



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**ANÁLISE DE FUNDAÇÃO DE POSTE PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO
ATRAVÉS DE PROVA DE CARGA INSTRUMENTADA**

**Gustavo V. M. Guimarães (*)
COPPE/UFRJ**

**Aureo Pinheiro Ruffier
CEPEL**

**Fernando A. B. Danziger
COPPE e Escola Politécnica/UFRJ**

RESUMO

No IT é descrito um ensaio para fundação de postes, no qual se solicitou até a ruptura uma estaca metálica de seção quadrada, vazada, com lado de 20 cm e comprimento de 3 m (2 m enterrada) instalada em solo laterítico, e instrumentada com células de tensão total e inclinômetro. Os ciclos de carga mostraram excelente repetibilidade. A curva carga versus deslocamento não mostrou ruptura bem caracterizada, sendo observadas trincas no nível do terreno para cargas da ordem de 50 kN. Valores para previsão de deslocamentos com base em ensaios de dilatômetro foram propostos para o caso do solo ensaiado.

PALAVRAS-CHAVE

Fundações de postes, estacas curtas, esforço transversal, métodos de dimensionamento, ensaio de dilatômetro.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Grupo de Trabalho 07 – Fundações, do Comitê de Estudos B2 do CIGRÉ–Brasil, que tem como principal objetivo a busca contínua do aprimoramento das técnicas de projeto e execução de fundações para linhas de transmissão de energia elétrica, desenvolve, já há alguns anos, pesquisas em fundações para postes.

A prática atual de projeto destas fundações baseia-se em técnicas desenvolvidas no exterior, que ainda não foram satisfatoriamente avaliadas para as condições geotécnicas de nosso país. Tem-se observado um expressivo número de postes, não só em linhas de transmissão, como também em linhas de distribuição, que apresentam desaprumo, o que indica problemas no projeto ou na execução de suas fundações.

Dentro deste contexto seria interessante, para a obtenção dos parâmetros geotécnicos para o projeto de fundações de postes, que fossem disponíveis ensaios de campo, simples, econômicos e com boa repetibilidade. O ensaio de dilatômetro, concebido originalmente para o projeto de estacas carregadas transversalmente, preenche tais requisitos. A verificação se as proposições para uso desse ensaio são, de alguma forma, aplicáveis a solos tropicais, não saturados, ou se novas propostas necessitariam ser desenvolvidas, constituiu a principal motivação da pesquisa aqui apresentada.

Como parte da pesquisa, foi realizada, em uma parceria do GT B2.07 com o laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, uma prova de carga horizontal em estacas metálicas, simulando fundações de postes de transmissão de energia. O local escolhido para a realização da prova de carga foi a unidade Adrianópolis do CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, em região de solo coluvial silto-argiloso, com nível d'água em profundidade abaixo da cota de assentamento das estacas.

O presente Informe Técnico descreve os ensaios realizados e analisa o comportamento das estacas em condições de trabalho.

2.0 - A PESQUISA DE CAMPO

2.1 Generalidades

A escolha do local foi condicionada por diversos fatores, dentre os quais pode-se destacar a necessidade de uma área com nível do lençol freático profundo, assim como uma camada de solo homogênea e com a superfície do terreno horizontal. Por outro lado seria interessante que existisse uma estrutura de apoio logístico para facilitar a realização dos ensaios, bem como segurança para a equipe e equipamentos.

O local mais adequado encontrado situou-se na unidade Adrianópolis do CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

A pesquisa de campo consistiu primeiramente em ensaios a trado e retiradas de amostras deformadas, com as quais foram realizados ensaios de caracterização, sendo também executadas sondagens à percussão (com SPT a cada 50 cm nos dois primeiros metros). A Figura 1 - (a) ilustra os resultados de ensaios de granulometria efetuados com e sem defloculante, podendo-se observar que se trata de um latossolo (solo laterítico, ver ainda Rodriguez 2000 e Garcia 2005), e a sondagem mais próxima ao local escolhido para a prova de carga está apresentada na Figura 1 - (b).

