

## Avaliação da transferência de carga de um tubulão assente em solo da formação Barreiras

Carlos Rolim Neto

Professor Titular, Instituto de Educação Superior da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil, carlosrolim@yahoo.com

Roberto Quental Coutinho

Professor Titular, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, robertoqcourtinho@gmail.com

Paulo José Rocha de Albuquerque

Professor Associado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil, pjra@unicamp.br

**RESUMO:** O presente trabalho visa apresentar um estudo com dados obtidos pela instrumentação de um tubulão, que possuía diâmetro do fuste igual a 1,0 m, diâmetro da base igual a 2,3 m e comprimento igual a 14 m. Com os dados da instrumentação avaliou-se o atrito lateral e ponta para a carga de trabalho, pois não houve ruptura. A metodologia aplicada consistiu na instalação de barras instrumentadas ao longo do fuste do tubulão, para que se obtivesse a transferência de carga ao longo da profundidade. Verificou-se que o tubulão trabalhou predominantemente por atrito lateral e que os resultados do Método da Rigidez foram confirmados pelos dados da instrumentação. Alguns métodos de previsão de carga mostraram-se conservadores e outros mais próximos dos resultados da instrumentação, mas quando são analisadas separadamente as parcelas de atrito e ponta, notou-se diferenças consideráveis. Para a realização deste trabalho, utilizaram-se dados de um edifício com 55 pavimentos, na Formação Barreiras de João Pessoa/PB.

**PALAVRAS-CHAVE:** Prova de carga, Instrumentação, Método da Rigidez, Tubulão.

**ABSTRACT:** The present paper presents a research with data obtained by the instrumentation of a belled caisson, that had a shaft diameter equal to 1.0 m, a base diameter of 2.3 m and a length of 14 m. With the instrumentation data the skin friction and tip load for the workload was evaluated, since there was no failure. The applied methodology consisted in the installation of instrumented bars along the shaft of the caisson, in order to obtain the transfer of load along the depth. It was found that the caisson worked predominantly by skin friction and that the results of the Stiffness Method were confirmed by the instrumentation data. Some load prediction methods have proved to be conservative and others closer to instrumentation results, but when the friction and tip plots are analyzed separately, considerable differences were noted. For the accomplishment of this paper, data of a building with 55 floors, in the Barreiras Formation of João Pessoa / PB, was used.

**KEYWORDS:** Load test, Instrumentation, Stiffness Method, Caisson.

## 1 Introdução

O mecanismo de transferência de carga das fundações para o solo desperta, há muito tempo, interesse dos engenheiros geotécnicos. Sendo através de métodos empíricos, semiempíricos ou teóricos, pesquisadores tentam antever como a fundação irá se comportar e responder às solicitações recebidas da superestrutura. Contudo, tais respostas dependem de diversos fatores, como o tipo de solo, tipo de fundação profunda, material e sua geometria.

Com o crescente uso das provas de carga, os estudos dos mecanismos de transferência de carga se tornaram mais frequentes. É de conhecimento que a prova de carga é o melhor caminho para compreender a interação solo-fundação profunda. No ensaio tradicional, obtém-se apenas pares de valores de carga x recalque, não estabelecendo as parcelas resistentes de atrito e ponta. Com a instrumentação em profundidade, torna-se possível a separação da parcela de atrito lateral e ponta, além de uma melhor compreensão da interação do sistema solo-fundação profunda. Diante do exposto, o presente trabalho possui o objetivo de confrontar os resultados obtidos pela instrumentação, em prova de carga estática à compressão, com resultados de métodos de previsão de carga e com o Método da Rigidez de Décourt.

## 2 Prova de Carga Estática

Segundo Albuquerque (2001), as provas de carga podem ser feitas com cargas verticais ou inclinadas, à compressão ou tração, cargas horizontais, procurando reproduzir as condições de funcionamento da fundação a que se destinam.

