

Aplicação do Método da Rigidez para Estimativa do Atrito Lateral e Resistência de Ponta em Estaca Escavada

Darlan Amorim Pereira

UFPR, Curitiba (PR), Brasil, damorimpereira@gmail.com

Larissa de Brum Passini

UFPR, Curitiba (PR), Brasil, larissapassini@hotmail.com

Alessander C. Morales Kormann

UFPR, Curitiba (PR), Brasil, alessander@ufpr.br

RESUMO: A prova de carga estática é uma importante ferramenta para se compreender o comportamento de uma estaca, sendo que o ensaio convencional, sem instrumentação em profundidade, fornece a curva carga $\times$ recalque no topo da estaca. Contudo, esta informação por si só, não permite entender o desenvolvimento das parcelas de atrito lateral e ponta, as quais são essenciais para o dimensionamento deste tipo de fundação e previsão dos recalques, sendo necessário o uso de métodos para a interpretação dos dados e separação de tais parcelas resistentes, de acordo com o formato das curvas carga $\times$ recalque. No caso de estacas instrumentadas em profundidade, é possível realizar a separação diretamente. Tendo em vista esta realidade, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o Método da Rigidez de Décourt (1996; 2008), em dados de uma prova de carga estática a compressão, realizada no município de Araquari (SC) em uma estaca do tipo escavada com polímero. Esta possui diâmetro de 0,7 m e comprimento de 15,7 m, instalada em solo predominantemente arenoso e instrumentada com pares de *strain gages* em 5 níveis ao longo do fuste. Com os dados das curvas carga $\times$ recalque coletados no topo da estaca e os dados da instrumentação do fuste, foram realizados estudos comparativos entre os valores de atrito lateral e resistência de ponta, obtidos através da interpretação da curva e os valores alcançados pelos dados da instrumentação. Os resultados mostraram uma precisão muito boa do método, com valores muito próximos aos obtidos pela instrumentação.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga Estática, Atrito Lateral, Resistência de Ponta, Estaca Escavada com Polímero, Instrumentação de Estacas, Método da Rigidez.

1 INTRODUÇÃO

A previsão do comportamento de fundações é, desde muito tempo, interesse de engenheiros, que tentam de diferentes formas, seja através de métodos empíricos, semiempíricos ou teóricos, antever como a fundação irá responder as cargas que a solicitam. Porém, como o comportamento, no caso de estacas, envolve diversos fatores, desde o tipo de solo (coesivo ou granular), estado em que este se encontra (sobre adensado ou normalmente adensado), tipo de estaca, material e sua geometria, esta tarefa se torna um desafio.

Provas de carga tem se mostrado a melhor

maneira de compreender a interação solo-estaca, no entanto, ensaios convencionais, apresentam apenas pares de valores de carga $\times$ recalque no topo. Não sendo definida a carga de ruptura, nem tampouco as parcelas resistentes de atrito e ponta, sendo necessário uma análise dos dados para se obter tais informações, as quais devem ser realizadas de maneira cautelosa e utilizando métodos de interpretação confiáveis. O mesmo não ocorre em provas de carga instrumentadas em profundidade, pois estas possibilitam a separação direta das parcelas de atrito lateral e ponta, e um melhor entendimento da interação solo-estaca. Tendo em vista o exposto, o

presente artigo tem o objetivo de confrontar os resultados obtidos pela instrumentação, em provas de carga estática a compressão, e o resultado de um método de interpretação da curva carga × recalque, conhecido como o Método de Rigidez de Décourt (1996; 2008).

2 PROVA DE CARGA ESTÁTICA

É o tipo mais comum de prova de carga e pode ser feito para estacas com esforços de compressão, tração ou transversais, sendo divididas em três grandes categorias segundo Velloso e Lopes (2010): i) Carga controlada, com carga incremental lenta, carga incremental rápida, carga incremental mista (lenta e rápida) e carga cíclica; ii) Deformação controlada; e iii) Método do equilíbrio.

