

Determinação Da Resistência Dinâmica Em Provas De Carga Estática Através De Resultados De Ensaios Dinâmicos

Daniel Kina Murakami

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, daniel.murakami@gmail.com

Fabian Corgnier

Teknier Engenharia e Tecnologia, São Paulo, SP, Brasil, fabian@tekniere.com.br

RESUMO: Murakami (2024a) propôs um Método para estimar resistências dinâmicas em provas de carga estática (PCE), especialmente nas mistas. A abordagem envolve utilizar resultados de provas de carga dinâmica (PCD) para calcular a resistência dinâmica (R_d) na PCE, considerando a relação entre R_d e a velocidade máxima do topo da estaca (VMX). Os passos propostos são: a) plotar R_d em função de VMX para cada golpe de energia crescente no ensaio dinâmico; b) calcular VMX na PCE a partir dos deslocamentos e tempo entre leituras; c) calcular R_d na PCE com base nos valores de VMX. O artigo apresenta uma aplicação dessa abordagem em um caso de obra onde foram realizadas provas de carga estática e dinâmica em estacas hélice contínua. Os resultados mostraram que a resistência dinâmica cresce com a carga aplicada no topo da estaca, conforme previsto por Murakami (2024a). Os resultados obtidos mostram que a ordem de grandeza dos valores de R_d na PCE para o caso de obra analisado foram 10^4 menores que o da PCD em termos de velocidade média obtida entre leituras consecutivas de deslocamentos, podendo atingir picos da ordem de 10^3 menores que a PCD em termos de velocidades instantâneas.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência dinâmica, prova de carga estática, prova de carga dinâmica, estaca hélice contínua

ABSTRACT: Murakami (2024a) proposed a method to estimate dynamic resistance in static load tests (SLT), especially in quick tests. The approach involves using results from dynamic load tests (DLT) to calculate the dynamic resistance (R_d) in the SLT, considering the relationship between R_d and the maximum pile top speed (VMX). The proposed steps are: a) plot R_d as a function of VMX for each blow of the dynamic increasing energy test; b) calculate VMX in SLT based on displacements and time between readings; c) calculate R_d in SLT based on VMX values. The paper presents an application of this approach in a case study where static and dynamic load tests were carried out in CFA piles. The results showed that the dynamic resistance increases with the load applied to the top of the pile, as predicted by Murakami (2024a). The results obtained show that the order of magnitude of the R_d values in the SLT for the case study analyzed were 10^4 smaller than that of the DLT in terms of average speed obtained between consecutive displacement readings, reaching peaks of the order of 10^3 smaller than the DLT in terms of instantaneous speeds.

KEYWORDS: Dynamic Resistance, Static Load Test, Dynamic Load Test, CFA pile

1 INTRODUÇÃO

Na prova de carga dinâmica (PCD) (NBR 13208) os Métodos CAPWAP (Pile Dynamics, Inc., 2006) e Case (Pile Dynamics, Inc., 2009) permitem a separação das parcelas de resistência estática e dinâmica, sendo que normalmente a grandeza de maior interesse é a resistência estática.

Este artigo tem como objetivo aplicar o Método proposto por Murakami (2024a) para realizar a determinação da resistência dinâmica (R_d) em provas de carga estática (PCE) (NBR 16903).