A utilização de provas de carga estáticas, instrumentadas ao longo do fuste, possibilita a obtenção das cargas de ponta e lateral, em cada etapa do carregamento. Existem algumas maneiras de se realizar a instrumentação. Uma delas, consiste na colocação de extensômetros elétricos, *strain gages*, que possuem a função de medir as deformações específicas. Tais medidas de deformação coletadas são utilizadas para a obtenção da força na seção instrumentada e, assim, se determinar a distribuição da carga ao longo do fuste do tubulão. As forças (F) atuantes em cada nível instrumentado são obtidas pelo produto da deformação específica ( $\epsilon$ ) de cada sensor pela rigidez ( $R_{ig}$ ) da seção do tubulão. A rigidez do tubulão é definida como sendo o produto do módulo de elasticidade (E) pela área da seção transversal do tubulão, conforme equações a seguir:

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

Neste trabalho serão apresentados os resultados da prova de carga, do tipo lenta, realizada no tubulão e questão. A prova de carga estática é realizada com incrementos de carga sucessivos e iguais, até a estabilização dos recalques. É regido pela NBR 12131/2006 e, segundo Velloso e Lopes (2010), é o ensaio que mais se aproxima, para estruturas usuais (edifícios, pontes etc), do carregamento real que fundação profunda sofrerá durante sua vida útil.

## 3 Método da Rigidez

Proposto por Décourt (1996), foi inicialmente apresentado 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 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 igual a 10% do seu diâmetro.

$$Q_u = \text{limite de RIG quando } r \rightarrow \infty \quad (2)$$

Sendo:

$$R = Q/r \rightarrow 0 \quad (3)$$

Em trabalho posterior, Décourt (2008) refina o método, assumindo que o carregamento conduzido até grandes deformações, possui 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 x rigidez é uma curva, tornando-se linear em um gráfico com eixos na escala logarítmica. No trecho onde o atrito lateral é dominante, essa relação é 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 e outro superior. O valor adotado para o atrito lateral é a média dos dois limites.

No limite inferior (Figura 1), inicialmente colocam-se os pares de valores de carga e rigidez em ordem crescente e são estabelecidas correlações lineares entre  $\log(\text{carga}) \times \log(\text{rigidez})$ , determinando os coeficientes de correlação  $R^2$ . Melo (2009) 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  $\log(\text{carga}) \times \log(\text{rigidez})$ .

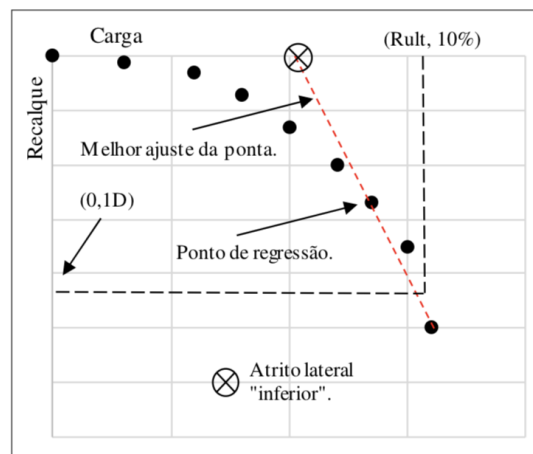


Figura 1. Definição do limite inferior do atrito. Fonte: Pereira, 2016

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

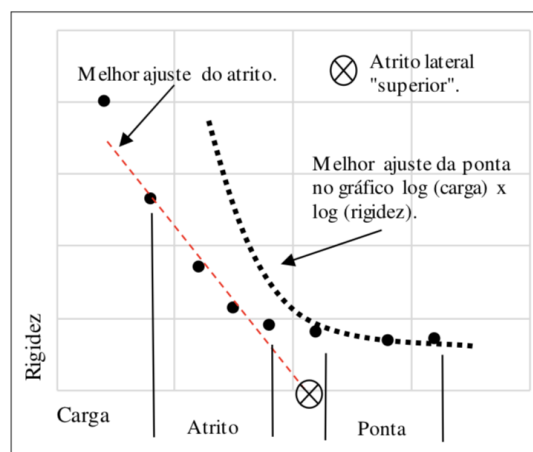


Figura 2. Definição do limite superior do atrito. Fonte: Pereira (2016)

#### 4 Planejamento Experimental

O local da pesquisa se encontra na cidade de João Pessoa PB. O tubulão em estudo faz parte da fundação de um edifício residencial. O fuste possui um diâmetro igual a 1,0 m e a base possui um diâmetro igual a 2,30 m. O comprimento total do tubulão é igual a 14 m. A resistência característica do concreto do tubulão foi de 20 MPa, sua armação longitudinal era composta de 14 barras de 20,0 mm e armação transversal por barras de 8,0 mm espaçadas a cada 20 cm. As normas seguidas foram a NBR 6122/2010 e NBR 12.131/2006. Foi realizado um ensaio de prova de carga estática, do tipo lento (SML), em um tubulão de um edifício residencial com 55 pavimentos, localizado no bairro Altiplano Cabo Branco (figura 3). O solo é não saturado, na Formação Barreiras da cidade. A prova de carga com a instrumentação do tubulão ao longo do fuste são a base deste trabalho.



