Hussein *et al.*, 2002).

O ensaio dinâmico no final da cravação costuma ser realizado com o mesmo martelo utilizado na instalação da estaca. Pelo fato do sistema de impacto ter conseguido cravar a estaca até a profundidade desejada, houve a mobilização de toda a resistência lateral e da máxima resistência de ponta, oferecidas pelo solo.

A partir deste momento, com o sistema estaca-solo em repouso, a recuperação da resistência lateral do solo ao longo do tempo traz novas condições para o ensaio de carregamento dinâmico. Quando este tempo é relativamente curto, de uma semana a 10 dias para não atrapalhar o cronograma da obra, o martelo utilizado para este novo ensaio pode ser o mesmo que foi utilizado na cravação. Os martelos geralmente são escolhidos especificamente para a cravação das estacas da obra após uma investigação geotécnica local e não para realizar ensaios dinâmicos em estacas após um período maior de cicatrização do solo. Isso faz com que o ensaio dinâmico na recravação seja realizado, por vezes, com um martelo com energia insuficiente para mobilizar todo o sistema, o que acaba resultando em um ensaio dinâmico limitado e interrompido prematuramente. A limitação de energia transmitida à estaca faz com que as resistências nos últimos segmentos do sistema estaca-solo não sejam totalmente mobilizados, resultando em um menor atrito lateral nos últimos metros e em um menor valor de resistência de ponta.

Esse fenômeno pode também ocorrer mesmo utilizando um único martelo, com mesma altura de queda, tanto na cravação e quanto nas recravações, o que é usual em obras de grande porte. É o caso de obra na Baixada Santista, objeto de análise do presente trabalho, em que foram realizados ensaios tanto no final de cravação (1ª fase), visando obter a máxima resistência de ponta, quanto após 9 dias de repouso (2ª fase), a fim de medir o aumento do atrito lateral causado pela cicatrização do solo. Nesta 2ª fase, fêz-se uso do Método da Envoltória Máxima de Resistência Lateral, proposto por Valverde (2018).

2 Caso de Obra analisado

Os ensaios foram realizados em uma estaca-teste para uma obra de ampliação de um cais às margens do Rio Piaçaguera, localizado entre os municípios de Santos e Guarujá (“Baixada Santista”), Brasil. A estaca ensaiada foi confeccionada em aço, com seção circular vazada, diâmetro externo de 91,4 cm e espessura de parede igual a 16 mm, resultando em uma área de aço da seção transversal igual a 451,4 cm². A Estaca Teste (denominada PC01) possuía comprimento total de 40,14 m, sendo 33,30 m cravados no solo em seu último ensaio. Ela foi submetida a uma prova de carga estática e a diversos ensaios de carregamento dinâmico.

A estaca foi instalada em 11 de fevereiro de 2015, com a utilização de um martelo hidráulico Junttan HHK com peso do pilão de 90 kN. Nesta obra foi realizada a instrumentação dinâmica de cravação, obtenção de nega ao final do estaqueamento e recravações após repousos consecutivos de 3 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas e ao final de 216 horas (9 dias).

2.1 Resultados das análises CAPWAP do último golpe no final de cravação e após 9 dias (216 h) de repouso

Neste item é apresentado o resultado da análise CAPWAP após o maior repouso (216 horas) em comparação com o resultado obtido no final de cravação, para a mesma energia aplicada, equivalente a 120 cm de altura de queda.

Como mostra a Tabela 1, ao final da cravação (1ª fase) foi estimada uma resistência lateral total de 1.381 kN pelo CAPWAP enquanto que, após o período de 216 horas (9 dias) (2ª fase), essa resistência foi de 4.647 kN para os golpes de maior energia (120 cm), o que corresponde a um aumento de aproximadamente 336%.

Essa diferença significativa se manifesta na distribuição da resistência lateral ao longo do fuste, como se mostra na Figura 1. Percebe-se também, pela Tabela 1, que o oposto vale para a resistência de ponta, cujo maior valor encontra-se no resultado da análise CAPWAP do final da cravação (1ª fase).

