Propriedades de Solos Residuais de Gnaisse e Migmatito Determinadas por Pressiômetro de Auto-Furação de Cambridge - Camkometer

Mauricio Abramento
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Carlos de Sousa Pinto
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO: Este trabalho apresenta resultados de ensaios pressiométricos executados sobre solos residuais de gnaisse e migmatito em três locais situados no Estado de São Paulo. Em um dos locais são apresentados também resultados de ensaios sísmicos "cross-hole". Apresentam-se valores de coeficiente de empuxo em repouso K_0, módulo de cisalhamento G e resistência, bem como correlações entre os parâmetros obtidos e a resistência à penetração N_{SPT}.

PALAVRAS-CHAVE: Pressiômetro, Solos Residuais, Módulo, Coeficiente de Empuxo em Repouso

1 INTRODUÇÃO

Diversas estruturas subterrâneas (túneis rodoviários e metroviários, adutoras, reservatórios) encontram-se em construção no estado de São Paulo. Em geral , os parâmetros de resistência para o projeto de tais estruturas são determinados através de ensaios laboratoriais. Entretanto, tais ensaios apresentam diversas desvantagens: a) não fornecem resultados confiáveis sobre tensões horizontais "in situ"; b) a perturbação durante a amostragem pode levar a resultados não confiáveis; e c) ensaios laboratoriais podem resultar em custos elevados, decorrentes de amostragem representativa, em particular para depósitos muito heterogêneos.

Este trabalho apresenta resultados obtidos a partir de ensaios pioneiros empregando-se o pressiômetro de auto-furação de Cambridge - Camkometer - em solos residuais de gnaisse e migmatito em três locais situados na cidade de São Paulo e vizinhanças. O equipamento empregado foi o pressiômetro Mark VIII-d. Ensaios adicionais de simples reconhecimento SPT foram executados nos três locais, sendo que em um deles foram também executados ensaios sísmicos "cross-hole" para a determinação de parâmetros de cisalhamento para pequenas deformações. Um total de 38 ensaios foi realizado nos três locais. Ciclos de descarregamento e recarregamento foram realizados em todos os ensaios para determinar características de deformabilidade dos materiais. Os resultados dos ensaios foram analisados empregando-se o "software" fornecido com o pressiômetro. Este trabalho enfoca a análise do coeficiente de empuxo em repouso K_0, módulo de cisalhamento G e resistência S_u. São também apresentadas correlações de alguns parâmetros com o N_{SPT}.

Apresenta-se, a seguir, uma descrição suscinta dos locais onde foram executados os ensaios, resultados obtidos e correlações para os diversos parâmetros determinados através dos ensaios pressiométricos.

2 LOCAL 1: AV. FRANCISCO MORATO - BUTANTÃ

2.1 Descrição do Local e Ensaios Realizados

A Figura 1a apresenta um perfil esquemático do Local 1, situado à Av. Francico Morato, no bairro do Butantã, cidade de São Paulo. Próximo a este local deverão ser construídas as estações Caxinguí e Três Poderes da Linha 4 do Metro de São Paulo.

Ensaios de simples reconhecimento executados no local mostram que o depósito consiste em um solo residual, caracterizado como silte arenoso micáceo com veios de quartzo, medianamente compacto a compacto, cinza e roxo. O nível d'água encontra-se a 2,7m abaixo do nível do terreno. Podem ser identificadas duas camadas distintas, a superior consistindo em solo residual maduro com cerca de 12m de espessura, sobre camada de solo residual jovem ou saprolito com cerca de 10m de espessura. Abaixo deste solo encontra-se o gnaisse alterado. O número de golpes N_{SPT} varia entre 8 e 13 para o solo residual maduro e entre 20 a 100 para o solo saprolítico. Note-se que para profundidades superiores a 20m o número de golpes excedeu o valor de 50 para a inserção dos últimos 30cm do amostrador SPT. Por este motivo, o número de golpes foi extrapolado, nestes casos, para fins