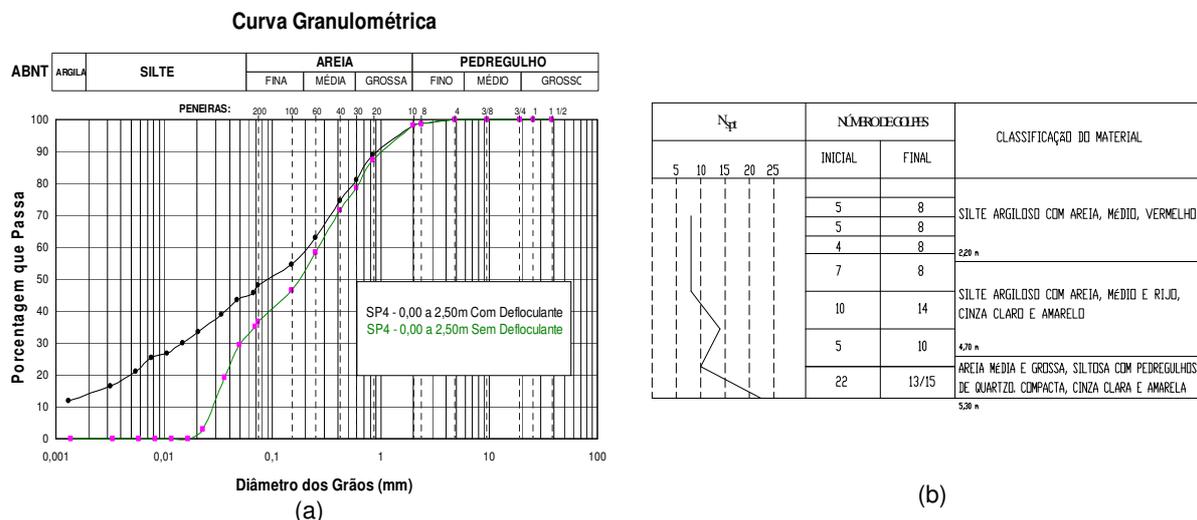


FIGURA 1 - (a) Ensaios de caracterização com defloculante e sem defloculante de amostras do solo; (b) Sondagem SP4, realizada na área escolhida (adaptado de Guimarães 2007).

2.2 A Prova De Carga

Uma das premissas para a realização da prova de carga é de que a estaca ensaiada respondesse com um comportamento aproximadamente de corpo rígido ao ser solicitada pela carga horizontal, o que seria representativo do comportamento de um poste.

A escolha da seção do elemento estrutural foi influenciada pela utilização de células de tensão total na instrumentação ao longo da profundidade. Optou-se por uma seção quadrada. Este tipo de seção permitiu que as células, ao serem instaladas, ficassem faceando a parede do elemento estrutural. Desta forma as perturbações associadas à introdução das células de tensão total na estaca puderam ser minimizadas.

Para a realização da prova de carga utilizou-se, então, um tubo estrutural vazado, de seção quadrada com lado de 20 cm, parede de 6,4 mm de espessura e um total de 3 m de comprimento. Estas características do tubo possibilitariam que a estaca teste funcionasse como estaca curta, segundo o critério de Broms (1964a, 1964b, 1965), ou seja, não haveria a formação de uma rótula plástica. A previsão de carga de ruptura e de momentos máximos atuantes foi efetuada com base nos dados das sondagens à percussão efetuadas.

Para a estaca de reação foi utilizado o mesmo tubo estrutural mencionado acima, com um comprimento de 3,7 m.

A prova de carga consistiu em aplicar a carga horizontal através de um macaco hidráulico, fazendo com que uma estaca reagisse contra a outra.