Figura 3. Implantação do edifício. Fonte: [www.revistaedificar.com.br](http://www.revistaedificar.com.br) acesso em 24/02/2019

O perfil geotécnico da área, de acordo com sondagens SPT é do tipo silte-arenoso-argiloso nos treze metros iniciais, seguido por argila silto-arenosa até 17 m. O número  $N_{SPT}$  é variável conforme figura 4

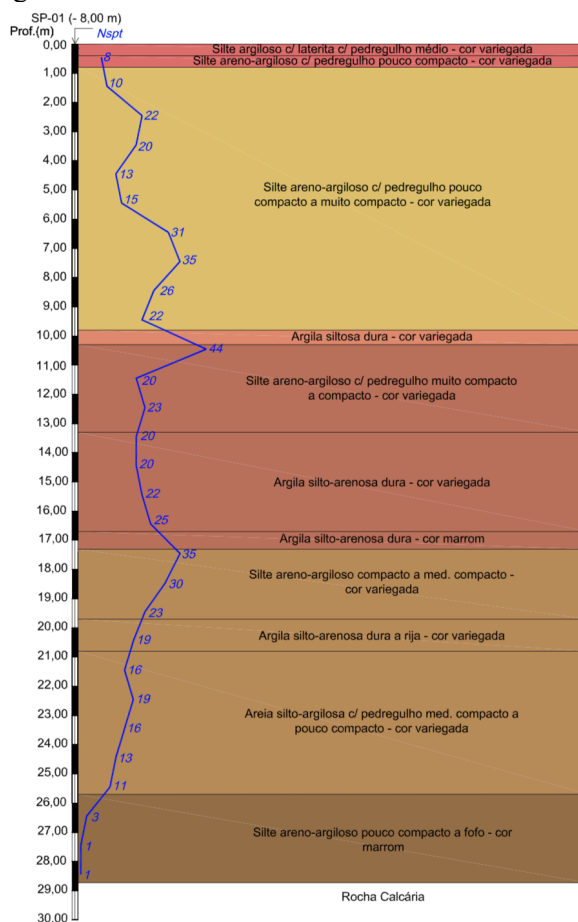


Figura 4. Perfil geotécnico. Fonte: Engeobase (2013)

Visando obter informações relativas à transferência de carga ao longo da profundidade, o tubulão ensaiado foi instrumentado em cinco níveis distintos ao longo da profundidade, sendo a 0,5 m (seção de referência), 3,0 m, 6,0 m, 9,5 m e 12,5 m, conforme mostrado na figura 5.

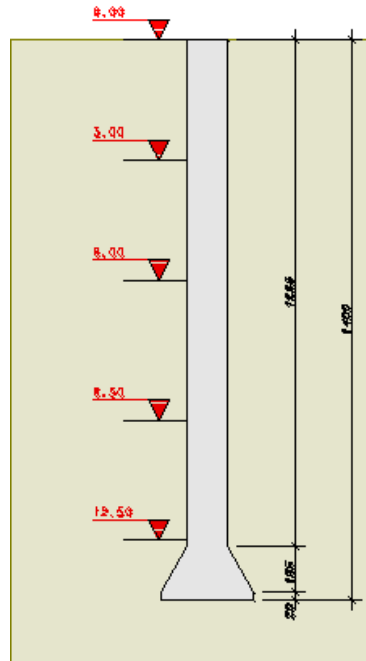


Figura 5. Cinco níveis de instrumentação. Fonte: autor

A instrumentação instalada consistiu de extensômetros elétricos de resistência, strain gages, tipo KFG2 – 120 – D16 – 11 da Kyowa Electronic Instruments CO Ltda (figura 6), colados em barras de aço CA-50, com ½” de diâmetro e 0,40 m de comprimento e instalados aos pares no mesmo nível, em posição diametralmente oposta, com ligação entre os *strain gages* do tipo ponte completa.

