

# INFLUÊNCIA DO ESTADO DE TENSÃO DE UM TÚNEL E DA SAZONALIDADE EM ENSAIOS DE CAMPO EM ARGILA COLAPSÍVEL DO BRASIL

Influence of the stress state induced by a tunnel and the seasonal variability on in situ tests in a collapsible clay of Brazil

Renato P. Cunha\*

André P. Assis\*\*

Fernando E. R. Marques\*\*\*

Charles R. B. Santos\*\*\*\*

**RESUMO** – Este trabalho apresenta a discussão do efeito isolado e simultâneo de variações no estado de tensão e umidade natural (ou sucção) do solo nos dados originais e parâmetros previsíveis de ensaios de campo tipo SPTT, DMT e CPT. Isto foi alcançado com resultados de uma área de testes localizada dentro da bacia de recalques de uma escavação (Local A) e de uma outra livre das interferências causadas por esta mesma escavação (Local B), relativa a um túnel existente na cidade de Brasília, Brasil. Os ensaios de campo foram executados em distintas épocas do ano (chuvosa e seca), permitindo o estabelecimento dos efeitos da variação sazonal, ou umidade do solo, nos resultados citados anteriormente. As análises mostraram que as influências do estado de tensão pós-construção em investigações de campo devem ser de alguma maneira consideradas no projeto de túneis, enquanto que a sazonalidade não parece causar apreciáveis diferenças de engenharia nos parâmetros de projeto.

**SYNOPSIS** – The paper presents a discussion of the isolated and simultaneous effect of both field stress state and moisture content (or suction) variations of the soil on the original data and predicted geotechnical parameters from SPTT, DMT and CPT in situ tests. This was accomplished with results from a test site located inside the settlement trough of an excavation (Location A) and from a location free from the interferences caused by this same excavation (Location B) related to an existing tunnel in the city of Brasília, Brazil. The field tests were carried out at distinct (rainy and dry) seasons of the year, allowing the establishment of the effects of the season variability, or soil moisture content, on the aforementioned results. The analyses have shown that post-construction stress state influences on site investigations should somehow be considered in tunnel design projects, whereas seasonality does not appear to cause appreciable engineering differences on design parameters.

**PALAVRAS CHAVE** – ensaios de campo, solo colapsível, projeto de túnel.

---

\* Professor Adjunto, Eng. Civil, Ph.D., Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil. E-mail: rpcunha@unb.br

\*\* Professor Titular, Eng. Civil, Ph.D., Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil. E-mail: aassis@unb.br

\*\*\* Professor Auxiliar, Eng. Civil, D.Sc., Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. E-mail: ferm@dec.uc.pt

\*\*\*\* Ex-Aluno, Eng. Civil, M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil.

## 1 – INTRODUÇÃO

Grande parte do Distrito Federal do Brasil, aonde se localiza sua capital, Brasília, apresenta um solo poroso, colapsível e meta-estável, localmente conhecido como “argila porosa” de Brasília. Este solo é constituído por uma camada superficial de argila siltosa que, quando submetida a variações no nível original de tensões ou de umidade (ou ambas simultaneamente), sofre uma considerável variação de volume e quebra estrutural de sua matriz. Este fenômeno é definido como “colapso” do solo, e pôde ser visualmente observado durante os trabalhos de escavação subterrânea a que esta cidade esteve submetida em anos recentes – particularmente ao longo da bacia superficial de recalques do solo sobrejacente ao topo de um túnel executado pelo governo local, túnel este que representou um dos maiores empreendimentos públicos na área de engenharia urbana e de transportes desta cidade na última década. O empreendimento em questão, executado pela Companhia do Metropolitano de Brasília, tem um comprimento total de 42 km que foram construídos sob distintos métodos construtivos de forma a viabilizar o sistema de Metrô desta cidade. Deste total, aproximadamente 7 km foram construídos sob a forma de túnel (diâmetro de 9,6m) escavado na argila porosa através do método NATM.

A esta região afetada denomina-se de “zona de influência” do túnel. De fato, este fenômeno foi causado pelos efeitos associados de variação do estado de tensão e umidade no maciço terroso, gerados pela escavação subterrânea do túnel, que por sua vez ocorreram em função do tempo de construção e da sazonalidade local (épocas de seca versus de chuva), além de aspectos intrínsecos relacionados à geotecnia do solo em questão, como o já relatado aspecto da estrutura meta-estável. Estes efeitos se relacionam, respectivamente, de forma externa e interna às camadas de maciço terroso natural da região afetada pela escavação, ou seja, na região dentro da zona de influência do túnel.

Portanto, com o objetivo de estudar os efeitos comentados e prevê-los, ou entendê-los por meio de ensaios de campo e laboratório, além de tirar diretrizes futuras de investigação para obras deste tipo, foi estabelecido um projeto conjunto de pesquisa entre o Brasil e Portugal. Este projeto se deu, mais especificamente, entre os grupos geotécnicos da Universidade de Brasília (UnB) e da Universidade de Coimbra, tendo envolvido docentes, funcionários e alunos de ambas as instituições. O mesmo já produziu, com sucesso, uma Tese de Doutorado (Marques, 2006) e uma Dissertação de Mestrado (Santos 2003), além de dois artigos internacionais (Marques *et al.*, 2004, Cunha *et al.*, 2006). De forma sumarizada, observa-se que o projeto de pesquisa foi conduzido via campanha de ensaios de campo na argila porosa de Brasília em áreas dentro, e fora, da zona de influência do túnel, que já estava em operação por ocasião destes ensaios. Os ensaios foram feitos em diferentes épocas do ano, isto é, durante as épocas de seca e chuva da região, e se realizaram concomitantemente com ensaios laboratoriais convencionais e especiais (oedométricos, triaxiais) executados na Universidade de Brasília via blocos indeformados de solo amostrados nas regiões de estudo.

Em função da escavação subterrânea estar centrada predominantemente na argila colapsível da região, que em geral se encontra em um estado inicial não saturado, sabia-se, de antemão, que a sucção deste material in loco iria afetar o seu comportamento e possivelmente o da obra. E sabia-se também que este comportamento se daria em função do nível de tensão produzido, ou alterado, após a instalação do túnel. Logo, levando em conta que o nível de sucção deste solo local varia com a umidade natural do mesmo, e que esta, por sua vez, muda em função da época do ano (seca ou chuvosa), procurou-se realizar ensaios de campo em dois distintos meses “chaves” de forma a observar este efeito nos dados primários e secundários (parâmetros interpretados) destes ensaios escolhidos. Portanto, a primeira fase de ensaios foi realizada na época de chuva, em Fevereiro de 2002, enquanto que a segunda foi executada em Julho deste mesmo ano, já em plena seca da região. Foram programados ensaios com os equipamentos usuais da prática Brasileira, como o Ensaio de

Penetração Standard com medição de Torque (SPTT) e outros não tão usuais para projetos deste tipo no Brasil, como o Ensaio Dilatométrico de Marchetti (DMT) e o Ensaio Conepenetrométrico (CPT).