2 RESISTÊNCIA DINÂMICA NO ENSAIO DINÂMICO

Murakami (2024a) apresentou o comportamento de estacas sob carregamento dinâmico e propõe uma nova forma de estimar as resistências dinâmicas (R_d) que podem ocorrer em provas de carga estática (PCE), principalmente nas do tipo mista. Na prova de carga dinâmica (PCD), o golpe tem curta duração (cerca de 50ms), sendo que neste intervalo parte da resistência é estática (R_{MX}) e outra parte é resistência dinâmica (R_d). As formulações matemáticas do CAPWAP e Case admitem que há resistência dinâmica sempre que a estaca estiver se deslocando, ou seja, quando apresentar uma velocidade de deslocamento. Murakami (2024b, 2024c) observa que a relação entre R_d/R_{MX} sempre cresce em função da máxima velocidade do topo da estaca (VMX), mesmo no pós-ruptura. Ou seja, a resistência total (estática + dinâmica) (R_t) sempre cresce em função de VMX . Além disso, na PCD com energia crescente, há proporcionalidade entre R_d para cada golpe em função de VMX constituindo a 1ª condição de contorno proposta por Murakami (2015, 2024a). Diante disso, Murakami (2024a) propôs o uso dos resultados do ensaio dinâmico para estimar R_d na PCE através do seguinte procedimento: a) utilização da equação da reta da 1ª condição de contorno; b) determinação da velocidade do topo da estaca na PCE; c) cálculo de R_d na PCE através da 1ª condição de contorno.

A figura 1 mostra a 1ª condição de contorno proposta por Murakami (2015, 2024a). Segundo a figura 1, observa-se que o valor de R_d é proporcional ao VMX na PCD. A figura 2 mostra a forma de atuação de R_d (Damping Resistance) na PCD durante a aplicação do golpe do martelo do bate estaca. Murakami (2024a) observa que R_d é função do valor da velocidade medida pelos sensores, ou seja, se a velocidade dos sensores aumenta, então R_d deve aumentar; se diminui, então R_d deve diminuir; se a velocidade ficar negativa, então R_d deve ser negativo; se a velocidade for nula, então R_d deve ser nulo. Maiores informações sobre o cálculo da resistência dinâmica na PCD podem ser encontradas em Murakami (2024a, 2024b, 2024c).

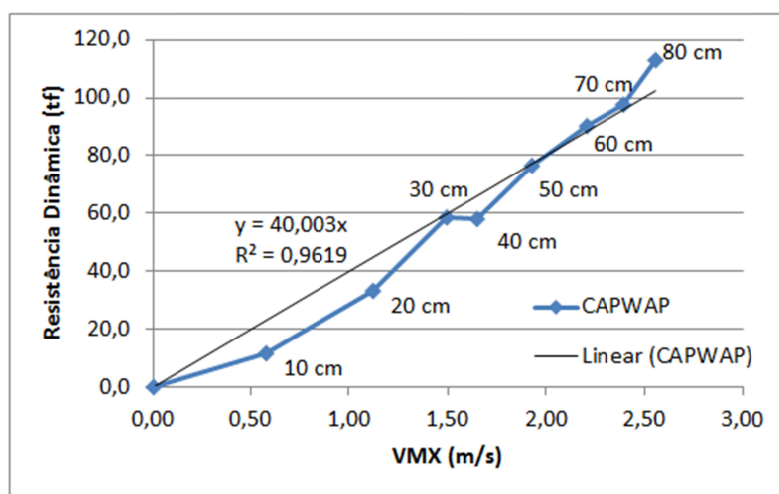


Figura 1. Relação entre R_d vs. VMX – Primeira condição de contorno (Murakami; 2015, 2024a)