Tabela 1. Resultados do CAPWAP - Final de cravação e repouso de 9 dias (216h), golpes de 120cm

Períodos do ensaio (Fases)	Capacidade total (kN)	Resistência por atrito lateral (kN)	Resistência de ponta (kN)	Quake lateral (mm)	Quake de ponta (mm)
1ª Fase - Final de cravação	7.098	1.381	5.717	7,50	3,10
2ª Fase - Repouso de 9 dias	9.559	4.647	4.912	5,73	1,76

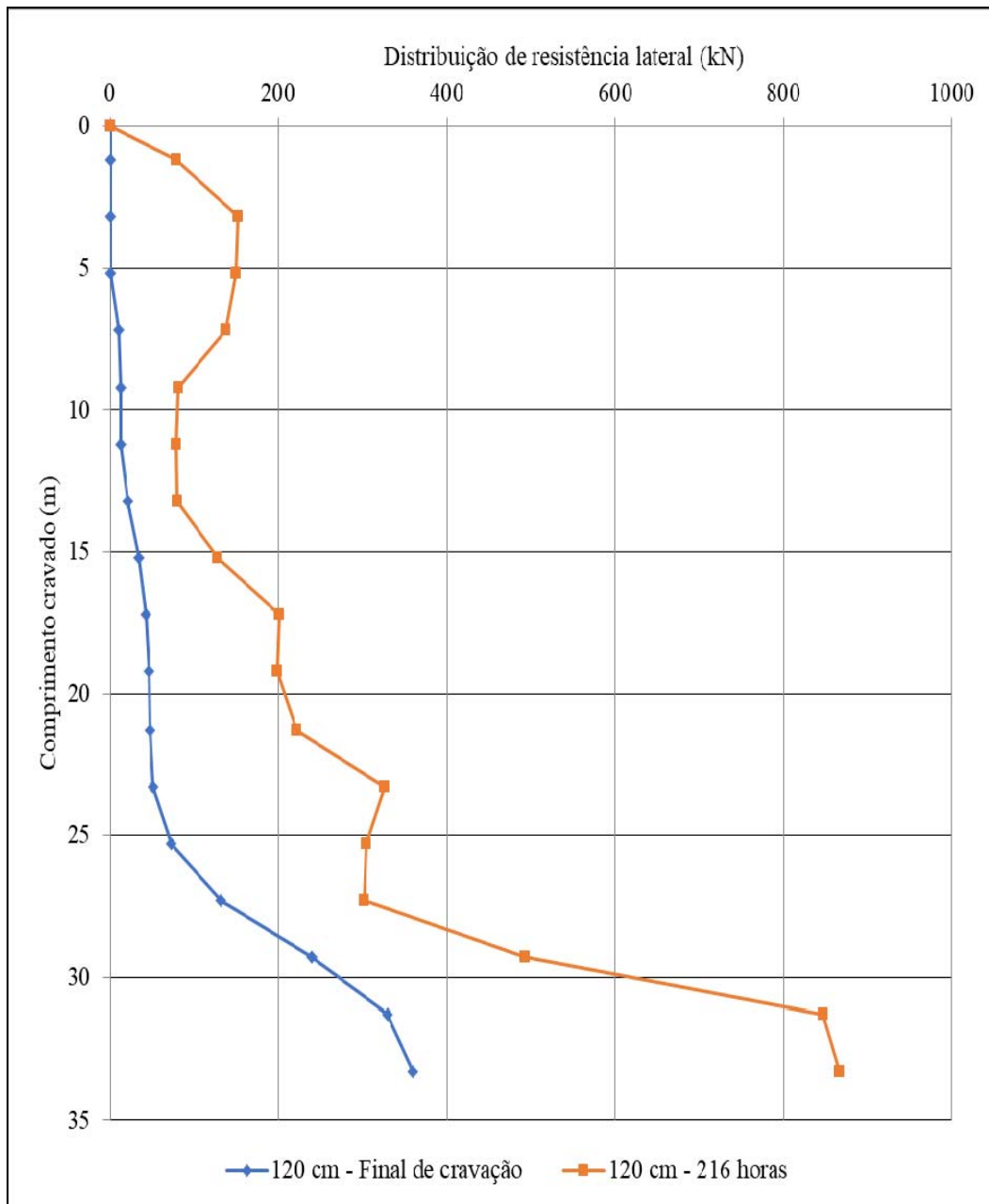


Figura 1. Distribuição de atrito lateral - final de cravação vs repouso de 216 h (9 dias)

De fato, para uma aplicação de mesma energia no ensaio dinâmico, em diferentes etapas, os resultados finais podem ser muito diferentes entre si. Enquanto que no final de cravação foi possível mobilizar 5.717 kN de resistência de ponta, a aplicação da mesma energia após o repouso de 9 dias foi capaz de mobilizar

4.912 kN, ou seja, apenas 85% do valor inicial, subestimando a resistência de ponta da estaca. Isto ocorre, pois na recavação, uma maior parcela da energia aplicada pelo martelo é absorvida pelo atrito lateral ao longo do fuste e, desta forma, sobra menos energia para mobilizar a resistência de ponta.