Outro aspecto relevante investigado no presente artigo foi estudo do efeito da escavação do túnel no comportamento, pós-construção, do solo circundante ao mesmo. Este é um aspecto importante porque a escavação e implantação do túnel geram variações nos níveis de tensões originais que induz, e possivelmente amplificam, o colapso do solo por ocasião da chegada das chuvas na região. De fato isto ocorreu e levou à formação (como observado em distintos lugares) de bacias superficiais de recalque com magnitude superior à prevista originalmente por metodologias convencionais de uso em solos “clássicos” da geotecnia.

Desta forma, foram definidos para a pesquisa dois locais de execução dos distintos ensaios de campo anteriormente descritos. O primeiro local, denominado de “Local A”, se encontrava próximo à lateral da parede do túnel, em área provavelmente afetada pelo processo executivo (na zona de influência deste). O segundo local, denominado de “Local B”, se encontrava na mesma seção transversal, porém bem distanciado da bacia de recalques, a cerca de 75 m do eixo central do túnel. Estes dois pontos foram definidos em região localizada ao centro da cidade de Brasília, mais precisamente na “Asa Sul” desta, onde o túnel havia sido previamente instrumentado. Nestes dois locais, portanto, foram realizados os ensaios de campo nas duas distintas épocas consideradas e acima descritas.

O artigo finaliza com a apresentação de todo o conhecimento adquirido através de considerações finais de ordem acadêmica e prática, que servirão de base a futuras investigações geotécnicas em projetos similares ao atual assentes em solos tropicais colapsíveis.

## **2 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO DISTRITO FEDERAL DO BRASIL**

### **2.1 – Características fisiográficas**

A cidade de Brasília situa-se no Distrito Federal (DF), localizado no Planalto Central, Centro-Oeste do Brasil, ocupando uma área quadrilátera de 5814 km<sup>2</sup> (Figura 1). O Distrito Federal é limitado ao Norte pelo paralelo de 15°30'N e ao Sul pelo paralelo de 16°03'S, a Leste pelo rio Preto e a Oeste pelo Rio Descoberto. A região apresenta um relevo com predominância de grandes superfícies planas e suavemente onduladas, conhecidas como chapadas, possuindo altitudes entre 750 e 1300 m. Por ser formada em grande parte por terras altas, a região do Distrito Federal se apresenta como dispersora das drenagens que fluem para as três mais importantes bacias fluviais do Brasil: Platina, Tocantins/Araguaia e a do São Francisco. Entre as bacias secundárias destaca-se a do rio Paranoá, onde está situado o lago artificial do Paranoá, criado juntamente com a cidade de Brasília (Novaes Pinto, 1993).

### **2.2 – Características climáticas**

O clima do Distrito Federal é do tipo tropical de savana e temperado chuvoso de inverno seco (Mortari, 1994), tendo como característica marcante a alternância entre uma estação fria e seca e outra quente e chuvosa. O período de maio a setembro corresponde à estação fria e seca, marcada pela baixa nebulosidade, alta taxa de evaporação e baixa taxa de precipitação, e o período entre os meses de outubro e abril predomina a estação quente e chuvosa. Este ciclo alternante impõe ao solo do Distrito Federal um processo de laterização, que consiste na lixiviação de sais solúveis das ca-



Fig. 1 – Mapa geográfico do Distrito Federal do Brasil.

madras superiores e deposição nos estratos inferiores. Este processo deixa na camada superficial de argila uma grande quantidade de poros, resultando em altos índices de vazios, baixos pesos específicos e alta permeabilidade (Ortigão, 1994).

A Figura 2 expõe informações do Inst. de Meteorologia referente aos anos 2000 a 2002.

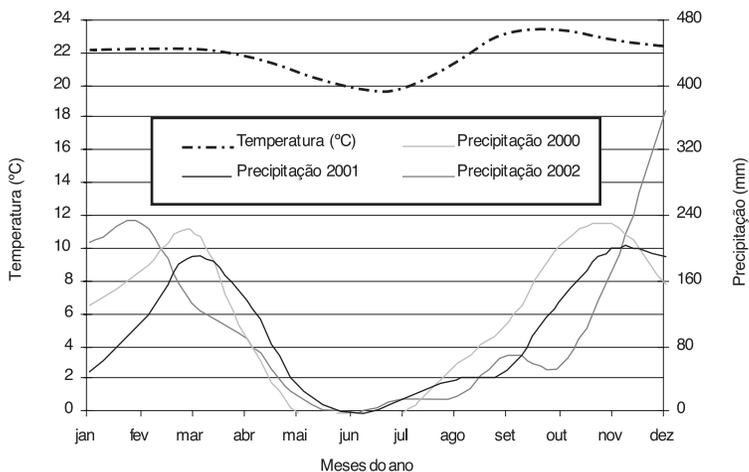


Fig. 2 – Distribuição da precipitação e da temperatura no Distrito Federal.

### 2.3 – Características geológicas

O Planalto Central apresenta características de geomorfologia influenciadas por condicionantes geológicos, climáticos e antrópicos. Em grande parte do Distrito Federal são encontradas chapadas que apresentam predominantemente um relevo residual e de aplainamento, com topografia

plana e levemente ondulada (Blanco, 1995). Estas feições são cobertas por uma espessa camada de latossolo e solos lateríticos vermelhos argilosos, denominados de argila porosa, como já mencionado anteriormente.

Freitas-Silva e Campos (1998) definem a geologia do Distrito Federal como sendo composta por rochas atribuídas aos grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí. Os ensaios de campo foram realizados na área do “Plano Piloto” de Brasília onde predominam as rochas do grupo Paranoá, onde se encontram alternâncias de estratos de quartzito com granulometria fina a média, metassilito argiloso, metarritmito arenoso, metarritmito argilosos e ardósia.

## **2.4 – Características pedológicas**

Existem três unidades de solos predominantes na região do Distrito Federal, que são denominadas pedologicamente de solos hidromórficos, cambissolos e latossolos. No entanto, a maior parte desta região, acima de 80%, é ocupada pelos latossolos que estão associados aos locais de ocorrência de rochas do grupo Paranoá. Estes solos são resultantes de intemperismo, principalmente químico, associado a processos de lixiviação e laterização. Este processo resulta na formação de espessas camadas detrito-lateríticas, silto-argilosas, avermelhadas, com elevado índice de vazios e baixos pesos específicos.