Estas podem conter instrumentação em profundidade ou não. A vantagem deste tipo de instrumentação é que ela possibilita, além das medições de carga e deslocamentos no topo (ensaio convencional), a medição das cargas e/ou deformações atuantes em diferentes profundidades ao longo do fuste da estaca em análise. Isto permite a distribuição da carga de topo ao longo do fuste e separação das parcelas resistentes de atrito lateral e ponta. Um tipo de instrumentação utilizado em estacas são os sensores de deformação ou *strain gages*, cuja função é medir deformações específicas no local posicionado. Sua instalação é feita junto a armadura da estaca, no caso de estacas moldadas *in loco*, com no mínimo um par de sensores em cada nível e diametralmente opostos.

As medidas de deformação coletadas são utilizadas para a obtenção da força na seção instrumentada e, assim, se conhece a distribuição da carga ao longo do fuste da estaca. As forças (F) atuantes em cada nível instrumentado são obtidas pelo produto da deformação (ε) específica de cada sensor pela rigidez (R_{ig}) característica da seção da estaca, sendo esta o produto do módulo de elasticidade (E) do material da estaca pela área da seção transversal (A), conforme mostram as equações a seguir:

$$F = \varepsilon \cdot R_{ig} = \varepsilon \cdot E \cdot A \quad (1)$$

$$R_{ig} = E \cdot A \quad (2)$$

Neste artigo serão apresentados os ensaios de carga incremental lenta, sendo este realizado na estaca analisada.

O ensaio de carga incremental lenta consiste na aplicação de carga constante até a estabilização dos recalques. Os incrementos de carga são sucessivos e iguais. No Brasil, a norma NBR 12131/2006 descreve o método de ensaio e prescreve os critérios para os incrementos de carga e os tempos mínimos para duração do ensaio. Segundo Velloso e Lopes (2010), é o ensaio que mais se aproxima, para casos correntes (edifícios, silos, tanques e pontes), do carregamento real que a estaca sofrerá durante sua vida útil, pois o carregamento se dará de maneira lenta, atingindo recalques maiores e menores resistências. Todavia a estabilização dos recalques torna o ensaio demorado e caro, fazendo do ensaio rápido uma opção em situações onde não se disponha de muito tempo.

3 MÉTODO DA RIGIDEZ DÉCOURT (1996; 2008)

Proposto por Décourt (1996), inicialmente para determinação da carga de ruptura em provas de carga, este método utiliza a rigidez, que é a razão entre a carga aplicada no topo da estaca e seu recalque, como parâmetro para a obtenção dos resultados. Isso em um gráfico, no qual a abscissa representa a carga aplicada e a ordenada a rigidez. A ruptura física (R_{ult}) seria o ponto onde a rigidez é nula e a ruptura convencional ($R_{ult,10\%}$) a carga para um recalque na ponta de 10% do seu diâmetro.

A ruptura física (R_{ult}) seria igual à razão entre o intercepto no eixo vertical (C) e a inclinação (m) da projeção da curva.

$$R_{ult} = \frac{C}{m} \quad (3)$$

A curva teórica de carga (P) × recalque (ρ), utilizando estas constantes C e m seria:

$$P = \frac{C \cdot \rho}{1 - m \cdot \rho} \quad (4)$$

Em trabalho posterior, Décourt (2008), o autor refina o método, assumindo que os carregamentos conduzidos até grandes deformações possuem dois domínios facilmente identificáveis: domínio da ponta e domínio do atrito lateral. No trecho onde a transferência por ponta é preponderante, a relação entre carga $\times$ rigidez é uma curva, tornando-se linear em um gráfico com eixos na escala logarítmica. Já no trecho onde atrito lateral é dominante, essa relação é, nitidamente, linear.

Com base nos domínios de ponta e atrito, o método identifica um intervalo para o atrito lateral na ruptura (A_{lr}), com um limite “inferior”, encontrado pelo domínio da ponta, e outro “superior”, encontrado pelo domínio do atrito. Sendo o valor adotado para o atrito lateral a média destes dois limites.

No Limite Inferior (Figura 1), inicialmente, colocam-se os pares de valores de carga e rigidez em ordem e são estabelecidas correlações lineares entre $\log(\text{carga}) \times \log(\text{rigidez})$, começando pelos pontos de carga mais elevada, e determinados os coeficientes de correlação R^2 . Após encontrada a melhor correlação para a ponta, traça-se uma reta ligando os pontos referentes a ponta no gráfico carga $\times$ recalque e o limite inferior de atrito é o valor onde está reta cruza com o eixo das cargas. Melo (2009) *apud* Amann (2012) indica traçar sobre a curva uma reta ligando o ponto de definição da ruptura convencional ($R_{ult,10\%}$) e o último ponto (ponto de maior rigidez) do melhor ajuste do $\log(\text{carga}) \times \log(\text{rigidez})$.