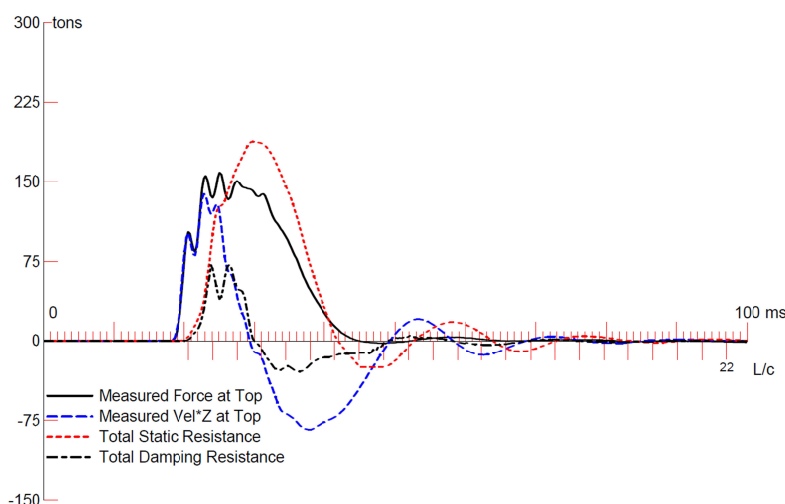


Figura 2. Gráfico de força, velocidade, RMX e Rd em função do tempo (Murakami, 2024a)

3 CASO DE OBRA

A obra em questão é localizada em Itatiba, SP. O subsolo local apresentava um solo de argila siltosa pouco arenosa de espessura da ordem de 3 m, com valores de N_{spt} da ordem de 3 golpes, seguido de uma camada de silte argiloso pouco arenoso até cerca de 14 m, com valores de N_{spt} crescentes em profundidade, atingindo valores da ordem de 20 golpes.

Trata-se de uma obra em estacas hélice contínua de diâmetro 40 cm. Foi realizada uma prova de carga estática do tipo lenta, atingindo carga máxima de 72,5 tf para um recalque máximo de 70,53 mm (figura 3). Este deslocamento corresponde a 17,6% do diâmetro da estaca. Nota-se que apesar do grande deslocamento observado na PCE, a figura 3 não demonstrou uma ruptura do tipo nítida. A extrapolação pelo Método de Chin-Kondner indicou que a carga de ruptura seria de 135 tf, conforme indicado nas figuras 4 e 5.

Entretanto, em provas de carga estática (PCE) com grandes deslocamentos, a ruptura física, caracterizada por um comportamento generalizado de ruptura do solo ou da interface solo-estaca, pode não ocorrer. É possível que as estacas continuem a apresentar resistência, mesmo com deslocamentos significativos, ou seja, as estacas podem estar sendo “cravadas” durante a PCE. Nestes casos, a extrapolação da curva carga versus deslocamento para determinar a capacidade última, pode se tornar um exercício puramente matemático, sem significado físico real. De fato, conforme indicado na figura 5, para se atingir uma carga de 120 toneladas por exemplo, seria necessário um recalque maior que 500 mm, ou seja, seria impossível atingir esta carga, uma vez que normalmente o curso do macaco hidráulico é inferior a este valor.

Segundo Fellenius (2022), o conceito de “carga última” ou “capacidade de carga” em estacas, especialmente para a resistência de ponta, é fundamentalmente falho e repleto de inconsistências. Ensaio em escala real revelam que as estacas raramente exibem uma resistência última clara, particularmente na ponta, com a resistência frequentemente continuando a aumentar com o deslocamento. Isso contradiz a noção convencional de capacidade de carga como um ponto de ruptura definitivo. Para aumentar a confusão, não há consenso sobre como definir a capacidade de carga a partir das curvas carga-deslocamento no topo da estaca, resultando em uma infinidade de interpretações subjetivas e valores dependentes da escala.

Por apresentar grandes deslocamentos nesta PCE, Murakami (2024a) observa: a) quando os deslocamentos estão elevados e a velocidade de deslocamento da estaca está elevada, deve haver uma maior influência de R_d na leitura da carga aplicada através da célula de carga; b) O autor tem observado em PCEs com deslocamentos elevados (deslocamentos maiores que 10% do diâmetro da estaca) que, ao tentar realizar uma mudança de estágio, ou seja, durante a aplicação de vazão de óleo hidráulico, ocorrem picos localizados de resistência medidos pela célula de carga e que imediatamente após interromper o bombeamento de vazão de óleo hidráulico, ocorre uma queda brusca da leitura da célula de carga; c) Neste caso, o acionamento da bomba hidráulica é semelhante ao acelerador de um automóvel, ou seja, o acionamento da bomba é o responsável pelo aumento da velocidade da estaca e consequentemente pelo aumento instantâneo de R_d que cai bruscamente assim que o botão da vazão da bomba é interrompida; d) Este fato de queda brusca de R_d na

PCE pode induzir o executor a acreditar que essa queda brusca corresponda à uma ruptura geotécnica, quando na verdade se deve a uma queda instantânea de Rd.