Conclui-se, portanto, que ao utilizar o mesmo sistema da cravação e aplicar a mesma energia no ensaio dinâmico, porém em diferentes fases, podem ser gerados resultados desiguais, ora mobilizando resistências predominantemente de ponta ora de atrito lateral. Assim sendo, com o objetivo de recuperar o atrito lateral, do maior período de repouso, e combinar com o maior valor mobilizado da resistência de ponta, no final da cravação, foi aplicado o método da Envoltória Máxima da Resistência Lateral.

2.2 Envoltória Máxima de Resistência Lateral – Repouso de 9 dias (216h)

O Método da Envoltória Máxima, desenvolvido por Valverde (2018) e parcialmente divulgado ao meio técnico nacional por Valverde e Massad (2016-b), consiste em analisar individualmente todos os golpes aplicados durante o ensaio dinâmico com energia crescente, para determinar a máxima mobilização do atrito lateral ao longo do fuste. É a base do procedimento da sobreposição (acréscimo) da capacidade de carga, objetivo deste trabalho.

Em síntese, o procedimento consiste na somatória da máxima resistência de ponta mobilizada com as maiores mobilizações de resistência lateral ao longo do fuste, determinadas a partir das análises CAPWAP dos golpes aplicados durante o ensaio dinâmico com energia crescente.