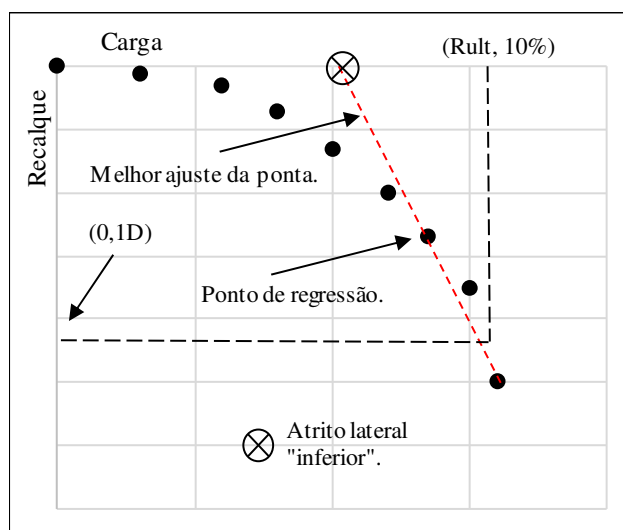


Figura 1 – Definição do limite inferior do atrito.

O Limite superior (Figura 2) é traçado, após encontrado o domínio da ponta, diretamente no gráfico da rigidez, neste caso são feitas várias tentativas na identificação do domínio de atrito, sendo a melhor aquela com maior número de pontos e maior R^2 . O valor de atrito superior é aquele onde a reta do domínio de atrito cruza com o eixo das cargas.

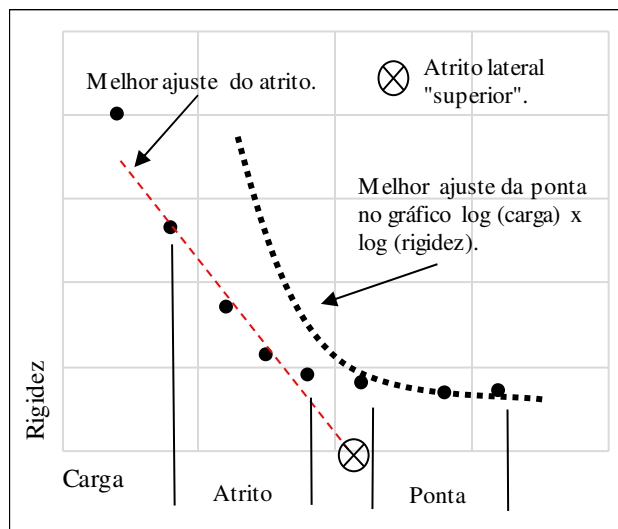


Figura 2 – Definição do limite superior do atrito.

Mais detalhes sobre o método e sua aplicação podem ser encontrados em Décourt (1996, 2008).

4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O local da pesquisa se encontra no município de Araquari (SC), próximo à rodovia BR 101, km 66 Norte. O perfil geotécnico da área, de acordo com sondagens SPT e CPTU realizadas, é predominantemente arenoso, com areia fofa nos metros iniciais, resistência de ponta do cone (q_c) variando de 0 a 5 MPa e N_{SPT} de 3 a 8 golpes; de 4 a 10 m de profundidade, onde se encontra uma camada de areia fina compacta, pico de resistência de ponta do cone (q_c), variando de 5 a 25 MPa e N_{SPT} de 20 a 40 golpes; entre 11 e 20 m de profundidade, há presença maior de material argiloso e siltoso, com resistência de ponta do cone (q_c) inferior a 5 MPa e N_{SPT} de 4 a 11 golpes; entre 20 e 30 m material arenoso, com resistência de ponta de cone (q_c) crescente com a profundidade, variando de 5 a 15 MPa e N_{SPT} entre 4 a 20 golpes. O nível da água se encontra em torno de 2,5 m abaixo da superfície.

