

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/350

## Resistência Dinâmica Determinada Através dos Métodos CAPWAP e CASE

Daniel Kina Murakami  
Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, daniel.murakami@gmail.com

**RESUMO:** No ensaio de carregamento dinâmico, o Método Case calcula a resistência estática mobilizada (RMX) usando o PDA (Pile Driving Analyzer) com base nos sinais coletados em campo. Para separar a resistência estática da dinâmica, é necessário adotar um valor para o fator de amortecimento do solo (JC) em campo. Com base no JC adotado, o PDA calcula o RMX e a resistência dinâmica (Rd) é obtida subtraindo-se RMX da resistência total (Rt). A análise CAPWAP, um método numérico mais rigoroso, permite uma separação mais precisa das parcelas de resistência estática e dinâmica. Após isso, é possível verificar qual é o valor de JC correspondente para que o valor de RMX do Método Case fique igual à carga do CAPWAP. Apesar de os Métodos CAPWAP e Case apresentarem mesmo RMX, mostra-se neste artigo que os valores de Rd e Rt não são necessariamente iguais nos dois métodos. Em um caso de obra foi observado: a) em média, Rd do CAPWAP foi 27% superior ao do Case; b) CAPWAP demonstrou melhor proporcionalidade entre Rd e velocidade máxima do topo (VMX); c) Relação entre Rd/RMX vs. VMX foi melhor para o CAPWAP; d) Rt do CAPWAP foi em média 8,4% superior ao do Case.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resistência dinâmica (Rd), Velocidade máxima do topo (VMX), CAPWAP, Método Case, Fator de amortecimento do solo (JC)

**ABSTRACT:** In the dynamic loading test, the Case Method calculates the mobilized static resistance (RMX) using the PDA (Pile Driving Analyzer) based on signals collected in the field. To separate static from dynamic resistance, it is necessary to adopt a value for the soil damping factor (JC) in the field. Based on the adopted JC, the PDA calculates the RMX and the dynamic resistance (Rd) is obtained by subtracting RMX from the total resistance (Rt). CAPWAP analysis, a more rigorous numerical method, allows a more precise separation of the static and dynamic resistance portions. After that, it is possible to check the corresponding JC value so that the RMX value of the Case Method is equal to the CAPWAP load. Although the CAPWAP and Case Methods present the same RMX, this paper shows that the values of Rd and Rt are not necessarily the same in both methods. In one case study it was observed: a) on average, Rd of CAPWAP was 27% higher than that the Case Method; b) CAPWAP demonstrated better proportionality between Rd and maximum top speed (VMX); c) Relationship between Rd/RMX vs. VMX was better for CAPWAP; d) Rt of CAPWAP was on average 8.4% higher than the Case Method.

**KEYWORDS:** Dynamic Resistance (Rd), Maximum Top Velocity (VMX), CAPWAP, Case Method, Case Damping Factor (JC)

### 1 INTRODUÇÃO

No ensaio de carregamento dinâmico (ECD) inicialmente os sinais de força e velocidade são coletados em campo e o PDA (Pile Driving Analyzer) calcula a resistência estática mobilizada (RMX) através do Método Case. Entretanto, para que este Método faça a separação entre a resistência estática e a dinâmica é necessário adotar em campo um valor para o fator de amortecimento do solo (JC). Com base no valor de JC adotado, o PDA calcula o RMX e facilmente a resistência dinâmica (Rd) pode ser obtida subtraindo-se o valor de RMX da resistência total (soma das resistências estática e dinâmica) (Rt). Posteriormente, é realizada a análise CAPWAP que é um Método numérico mais rigoroso, permitindo separar as parcelas de

resistência estática e dinâmica com maior precisão, uma vez que é necessário que a curva calculada fique mais próxima possível da curva medida. Quando isso ocorre há uma boa concordância entre as curvas, obtendo-se um “Match Quality” satisfatório, resultando em um valor de resistência estática com maior precisão. Com base neste valor de resistência estática determinado pelo CAPWAP é possível verificar qual é o valor de JC correspondente para que o valor de RMX do Método Case fique igual à carga do CAPWAP.