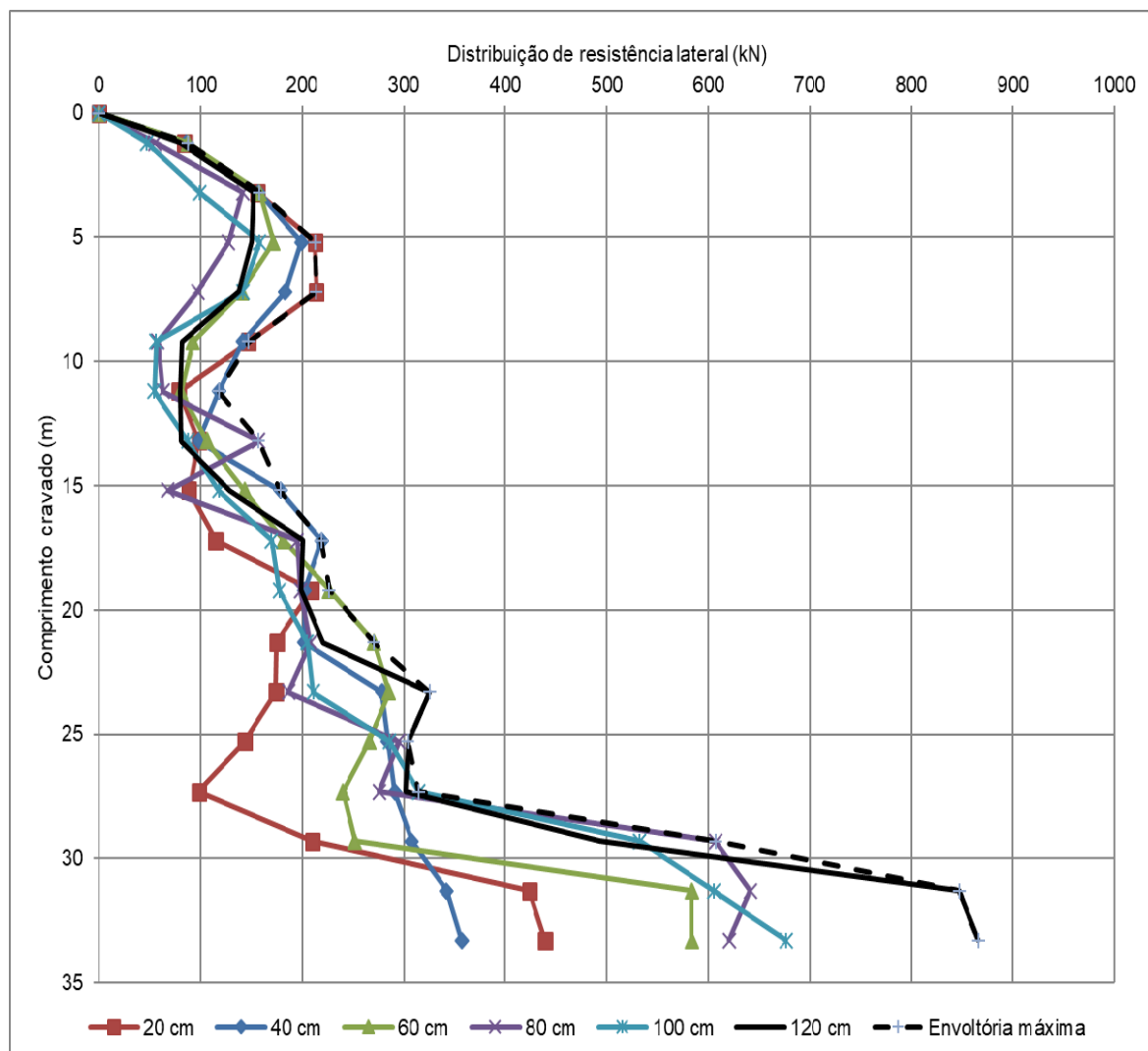


Figura 2. Mobilização da resistência lateral ao longo do fuste – Envoltória máxima - Repouso de 216h

A Figura 2 mostra a variação da resistência lateral com o aumento da energia aplicada para o repouso de 9 dias (216 horas). Vê-se que à medida que a altura de queda do martelo aumenta de 20 cm para 120 cm, são mobilizadas resistências estáticas cada vez menores em segmentos da estaca próximos ao topo e cada vez maiores em segmentos próximos à ponta. Associada à envoltória máxima, tem-se um atrito lateral total de 5.252 kN contra 4.647 kN do golpe de 120 cm (Tabela 1), ou seja, um aumento de 13%.

A Figura 3 compara as distribuições de resistências laterais obtidas através do CAPWAP: a) no final de cravação (golpe de 120 cm); b) no golpe de 120 cm após repouso de 9 dias (216 h); e c) da Envoltória Máxima. Em resumo, têm-se as seguintes resistências laterais: 1;381 kN (final da cravação - 120 cm); 4.647 kN (após o período de 216 horas ou 9 dias - 120 cm) e 5.252 kN (Envoltória Máxima). Tomando como referência o final da cravação, as duas últimas cifras correspondem a incrementos de 336% e 380%, respectivamente.