A estaca teste foi instalada com 2 m enterrados e 1 m aflorado, enquanto a estaca de reação foi enterrada 2,7 m e teve 1 m aflorado. O esforço foi aplicado a 50 cm do nível do terreno. A Figura 2 ilustra o esquema da prova de carga.

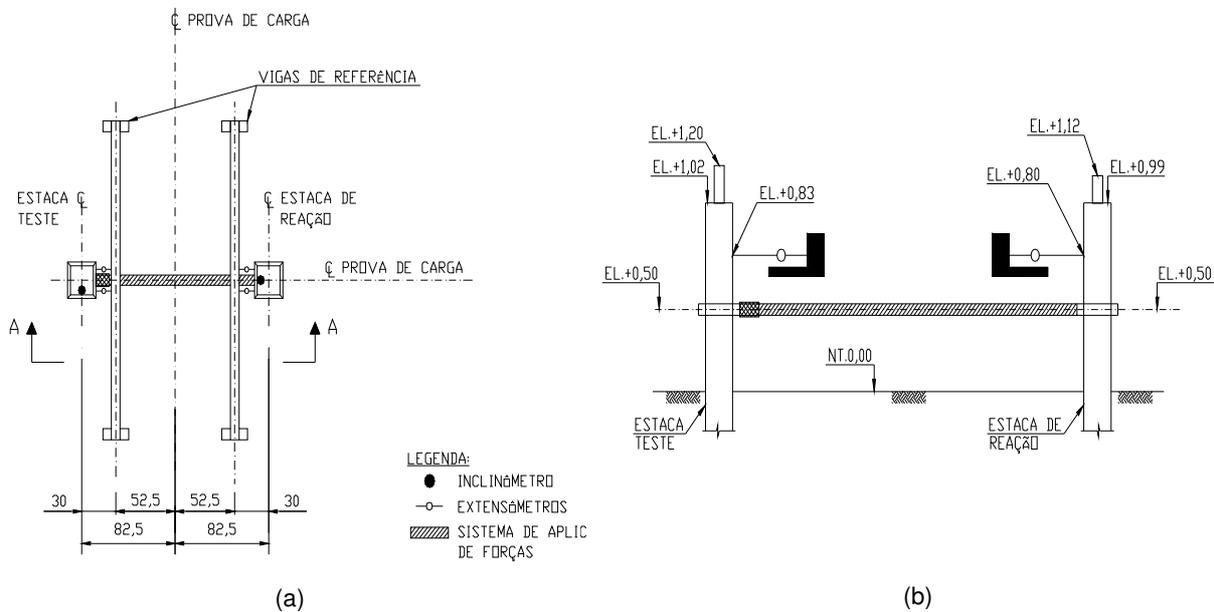


FIGURA 2 - (a) Planta da prova de carga (dimensões em cm); (b) corte A-A (elevações em m).

A instrumentação da estaca teste foi composta de células de tensão total distribuídas ao longo da profundidade, assim como de um tubo de inclinômetro instalado em seu interior. Já a estaca de reação foi instrumentada apenas com inclinômetro.

Seis células de tensão total ao longo da parte enterrada do elemento estrutural foram empregadas, e sua distribuição, bem como detalhes das mesmas, pode ser visto na Figura 3. Salienta-se que esta distribuição considerou o diagrama esperado de tensões totais ao longo da profundidade da estaca.

As células de tensão total foram do tipo fluido confinado, tendo sido projetadas na COPPE/UFRJ e executadas por uma empresa fabricante de dispositivos mecânicos, possuindo 50 mm de diâmetro, aproximadamente 10 mm de espessura e altura total variando entre 15 e 20 cm. Foram projetadas para uma tensão máxima de 500 kPa, tendo sido este valor estimado a partir do emprego do método de Broms (1964b).

A execução das escavações foi cuidadosamente realizada com um trado mecânico de seção circular e sua forma foi modificada posteriormente para uma seção quadrada com uma ferramenta especial (ver Figura 4 - (a)).