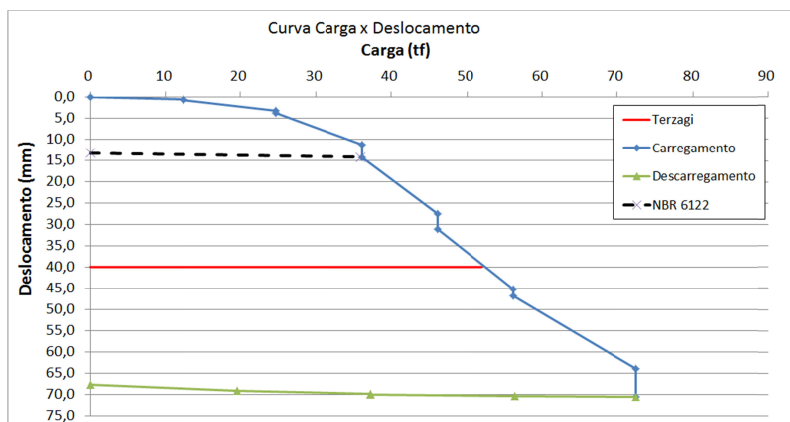


Figura 3. Curva carga vs. deslocamento

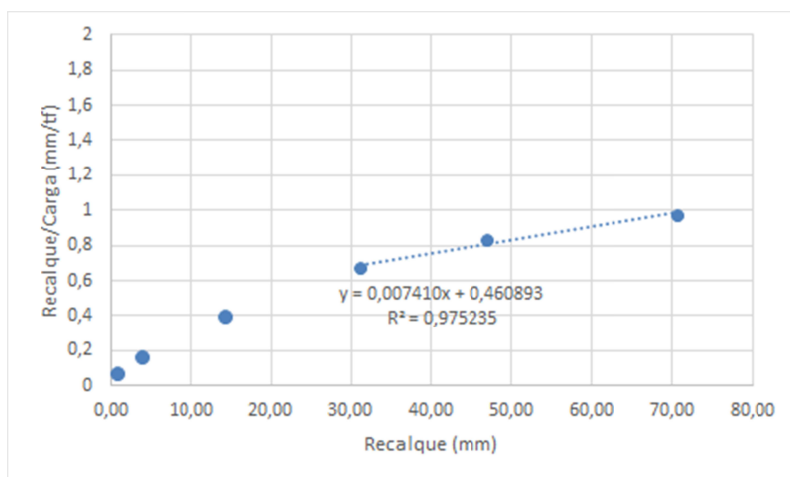


Figura 4. Extrapolação Chin-Kondner

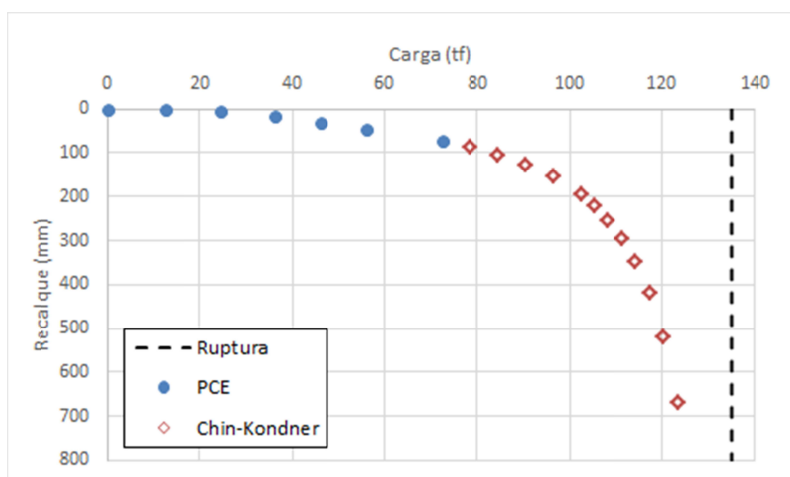


Figura 5. Curva carga vs. recalque extrapolada por Chin-Kondner

Próxima à PCE, cerca de 12 m de distância, foram realizados 5 ensaios de carregamento dinâmico. A tabela 1 indica o valor da resistência dinâmica obtida em uma das estacas próximas à PCE. As estacas da PCE e PCD tiveram o mesmo comprimento executado de 9 m.

Tabela 1. Resistência dinâmica obtida pelo CAPWAP

| DYNAMIC RESISTANCE TABLE | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Soil Sgmt No. | Dist. Below Gages m | Depth Below Grade m | Ru tons | Damping Rd at Max. Rt tons | Max Rt (Ru+Rd) tons | Total Unit W. Resp. to Depth tons/m | Rt Area tons/m ² | Smith Damping Factor | |
| 1 | 1.5 | 1.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | |
| 2 | 2.5 | 2.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | |
| 3 | 3.5 | 3.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | |
| 4 | 4.5 | 4.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | |
| 5 | 5.4 | 5.0 | 1.0 | 2.3 | 3.3 | 3.30 | 2.63 | 0.948 | |
| 6 | 6.4 | 6.0 | 1.0 | 2.4 | 3.4 | 3.43 | 2.73 | 0.948 | |
| 7 | 7.4 | 7.0 | 2.0 | 4.8 | 6.8 | 6.90 | 5.49 | 0.948 | |
| 8 | 8.4 | 8.0 | 2.0 | 4.9 | 6.9 | 6.97 | 5.54 | 0.948 | |
| 9 | 9.4 | 9.0 | 14.0 | 24.6 | 38.6 | 39.03 | 31.06 | 0.948 | |
| Avg. Shaft | | | 2.2 | 4.3 | 6.6 | 6.56 | 5.22 | 0.948 | |
| Toe | | | 47.9 | 43.1 | 91.0 | | 724.35 | 0.443 | |
| Total | | | | | 150.0 | | | | |

Com base nos valores da tabela 1 se obtém o valor da resistência dinâmica total (soma da parcela de atrito lateral e carga de ponta) igual à 81,8 tf. O valor de VMX foi de 2,0 m/s, correspondendo ao seguinte gráfico que será fundamental para a determinação de Rd na PCE:

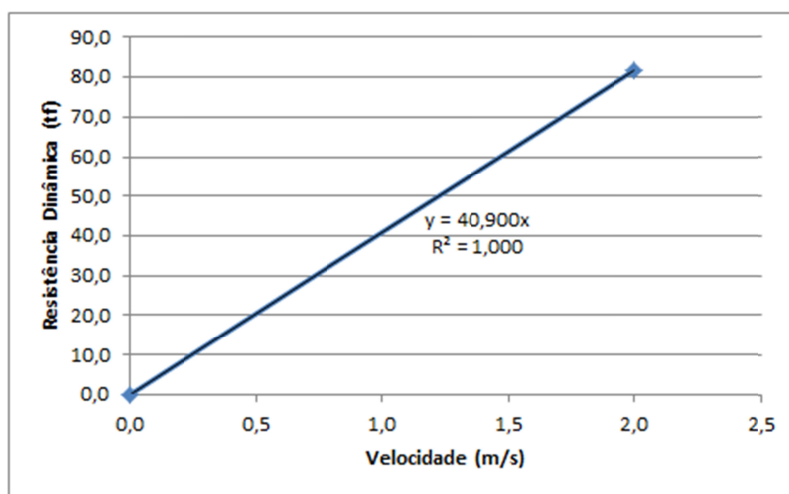


Figura 6. Gráfico de Rd vs. VMX do CAPWAP

Com base na equação da reta obtida na figura 6, chegou-se a um valor de α (inclinação da reta da figura 6) igual a 40,90 tf.s/m. Conforme proposto por Murakami (2024a), a determinação da resistência dinâmica na PCE é feita através da multiplicação do valor de α de 40,90 tf.s/m pelo valor da velocidade média da estaca em cada leitura de deslocamento da PCE. As figuras 6 e 7 mostram os valores de Rd obtidos para a etapa de carregamento da PCE. Na figura 7 se observa que sempre no início de cada estágio o valor de Rd é maior em função da ocorrência de maiores velocidades de deslocamento da estaca e ao longo das demais leituras no mesmo estágio, o valor de Rd tende a diminuir, até atingir valores menores quando o critério de estabilização da NBR 16903 for atingido.

A figura 8 mostra que as resistências dinâmicas na PCE são aproximadamente 10^4 vezes menores do que na PCD, enquanto as velocidades da estaca são cerca de 10^5 vezes menores. Considerando a proporcionalidade entre a velocidade da estaca e a resistência dinâmica (Murakami, 2024a), a menor velocidade na PCE resulta em resistências dinâmicas significativamente menores em comparação à PCD.

Nota-se que durante a mudança de estágio devem ocorrer velocidades instantâneas maiores que as velocidades médias entre leituras de deslocamento. Para este caso de obra podem ter ocorrido velocidades instantâneas da ordem de 1 mm/s ou maior em função do grande deslocamento observado (17,6% do diâmetro), principalmente na mudança para o último estágio, o que corresponderia a uma resistência dinâmica cerca de 10^3 menor que o da PCD. Observa-se que o valor de α da figura 8 é o mesmo da figura 6, uma vez que foi utilizado este mesmo valor para o cálculo de R_d na PCE.

Convém observar que, caso a PCE fosse do tipo mista, por não apresentar o critério de estabilização dos recalques, os valores de R_d seriam maiores.