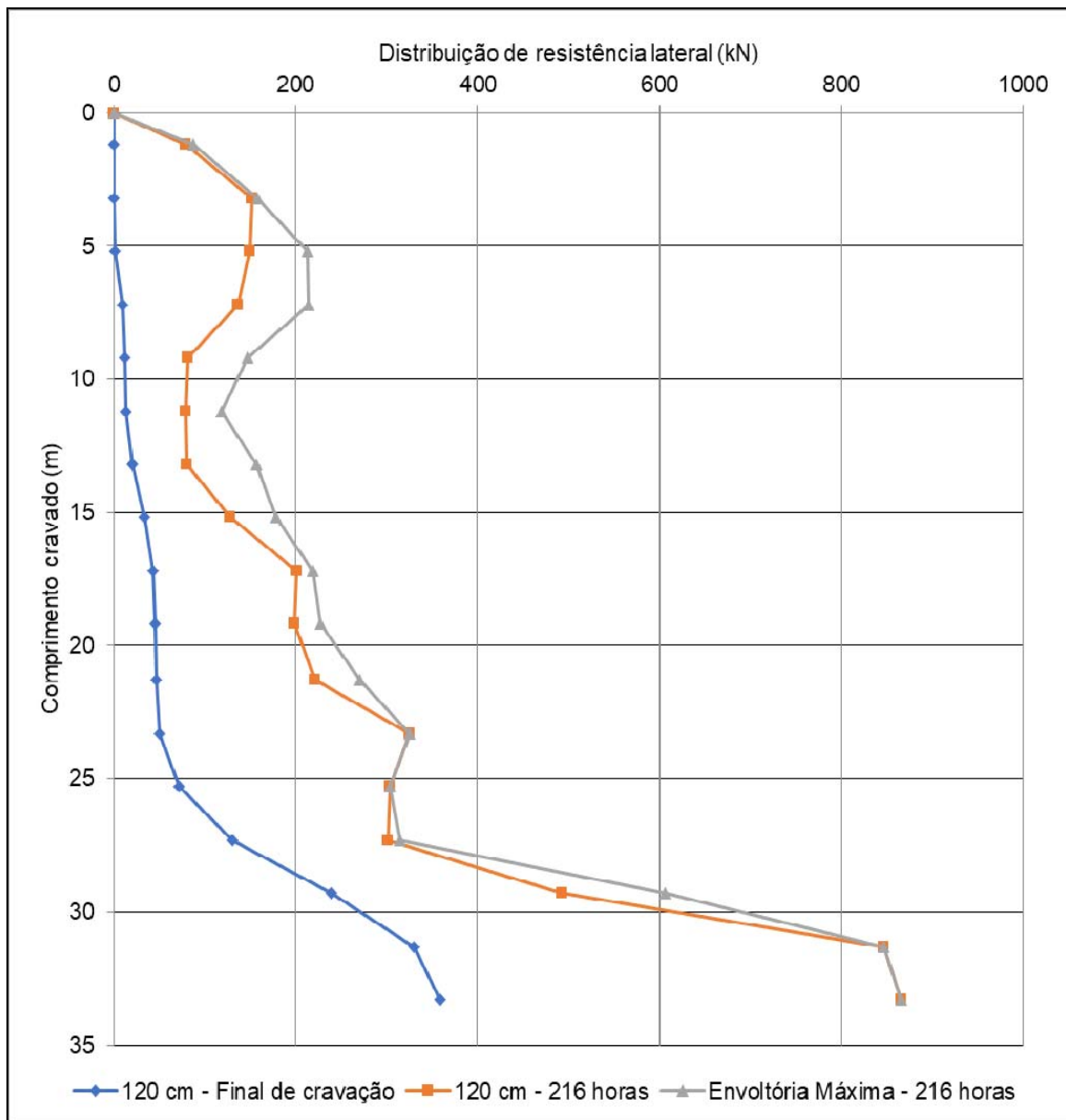


Figura 3. Distribuição de atrito lateral em 3 condições

Combinando a cifra de atrito lateral da envoltória máxima com a resistência de ponta do golpe de 120 cm (após recuperação de 9 dias), chega-se a uma carga total mobilizada de 5.252 (atrito)+4.912 kN (ponta)=

10.164 kN. Alternativamente, se se tomar para a resistência de ponta o valor do final da cravação (Tabela 1), chega-se a uma carga total mobilizada de $5.252 \text{ (atrito)} + 5.717 \text{ (ponta)} = 10.969 \text{ kN}$.