Intuitivamente, é de se esperar que  $R_d$  e  $R_t$  dos Métodos CAPWAP e Case devam ser iguais, uma vez que nos dois Métodos a resistência estática se correlaciona através do JC. Entretanto, apesar dos Métodos CAPWAP e Case apresentarem a mesma resistência estática mobilizada, mostra-se neste artigo que  $R_d$  e  $R_t$  não necessariamente são iguais nos dois Métodos. O caso de obra analisado já foi amplamente estudado anteriormente por Murakami e Massad (2014, 2016, 2023) e Murakami (2015, 2019), onde foram realizados ensaios dinâmicos com altura de queda crescentes e prova de carga estática. As análises CAPWAP foram realizadas através do procedimento proposto por Murakami (2015, 2019) e apresentaram boas correlações com a PCE.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo o manual do PDA-W (Pile Dynamics, 2009), através dos sinais coletados pelos sensores, a resistência total mobilizada (soma da resistência estática e dinâmica) é dada pela equação (1):

$$R_t = \frac{(FT_1+FT_2)}{2} + \frac{(VT_1-VT_2)}{2} \times \frac{E \times A}{c} = WD_1 + WU_2 \quad (1)$$

Onde:

$R_t$  = Resistência total (soma da resistência estática e dinâmica);

$FT_1$  = valor da força no instante  $T_1$ ;

$FT_2$  = valor da força no instante  $T_2$  ( $T_2 = T_1 + 2L/c$ ; onde:  $L$  = comprimento da estaca;  $c$  = velocidade de propagação da onda);

$VT_1$  = velocidade no instante  $T_1$ ;

$VT_2$  = velocidade no instante  $T_2$ ;

$E$  = módulo de elasticidade do material da estaca;

$A$  = Área transversal da estaca;

$WD_1$  = força descendente no instante  $T_1$ ;

$WU_2$  = força ascendente no instante  $T_2$ ;

Para determinar a resistência estática, o PDA fornece a seguinte equação denominada como Método Case:

$$RMX = (1 - JC) \times WD_1 + (1 + JC) \times WU_2 \quad (2)$$

Onde:

$RMX$  = máxima resistência estática mobilizada;

$JC$  = fator de amortecimento do solo;

Nota-se que para  $JC$  igual a zero, o valor de  $RMX$  dado pela Eq. (2) é igual ao valor de  $R_t$  dado pela Eq. (1).

Com base nas Eq. (1) e Eq. (2), o valor da resistência dinâmica ( $R_d$ ) pode ser calculada através da seguinte equação:

$$R_d = R_t - RMX \quad (3)$$

Já no Método CAPWAP (Pile Dynamics, 2006) o cálculo da resistência dinâmica é um pouco diferente, uma vez que o mesmo divide o solo em  $k$  elementos e o cálculo é realizado através da seguinte equação:

$$R_{dk} = J_{sk} \times v_i \times R_{sk} \quad (4)$$

Onde:

$R_{dk}$  = resistência dinâmica do elemento  $k$ ;

$J_{sk}$  = damping do modelo de Smith (1960);

$v_i$  = velocidade da estaca referente ao elemento de solo  $k$ ;

$R_{sk}$  = resistência estática temporária do elemento  $k$ ;

Nota-se através da Eq. (4) que a resistência dinâmica calculada pelo CAPWAP depende basicamente de três fatores: damping do modelo de Smith, velocidade da estaca e resistência estática. Entretanto, no CAPWAP é conveniente utilizar o modelo linear viscoso ao invés do modelo de Smith, uma vez que esta abordagem independe da magnitude da resistência estática:

$$R_{dk} = J_{vk} \times v_i \quad (5)$$

Onde:

$J_{vk}$  = damping viscoso;