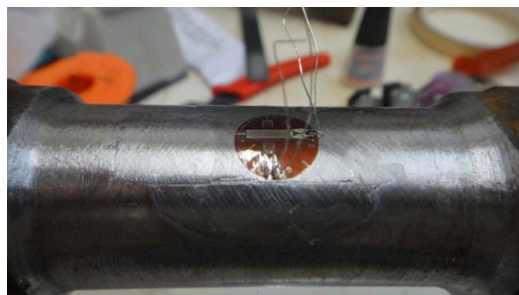


Figura 6. Extensômetros elétricos utilizados. Fonte: autor

As barras instrumentadas foram conectadas a uma caixa seletora de canais (Vishay Micro Measurements), que estava ligada a uma leitora de deformações P3500 da Vishay Micro Measurements Ltda (figura 7). Para ligar as barras instrumentadas à unidade leitora, utilizou-se cabo elétrico 4 x 26 AWG.



Figura 7. Unidade de leitura da instrumentação. Fonte: Engeobase (2013)

As barras instrumentadas foram aferidas com a finalidade de possibilitar a correção de eventuais diferenças nas leituras de deformação e possíveis erros de instalação dos *strain gages*. Após a aferição, as barras foram unidas por meio de roscas formando uma barra contínua.

As barras instrumentadas foram fixadas no tubulão de forma centrada, seguida da armação do mesmo. Após a colocação da barra instrumentada, foi realizada a concretagem para consolidação do sistema barra instrumentada-tubulão, ilustradas nas figuras 8 e 9.



Figura 8. Barra instrumentada no eixo do tubulão. Fonte: Engeobase (2013)



Figura 9. Concretagem do tubulão instrumentado. Fonte: Engeobase (2013)

O sistema de reação (figura 10) utilizado foi composto de seis tubulões de reação.



Figura 10. Sistema de reação. Fonte: Engeobase (2013)

## 5 Resultados

Durante o carregamento lento, a carga foi aplicada gradativamente, por meio de nove estágios iguais e sucessivos, de carga acrescida de 600 kN e um estágio de carga acrescida de 200 kN. Cada estágio teve a duração de 30 min, sendo realizadas as medições de deslocamentos referentes aos tempos de 0, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos. Esta fase de carregamento lento foi iniciada com carga nula e finalizada com carga igual a 5.600 kN. Como não houve ruptura evidenciada, após este estágio, a carga de 5.600 kN foi mantida por doze horas.

Em seguida foi iniciada a fase de descarregamento, sendo realizada em cinco estágios iguais e sucessivos de quinze minutos de duração, sendo decrescidas as cargas necessárias para o monitoramento dos estágios de 4480, 3360, 2240, 1120 e 0 kN, sendo realizadas medições de deslocamentos referentes aos tempos de 0 e 15 min. Em todas as fases e níveis de carga, os deslocamentos foram considerados finais após a estabilização das leituras, não apresentando variações acima de 5%.

A figura 11 apresenta a curva carga x recalque obtida no ensaio de prova de carga estática (PCE) executado. Trata-se da primeira PCE realizada no tubulão, portanto, sem a presença de cargas residuais ou melhoramento da ponta devido a carregamentos anteriores.

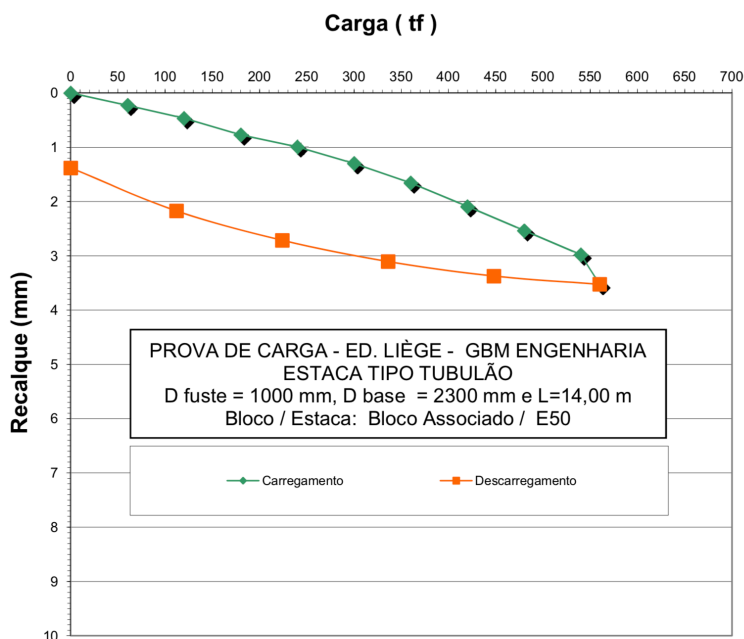


Figura 11. Curva carga x recalque

De acordo com o ensaio realizado, expõem-se as seguintes informações:

- Carga máxima: 5.600 kN
- Recalque total: 3,53 mm
- Recalque permanente: 1,38 mm
- Recalque elástico: 2,15 mm

A figura 12 apresenta a distribuição da carga ao longo do fuste do tubulão. Cada linha representa uma distribuição de carga para uma dada carga aplicada no topo da estaca.