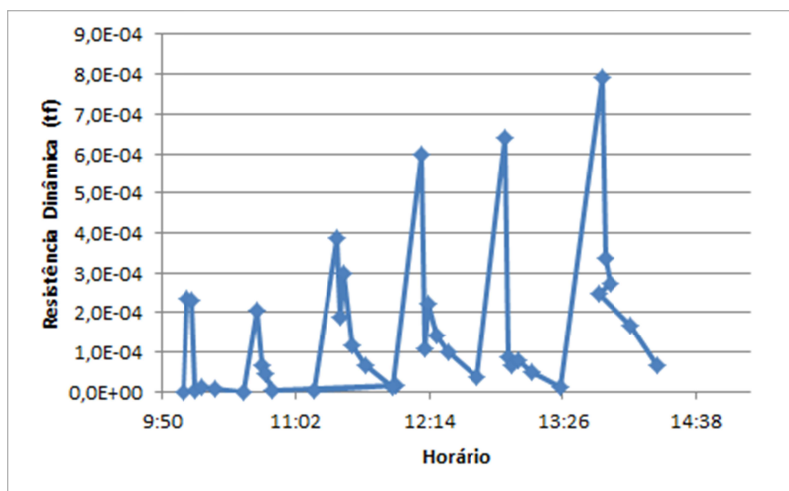


Figura 7. Gráfico R_d vs. horário da PCE na etapa de carregamento

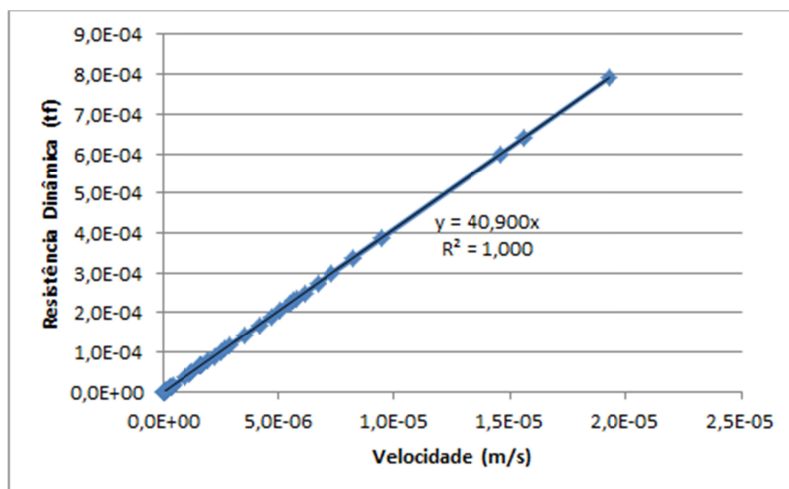


Figura 8. Gráfico R_d vs. VMX da PCE na etapa de carregamento

As figuras 9 e 10 mostram os valores de R_d na etapa de descarregamento. Os valores de R_d são negativos por apresentar deslocamento no sentido oposto ao ocorrido na etapa de carregamento. Na figura 9 se observa que o valor de R_d em módulo foi maior na última etapa de descarregamento quando a carga no topo da estaca é nula. Observa-se que o valor de α da figura 10 é o mesmo da figura 6, uma vez que foi utilizado este mesmo valor para o cálculo de R_d na PCE.