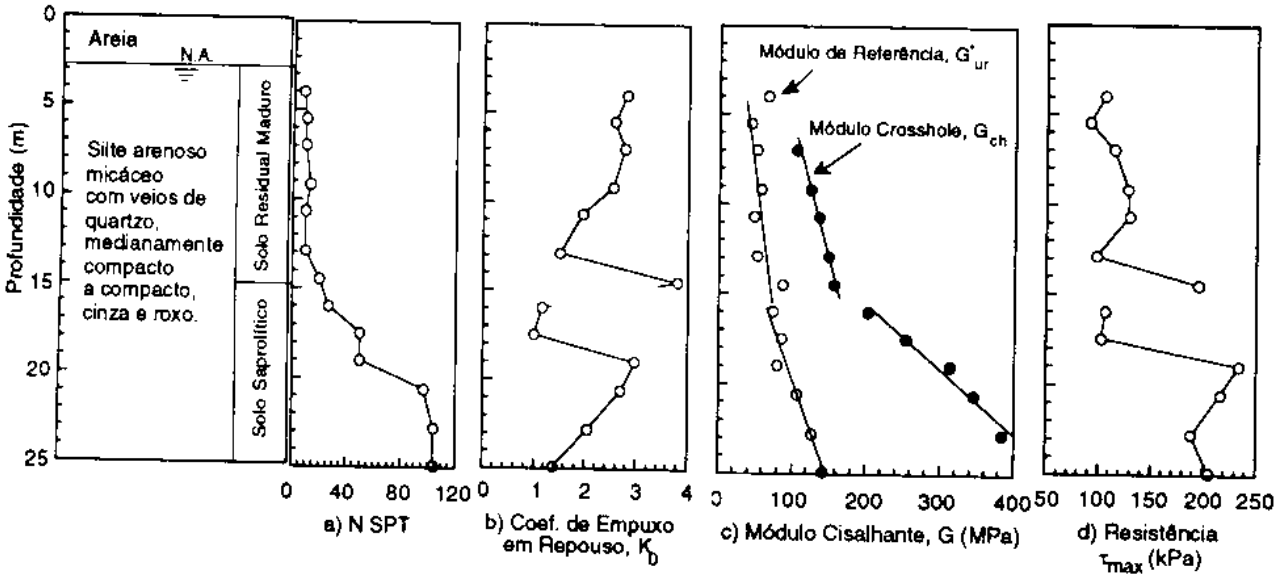

Figura 1. Local 1 - Av. Francisco Morato, São Paulo - Perfil de sondagem e principais resultados dos ensaios pressiométricos.

de correlações empíricas. O depósito pode ser bastante heterogêneo, apresentando veios de quartzo ou pedregulhos distribuídos de forma aleatória.

Foram também realizados no local ensaios dinâmicos "cross-hole" para a determinação do módulo cisalhante dos materiais para pequenas deformações, G_0. Os resultados destes ensaios são apresentados na Figura 1c.

2.2 Tensão horizontal "in situ" e K_0

A tensão horizontal foi determinada empregando-se o método desenvolvido por Marsland e Randolph (1977). Em geral, este método fornece valores maiores de tensão horizontal quando comparados com aqueles obtidos a partir do método denominado "lift off", o que pode ser atribuído a uma possível perturbação do solo nas vizinhanças da sonda.

A Figura 1b mostra a variação de K_0 com a profundidade. Para a determinação da tensão vertical efetiva, considerou-se o peso específico do solo como sendo 18kN/m^3. Os resultados mostram que K_0 tende a diminuir de 3,0 no topo do solo residual maduro até 1,0 na sua base. Um dos ensaios, na profundidade de 14,5m, resultou um valor alto de K_0=3,8, o que pode ser atribuído a uma heterogeneidade local como, por exemplo, veios de quartzo ou pedregulho.

Para o solo saprolítico, K_0 variou entre 1,0 e 3,0. Estes valores relativamente elevados de K_0 sugerem a existência de tensões tectônicas herdadas da rocha matriz nas camadas de solo residuais.

2.3 Módulo Cisalhante G

Em todos os ensaios pressiométricos realizados no local foram executados ciclos de descarregamento-recarregamento para a determinação dos módulos cisalhantes dos solos, G. Uma análise detalhada destes ciclos mostrou que G varia com a amplitude de deformação da cavidade em um dado ciclo, bem como com o nível de deformação da cavidade em ciclos sucessivos. Para contornar este problema e possibilitar comparações entre parâmetros de deformabilidade de diversos ciclos, uma análise estatística foi realizada de forma a corrigir e reduzir os módulos a um "módulo de referência", G^*_{ur}. Este módulo corresponde, de forma arbitrária, a uma amplitude de deformação de cavidade de 0,1% para uma nível de deformação do ciclo de 1,0%. Os resultados mostram que o módulo e, portanto, a rigidez do solo, aumenta com o nível de deformação do ciclo. Detalhes sobre a determinação de G^*_{ur} são apresentados por Pinto e Abramento (1998).

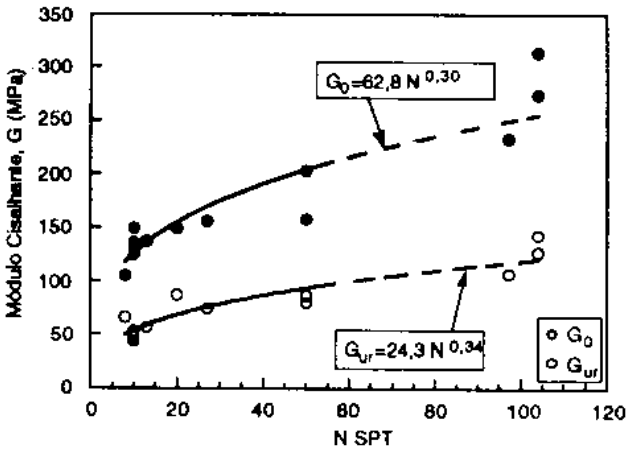

Figura 2. Correlações entre G e N_{SPT}.