A terceira opção para o cálculo da resistência dinâmica seria o modelo Smith viscoso que é a combinação dos dois modelos anteriores (adotando  $R_{sk} = R_{uk}$ ) através da seguinte aproximação:

$$J_{sk} = \frac{J_{vk}}{R_{uk}} \quad (6)$$

Onde:

$R_{uk}$  = resistência estática última;

Com base nas equações 4 e 5, nota-se que  $R_d$  é proporcional à velocidade de deslocamento da estaca. Neste contexto, Murakami (2015) adaptou esta condição e utilizou como condição de contorno a proporcionalidade entre  $R_d$  e  $VMX$ . Esta condição de contorno permite corrigir o valor da resistência dinâmica em cada golpe analisado com energia crescente, melhorando o Match Quality da curva Wave Up (MQWU).

Murakami (2015, 2019) também utiliza a técnica de determinação do quake do fuste da estaca (Murakami, 2014, 2016) em conjunto com uma segunda condição de contorno referente ao comportamento da ponta da estaca, aprimorando não apenas o MQWU como também o Match Quality de Recalques (MQR). Diversos casos de obra que utilizaram o procedimento proposto por Murakami (2015, 2019) apresentaram boa correlação entre ECD e prova de carga estática (PCE) (Murakami e Massad, 2014, 2016, 2023; Murakami, 2015; Murakami et al. 2016, 2018, 2019, 2020, 2022, 2023))

### 3 CASO DE OBRA: OSASCO, SP

Trata-se de uma obra localizada em Osasco, SP. Foram executadas estacas pré-moldadas de concreto de seção  $\phi 38$ cm, cravadas através de um martelo de queda livre de 4000 kg.

A estaca da PCE (E01) possuía 13,80 m de profundidade, enquanto que a estaca do ECD (E02) possuía 14,10 m de profundidade. O ECD foi realizado com alturas de queda crescentes (Aoki, 1989, 1997) e as análises CAPWAP foram realizadas segundo o procedimento proposto por Murakami (2015, 2019). A obra em questão já foi amplamente estudada por Murakami e Massad (2014, 2016, 2023) e Murakami (2015, 2019). Maiores informações sobre a obra e os ensaios podem ser encontrados nos trabalhos já publicados anteriormente pelos autores.

A figura 1 mostra a comparação entre a PCE e o ECD. A curva “PDA – Case – E02” é a curva RMX vs. DMX proposta por Aoki (1989, 1997), indicando as alturas de queda de cada golpe que variaram entre 10 cm e 80 cm. Nota-se que a partir de 50 cm de altura de queda se verificou ruptura geotécnica. O ponto denominado CEPM representa o carregamento estático utilizando-se o peso do martelo do bate estaca (40 kN) e seu deslocamento medido com relógios comparadores. O CEPM foi realizado na mesma estaca do PDA e maiores informações sobre este procedimento podem ser encontrados em Murakami (2015, 2019).