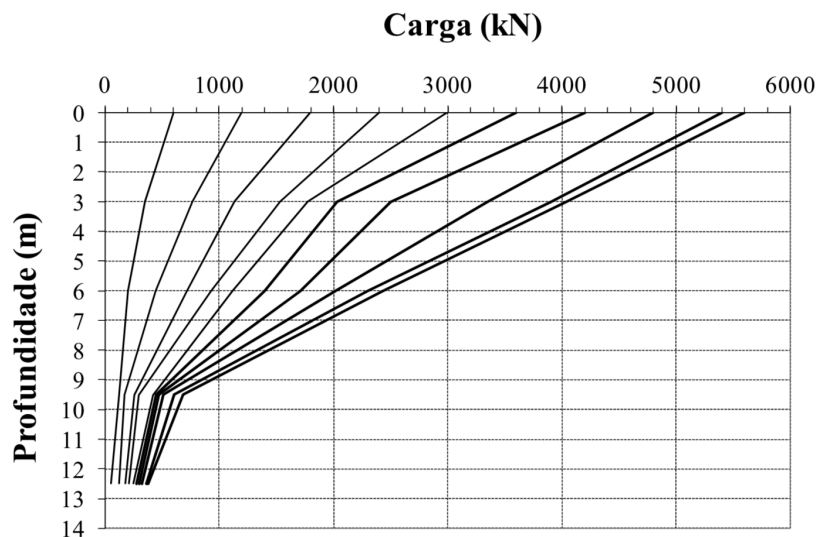


Figura 12. Distribuição da carga aplicada no topo ao longo do fuste

O gráfico da figura 12 está resumido no quadro 1, que mostra os valores de carga ao longo do fuste.

Quadro 1. Cargas nos níveis instrumentados

| SR (topo) | Nível 3,0 m (kN) | Nível 6,0 m (kN) | Nível 9,5 m (kN) | Nível 12,5 m (kN) |
|-----------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 0         | 0                | 0                | 0                | 0                 |
| 600       | 346              | 201              | 121              | 53                |
| 1200      | 768              | 441              | 172              | 127               |
| 1800      | 1135             | 718              | 259              | 174               |
| 2400      | 1533             | 929              | 296              | 211               |
| 3000      | 1777             | 1119             | 422              | 248               |
| 3600      | 2027             | 1396             | 449              | 274               |
| 4200      | 2501             | 1713             | 475              | 301               |
| 4800      | 3345             | 2016             | 512              | 322               |
| 5400      | 3904             | 2301             | 602              | 359               |
| 5600      | 4034             | 2428             | 681              | 380               |

Percebe-se que o atrito lateral representa a maior parcela da resistência do tubulão. Não se instrumentou a ponta, mas na cota -12,5 m, a carga que atingiu este nível foi de 380 kN, ou seja, 6,8 % da carga aplicada no topo.

## 5.1 Método da Rigidez



Conforme exposto no item 3, o método utiliza o gráfico carga x recalque, o qual é apresentado na figura 13, para a prova de carga estática (PCE) executada. Conforme indicado na figura 13, a curva carga x rigidez apresenta trecho retilíneo.