A Figura 1c mostra que, para as camadas de solo residual maduro e saprolítico, o módulo de referência aumenta de forma aproximadamente linear com a profundidade. Entretanto, existe uma diferença no coeficiente angular das retas para os dois solos. A mesma tendência pode ser observada nos módulos que resultaram dos ensaios "cross-hole", G_0, em que esta tendência é ainda mais marcante.

A Figura 2 apresenta correlações entre módulos obtidos a partir dos ensaios pressiométricos, G^*_{ur}, e "cross-hole", G_0, com N_{SPT}. Os trechos finais das curvas são pontilhados pois correspondem à região em que os valores de N_{SPT} foram extrapolados. O módulo cisalhante apresenta um aumento relativamente pequeno com N_{SPT} quando comparado com expressões clássicas, o que é um comportamento peculiar de solos saprolíticos (Barros e Pinto, 1997).

Combinando-se resultados de ensaios "cross-hole" e ciclos de descarregamento-recarregamento nos ensaios pressiométricos, é possível determinar como o módulo cisalhante dos solos diminui com a amplitude de deformação da cavidade ε_c ou deformação cisalhante γ.

A Figura 3 mostra que existem duas curvas distintas para cada camada típica de solo residual ou saprolítico.

As curvas foram obtidas supondo que a variação de G com a deformação cisalhante pode ser representada por uma equação hiperbólica:

$$G/G_0=[1+\gamma(G_0/\tau_{max})]^{-1} \quad (1)$$

onde G_0 é o módulo obtido a partir de ensaios "cross-hole", γ é a deformação cisalhante e τ_{max} é a resistência drenada (Figura 1d).

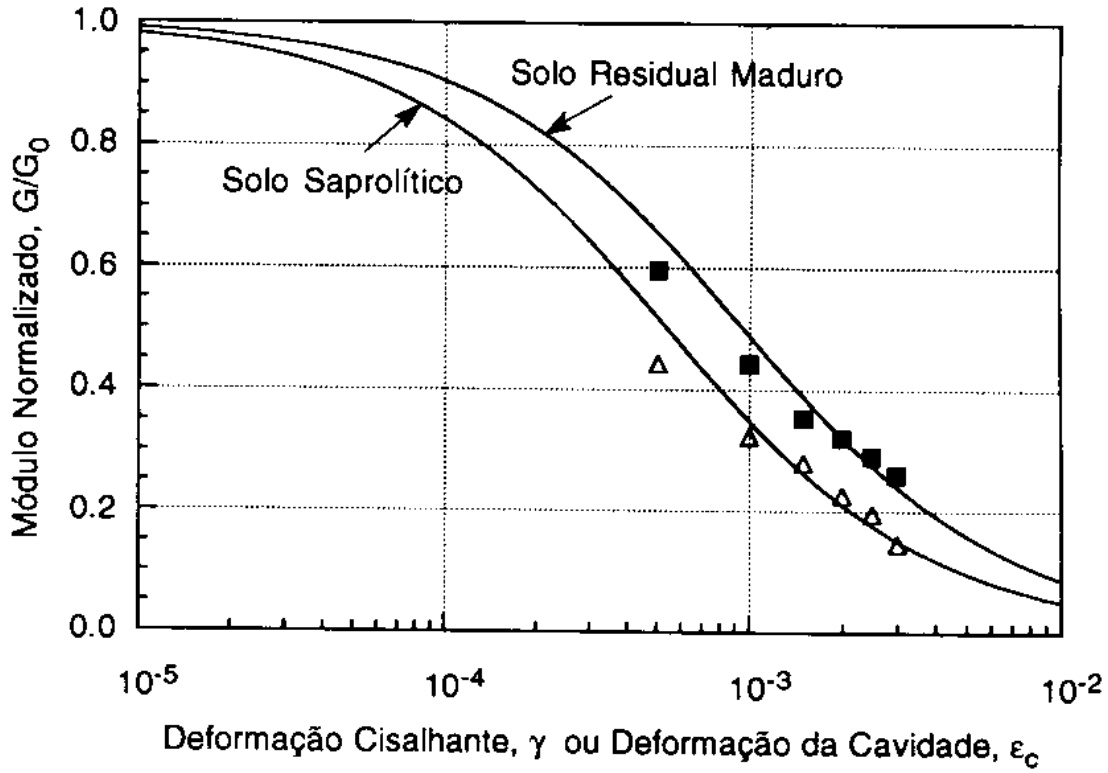

Figura 3. Decréscimo de G com γ ou ε_c.

A resistência drenada foi determinada através da seguinte expressão:

$$\tau_{max}=\sigma'_{h0}\sin\phi_p \qquad (2)$$

O ângulo de atrito de pico, ϕ_p, foi determinado segundo a formulação apresentada por Hughes et al. (1977).