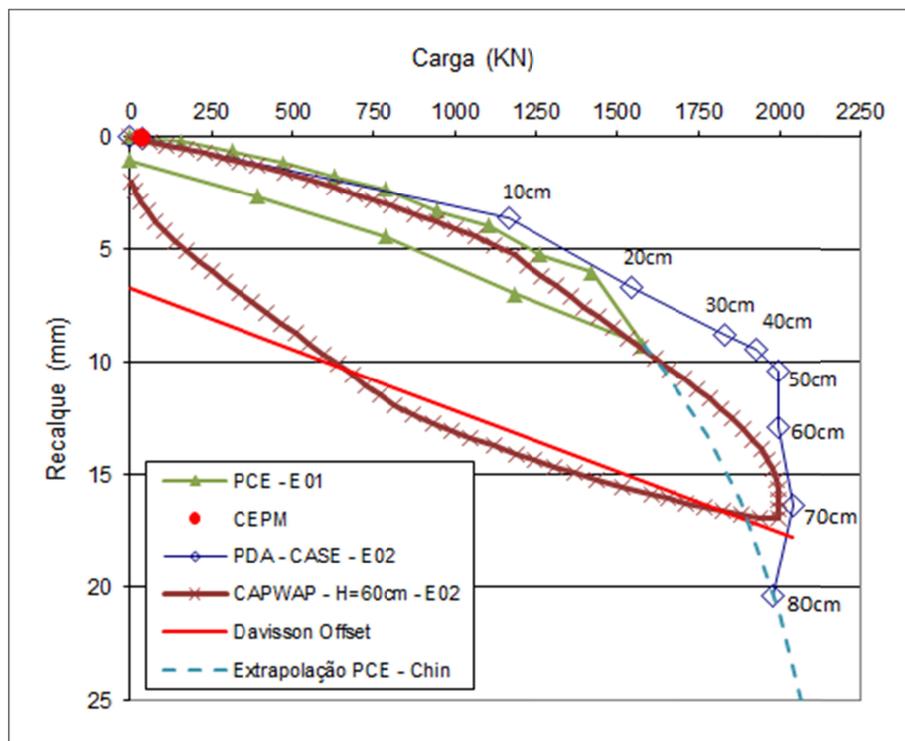


Figura 1. Correlação entre o ECD e PCE (Murakami e Massad, 2014, 2016)

O procedimento proposto por Murakami (2015, 2019) utiliza a relação entre resistência dinâmica ( $R_d$ ) vs. velocidade máxima do topo da estaca ( $VMX$ ) como uma condição de contorno para aprimorar os resultados do CAPWAP no ECD com energia crescente, procurando manter a linearidade em cada golpe aplicado (1ª condição de contorno).

A figura 2 mostra a relação entre  $R_d$  vs.  $VMX$  obtidos através do CAPWAP. Nota-se que o valor máximo foi de 1129 kN referente ao golpe de altura de queda de 80 cm. A regressão linear indicou  $R^2$  de 0,9619. Já na figura 3, o Método Case indicou valor máximo de  $R_d$  de 958 kN e a regressão linear indicou  $R^2$  de 0,8064. Ainda na figura 3 é importante destacar que o Método Case indicou  $R_d$  negativo de 29 kN referente ao  $VMX$  de 0,58 m/s (1º golpe aplicado com altura de queda 10 cm). Uma explicação para este valor negativo para  $R_d$  seria que o valor de RMX neste golpe foi maior do que o valor de  $R_t$  do Método Case. Neste caso, ao subtrair RMX de  $R_t$  (Eq. 3) resulta em um valor negativo de  $R_d$ . Convém destacar também: a) o Método Case é um método simplificado que admite que toda resistência da estaca se concentra na ponta, enquanto que o CAPWAP é um método numérico mais rigoroso; b) para valores baixos de  $VMX$  o JC é menor que nos golpes de maior energia, o que implica que a resistência total se aproxime da resistência estática (Murakami, 2024a).

A comparação entre os Métodos CAPWAP e Case mostrou que as resistências dinâmicas para cada golpe no ECD com energia crescente não foram iguais, conforme mostrado nas Figuras 2 e 3. Já na figura 4 se observou em média um valor de  $R_d$  27% maior para o CAPWAP em relação ao Método Case. Além disso, se verificou melhor  $R^2$  para o CAPWAP, o que indicaria melhor regressão linear para este Método.

Apesar de que os Métodos CAPWAP e Case se correlacionarem através do JC em relação ao valor de RMX, é importante destacar que os dois Métodos são um pouco diferentes em relação ao cálculo de  $R_d$ , conforme descrito por Murakami (2024a, 2024b). Isso explicaria o motivo de diferença dos valores de  $R_d$  calculados pelos dois Métodos.