A micromorfologia destes solos profundamente intemperizados revela que os mesmos são formados por agregados de matriz fortemente argilosa, interligados entre si e a grãos de quartzo (areia) por pontes de argila, com índice de vazios entre 1 e 2 (Cardoso, 1995). Este aspecto confere aos solos locais uma alta permeabilidade ( $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  cm/s) e um comportamento drenado similar aos solos granulares finos. Devido à sua alta porosidade e tipo de ligações cimentíceas, estes apresentam uma estrutura instável quando submetidos a aumento de umidade e/ou a alteração do estado de tensões, apresentando quase sempre uma brusca variação de volume, denominada “colapso”, daí a denominação “colapsível” tipicamente atribuída a estes materiais. Portanto, as camadas superficiais de argila porosa colapsível do DF em geral apresentam baixa resistência à penetração ( $SPT < 4$ ) e nelas observam-se recalques exagerados quando submetidas a uma variação de umidade e/ou estado de tensões.

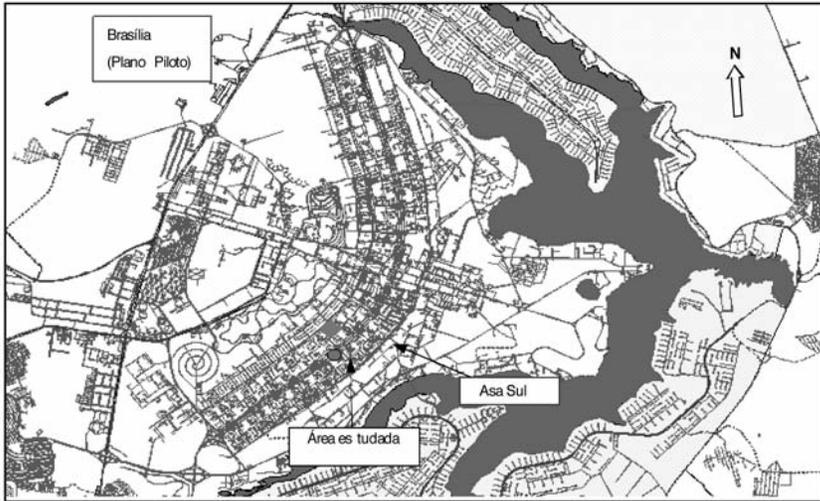
## **3 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO LOCAL DOS ENSAIOS E DA OBRA**

### **3.1 – Localização do túnel e dos ensaios**

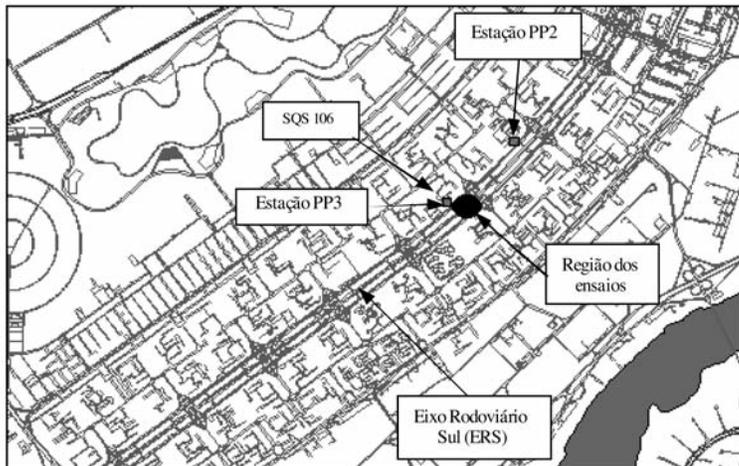
Os ensaios de campo apresentados neste trabalho e o túnel em questão se localizam no Plano Piloto de Brasília, mais especificamente em sua Asa Sul. A Figura 3 mostra a localização da área estudada. Nesta se observa o formato de “avião” do Plano Piloto (por isto este nome) e as regiões sul e norte deste, respectivamente denominadas de Asa Sul e Asa Norte, novamente em referência ao formato de avião da cidade. À direita nesta figura notam-se as grandes extensões do Lago Paranoá, que foi artificialmente criado para tornar o clima da cidade mais ameno, além de torná-la mais pitoresca.

O trecho de estudo escolhido situa-se no Eixo Rodoviário Sul (ERS), entre as estações PP2 e PP3 do Metrô, em frente ao conjunto habitacional SQS 106 (Superquadra Sul 106), conforme mostrado na Figura 4. Na escolha deste trecho foram considerados dois aspectos importantes. O primeiro baseou-se no fato deste representar muito bem as características do solo superficial típico de Brasília, estando inserido no domínio da argila vermelha porosa colapsível. O segundo aspecto é referente à existência, neste trecho, de uma seção do túnel considerada completamente instrumentada

(S-4294), o que possibilitou a determinação da largura da faixa superficial abrangida pela bacia de recalque e forneceu informações que indicaram a ocorrência de colapso estrutural do solo na camada superficial.



**Fig. 3** – Plano piloto de Brasília e localização da área estudada.

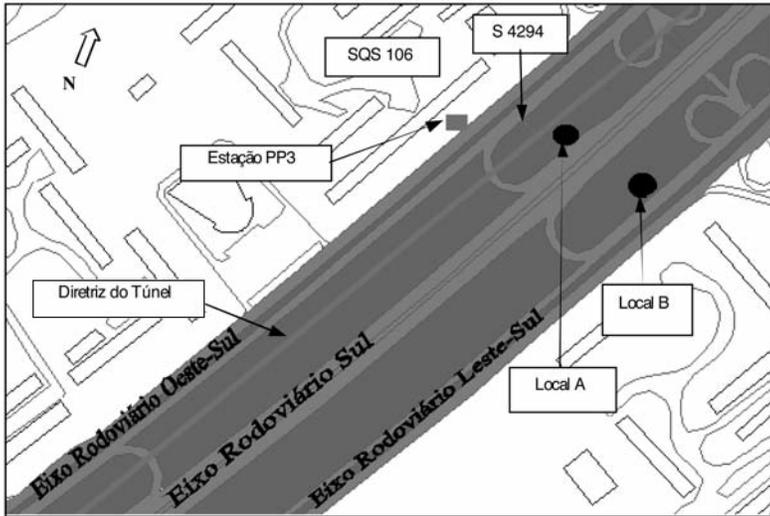


**Fig. 4** – Trecho e região de realização dos ensaios na Asa Sul de Brasília.

A partir dos resultados fornecidos pela seção instrumentada S-4294, sabe-se que na região onde foram realizados os ensaios de campo ocorreram recalques superficiais elevados. Após uma escavação de um túnel, é comum os recalques se propagarem do teto do mesmo para a superfície, no entanto, estes deslocamentos estabilizados diminuem quanto maior a distância da abertura. Como a instrumentação demonstrou o inverso, aceitou-se a existência de uma fonte adicional de recalque na camada de solo entre o teto do túnel e a superfície do terreno.