As curvas foram ajustadas supondo um valor médio $G_0/\tau_{max}=1050$ e $G_0/\tau_{max}=1870$ para os solos residual maduro e saprolítico, respectivamente.

Existe muita discussão na literatura sobre a correlação entre a deformação da cavidade e a deformação cisalhante no solo que circunda a cavidade. Para o caso apresentado, os resultados mostram que a amplitude de deformação da cavidade, ε_c, pode ser considerada como sendo numericamente equivalente à deformação cisalhante média no solo, γ. Os resultados sugerem que, neste caso, a correção a ser aplicada de forma a obter a variação do módulo cisalhante com a deformação cisalhante, quando a deformação da cavidade é conhecida, é igual a 0,5. Não há conclusão, na literatura, sobre a correção a ser aplicada. Bellotti et al. (1989), por exemplo, sugerem um fator de correção de 0,25, enquanto que Howie (1991) sugere 0,15.

2.4 Deformação Lenta

Os ensaios realizados no solo residual de gnaisse apresentaram um acentuado efeito de deformação lenta, fenômeno que já havia sido constatado para estes solos em ensaios de laboratório. Quando se observa em detalhe o resultado de um ciclo de descarregamento-recarregamento, constata-se que quando se interrompe a injeção de gás no pressiômetro e a pressão começa a cair, o solo ainda está se deformando. Os ensaios mostram que o efeito da deformação lenta é muito mais pronunciado na fase do carregamento do que na de descarregamento. Para analisar este efeito, em um dos ensaios a pressão foi mantida constante por um período de cerca de 20 minutos imediatamente antes da realização do ciclo de descarregamento-recarregamento. O deslocamento dos sensores prosseguiu como se mostra na Figura 4.

O acréscimo máximo de pressão neutra decorrente de um carregamento pode ser calculado através da seguinte expressão (Clarke et al., 1979):

$$\Delta u=S_u \ln[(G/S_u)(\Delta V/V)] \qquad (3)$$

Para o ensaio em questão, S_u=200kPa (de acordo com o método de Gibson e Anderson), G^*_{ur}=48MPa e $\Delta V/V$=5,5% (imediatamente antes do processo de manutenção da pressão aplicada). Substituindo-se estes valores na expressão 3, obtém-se Δu_{max}=515kPa como valor teórico da sobrepressão neutra máxima que seria esperado no caso de uma solicitação não drenada.

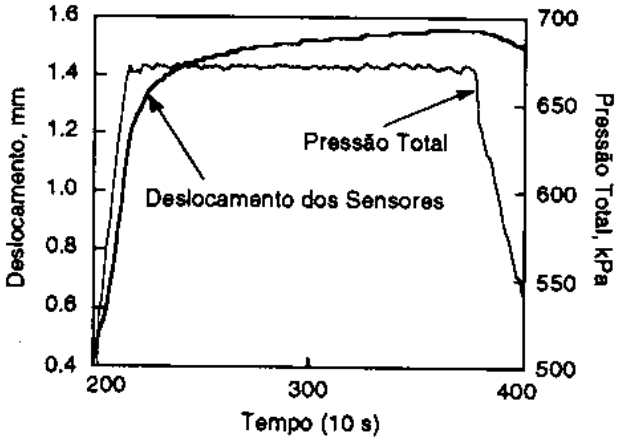

Figura 4. Variação do deslocamento e da pressão de cavidade com o tempo no estágio de pressão constante.

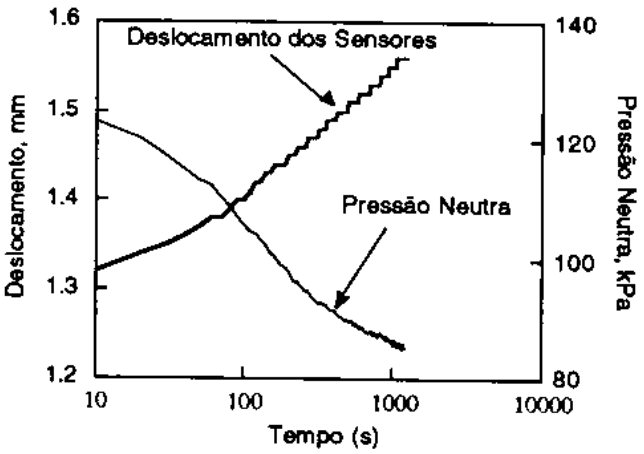

Figura 5. Variação do deslocamento e da pressão neutra com o logarítmo do tempo no estágio de pressão constante.

Os resultados de variação da pressão neutra e dos deslocamentos são apresentados em função do logarítmo do tempo na Figura 5. No início do processo de fluência (manutenção da

pressão), descontando-se a pressão neutra correspondente ao nível d'água no terreno, de cerca de 75kPa, a Figura 5 mostra que a sobrepressão neutra correspondia a 50kPa, indicando que aproximadamente 90% da sobrepressão neutra máxima teórica já havia se dissipado durante o processo de carregamento.