A instalação das estacas foi realizada evitando-se perturbações no perfil do solo que circundava as estacas (Figura 4 - (b)). Os espaços vazios existentes entre a estaca e o solo natural (aproximadamente 5 mm para cada lado) foram preenchidos com areia bem graduada.

Foi utilizado um macaco hidráulico para aplicação das cargas horizontais. As vigas de referência eram em madeira para minimizar o efeito de variação de temperatura. Extensômetros foram instalados para a medida dos deslocamentos horizontais e verticais das estacas. Uma visão geral da montagem da prova de carga pode ser observada na Figura 4 - (c).

A realização da prova de carga contou com dois ciclos de carga em condições de trabalho, que apresentaram repetibilidade muito boa. A carga máxima dos ciclos foi de 18,7 kN (ver Figura 5 - (a)).

Após o segundo ciclo, o objetivo era carregar a estaca até níveis que pudessem caracterizar uma situação de ruptura. Quando a carga era da ordem de 50 kN foram observadas as primeiras trincas no terreno.

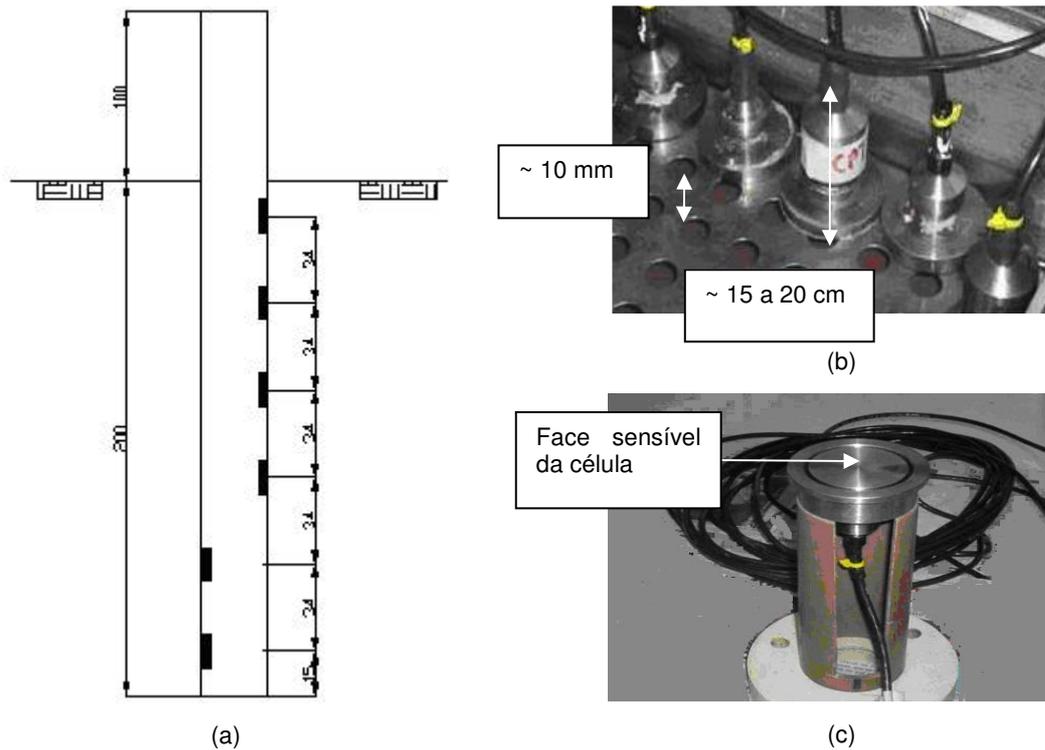


FIGURA 3 - (a) Posicionamento das células de tensão total na estaca teste (dimensões em cm); (b) Detalhes das células de tensão total utilizadas; (c) Face sensível de uma das células.



FIGURA 4 - (a) Escavação realizada com a ferramenta auxiliar para corte; (b) Instalação da estaca teste na escavação; (c) Montagem final da prova de carga.