2.4 Curvas carga-recalque

É possível comparar a curva carga-recalque da prova de carga estática na mesma estaca (PC01) com curvas estáticas simuladas pelo CAPWAP em diferentes fases abordadas neste estudo. A Figura 4 mostra a curva carga-recalque resultante da aplicação do Método da Envoltória Máxima. Ela foi obtida por Valverde (2018) através do Método de Coyle Reese (1966), usando funções de transferência de carga elasto-plásticas. Essas funções foram construídas com base nos quakes e nos valores máximos mobilizados dos atritos laterais unitários e da resistência de ponta, envolvendo todos os golpes aplicados após o repouso de 9 dias (216h). Nota-se que a aderência à curva da prova de carga estática é notável. O mesmo não se pode dizer da curva simulada pelo CAPWAP considerando isoladamente o golpe de 120 cm (216h). A carga máxima mobilizada da curva Coyle-Reese foi estimada em 10.164 kN, indicada pela linha pontilhada. Este é exatamente o mesmo valor calculado acima, combinando a cifra de atrito lateral da envoltória máxima com a resistência de ponta do golpe de 120 cm (216h).

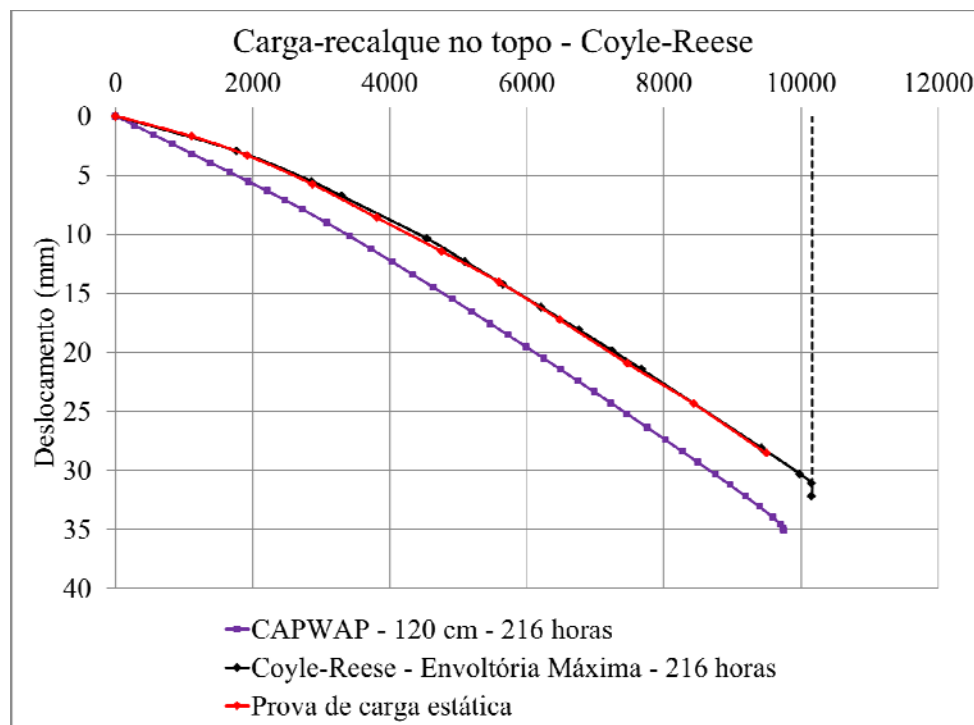


Figura 4. Coyle-Reese - Envoltória Máxima - 216 horas