Neste caso, pode-se observar que, para o intervalo de tempo de 20 minutos em que a pressão da cavidade foi mantida constante, não existiu tendência de estabilização do deslocamento ou da dissipação da pressão neutra com o tempo. A Figura 5 mostra que a dissipação do excesso de pressão neutra ocorreu simultaneamente com o processo de deformação do solo. Os resultados aqui apresentados mostram a tendência de acentuada deformação lenta do material ensaiado, assunto que merece análise mais detalhada.

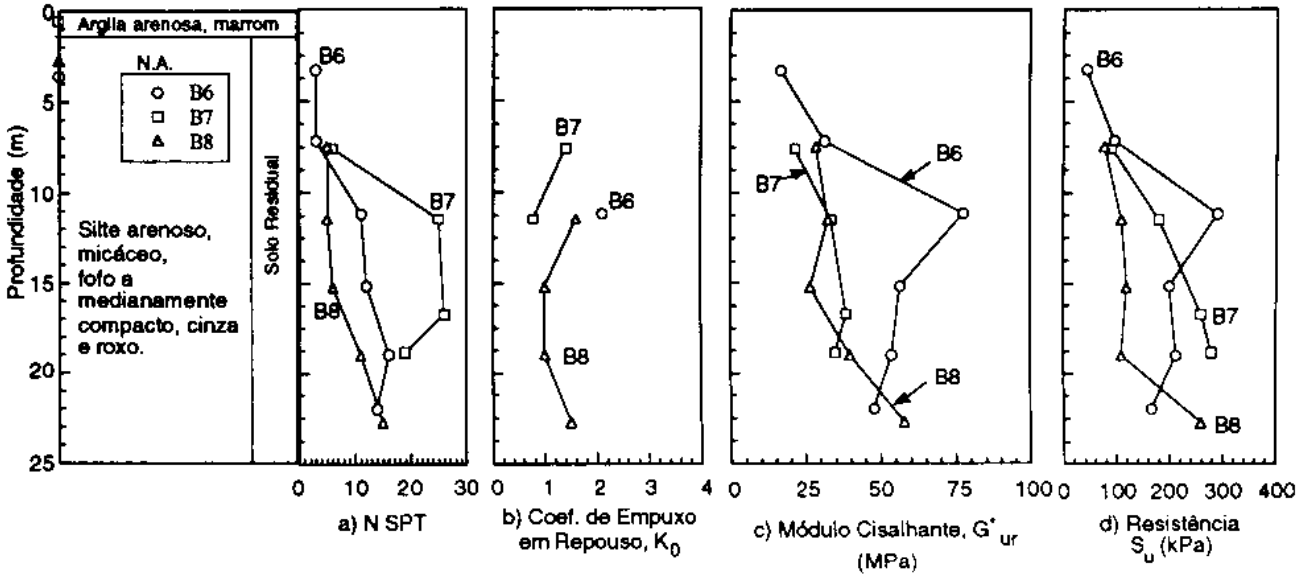

Figura 6. Local 2 - Interligação Tietê-Jundiaí - Perfil de sondagem e principais resultados dos ensaios pressiométricos.

3 LOCAL 2: INTERLIGAÇÃO TIETÊ-JUNDIAÍ

A Figura 6a apresenta um perfil esquemático do Local 2, situado próximo aos municípios de Biritiba e Mogi das Cruzes, estado de São Paulo. Neste local deverá ser construída uma adutora de água de grande diâmetro.

Foram executados três ensaios de simples reconhecimento e ensaios pressiométricos ao longo de três furos próximos àqueles dos ensaios SPT (ensaios B6, B7 e B8). Os resultados mostram que o depósito consiste em um solo residual, caracterizado como silte arenoso ou areno-argiloso, micáceo, fofo a medianamente compacto, cinza e roxo. O nível d'água encontra-se entre 0,5 e 3,5m abaixo do nível do terreno, dependendo da sondagem. O número de golpes N_{SPT} varia entre 5 e 28 para os horizontes onde foram executados os ensaios. O depósito pode ser bastante heterogêneo, apresentando veios de areia e fragmentos de rocha distribuídos de forma aleatória.

As Figuras 6b a 6d mostram os resultados obtidos para o coeficiente de empuxo em repouso K_0, o módulo de cisalhamento de referência G^*_{ur} e a resistência característica S_u. Com relação à determinação de K_0, constatou-se que a presença de pedregulhos e fragmentos de rocha podem ter provocado perturbação acentuada nas imediações da sonda pressiométrica. Desta forma, são apresentados somente alguns resultados de K_0, considerados como sendo aqueles menos influenciados devido a eventuais perturbações, o que foi constatado através da análise do trecho inicial da curva pressão-deformação da cavidade. Note-se que os valores de K_0 são relativamente elevados, oscilando tipicamente entre 1,0 e 2,2.