A carga final do ensaio foi de 74,7 kN, com um deslocamento médio nos extensômetros de aproximadamente 80 mm (ver Figura 5 - (a)).

Os valores de deslocamentos apresentados na Figura 5 - (a) foram transferidos para o nível do terreno e o valor do deslocamento máximo foi de aproximadamente 45 mm (ver Figura 5 - (b)).

Mesmo com este valor de deslocamento, equivalente a aproximadamente 23% do lado da estaca, a curva carga versus deslocamento não apresentou uma ruptura definida. Vários critérios de ruptura foram analisados (ver Guimarães 2007), tendo sido estabelecido o valor de 52 kN como a carga de ruptura.

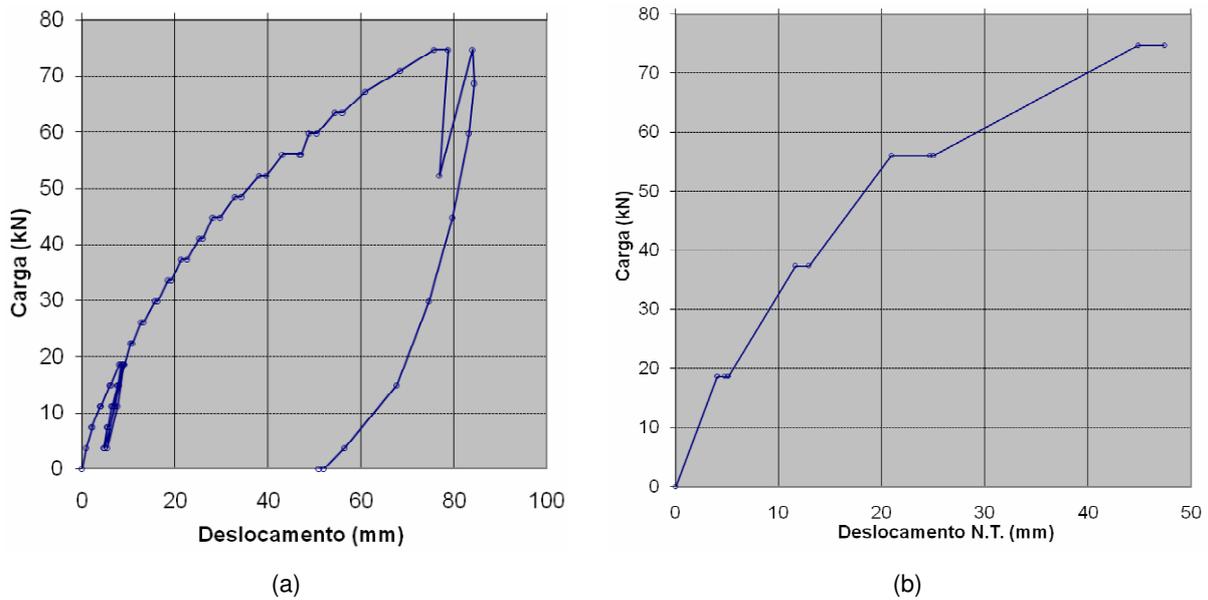


FIGURA 5 - (a) Carga versus deslocamento (medido no nível de aplicação da carga);
(b) Carga versus deslocamento (no nível do terreno) da estaca instrumentada.

2.3 Os Ensaio De Dilatômetro

Foram realizados dois ensaios de dilatômetro junto à prova de carga. Os valores de pressão p_0 e p_1 , medidos nos ensaios, estão apresentados nas Figuras 6 - (a) e 6 - (b) respectivamente.