Buscando avaliar as influências que a modificação do estado de tensões do solo vizinho à escavação teria nos parâmetros geotécnicos, discriminou-se a região de ensaio em dois locais, A e

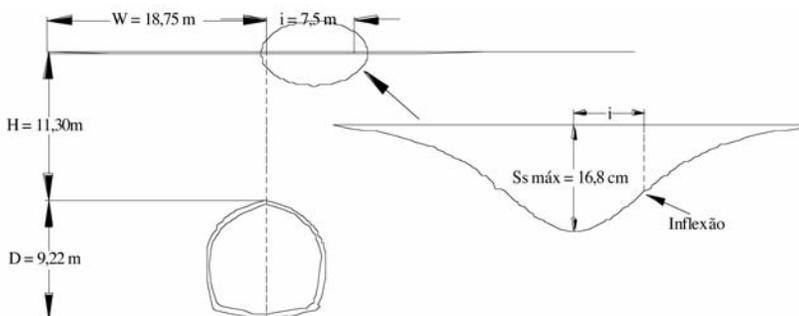
B (Figura 5), como já citado anteriormente. O Local A está situado próximo à seção instrumentada, no canteiro entre o Eixo Rodoviário Oeste-Sul (Eixo W) e o Eixo Rodoviário Sul, como indica esta figura, e o Local B no canteiro entre o Eixo Rodoviário Sul e o Eixo Rodoviário Leste-Sul (Eixo L), também assinalado.



**Fig. 5** – Detalhe dos locais de realização dos ensaios e da diretriz do túnel.

O Local A foi disposto em uma vertical que dista cerca de 1 m da parede de concreto do túnel, portanto, dentro da zona superficial demarcada por sua bacia de recalque que nesta região possui largura de 37,5 m (semi-largura da bacia igual a 18,75 m). Já o Local B foi arranjado de maneira que preservasse uma considerável distância da bacia de recalque, conforme apresentado na Figura 6.

Desta forma, o conjunto de ensaios de campo realizado no Local A forneceu parâmetros oriundos de um solo, a priori, perturbado pela alteração de suas tensões naturais, enquanto que, do Local B, foram extraídas informações que serviram de base para a determinação dos parâmetros geotécnicos provenientes de um solo não ou muito pouco perturbado, onde os efeitos das tensões induzidas pela escavação não foram pronunciados, ou quase inexistentes.



**Fig. 6** – Configuração dos locais de ensaio em relação à bacia de recalque superficial.

### 3.2 – Detalhes do túnel

Com o objetivo de reduzir os problemas de transporte no DF, iniciou-se no ano de 1992 a construção do Metrô, cuja extensão atinge 42 km de vias que interligam a estação rodoviária de Brasília (no centro do Plano Piloto) a cinco cidades satélites. A linha é na sua maioria superficial, no entanto, o trecho situado na Asa Sul é subterrâneo, possuindo um túnel com diâmetro equivalente médio de 9,6 m. Este trecho subterrâneo possui nove estações, sendo a maioria identificadas pela sigla PP (Plano Piloto) conforme mostra a Figura 7. Como já relatado, a região em estudo situa-se entre as estações PP2 e PP3, aonde o túnel teve uma de suas diversas seções instrumentadas completas (S-4294).

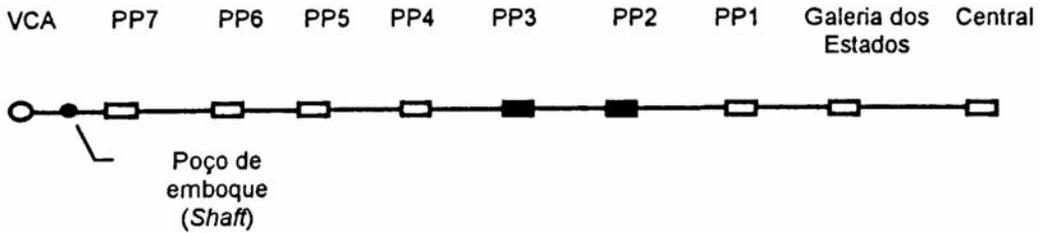


Fig. 7 – Estações do trecho subterrâneo situado na Asa Sul do Plano Piloto de Brasília.

A observação dos deslocamentos no maciço que circunda a escavação é uma atividade presente na metodologia do NATM. Assim, recalques superficiais foram percebidos logo após o início das escavações e estavam duas a três vezes maiores que os previstos inicialmente, no entanto sem instabilidade da frente de escavação. O fenômeno da colapsividade volumétrica foi a explicação encontrada para tal fato, pois no teto do túnel os recalques ficaram dentro do esperado, enquanto que em direção à superfície do terreno ocorreu uma gradual redução da variação volumétrica do solo. Na ocasião da escavação do túnel na Seção S-4294 a estimativa inicial de recalques na camada superficial de argila era da ordem de 60 a 80 mm. No entanto, no início desta observou-se a ocorrência de recalques superficiais de 150 a 200 mm, chegando a atingir picos de 500 mm em outras regiões em que havia a presença de lençol freático (Ortigão, 1994). O fenômeno foi creditado ao fato do túnel ter sido escavado em uma espessa camada de argila porosa, face aos aspectos estruturais já explanados anteriormente.

A Figura 8 apresenta a seção transversal esquemática da seção instrumentada S-4294.

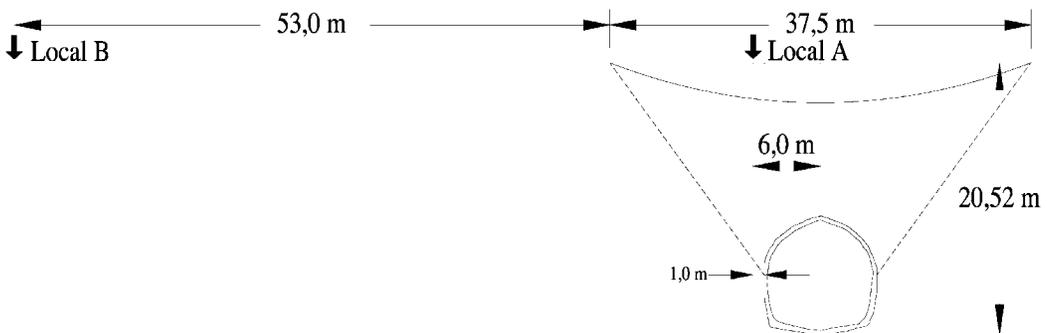
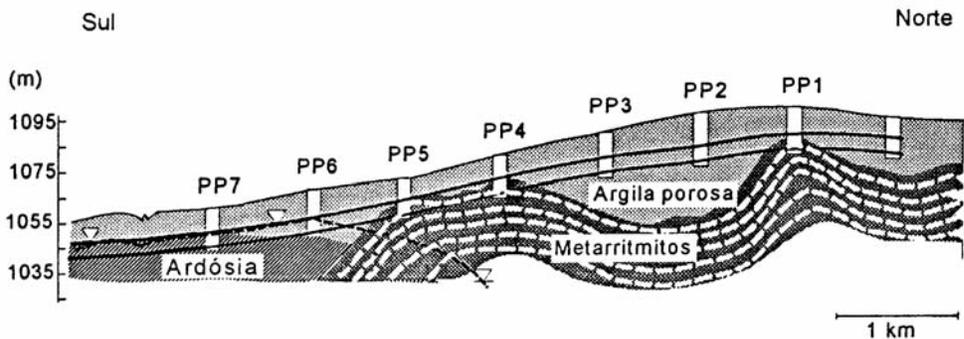


Fig. 8 – Seção transversal esquemática do trecho instrumentado S-4294 e local de estudos.