Em todos os ensaios pressiométricos realizados observou-se muito pequena variação da pressão neutra durante o aumento da pressão de carregamento e o consequente deslocamento do

solo. Este comportamento indicou que o solo é bastante permeável e, portanto, o carregamento pode ser considerado como sendo drenado. A resistência do solo, neste caso, foi determinada pelo método de Gibson e Anderson, o qual foi desenvolvido para a hipótese de carregamento não drenado. Estes valores foram calculados, entretanto, por representarem um índice de resistência comparativo para correlações empíricas.

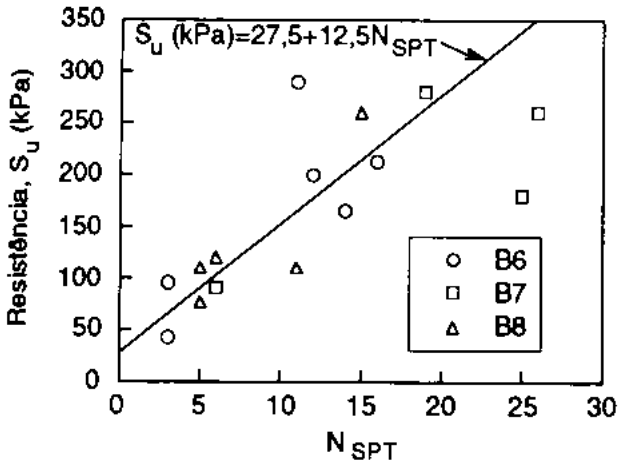

Figura 7. Correlação entre resistência S_u e N_{SPT} para o Local 2.

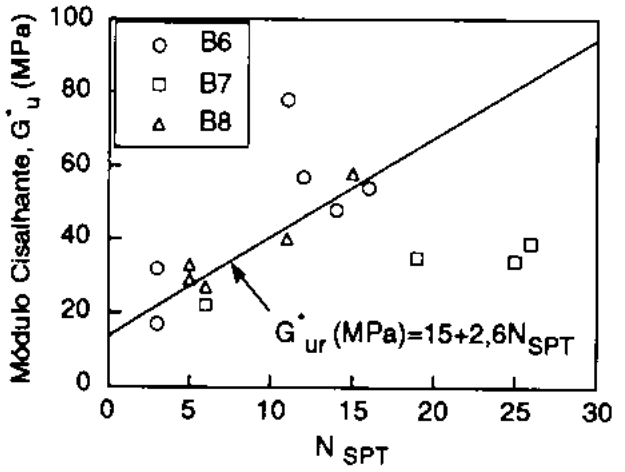

Figura 8. Correlação entre módulo cisalhante G^*_{ur} e N_{SPT} para o Local 2.

As Figuras 7 e 8 mostram algumas correlações entre os resultados obtidos com o N_{SPT}. Adotou-se como N_{SPT} representativo, neste caso, uma média ponderada dos valores de NSPT, atribuindo-se peso 2 ao valor correspondente à cota de ensaio e peso 1 para os valores 1,0m acima e abaixo da cota de ensaio. Este procedimento foi realizado com o objetivo de minimizar o efeito de alguma heterogeneidade localizada, que pode não corresponder à massa de solo solicitada pelo ensaio. Uma correlação entre S_u e N_{SPT} é apresentada na Figura 7, em que se nota uma certa dispersão nos resultados em função da heterogeneidade do material ou de perturbações associadas com a cravação do pressiômetro. Uma correlação entre o módulo de cisalhamento e o N_{SPT} é apresentada na Figura 8, em que a dispersão observada também pode ser considerada acentuada. As correlações apresentadas nas Figuras 7 e 8 não incluem alguns pontos que se afastam consideravelmente da média dos ensaios (dois pontos B7 abaixo da curva e um ponto B6 acima da curva, na Figura 7, e três pontos B7 abaixo da curva e um ponto B6 acima da curva, na Figura 8).

4 LOCAL 3: FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE PARAITINGA

A Figura 9a apresenta um perfil esquemático do Local 3, referente à fundação da Barragem de Paraitinga, na Bacia do Alto Tietê, estado de São Paulo.

Foram executados ensaios de simples reconhecimento em dois locais. No primeiro local, próximo ao furo do ensaio pressiométrico B9, a área havia sofrido um corte de cerca de 3,0 a 4,0m de espessura, e o nível d'água encontra-se a cerca de 1,0m abaixo do nível atual do terreno. Neste local, foram realizados três ensaios pressiométricos entre as profundidades de 1,5m e 4,5m. No segundo local, próximo ao furo B10, os sete ensaios pressiométricos foram realizados entre as profundidades de 6,4m e 14,2m. Por este motivo, optou-se por representar os perfis e os resultados superpondo-os, conforme apresentado na Figura 9. O nível d'água, no local B10, encontra-se a cerva de 1,5m de profundidade. Adotou-se o peso específico do solo residual como 19kN/m^3, para fins de cálculo de K_0.