As Figura 3 e 4 apresentam o perfil médio dos ensaios SPT e CPTU realizados.

A estaca analisada é do tipo escavada com polímero como fluido estabilizante, suas dimensões são de 0,7 m de diâmetro e 15,7 m de comprimento, concreto com f_{ck} 20 MPa, armadura longitudinal composta de 4 barras de aço com 32 mm de diâmetro, 15,4 m de comprimento e armadura transversal, do tipo estribo espiral, com 8 mm de diâmetro e espaçamento de 20 cm. Sua execução seguiu o procedimento indicado na norma brasileira NBR 6122/2010.

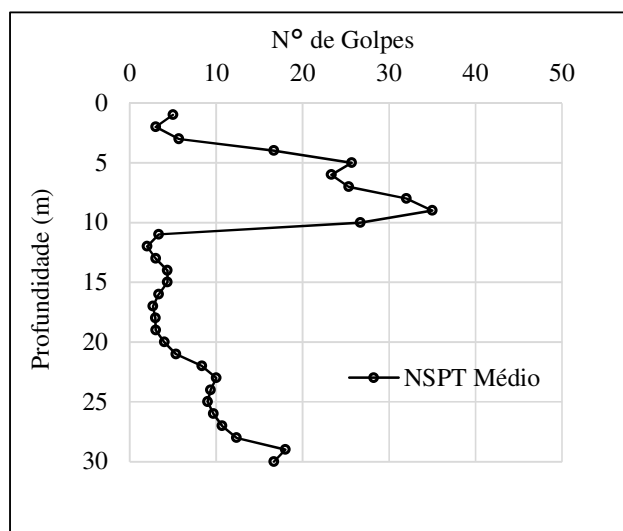


Figura 3 – Perfil médio das sondagens SPT.

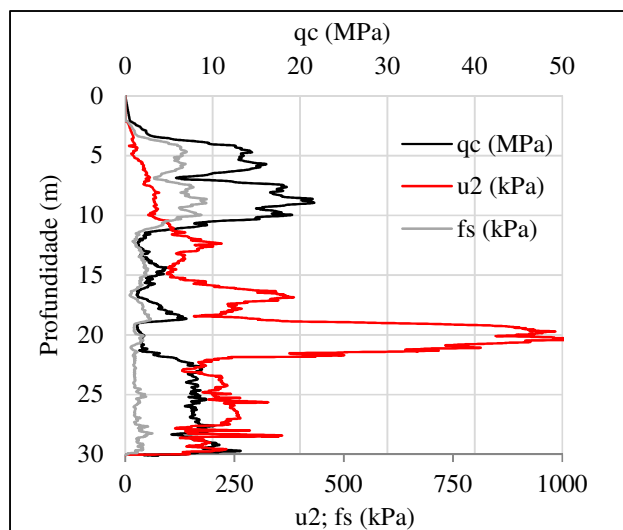


Figura 4 – Perfil médio das sondagens CPTU.

A instrumentação utilizada foi composta de *strain gages* do tipo corda vibrante, Modelo 4911 *Sister Bar*, fabricados pela Geokon. Estes foram fixados junto a armadura longitudinal da estaca, em cinco profundidades (1,4; 4,6; 7,6;

11,1; 15,1 m), contendo cada nível, no mínimo, dois sensores diametralmente opostos. A calibragem da instrumentação foi fornecida pelo fabricante, sendo admitida como leitura “zero” o valor obtido imediatamente antes do início de cada prova de carga. Durante as provas de carga os dados da instrumentação foram coletados em intervalos de 1 min, automaticamente, por meio de *datalogger*.

A prova de carga estática realizada foi, conforme exposto no item 2, do tipo compressão axial com carga controlada lenta. A carga máxima atingida foi de 2968 KN.

Os procedimentos realizados seguiram o indicado na norma brasileira NBR 12131/2006 e nas normas internacionais Eurocode 7 Parte 1/1997 e norte americana ASTM D1143/D1143M/2007.