À medida que o tempo de cicatrização do solo aumenta, menor é a mobilização de resistência de ponta. Portanto, a curva simulada com dados obtidos no ensaio realizado com 216 horas de repouso possui menor mobilização de resistência de ponta, estimada em 4.912 kN, como se viu acima. Assim, foi feita uma nova simulação pelo método Coyle-Reese (1966), considerando a maior mobilização de resistência de ponta de 5.717 kN com “quake” de 3,1 mm, cifras essas obtidas no final da cravação da estaca. O resultado encontra-se na Figura 5. A excelente correlação entre os gráficos se mantém e a carga máxima mobilizada, indicada pela linha tracejada da Figura 5, é de 10.969 kN, confirmando também cifra obtida anteriormente.

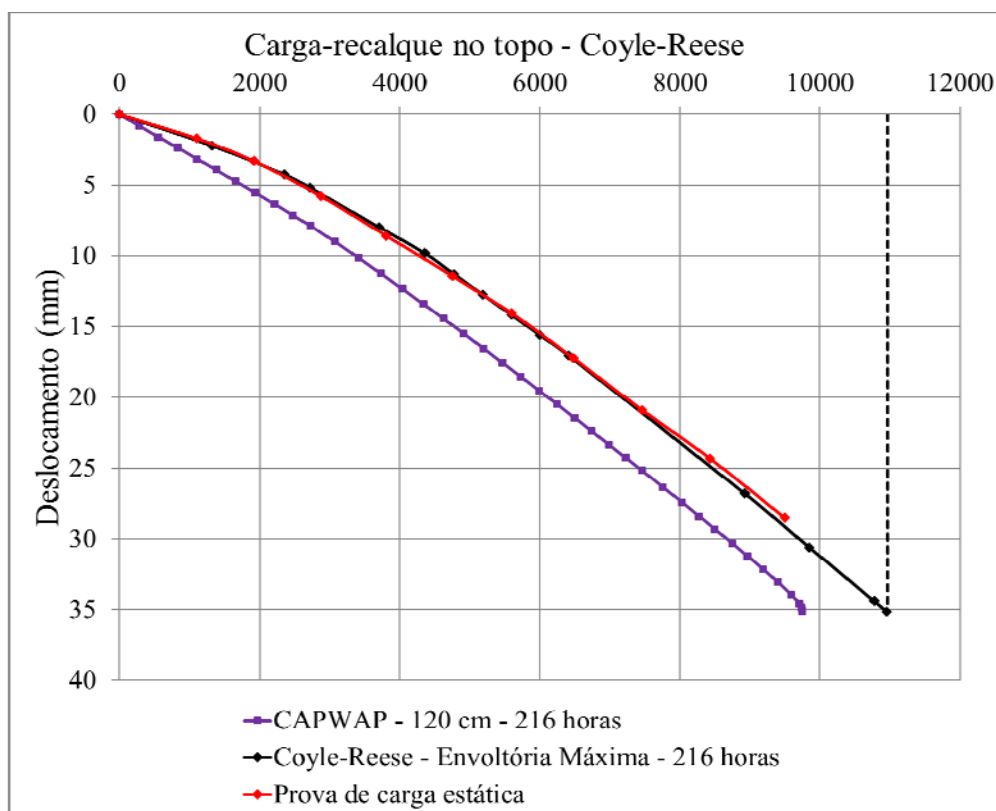


Figura 5. Coyle-Reese - Envoltória Máxima - 216 horas - Ponta do final de cravação

A Tabela 2 sintetiza todos os resultados obtidos. Pode-se concluir que o procedimento da sobreposição da capacidade de carga, combinando a resistência lateral, estimada pelo Método da Envoltória Máxima, com resistências de ponta em diferentes fases, é consistente e que é possível obter simulações da curva carga-recalque do topo, através da aplicação do método de Coyle-Reese, com excelentes aderências em relação à curva da prova de carga estática.