As sondagens mostram que o depósito em que foram realizados os ensaios pressiométricos consiste em um solo residual, caracterizado como silte areno-argiloso, micáceo, medianamente compacto a muito compacto, amarelo, cinza e roxo. O número de golpes N_{SPT} varia tipicamente entre 8 e 30 para o horizonte de solo residual onde foram executados os ensaios, chegando a 50 na base do horizonte. O depósito é bastante heterogêneo, verificando-se a existência de considerável quantidade de grãos de pedregulho e de areia em quase todos os ensaios, o que dificultou a cravação do

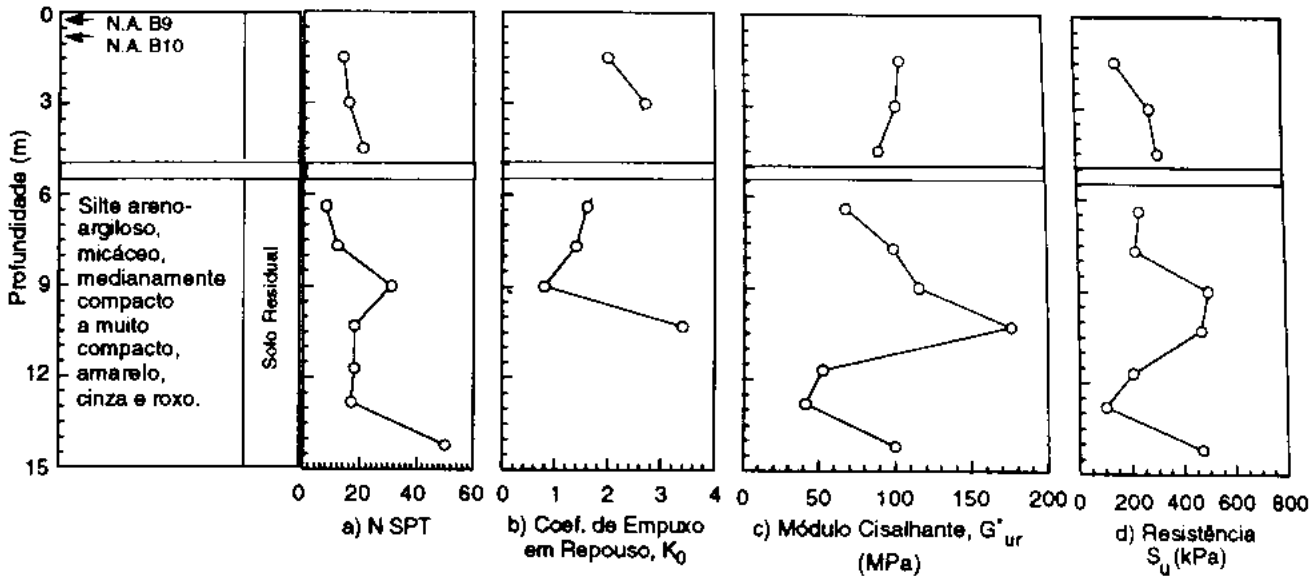

Figura 9. Local 3 - Fundação da Barragem de Paraitinga - Perfil de sondagem e principais resultados dos ensaios pressiométricos.

pressiômetro de maneira a não provocar perturbação das paredes do furo. Tal fato interferiu, principalmente, na determinação do estado de tensões in situ, tendo pequena influência na determinação dos parâmetros de resistência e de deformabilidade.

A Figura 9b apresenta os valores de K_0 obtidos a partir dos ensaios. São apresentados somente aqueles considerados como sendo menos influenciados devido a eventuais perturbações, através da análise do trecho inicial da curva pressão-deformação da cavidade. Observa-se que os valores tendem a ser elevados, oscilando entre 1,0 e 2,5 e chegando a 3,5 em um dos ensaios, a cerca de 10,5m de profundidade.

A resistência do solo foi estimada pelos métodos de Gibson e Anderson e de Palmer, os quais supõem que não ocorra drenagem do solo durante o carregamento. Como o material é bastante permeável, provavelmente deve ter ocorrido drenagem do material durante a solicitação. Ainda assim, os valores de resistência foram calculados para fins de correlações empíricas. Constatou-se, neste local, uma grande heterogeneidade do material ensaiado, com grande variação de propriedades para pequenas distâncias. Como resultado, um ensaio de penetração SPT realizado em um determinado local não necessariamente corresponde ao perfil de subsolo onde o ensaio pressiométrico foi executado, mesmo que as distâncias entre os furos sejam pequenas. Como consequência, constatou-se uma grande dispersão de resultados quando se procurou correlacionar os parâmetros de deformabilidade e resistência com o N_{SPT}. Por este motivo, somente está sendo apresentada, a título de ilustração, a relação entre o módulo cisalhante G^*_{ur} e a resistência S_u, conforme mostrado na Figura 10.