A aplicação das cargas foi realizada por meio de macaco hidráulico, centralizado no topo da estaca, sendo a medição e monitoramento das cargas feita por meio de célula de carga, posicionada entre a viga de reação e o macaco hidráulico, garantindo o controle das cargas aplicadas. Os deslocamentos, no topo da estaca carregada foram realizados com quatro extensômetros com faixa de medição de 0 a 100 mm e resolução de 0,01 mm, e sobre cada estaca de reação foi colocado um extensômetro de mesma resolução.

O sistema de reação (Figura 5) utilizado foi composto de quatro estacas de reação, tipo hélice contínua, com profundidade de 20 m e diâmetro de 0,8 m, reforçadas com três barras Dywidag com diâmetro de 36 mm. O espaçamento entre as estacas seguiu os requisitos da NBR 12131/2006, que recomenda espaçamento mínimo, entre eixos de estaca, de 3,6 vezes o diâmetro da maior estaca do sistema, sendo utilizado espaçamento entre eixos de 3,75 m, entre a estaca testada e as estacas de reação. O restante do sistema de reação contou com viga de reação em aço, ligada as estacas de reação por meio de outras 4 vigas menores.

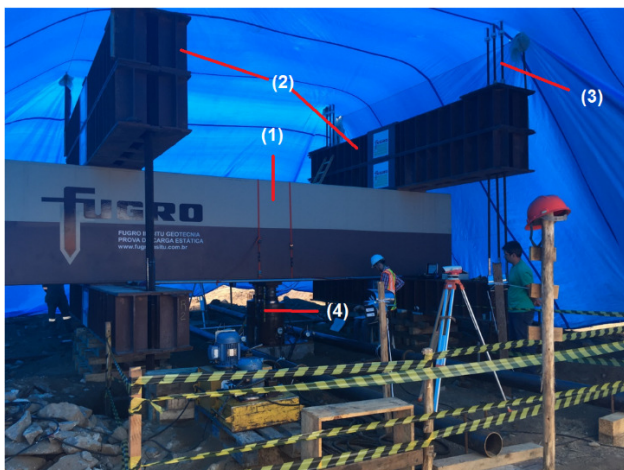


Figura 5 – Visão geral do sistema de reação da prova de carga estática: (1) viga de reação principal; (2) vigas auxiliares; (3) barras Dywidag das estacas de reação e (4) sistema de aplicação das cargas.

5 RESULTADOS

5.1 Curva carga × recalque

A Figura 6 apresenta a curva carga × recalque obtida no ensaio de prova de carga estática (PCE) executado. Trata-se da primeira PCE realizada na estaca, portanto, sem presença de cargas residuais ou melhoramento da ponta devido a carregamentos anteriores.

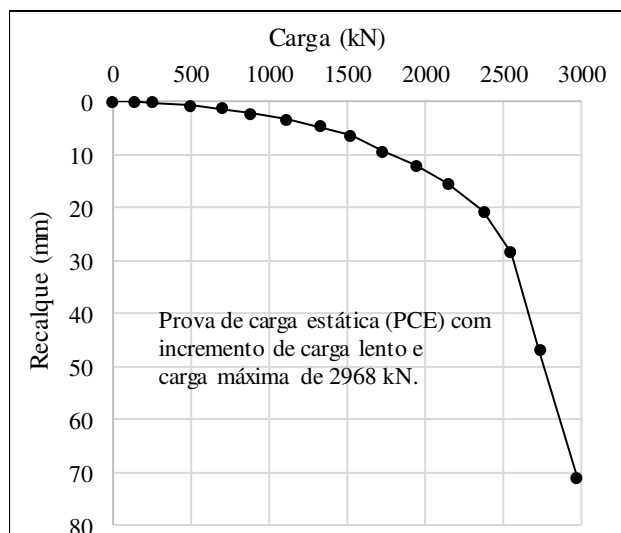


Figura 6 – Curvas carga × recalque.

5.2 Instrumentação ao longo do fuste

Para a distribuição das cargas ao longo do fuste da estaca e determinação das parcelas de atrito lateral e ponta foi utilizado o método do módulo tangente de Fellenius (1989) e Fellenius *et. al.*

(2000) o qual fornece uma rigidez média no valor de 20 GN ao longo do fuste, produto do módulo de elasticidade (E) e área da seção (A) da estaca. Valor de rigidez correspondente à um módulo de elasticidade aproximado de 50 GPa, para o diâmetro de estaca de 0,7 m, em concreto de resistência a compressão de 38 MPa aos 28 dias.