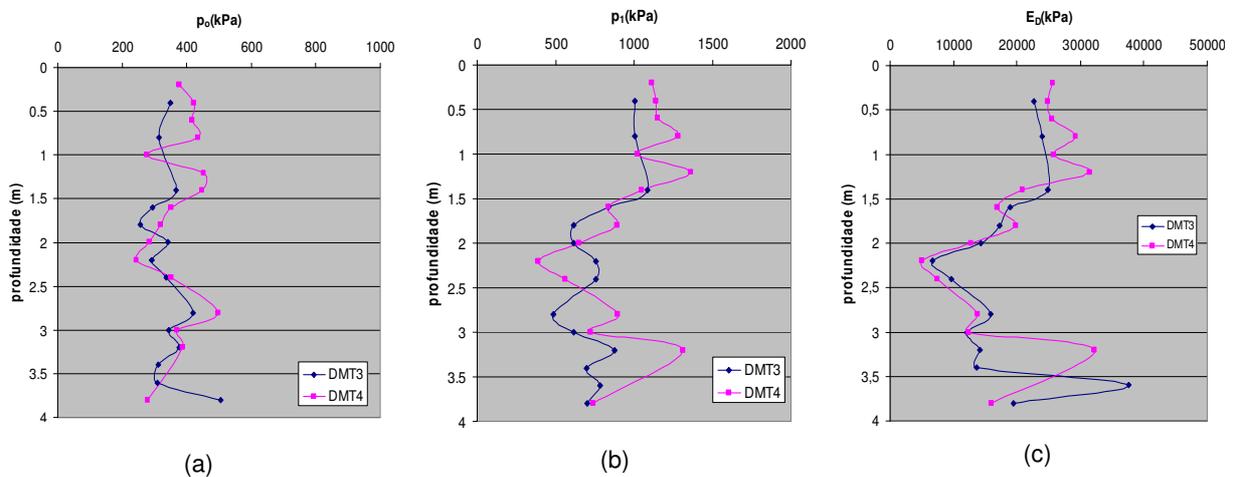


FIGURA 6 - (a) Valores de p_0 ; (b) Valores de p_1 ; (c) Valores de E_D nos dois ensaios de dilatômetro.

A partir de p_0 e p_1 obtém-se o módulo dilatométrico E_D pela equação:

$$E_D = 34,7 (p_1 - p_0) \quad (1)$$

Para mais detalhes sobre o ensaio de dilatômetro ver Marchetti (1980) e Marchetti e Crapps (1981).

O módulo dilatométrico E_D , obtido a partir de (1), está apresentado na Figura 6 - (c). Os valores de E_D mostram uma boa concordância. Nota-se que E_D é aproximadamente constante, em torno de 24 MPa, até a profundidade de 1,5 m. A partir daí decresce até valores em torno de 6 MPa para uma profundidade de 2,2 m. A partir desta profundidade torna-se crescente até valores próximos a 15 MPa para uma profundidade de aproximadamente 3 m. Abaixo de 3 m ocorre uma maior diferença entre os resultados dos dois ensaios.

3.0 - PREVISÃO DE DESLOCAMENTOS EM CONDIÇÃO DE TRABALHO

3.1 Generalidades

Duas análises foram realizadas em condição de trabalho para a estaca teste: a primeira para os ciclos de carga e a segunda a 50% da carga de ruptura. O módulo dilatométrico foi admitido constante com a profundidade para uma carga equivalente à condição de trabalho.

3.2 Deslocamentos – Previsão

Para uma estaca rígida e coeficiente de reação horizontal (k_h) constante com a profundidade, os valores dos deslocamentos (ρ) ao nível do terreno podem ser obtidos no regime elástico através da expressão (2) (Poulos e Davis 1980).

$$\rho = \frac{4H(1 + 1,5e/L)}{k_h d L} \quad (2)$$

onde:

H = força horizontal aplicada;

e = altura de aplicação da força H em relação ao nível do terreno;

L = comprimento enterrado da estaca;

d = lado da estaca;

k_h = coeficiente de reação horizontal do solo.