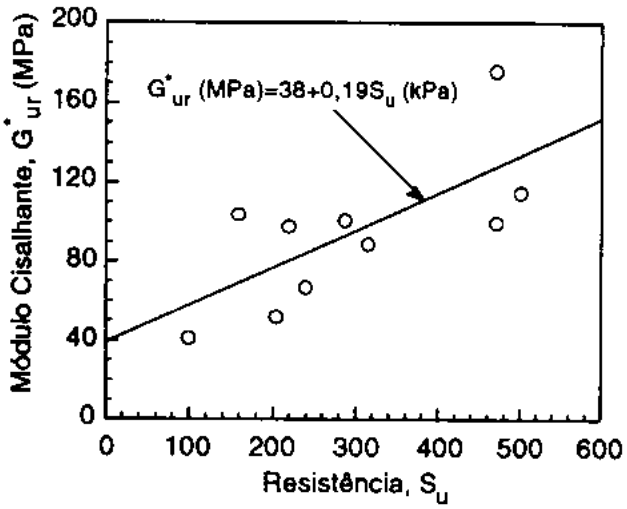

Figura 10. Correlação entre o módulo cisalhante G^*_{ur} e a resistência S_u para o Local 3.

5 CONCLUSÕES

Apresentaram-se, neste trabalho, resultados de ensaios pressiométricos empregando-se o pressiômetro de auto-furação de Cambridge - Camkometer, sobre 3 solos residuais de gnaisse/migmatito. São apresentadas também correlações empíricas entre os resultados e o N_{SPT}. Os resultados dos ensaios realizados sobre os solos mostraram que:

a) Em geral, os valores de K_0 obtidos foram relativamente elevados, variando tipicamente entre 1,0 até 3,8. Estes valores sugerem a existência de tensões residuais *in situ* que foram herdadas da rocha matriz.

b) O módulo de cisalhamento G varia com a amplitude de deformação em um dado ciclo de descarregamento-recarregamento e com o nível de deformação de ciclos sucessivos. Para evitar este problema e tornar possível comparações entre parâmetros de deformabilidade entre diversos ciclos, uma análise estatística foi realizada para reduzir os valores para um valor de referência G^*_{ur}, correspondendo arbitrariamente a uma amplitude de deformação de cavidade de 0,1% e a um nível de deformação de 1,0%. Os resultados mostram que o módulo G aumenta com o nível de deformação.

c) Para um dos locais, o decréscimo de G com a amplitude de deformação foi ajustado a uma curva hiperbólica simples. Um fator de correção de 0,5 foi adequado, para este local, na conversão do decréscimo de G para deformação cisalhante da cavidade.

d) Heterogeneidades intrínsecas ao solo residual podem dificultar a interpretação de alguns resultados e a obtenção de correlações empíricas.

AGRADECIMENTOS

O pressiômetro empregado neste trabalho foi adquirido com recursos do Projeto Temático da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Os ensaios foram realizados para a Companhia do Metro de São Paulo (Local 1), Construções e Comércio Camargo Corrêa (Local 2), e Bureau de Projetos e Consultoria (Local 3). As operações de cravação e instalação do pressiômetro foram executadas pela firma Engesolos - Engenharia de Solos e Fundações Ltda. Os autores agradecem.

REFERÊNCIAS

Barros, J.M.C. e Pinto, C.S. (1997) Estimation of maximum shear modulus of brazilian tropical soils from standard penetration tests. *XIV ICSMFE*, v. 1, Hamburg.

Belloti, R., Ghiona, V., Jamiolkowsky, M., Robertson, P.K. e Peterson, R.W. (1989) Interpretation of moduli from self-boring pressuremeter tests in sand. *Géotechnique*, v.39, n.2, p. 269-292.

Clarke, B.G., Carter, J.P. e Wroth, C.P. (1979) In situ determination of the consolidation characteristics of saturated clays. *7th ECSMFE*, Brighton, v.2, p. 207-211.

Howie, J.A. (1991) *Factors affecting the interpretation and analysis of full-displacement pressuremeter tests in sand.* PhD thesis, Dep. of Civil Eng., University of British Columbia.

Hughes,J.M.O., Wroth, C.P. e Windle, D. (1977) Pressuremeter tests in sands. *Géotechnique*, v. 27, n.2, p.455-477.

Marsland, A. e Randolph, M.F. (1977) Comparisons of the results from pressuremeter tests and large in situ plate tests in London clay. *Géotechnique*, v.27, n.2, p.217-243.

Pinto, C.S. e Abramento, M. (1998) Características das argilas rijas e duras, cinza-esverdeadas de São Paulo determinadas por pressiômetro de auto-furação Camkometer. XI COBRAMSEG, Brasília, no prelo.