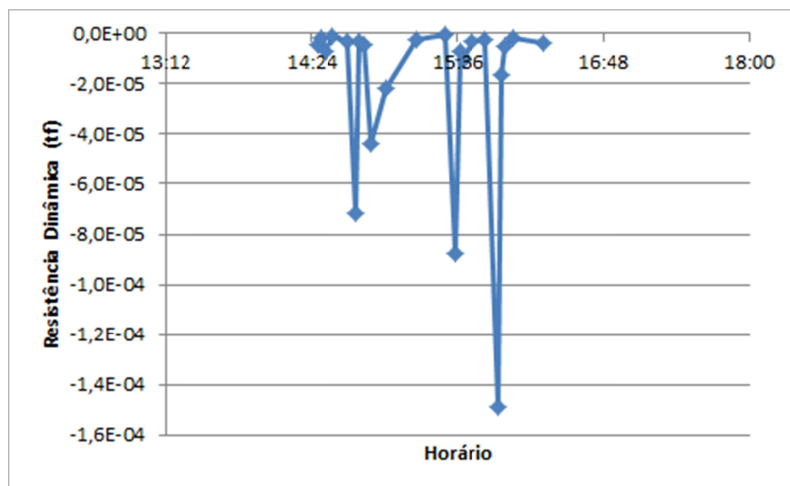


Figura 9. Gráfico Rd vs. horário da PCE na etapa de descarregamento

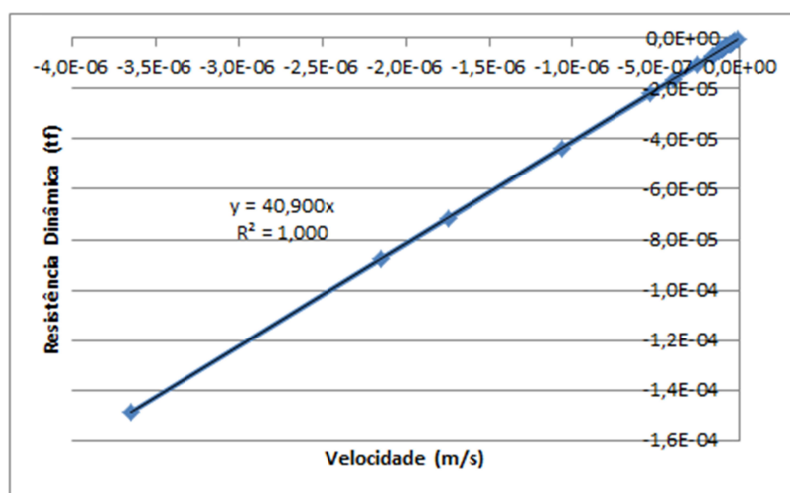


Figura 10. Gráfico Rd vs. VMX da PCE na etapa de descarregamento

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi utilizado o Método para cálculo da resistência dinâmica na PCE através de resultados da PCD, proposto por Murakami (2024a), seguindo-se as seguintes etapas: a) utilização da equação da reta da 1ª condição de contorno (Murakami, 2015, 2024a); b) determinação da velocidade do topo da estaca na PCE entre leituras consecutivas dos deslocamentos; c) cálculo de Rd na PCE através da 1ª condição de contorno.

Diante do apresentado, seguem as conclusões: a) na PCE, em cada estágio a resistência dinâmica atinge um pico sempre no início da aplicação da carga e a mesma vai se dissipando com a estabilização dos deslocamentos, ou seja, a velocidade da estaca vai diminuindo em função do tempo; b) a rigor, a carga aplicada na PCE somente é estática quando a diferença entre leituras consecutivas for ZERO; c) na PCE lenta, por ter o critério de estabilização de recalques, a influência de Rd na leitura estabilizada deverá ser menor que na PCE mista; d) em PCEs com grandes deslocamentos (maior que 10% do diâmetro) pode haver uma “confusão” de que a estaca rompeu, uma vez que tenta-se aplicar pressão hidráulica e a resistência parece atingir um pico e cai rapidamente em função da redução brusca de Rd; e) a ordem de grandeza dos valores de Rd para o caso de obra analisado foram aproximadamente 10^4 vezes menores do que na PCD, enquanto as velocidades são cerca de 10^5 vezes menores. Considerando a proporcionalidade entre a velocidade da estaca e a resistência dinâmica (Murakami, 2024a), a menor velocidade na PCE resulta em