Para estimativa dos deslocamentos ao nível do terreno considerou-se, em primeira aproximação, que o produto do coeficiente de reação horizontal do solo pelo lado da estaca fosse igual ao módulo dilatométrico. Tem-se, portanto:

$$E_D = k_h d \quad (3)$$

3.2.1 Nos Ciclos de Carga

As cargas correspondentes aos ciclos de carga realizados na prova de carga variaram entre 3,7 e 18,7 kN. Substituindo-se (3) em (2) e aplicando-se os valores na fórmula tem-se:

$$\rho_{(\text{ciclo})} = 1,72 \text{ mm}$$

3.2.2 Módulo secante a 50% da carga de ruptura

Para a carga de 26 kN tem-se:

$$\rho_{(50\% \text{ ruptura})} = 2,98 \text{ mm}$$

4.0 - ANÁLISES DOS DESLOCAMENTOS OBTIDOS COM A INSTRUMENTAÇÃO DA PROVA DE CARGA

4.1 Generalidades

Para fins de comparação com os valores dos deslocamentos previstos anteriormente para a estaca teste também foram obtidos os deslocamentos para os ciclos de carga e para 50% da carga de ruptura. A mesma consideração para o módulo dilatométrico foi adotada.

Também foram comparados os deslocamentos obtidos, para a carga de ruptura (52 kN), na estaca teste e na estaca de reação, que tinham comprimentos distintos, 3,0 m e 3,7 m respectivamente.

4.2 Deslocamentos Obtidos na Prova de Carga

Como a estaca teste foi instrumentada com dois extensômetros (no plano horizontal, ver Figura 2) uma média entre os deslocamentos obtidos nos mesmos foi realizada para fins de comparação.

4.2.1 Nos Ciclos de Carga

O deslocamento médio, no nível do terreno, da estaca teste, referente aos deslocamentos horizontais, durante os ciclos de carregamento foi de 2,25 mm.

4.2.2 Módulo Secante a 50% da Carga de Ruptura

O deslocamento médio, no nível do terreno, da estaca teste, referente aos deslocamentos horizontais, utilizando o módulo secante a 50% da carga de ruptura foi de 7,44 mm.

4.3 Comparação Entre Previsão e Desempenho

4.3.1 Nos Ciclos de Carga

Comparando-se o valor obtido pela instrumentação e o previsto (com $E_D = k_h d$), observa-se a seguinte relação:

$$\frac{\text{deslocamento medido}}{\text{deslocamento previsto}} = \frac{2,25}{1,72} \cong 1,3$$

Assim, para que haja igualdade entre o deslocamento medido e o previsto propõe-se que o valor do módulo dilatométrico seja dividido por 1,3 para utilização na previsão dos deslocamentos horizontais de estacas curtas e rígidas em condições elásticas (de ciclos de carregamento) para solos com características semelhantes ao ensaiado.

4.3.2 Módulo secante a 50% da carga de ruptura

Comparando-se o valor medido e o previsto (com $E_D = k_h d$), observa-se a seguinte relação:

$$\frac{\text{deslocamento medido}}{\text{deslocamento previsto}} = \frac{7,44}{2,98} \cong 2,5$$

Para que haja igualdade entre o deslocamento medido e o previsto propõe-se que o valor do módulo dilatométrico seja dividido por 2,5 para utilização na previsão dos deslocamentos horizontais de estacas curtas e rígidas em condições de trabalho, no primeiro carregamento, a 50% da carga de ruptura e para solos com características semelhantes ao ensaiado.

4.4 Comparação Entre os Deslocamentos da Estaca Teste e de Reação

A Figura 7 ilustra as estacas teste e de reação após o término da prova de carga. Além das trincas observadas, também ficou visível o intumescimento do solo na parte frontal das estacas, bem como o recalque na parte posterior. Foi constatado que os deslocamentos sofridos pela estaca teste foram maiores que os da estaca de reação.