### 3.3 – Características geotécnicas do local de ensaios

O túnel do metrô ao longo da Asa Sul atravessa camadas de argila porosa de espessura variando de 8 a 40 m. Foi observado um nível d'água bastante profundo ou inexistente nesta região, exceto na ponta da Asa Sul, onde este se encontra numa profundidade de 10 m (Ortigão, 1994).

A Figura 9 apresenta o perfil geotécnico da Asa Sul, e as diretrizes inferior e superior do túnel. É possível notar a camada superficial de argila porosa sobrejacente a solos residuais, saprólitos de ardósia e metarrilitos. Entre as Estações PP2 e PP3, onde esta camada atinge a espessura máxima de 40 m, também se retiraram amostras deformadas e indeformadas de solo para ensaios laboratoriais. Estes ensaios foram realizados pela Universidade de Brasília a pedido do consórcio Brasmetrô, e seus resultados são sumarizados no Quadro 1.



**Fig. 9** – Seção longitudinal da Asa Sul com detalhe do perfil geotécnico, do túnel e das estações (modificado de Ortigão, 1994).

**Quadro 1** – Parâmetros geotécnicos na seção em estudo (Brasmetrô, 1992).

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valores
Peso específico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	9,7 - 16,8
Índice de vazios	$e_0$	–	0,96 - 2,01
Limite de liquidez	$W_L$	%	25,1 - 78,0
Índice de plasticidade	$I_p$	%	4,4 - 43,3
Coesão efetiva	$c'$	kPa	9,0 - 19,0
Ângulo de atrito efetivo	$\phi'$	°	9,6 - 28,9
Coefficiente de colapso	$i$	%	0 - 11,6
Coefficiente de empuxo no repouso	$K_0$	–	0,55
Coefficiente de permeabilidade	$k$	m/s	$7,0 \times 10^{-8}$ - $8,5 \times 10^{-5}$
Coefficiente de variação volumétrica	$c_v$	m <sup>2</sup> /s	$1,5 \times 10^{-7}$ - $5,5 \times 10^{-7}$
Índice de compressão	$c_c$	–	0,17 - 0,61

Na região específica dos locais de ensaio (A e B), notou-se um horizonte de solo laterítico constituído por uma argila arenosa vermelha, de acordo com a classificação táctil visual do SPT, onde o impenetrável da sondagem era atingido com 23 m de profundidade. A resistência mecânica desta argila nestes locais era inferior aos 10 golpes do amostrador convencional SPT, não tendo sido observado nível de água.

#### 4 – NOMENCLATURA E CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS EXECUTADOS

As campanhas de ensaios de campo envolveram ensaios de CPT, DMT e SPTT, nos locais assinalados e nas diferentes épocas do ano. Para cada ensaio retiraram-se, ao longo da profundidade e a cada metro, amostras deformadas para determinação da umidade natural do solo, de forma a se ter uma idéia desta variável para cada perfil de solo ensaiado.

De forma a analisar e comparar as informações de cada ensaio na mesma profundidade, tomaram-se os valores médios de CPT e DMT correspondentes a cada metro. Por outro lado, no ensaio SPTT tomou-se a soma dos golpes entre as profundidades de  $Z + 0,15$  m e  $Z + 0,45$  m, onde  $Z$  é um número inteiro a uma certa profundidade. Este procedimento é similar ao adotado por Mota (2003) no Campo Experimental da UnB.

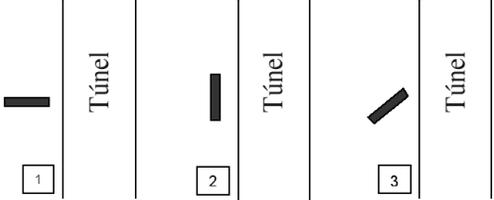
A nomenclatura adotada para descrever estes ensaios foi arranjada na seguinte ordem: primeiro a sigla do tipo de ensaio, seguida do local de realização (A ou B) e da época sazonal (chuvosa C ou seca S). No caso específico do DMT, adicionou-se ainda uma numeração referente à orientação do sentido de expansão da membrana metálica (1, 2 ou 3), de forma a estudar esta variável (resultados da orientação espacial da membrana) em relação ao eixo do túnel. Esta numeração e os outros detalhes da nomenclatura são apresentados no Quadro 2.

A execução dos ensaios de SPT seguiu a norma Brasileira NBR-6484, exceto quanto ao acionamento manual do martelo com cabo de aço, a não utilização do coxim de madeira e a realização do avanço com o próprio amostrador, o que vem a ser uma prática regional. Não foi utilizado qualquer tipo de revestimento e após a penetração do amostrador padrão foi realizada a medição de torque (ensaio SPTT) retirando a cabeça de bater e acoplado às hastes um adaptador para o torquímetro. Realizou-se o torque sempre pelo mesmo operador e a leitura de torque máximo se deu ao completar 4 de volta do torquímetro. Embora a prática de medição do torque ainda não esteja normalizada, seu procedimento já é bem difundido e aplicado no Brasil, em particular na região Sudeste.

Os ensaios de cone elétrico foram realizados segundo a NBR12069 com dados medidos a cada 10 cm e velocidade de cravação estática de 2 cm/s. Utilizou-se um equipamento hidráulico para a cravação do cone penetrométrico com capacidade máxima de cravação de 200 kN, hastes cilíndricas de 33 mm de diâmetro e 1 m de comprimento. O cone elétrico apresentou diâmetro de 3,56 cm, área de 10 cm<sup>2</sup>, ângulo de base igual a 60°, capacidade máxima na ponta de 100 kN e atrito lateral máximo de 1000 kPa. Utilizou-se um equipamento e sistema de aquisição de dados do tipo “Hogentogler”, pertencente a empresa de engenharia local. A Figura 10 apresenta um detalhe do sistema utilizado. Estes, no entanto, só foram realizados na época chuvosa, visto que o sistema de aquisição de dados se danificou após fevereiro de 2002 e não foi consertado a tempo dos ensaios na época seca.