Tabela 2. Resultados obtidos

Ensaio	Resistência máxima mobilizada (kN)		
	Atrito	Ponta	Total
Prova de carga estática	-	-	9.497
CAPWAP individual – 216 horas	4.647	4.912	9.559
CAPWAP individual – Final de cravação	1.381	5.717	7.098
Envoltória Máxima – 216 horas	5.252	4.912	10.164
Coyle-Reese – 216 horas – Envoltória Máxima	5.252	4.912	10.164
Envoltória Máxima – Ponta do final de cravação	5.252	5.717	10.969
Coyle-Reese – Envoltória Máxima - Ponta do final de cravação	5.252	5.717	10.969

3. Considerações finais e conclusões

Qualquer tipo de análise, método ou procedimento tem suas limitações no objetivo de aferir ou estimar a capacidade de carga de uma estaca. O fato de ser possível determinar pelo CAPWAP tanto a distribuição de resistência lateral ao longo do fuste quanto a resistência de ponta torna possível a combinação de resultados de ensaios realizados em diversos períodos. O procedimento da sobreposição dos resultados obtidos no final da cravação (1ª fase) e após a cicatrização do solo (2ª fase) permite estimar a capacidade de carga total máxima que pode ser mobilizada. E isso pode ser feito de maneira econômica, utilizando o mesmo martelo e determinando a resistência de ponta na 1ª fase e o atrito lateral máximo na 2ª fase, através do Método da Envoltória Máxima.

O estudo de caso mostrou a validade dessa sobreposição, pois permitiu uma excelente correlação da curva carga-recalque simulada pelo Método de Coyle e Reese com aquela obtida na prova de carga estática. Analisar pelo CAPWAP somente o último golpe aplicado pode resultar em valores subestimados no ensaio de carregamento dinâmico com energia crescente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131: *Estacas - Prova de carga estática: método de ensaio*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 6122: *Projeto e execução de fundações*, Rio de Janeiro.
- Aoki, N. (1991). Carga admissível em estacas através de ensaios dinâmicos. In: SEFE - SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA - SEFE [s.n.], 1991, São Paulo: ABMS. p. 269-292.
- Aoki, N. (2000). Energia complementar como critério de ruptura de estaca cravada. RMCT – REVISTA MILITAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, Rio de Janeiro, v. XVII, n. 3, p. 26 - 42.
- Coyle, H. M.; Reese, L. C. (1966). Load transfer for axially loaded piles in clay. JOURNAL OF SOIL MECH. AND FOUNDATION DIVISION. PROC. OF THE ASCE, 92.
- Hussein, M. H.; Sharp, R. M.; Knight, F. W. (2002). The use of Superposition for evaluating pile capacity. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Orlando, Florida: [s.n.].
- Pile Dynamics (2006). Case Pile Wave Analysis Program - CAPWAP MANUAL.
- Rausche, F.; Hussein, M.; Likins, G.; Thendean, G. (1994). Static Pile Load-Movement from Dynamic Measurements. PROCEEDINGS OF SETTLEMENT: VERTICAL AND HORIZONTAL DEFORMATIONS OF FOUNDATIONS AND EMBANKMENTS: College Station, TX, June. p.291-302.
- Valverde, R. (2018). Envoltória máxima de resistência lateral em estacas através do ensaio de carregamento dinâmico com energia crescente. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Valverde, R. e Massad, F. (2018-a). Avaliação do “set-up” em estacas através do Método da Envoltória Máxima de Resistência Lateral aplicado a ensaios dinâmicos com energia crescente. XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA E DESENVOLVIMENTO URBANO – COBRAMSEG 2018 – 28 de Agosto a 01 de Setembro, Salvador, Bahia.
- Valverde, R. e Massad, F. (2018-b). Maximum Envelope of Lateral Resistance through Dynamic Increasing Energy Test in Piles. SOILS & ROCKS. , v.41, p.75 - 89, 2018.