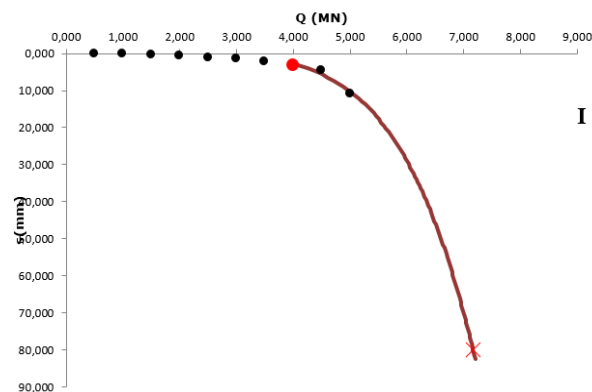


Figura 13. Curva carga x recalque

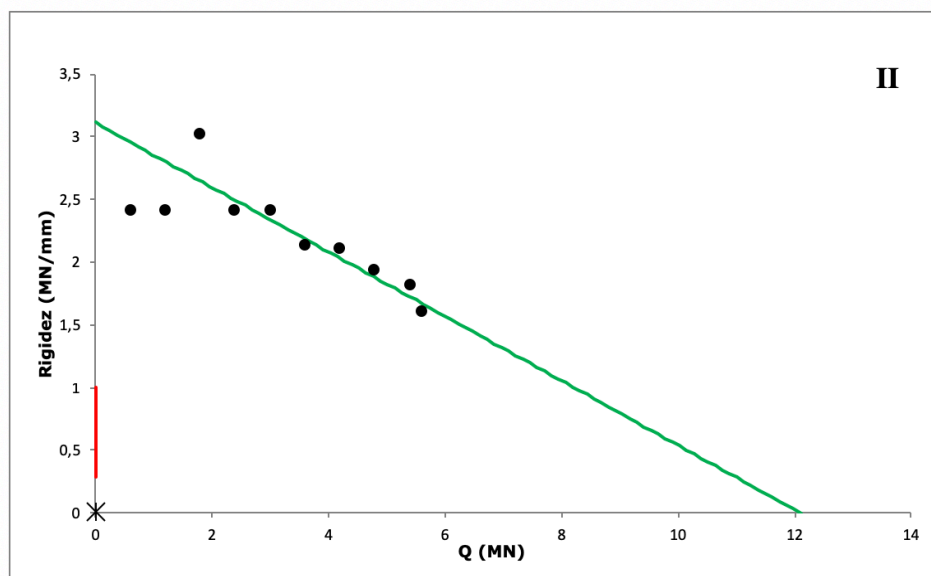


Figura 14. Gráfico da Rigidez

Analisando o gráfico de rigidez (figura 13) pode-se verificar que a fundação trabalhou preponderantemente por atrito, o que é corroborado com os dados da instrumentação.

## 6. Conclusões

A instrumentação empregada apresentou resultados coerentes, indicando um bom funcionamento. Os dados indicaram que o tubulão atuou preponderantemente por atrito lateral, o que vem de contraposição com os conceitos de projeto neste tipo de fundação, em que se considera que grande parte da carga é absorvida pela base.

A prova de carga não evidenciou a ruptura geotécnica, mostrando um deslocamento máximo de 3,53 mm, o que representa 0,34 % do diâmetro, indicando que o tubulão suportaria um carregamento superior ao obtido no ensaio, que de acordo com a proposta de Décourt (2008) seria da ordem de 7.165 kN.

O Método da Rigidez apresentou resultado próximo aquele indicado na instrumentação, indicando coerência com os dados experimentais. O gráfico apresenta uma reta, que indica que o tubulão trabalhou por

atrito lateral. Na instrumentação, pôde-se observar que do total da carga aplicada na cota 0,0 m, 5.600 kN, somente 380 kN alcançaram a cota – 12.5 m, indicando que 93,2% da carga aplicada foi absorvida por atrito lateral. A faixa de variação do atrito lateral está compreendida entre 3.867 kN e 5.621 kN. Tomando-se a média entre estes dois valores, encontra-se 4.740 kN.

A extrapolação da curva usando apenas os três últimos pontos deve-se ao fato de que o software utilizado faz um ajuste de  $R^2$ , e que o melhor ajuste encontrado foi para esta situação.

A metodologia do Método da Rigidez indica que a carga de ruptura convencional é referente a 10% do diâmetro da estaca, conforme indicado na figura 1. No tubulão em estudo, equivale a 80 mm.

#### AGRADECIMENTOS

À empresa GBM Engenharia Ltda e Fundações Engenharia Ltda pela liberação dos dados das provas de carga estática.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, P. J. R. (2001), *Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade*. Tese de doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo/USP, 263 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). NBR 6122. *Estacas- Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Décourt, L. (2008) Provas de carga em estacas podem dizer muito mais do que têm dito. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE, 8, São Paulo. *Anais...* ABEF. v. 1, p. 221-245.
- Pereira, D. A., Passini, L. B., Kormann, A. C. M. (2016) Aplicação do Método da Rigidez para Estimativa ao Atrito Lateral e Resistência de Ponta em Estaca Escavada. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 18, Belo Horizonte. *Anais...* ABMS, CD ROM.
- Engobase Engenharia de Fundações Ltda (2013). *Relatório de ensaio 005/2013*