O valor da rigidez aqui adotado está abaixo do encontrado por França (2011), em análise semelhante de estacas escavadas, cuja rigidez encontrada foi de 39 GN, correspondente a módulo de elasticidade de 35 GPa, para estaca de 1,2 m de diâmetro e concreto de 32 MPa aos 28 dias.

Cabe lembrar que se trata de estaca moldada *in loco*, portanto o diâmetro de 0,7 m é aproximado, sendo este valor possivelmente maior, e a resistência a compressão do concreto apresentada é para idade de 28 dias, porém, no momento da primeira prova de carga, sua idade era de 115 dias, o que leva a crer que a resistência a compressão é maior que os 38 MPa. Sendo assim, o módulo real é inferior a 50 GPa, para um concreto de resistência superior a 38 MPa, de forma que, este é apenas um valor aproximado.

Mais detalhes sobre a aplicação deste método podem ser obtidos nos trabalhos de Fellenius (1989) e Fellenius *et. al.* (2000).

A Figura 7 apresenta a distribuição de cargas ao longo do fuste da estaca, obtida para a primeira prova de carga (PCE1). Cada linha representa uma distribuição de carga para uma dada carga aplicada no topo da estaca. Os níveis de instrumentação são representados pelos marcadores em círculo presentes em cada linha.

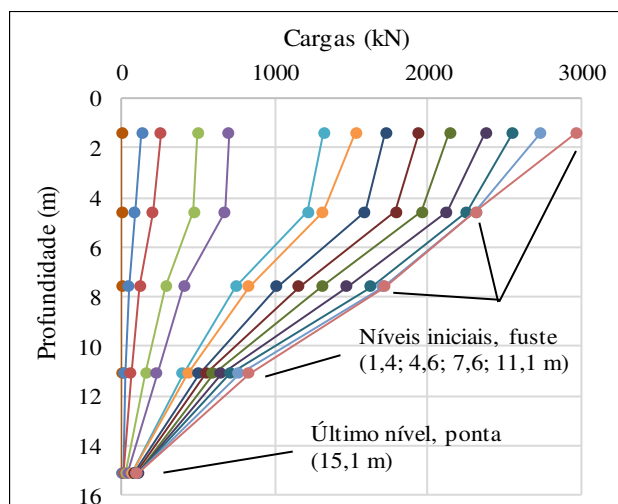


Figura 7 – Distribuição de cargas aplicadas na estaca.

Percebe-se que o atrito lateral representa a maior parcela da resistência da estaca, sendo a parcela de ponta, representada pelo último nível instrumentado, responsável por apenas 100 kN ou 3,4% da resistência total, para a carga máxima aplicada de 2968 kN. Os valores das cargas encontrados ao longo do fuste apresentaram maior redução de cargas entre os níveis referentes à 7,6 m e 11,1 m de profundidade, sendo da ordem de 900 kN, para a carga máxima aplicada de 2968 kN, justamente a camada mais resistente do terreno.

5.3 Método da Rigidez Décourt (1996; 2008)

Conforme exposto no item 3, o método utiliza o gráfico carga $\times$ rigidez, o qual é apresentado na Figura 8, para a prova de carga estática (PCE) executada.

Conforme indicado na Figura 8, a curva carga $\times$ rigidez apresenta trecho retilíneo a partir de 1000 kN de carga, o que indica, segundo o método, que se trata de uma estaca de atrito com pouca ou nenhuma parcela de ponta. O que está de acordo com as sondagens apresentadas no item 4, que indicam material de baixa resistência na região de ponta (15 m), com N_{SPT} inferior a 5 golpes e resistência de ponta do cone (q_c) inferior à 5 MPa.