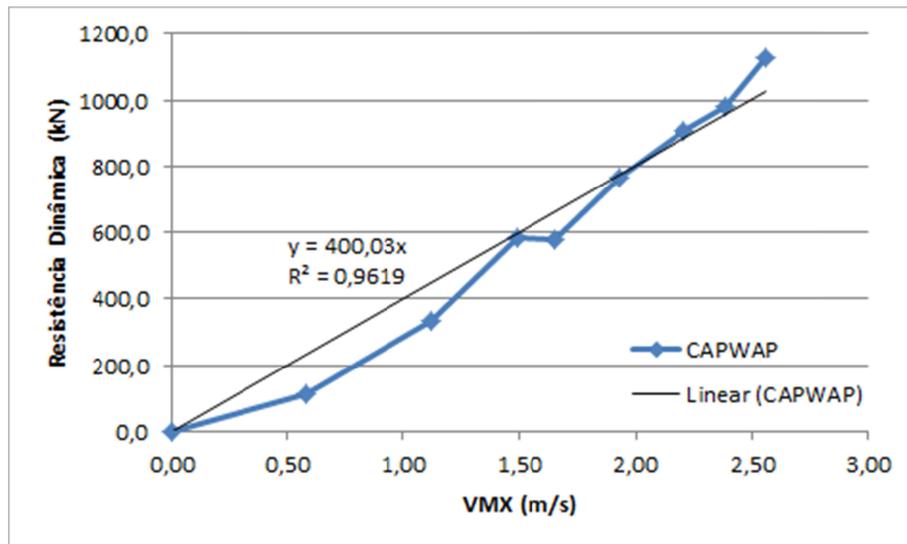


Figura 2. Resistência dinâmica do CAPWAP vs. VMX

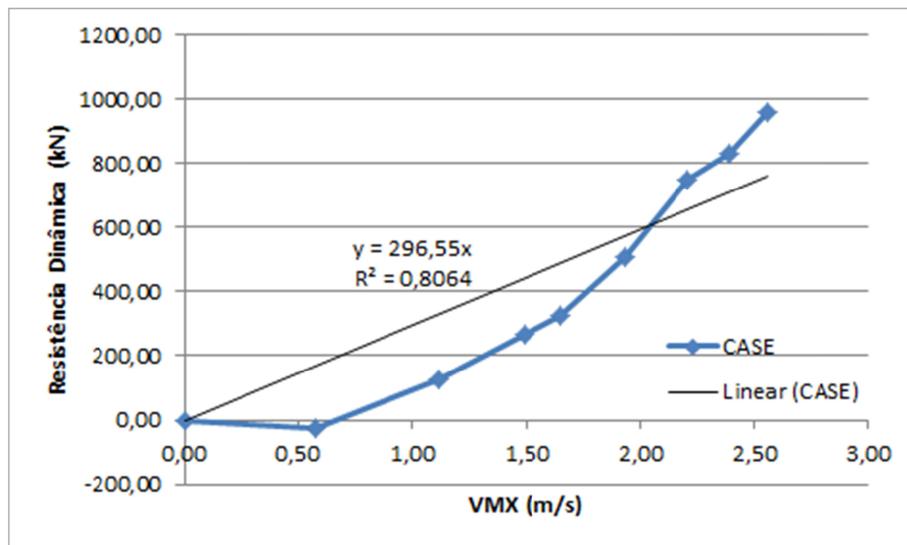


Figura 3. Resistência dinâmica do Método Case vs. VMX

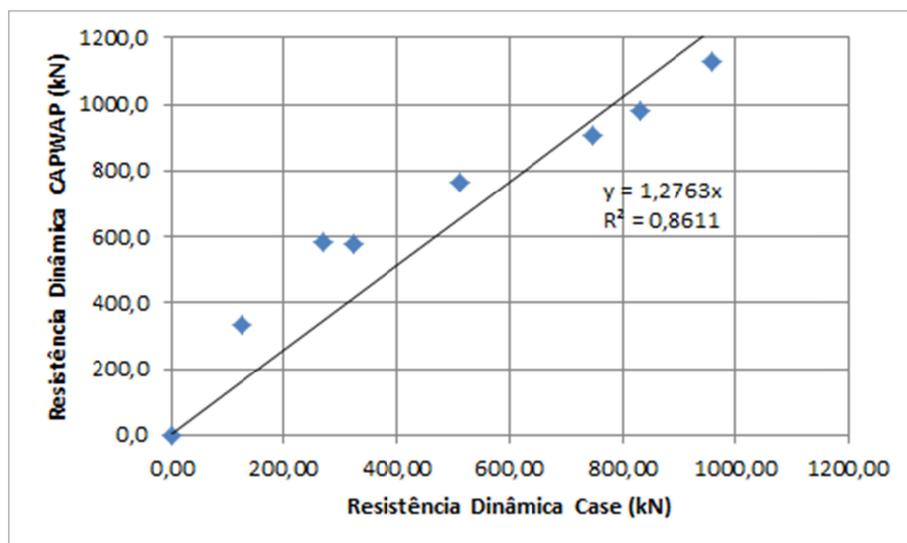


Figura 4. Resistência dinâmica do CAPWAP vs. Método Case

As figuras 5 e 6 mostram a relação  $R_d/R_{MX}$  vs.  $VMX$  para os Métodos CAPWAP e Case, respectivamente. É interessante observar que esta relação sempre cresce com o aumento de  $VMX$ , apresentando boa regressão linear para o CAPWAP ( $R^2$  de 0,9827), enquanto que no Método Case a regressão foi linear foi um pouco pior ( $R^2$  de 0,8199). A importância desta relação  $R_d/R_{MX}$  com o aumento de  $VMX$  é de que há uma linearidade desde o início da mobilização da resistência estática (primeiros 4 pontos de menor valor de  $VMX$ ) até o comportamento no pós ruptura (4 últimos pontos com maior  $VMX$ ). A conclusão é de que o valor de  $R_d$  deve crescer em função de  $VMX$ , independentemente do formato da curva  $R_{MX}$  vs.  $DMX$ .