Os ensaios DMT foram realizados segundo a norma americana ASTM D18.02 com o mesmo sistema de cravação adotado nos ensaios CPT. As leituras das pressões no manômetro, feitas a cada 20 cm de avanço, foram anotadas em planilhas manuais (pressão A e B), juntamente com a profun-

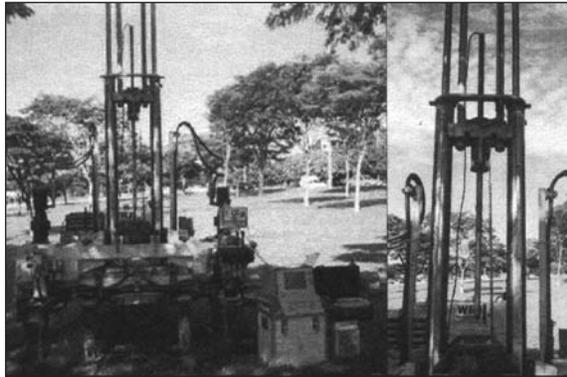
**Quadro 2** – Nomenclaturas adotadas para os ensaios.

Ensaio	Local	Estação climática	*Expansão da membrana	Nomenclatura	
DMT	A	C	1	DMT AC-1	
		C	2	DMT AC-2	
		C	3	DMT AC-3	
	B	C	1	DMT BC-1	
		C	2	DMT BC-2	
		C	3	DMT BC-3	
	A	S	1	DMT AS-1	
		S	2	DMT AS-2	
		S	3	DMT AS-3	
	B	S	1	DMT BS-1	
		S	2	DMT BS-2	
		S	3	DMT BS-3	
CPT	A	C		CPT AC	
	B	C		CPT BC	
SPT-T	A	C		SPT-T AC	
	B	C		SPT-T BC	
	A	S		SPT-T AS	
	B	S		SPT-T BS	
<p>*Expansão 1: membrana paralela ao eixo longitudinal do túnel.                      *Expansão 2: membrana perpendicular ao eixo longitudinal do túnel.                      *Expansão 3: membrana com ângulo de 45° com o eixo long. do túnel.</p> <p>Desenho Esquemático</p> 					

didade de ensaio e os dados iniciais (desvio do zero do manômetro, pressões de calibração  $\Delta A$  e  $\Delta B$ , número da membrana e localização do ensaio). A velocidade de cravação da lâmina dilatométrica foi de 2 cm/s e não foi realizada a leitura da pressão C.

Cada sondagem DMT, respectiva a uma época e local, teve uma orientação diferente para a expansão da membrana dilatométrica, ou seja, orientação paralela (1), perpendicular (2) e forman-

do um ângulo de 45 graus em relação ao eixo longitudinal do túnel (3), conforme já desenhado esquematicamente no Quadro 2. Buscou-se com isto avaliar o possível efeito de anisotropia de tensões induzidas pelo eixo do túnel, como será discutido mais a frente.



**Fig. 10** – Equipamento de cravação hidráulica utilizados nos ensaios CPT e DMT.

## 5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 – Análise dos dados primários quanto à modificação do estado de tensões

#### 5.1.1 – Efeito de anisotropia de tensões induzidas medidas pelo DMT

A avaliação inicial dos dados dilatométricos se deu em relação aos possíveis efeitos de anisotropia de tensões induzidas nas distintas orientações das membranas dilatométricas, ou seja, segundo as orientações de expansão 1, 2 e 3 apresentadas no Quadro 2.

Vale ressaltar que antes de todos os ensaios estas membranas de aço foram intensamente exercitadas em laboratório, a fim de minimizar o efeito de sua rigidez. As devidas correções foram igualmente aplicadas nos dados de campo, conforme preconiza Marchetti (1980). Além disto, a presente discussão se limitará aos resultados na época chuvosa, onde o efeito de sucção nos resultados é amenizado ou quase inexistente. A Figura 11 apresenta os resultados para os locais A e B, respectivamente.

Observando os valores de  $p_0$  e  $p_1$  obtidos no Local A para as três expansões da membrana, pode-se perceber uma faixa superficial até 4 m onde as distribuições de  $p_0$  e  $p_1$  mostraram diferenças entre si. Entretanto, na faixa situada entre 4 e 14 m de profundidade, para as três expansões diferenciadas da membrana, foram obtidas distribuições de  $p_0$  (e também  $p_1$ ) sem uma clara distinção ao logo da profundidade. A partir de aproximadamente 14 m as diferenças entre as distribuições de  $p_0$  voltaram a ser evidentes, e este fato também se repete para as distribuições de  $p_1$  ao longo da profundidade. Quando se direcionou o mesmo tipo de análise para o Local B, não foi possível modular em camadas o perfil conforme procedido no Local A, visto não ter sido identificadas tendências diferenciadas de  $p_0$  e  $p_1$ .

Esta análise inicial permite que seja observado que, para o Local A, existem três regiões distintas onde o efeito de anisotropia de tensões induzidas pode ser observado, enquanto que, para o Local B este mesmo efeito não se observa, em função, certamente, da distância elevada deste local em relação ao eixo do túnel, em cerca de 7,5 vezes seu diâmetro.