FIGURA 7 - (a) Detalhe das trincas e intumescimento do solo na parte frontal da estaca teste; (b) Detalhe das trincas e intumescimento do solo na parte frontal da estaca de reação.

Estes deslocamentos (entre a estaca teste e a estaca de reação) foram comparados no nível em que foram instalados os extensômetros (ver Figura 2). Foi considerada a carga de ruptura estabelecida no item 2.2 (52 kN) para valor de referência dos deslocamentos. As comparações mostraram que a redução de 70 cm no comprimento enterrado das estacas (a estaca teste com 200 cm e a estaca de reação com 270 cm) fez com que os deslocamentos aumentassem 36% na estaca teste.

5.0 - CONCLUSÕES

A prova de carga permitiu observar que as células de tensão total foram capazes de medir, de modo adequado, as variações das tensões horizontais de reação com o crescimento das solicitações. As medidas de inclinômetro desempenharam de modo satisfatório o papel de verificação da hipótese de corpo rígido das estacas sob carregamento. Os dois ciclos de carga realizados mostraram excelente repetibilidade no que concerne tanto ao comportamento carga versus deslocamento como das medidas de tensão das células. As curvas carga versus deslocamento das estacas ensaiadas não mostraram ruptura bem caracterizada, mesmo a prova de carga tendo sido levada até deslocamentos da ordem de 45 mm no nível do terreno para a estaca teste (correspondendo a uma carga de 74,7 kN), ou seja, 23% da largura da estaca. Trincas no nível do terreno foram observadas quando o carregamento era da ordem de 50 kN. O material à frente da estaca sofreu forte intumescimento, enquanto o da parte oposta apresentou recalque, tendo havido separação significativa entre a estaca teste e o solo.

Os ensaios de dilatômetro realizados mostraram boa repetibilidade e associados aos resultados obtidos na prova de carga fornecem subsídios para o desenvolvimento de um método de dimensionamento de fundações de postes com bases mais realistas, e de grande interesse para todas as empresas do setor.

No que diz respeito a uma proposta de emprego do módulo dilatométrico (E_D) para obtenção dos deslocamentos horizontais de postes ou estacas no nível do terreno, considerando-se o conceito de coeficiente de reação horizontal constante com a profundidade, sugere-se, para solos semelhantes ao ensaiado, que:

- i) No caso de comportamento elástico (ciclos de carregamento), considerar o produto do coeficiente de reação horizontal pela largura do poste ou da estaca igual ao módulo dilatométrico (E_D) dividido por um fator de 1,3;
- ii) No caso de comportamento a 50% da carga de ruptura (módulo secante), considerar o produto do coeficiente de reação horizontal pela largura do poste ou da estaca igual ao módulo dilatométrico (E_D) dividido por um fator de 2,5.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Broms, B.B. (1964a) Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils; Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90(2), pp. 21-63.
- (2) Broms, B.B. (1964b) Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils; Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90(3), pp. 123-156.
- (3) Broms, B.B. (1965) Design of Laterally Loaded Piles; Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 91(3), pp. 79-99.
- (4) Garcia, O.C. (2005) Influência da Qualidade da Compactação dos Reaterros na Capacidade de Carga de Fundações Submetidas a Esforços de Tração; Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 113 p.
- (5) Guimarães, G.V.M. (2007) A Utilização do Ensaio de Dilatômetro para o Dimensionamento de Estacas Rígidas Carregadas Transversalmente; Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 243 p.
- (6) Marchetti, S. (1980) In Situ Tests by Flat Dilatometer; Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. GT3, pp. 299-321.
- (7) Marchetti, S. e Crapps, D.K. (1981) Flat Dilatometer Manual; International Report of GPE inc.
- (8) Poulos, H.G. e Davis, E.H. (1980) Pile Foundation Analysis and Design; Wiley, New York, 397 p.
- (9) Rodriguez, T.M.S. (2000) Caracterização e Erodibilidade dos Solos de uma Voçoroca da Região de Ouro Preto, MG; Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 106 p.