resistências dinâmicas significativamente menores em comparação à PCD; f) O grande deslocamento ocorrido neste caso de obra (17,6% x Diâmetro) podem ter causadas velocidades instantâneas de 1 mm/s ou mais, resultando em resistência dinâmica 10^3 vezes menor que a PCD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2007) NBR 13208. Estacas Ensaio de carregamento dinâmico. Rio de Janeiro.
- ABNT (2020) NBR 16903. Solo – Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro.
- Fellenius, B.H., (2022). Basics of foundation design. Electronic Edition, www.Fellenius.net, 538 p.
- Murakami, D. K. (2015) Novo procedimento para a realização de análise capwap no ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, Brasil.
- Murakami, D. K. (2019) “A New Concept of Match Quality of Settlements for Signal Matching Analysis on the Dynamic Pile Test”, 10th International Conference on Stress Wave Theory and Testing Methods for Deep Foundations, San Diego, California, USA
- Murakami, D. K., (2024a). Novo Método De Cálculo de Resistência Dinâmica Na Prova De Carga Estática com Critérios de Ruptura. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Balneário Camboriú, SC. (artigo submetido)
- Murakami, D. K., (2024b). Resistência Dinâmica Determinada Através dos Métodos CAPWAP e CASE. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Balneário Camboriú, SC. (artigo submetido)
- Murakami, D. K., (2024c). O Fator De Amortecimento Do Solo No Ensaio De Carregamento Dinamico Com Energia Crescente. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Balneário Camboriú, SC. (artigo submetido)
- Pile Dynamics, Inc. (2006) CAPWAP manual, Cleveland, Ohio.
- Pile Dynamics, Inc. (2009). PDA-W Manual. Cleveland, Ohio.
- Smith, E.A.L.; Pile Driving Analysis by the Wave Equation. Journal of the Mechanics and Foundations Division. Proc. of American Society Civil Engineering (ASCE), agosto, pp. 35-61, 1960.