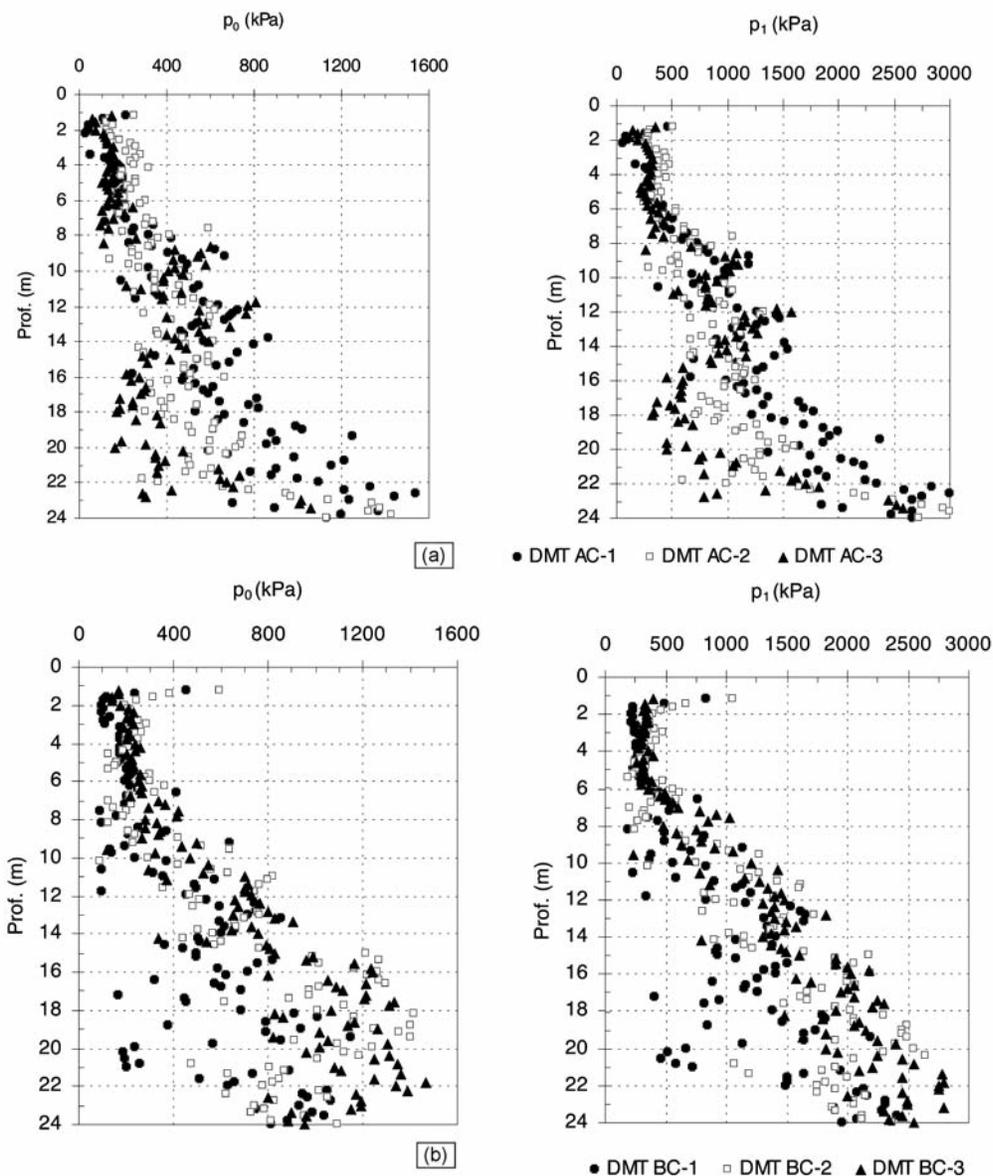


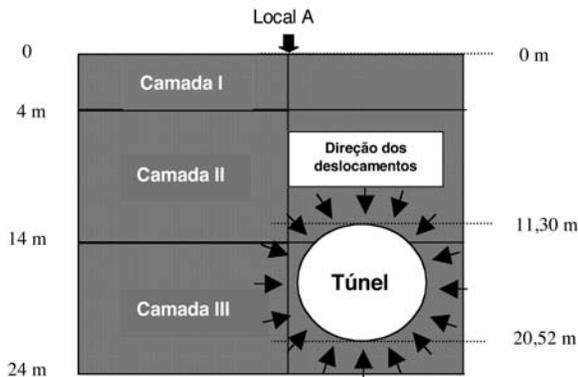
Fig. 11 – Comparação de dados primários do DMT em diferentes orientações de expansão para o (a) Local A e (b) Local B.

Levando então em conta somente os resultados do Local A, pode-se afirmar que esta primeira camada de solo que foi influenciado se estenderia desde a superfície até aproximadamente 4 m de profundidade. Já a segunda camada de 4 a 14 m, aproximadamente, enquanto que a terceira camada vai de 14 a 24 m, aonde se atingiu o limite do ensaio. De forma a simplificar a abordagem, as mesmas serão denominadas respectivamente de camada I ou superficial, camada II ou intermediária, e camada III ou inferior. Este aspecto é esquematicamente mostrado na Figura 12. Nota-se que a Camada III é justamente a que mais próxima está, e mais sofre influência, da parede do túnel.

Quanto à orientação de expansão da membrana do DMT na percepção do efeito de tensão modificada ou induzida no maciço, verifica-se para o Local A que, na camada III, há uma clara tendência de valores de  $p_0$  e  $p_1$  da expansão 1 maiores que os respectivos da expansão 2 e 3. Nesta camada, por exemplo, o valor médio de  $p_0$  medido na expansão 3 e 2 sofreu, respectivamente, uma redução de 57 e 34% em relação a média de  $p_0$  obtida na expansão 1. Como a expansão 1 é paralela ao eixo do túnel (vide Quadro 2), conclui-se que, nesta distância, as expansões 2 e 3 tenham detectado com maior clareza o efeito da relaxação anisotrópica de tensões gerada pela escavação (via formação da zona plástica em torno da escavação). Isto por que tais expansões foram realizadas em direções mais próximas a dos vetores de deslocamento da escavação, vetores estes que são direcionados para o centro da abertura conforme a Figura 12. Já na camada I ocorre o inverso, ou seja, há a tendência de valores menores de  $p_0$  e  $p_1$  para a expansão 1, e isto pode estar possivelmente ligado ao fato de que, nesta região, houve colapso do solo no interior da bacia de recalque superficial, alterando anisotropicamente as tensões iniciais. Este aspecto, no entanto, ainda carece de melhor comprovação.

Nota-se ainda que tal efeito de anisotropia não foi claramente perceptível na camada intermediária II do Local A, e em nenhuma camada no Local B pela distância do mesmo ao eixo do túnel como já explanado anteriormente.

Desta forma, para as comparações do DMT que se fizerem a seguir, serão somente utilizados dados da expansão 2 ou 3, para o Local A e camada III, que mais se mostraram sensíveis aos efeitos de relaxação de tensões anisotropicamente induzidas no maciço pelo túnel. Este é um aspecto de conservadorismo de análise e projeto, visto que, sem dúvida, foram nestas direções que maiores diferenças de resultados ocorreram entre os locais A e B na época chuvosa, conseqüentemente maior variação em relação à situação “original” do solo. No caso específico dos parâmetros geotécnicos oriundos do DMT, ou parâmetros secundários, será utilizada a interpretação dos dados da expansão 3.



**Fig. 12** – Distintas camadas de solo influenciadas no Local A pela relaxação de tensões.

### 5.1.2 – Efeito da distância do local de ensaio em relação ao túnel, medido pelo DMT

Com base no que foi abordado anteriormente, somente os resultados da expansão 3 são apresentados, respectivamente para os locais A e B. Logo, a Figura 13 apresenta respectivamente os resultados para a época chuvosa e seca, donde se nota, inicialmente, que na primeira época é nítida a diferença dos valores de  $p_0$  e  $p_1$  quando comparam-se os dois locais investigados. Para a camada I, e em relação a  $p_0$  por exemplo, há um decréscimo percentual aproximado de 40% do valor desta

variável do Local B para o A. Já na camada III estas diferenças foram muito mais acentuadas, com um decréscimo aproximado de quase 70%, face à maior proximidade desta camada ao eixo do túnel, como já comentado. Na Camada II, no entanto, as diferenças já não são tão perceptíveis, embora, em termos médios, possa-se calcular uma redução percentual de aproximadamente 14% do  $p_0$  do Local B para o A. Novamente observa-se que tal camada foi menos afetada por se encontrar abaixo da região superficial que sofreu colapso, e fora da porção horizontal inferior que diretamente recebeu os efeitos da escavação. No entanto foi afetada, como indicam os dados em nível de  $p_0$  e  $p_1$ , ou seja, os efeitos do acréscimo de tensões gerado pela escavação do túnel existiram e afetaram esta camada de forma mais suave.