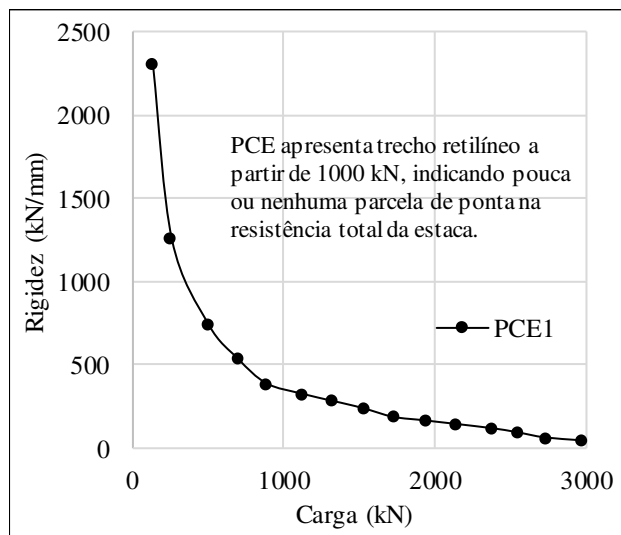


Figura 8 – Gráfico da rigidez.

A Figura 9 apresenta o melhor ajuste para a parcela de atrito, onde foram utilizados 11 pontos para a regressão linear, com R^2 igual a 0,970. Como neste caso a parcela de ponta não

foi considerada, os valores de atrito lateral na ruptura (A_{lr}) e carga de ruptura (R_{ult}) são iguais.

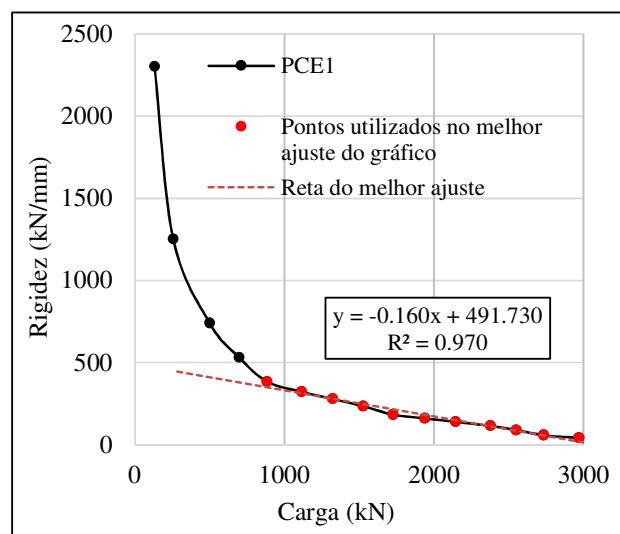


Figura 9 – Melhor ajuste do atrito para PCE1.

Para o cálculo da carga de ruptura (R_{ult}) foram considerados dois valores: ruptura física ou última, que corresponde a carga equivalente a rigidez zero, e a ruptura convencional ($R_{ult,10\%}$), para um recalque igual a 10 % o diâmetro da estaca.

A Tabela 1 apresenta os valores de ruptura física, convencional, atrito na ruptura (A_{lr}) e resistência de ponta (R_p) encontrados pelo método da rigidez. Como o valor da ruptura física é teórico e só ocorre para um recalque muito elevado, da ordem de 100% do diâmetro da estaca, o atrito lateral foi considerado igual a ruptura convencional. Sendo a resistência de ponta, para este caso, nula.

Tabela 1 – Valores obtidos pelo método da rigidez.

R_{ult} física (kN)	3073
R_{ult} convencional (kN)	2821
A_{lr} - resistência lateral (kN)	2821
R_p - resistência de ponta (kN)	0

A Figura 10 mostra a curva carga $\times$ recalque real (pontos pretos) e a curva teórica (linha vermelha), obtida pelos coeficientes da regressão linear, $C = 491,730$ e $m = -0,160$, apresentados na equação da reta na Figura 9. Percebe-se um ajuste muito bom, com R^2 igual a 0,992, em que apenas o último ponto se afasta da curva teórica proposta pelo método da rigidez.