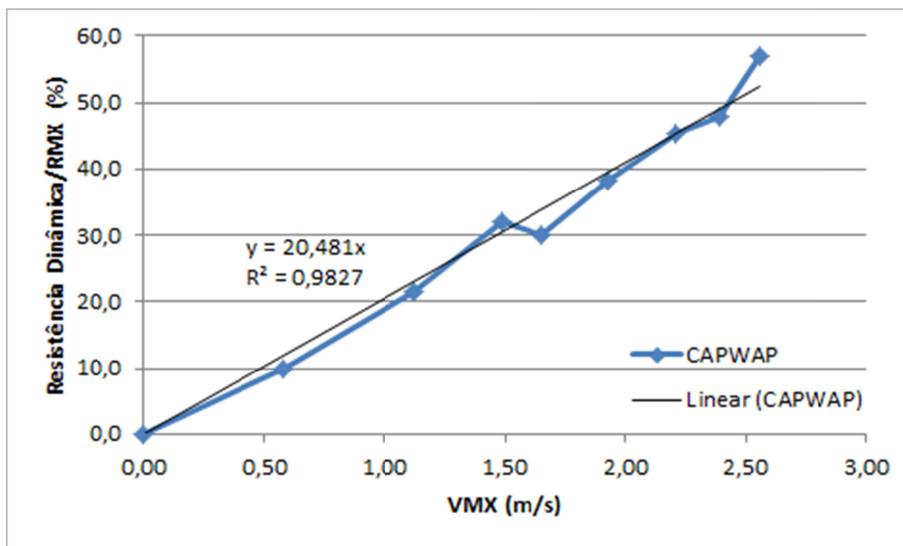


Figura 5. Relação  $R_d/R_{MX}$  do CAPWAP vs.  $VMX$

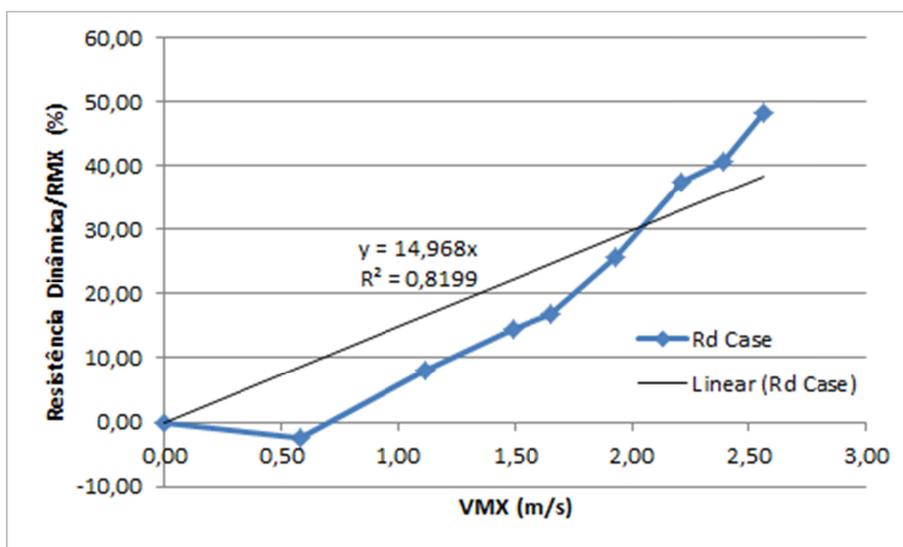


Figura 6. Relação  $R_d/R_{MX}$  do Método Case vs.  $VMX$

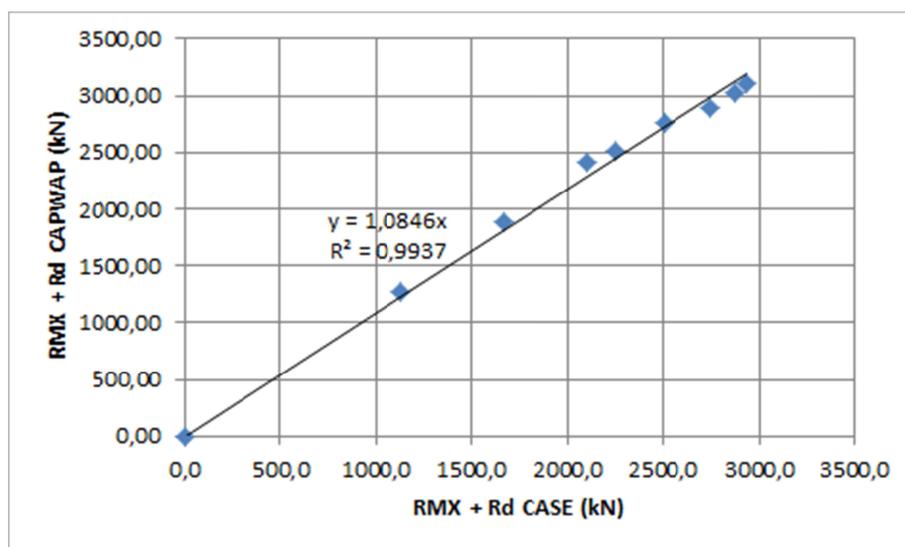


Figura 7. Resistência Total do CAPWAP vs. Resistência Total do Método Case

Apesar do valor de  $R_d$  do CAPWAP ser em média 27% superior ao do Método Case (figura 4), em termos de Resistência Total ( $R_t$ ) se observou que o CAPWAP foi em média apenas 8,46% superior ao Método Case, conforme indicado na figura 7. Nota-se que, apesar de próximos, a resistência total (soma das parcelas de resistência estática e dinâmica) não foi exatamente igual para os dois Métodos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Intuitivamente, é de se esperar que  $R_d$  e  $R_t$  dos Métodos CAPWAP e Case devam ser iguais, uma vez que nos dois Métodos a resistência estática se correlaciona através do JC. Entretanto, apesar dos Métodos CAPWAP e Case apresentarem a mesma resistência estática mobilizada, mostrou-se neste artigo que  $R_d$  e  $R_t$  não necessariamente são iguais nos dois Métodos.

Além da linearidade entre  $R_d$  e  $VMX$ , amplamente estudada pelo autor em diversos casos já publicados, verificou-se também uma linearidade entre a relação  $R_d/RMX$  vs.  $VMX$ . A importância desta relação  $R_d/RMX$  com o aumento de  $VMX$  é de que há uma linearidade da relação  $R_d/RMX$  desde o início da mobilização da resistência estática até o comportamento no pós ruptura. A conclusão é de que o valor de  $R_d$  deve crescer em função de  $VMX$ , independentemente do formato da curva  $RMX$  vs.  $DMX$ .

Para o caso de obra estudado as conclusões foram: a)  $R_d$  do CAPWAP foi em média 27% superior ao Case; b) há uma proporcionalidade entre  $R_d$  e velocidade máxima do topo da estaca ( $VMX$ ) para ambos Métodos, segundo a 1ª condição de contorno (Murakami, 2015), porém o CAPWAP apresentou melhor  $R^2$  de 0,9619 contra  $R^2$  de 0,8064 do Case; c) relação entre  $R_d/RMX$  vs.  $VMX$  foi melhor para o CAPWAP com  $R^2$  de 0,9827 contra 0,8199 do Case; d)  $R_t$  do CAPWAP foi em média 8,4% superior ao Case.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, N. (1989) "A new dynamic load test concept", Drivability of piles (1), Proc. Discussion Session 14, . Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng. (12), Rio de Janeiro, Brazil, pp. 1-4.
- Aoki, N. (1997), "Determination of pile capacity of driven piles on the dynamic increasing energy test", DSC Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos (in Portuguese).
- ABNT (2007) NBR 13208. Estacas Ensaio de carregamento dinâmico. Rio de Janeiro.

- ASTM D4945 (2017) Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations, West Conshohocken, PA, USA.
- Likins, G., Rausche, F., (2008). What Constitutes a Good PDA Test? Proceedings of the Eighth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Lisbon, Portugal, pp 403-407.
- Murakami, D. K., Massad, F. “Determinação do quake do fuste de estacas pré-moldadas através de provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico”, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, 2014.
- Murakami, D. K. (2015) New Procedure to Perform CAPWAP Analysis on the Dynamic Load Test in Precast Concrete Piles. M.Sc. thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.
- Murakami, D. K.; Cabette, J. F.; Rodriguez, T. G.; Miranda Junior, G., Correlation between static and dynamic load test in a 50cm diameter precast concrete pile. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, 2016 (in Portuguese).
- Murakami, D. K., Massad, F. “Determinação do quake do fuste de estacas pré-moldadas através de provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico”, Geotecnia, Nº 137, pp 79-98, 2016.
- Murakami, D. K., Corgnier, F., Silva, A., Correlation between cyclic static load test and dynamic load test in a 1,0m diameter steel pipe pile. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, Salvador, 2018 (in Portuguese).
- 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., Corgnier, F., Silva, A., Cury Filho, D., Paschoalin Filho, J. A., Correlation between static and dynamic load test in continuous flight auger piles through the concept of match quality of settlements. 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, 2019.
- Murakami, D. K., Corgnier, F., Silva, A., Cury Filho, D., On the Use of the Concept of Match Quality of Settlements to Correlate Static and Dynamic Load Test in Franki piles. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, 2020.
- Murakami, D. K.; Corgnier, F.; Sáez, M.; Ludemann, S. M.; Rocha, A. (2020). Análise de resultados de ensaios em estacas raiz em uma região de bota fora da ETA Guaraú - Obra da Sabesp, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Campinas, SP.
- Murakami, D. K., Massad, F. (2023) The Advantage of The Use of The Concept of Match Quality of Settlements in The Dynamic Load Test. 10º Seminário de Fundações e Geotecnia, São Paulo, SP.
- Murakami, D. K. (2024a) O fator de amortecimento do solo no ensaio de carregamento dinâmico com energia crescente. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Balneário Camboriú, SC (artigo submetido).
- Murakami, D. K., (2024b). Novo Método De Cálculo De Resistência Dinâmica Em Provas De Carga Estática Com Critérios De Ruptura. 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.