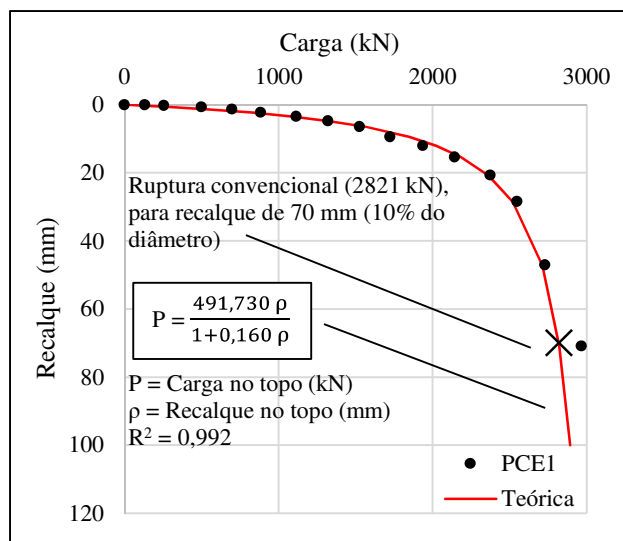


Figura 10 – Curva carga × recalque teórica, real e ruptura convencional.

5.4 Comparativo método da rigidez e os resultados da instrumentação do fuste

A análise comparativa entre o método da rigidez e os resultados da instrumentação do fuste da estaca, foi realizada admitindo-se para carga total o valor de ruptura convencional de 2821 kN, correspondente a 10% do diâmetro da estaca, obtida através do gráfico carga × recalque para a PCE1 com o uso do método da rigidez.

Os valores obtidos pelo método da rigidez se mostraram muito confiáveis, com diferença de apenas 3,4% do encontrado através da instrumentação. A instrumentação apontou para 96,6% atrito lateral e 3,4% ponta na composição da resistência total da estaca e o método da rigidez apontou para 100% atrito lateral na contribuição da resistência total da estaca. Resultado este de acordo com Massad e Fonseca (2012), que indicam a aplicação do método para estacas escavadas, rígidas, primeiro carregamento, caso apresentado neste artigo.

6 CONCLUSÕES

O método da rigidez apresentou valores muito bons na separação das parcelas de atrito e ponta, para a estaca rígida, do tipo escavada com polímero em análise, referente ao primeiro carregamento executado na estaca. A relação linear entre carga e rigidez, apontada por Décourt (2008), para estacas sem resistência de ponta é coerente. Neste caso, a aplicação do

método original (Décourt, 1996), é suficiente para a obtenção da carga de ruptura.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Fernando Schnaid pela liberação dos dados das provas de carga estática, a Fugro in Situ Geotecnia pelos dados dos ensaios CPTU e a Geoforma Engenharia pelos dados dos ensaios SPT.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12131: Estacas – Prova de carga estática. Rio de Janeiro, 2006.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load. D1143/D1143M. United States, 2007. 15 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- Amann, K. A. P. (2012) Identificação de parâmetros de transferência de carga nos diagramas de Rigidez de Décourt (2008). In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 2012, Porto de Galinhas - PE. COBRAMSEG 2012 - ANAIS. Pernambuco: ABMS. p. 320.
- Décourt, L. (1996) A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE III*. São Paulo: ABEF/ABMS, v. 1, p. 215-224.
- Décourt, L. (2008) Provas de carga em estacas podem dizer muito mais do que têm dito. In: *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE VIII*. São Paulo: ABEF/ABMS, v. 1, p. 117-131.
- EUROCODE 7: Geotechnical Design – Part 1: General Rules. 171 p. 1997.
- França, D. C. (2011). *Provas de cargas estáticas instrumentadas em profundidade em estacas escavadas de grande diâmetro (estacões)*. 186 p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Fellenius, B. H. (1989). Tangent modulus of piles determined from Strain data. *The American Society of Civil Engineers*, ASCE, Geotechnical Engineering Division, Foundation Congress, v, 1, p. 500-510. Disponível em: <<http://www.Fellenius.net>>. Acesso em: dezembro. 2015.
- Fellenius, B. H.; Brusey, W. G.; Pepe, F. (2000). Soil Set-up, Variable Concrete Modulus, and Residual Load for Tapered Instrumented Piles in Sand. *Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities*. Disponível em: <<http://www.Fellenius.net>>. Acesso em: dezembro. 2015.

- Massad, F. e Fonseca, A. V. da. (2012). Método da Rigidez de Décourt aplicado a estaca submetida a vários ciclos de carregamento. In: *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE VII*. São Paulo.
- Velloso, D. A.; Lopes F. R. (2010). *Fundações – Critérios de Projeto, Investigação do Solsolo, Fundações Superficiais, Fundações Profundas*. São Paulo: Oficina de Textos, 568 p.