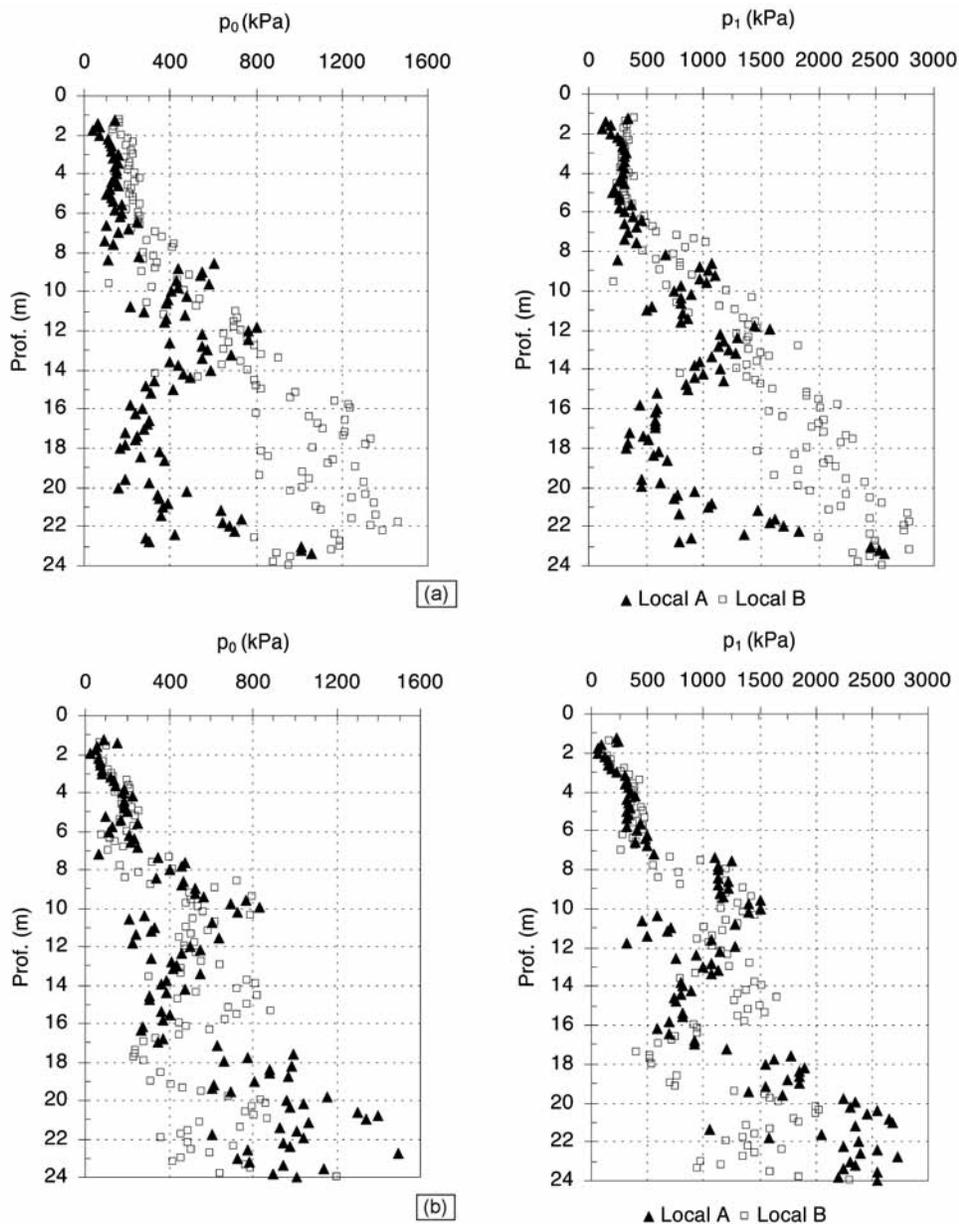
A comparação na estação seca não apresenta, no entanto, similaridade com os resultados da estação chuvosa, como se observa nesta mesma figura. Isto por que não se observam as tendências anteriores de valores de  $p_0$  e  $p_1$  de ambos locais A e B. De fato, somente na camada I ocorreram valores menores destas variáveis no Local A em relação ao B. Já para a camada III ocorre o inesperado, ou seja, o inverso com valores maiores para o Local A em relação ao B. Este fato enfatiza o porque de não ter sido considerada a estação seca nas análises anteriores, já que, nesta, há um outro fator em evidência nos dados: a sucção do solo. Como será apresentado graficamente mais a frente, embora a estação (seca) do ano tenha sido a mesma, nesta o Local A apresentou umidade natural ao longo da profundidade levemente inferior à do Local B, ou seja, com uma parcela superior de resistência ao cisalhamento do solo referente à sucção matricial. Isto sem dúvida influenciou os resultados e “mascarou” o efeito de relaxação de tensões que se quer evidenciar neste subitem. Hipotetiza-se, também, que o Local A teve menor umidade em profundidade na época seca pelo fato do túnel ter funcionado como elemento drenante, ou seja, como um bueiro de grandes dimensões, o que levou à drenagem do solo com mais intensidade no Local A em relação ao B.

### ***5.1.3 – Efeito da distância do local de ensaio em relação ao túnel, medido pelo CPT***

As análises demonstraram que ao comparar os resultados dos locais A e B (respectivamente ensaios CPT AC e BC, relativos somente à época chuvosa C), o ensaio CPT também pôde identificar uma camada intermediária de menor variação nos valores medidos em campo, e outras duas camadas em que podem ser verificadas variações significativas. De fato, como já conhecido em literatura, a variável  $q_c$  é função predominante do nível de tensões horizontais do solo, sendo, portanto, função deste.

Logo, na Figura 14 é feita a comparação entre estes resultados, podendo ser visualizadas as três camadas anteriormente percebidas e comentadas. Ou seja, na camada I ocorreu um decréscimo percentual no valor médio de  $q_c$  de 41% do Local B para o Local A. Na zona intermediária, definida como camada II, os valores de  $q_c$  apresentaram uma redução percentual média de 10%, enquanto que na camada inferior, ou III, esta mesma variável sofreu um decréscimo percentual médio de 42% do Local B para o Local A. Apesar das variáveis  $p_0$  e  $q_c$  serem obtidas de forma diferente, pode-se observar que estas mostraram-se semelhantes em termos qualitativos.

Observa-se no entanto que a queda do valor de  $q_c$  do Local B para o A, na camada III, foi percentualmente bem inferior ao que fora notado anteriormente para a variável  $p_0$  do DMT. Isto indica o já conhecido aspecto de maior sensibilidade deste equipamento de campo (DMT) para variações de tensão no sentido horizontal. Esta “sensibilidade” parece ser também função do tipo de variável considerada. Ou seja, também se nota nesta figura que o atrito lateral ( $f_s$ ) não variou do Local B para o A nas camadas I e II, somente se percebendo uma redução na camada III, justamente a que sofreu o maior efeito de relaxação de tensões. Conclui-se daqui que esta variável do CPT não é tão sensível para a avaliação deste efeito em solos deste tipo, e possivelmente de outros.



**Fig. 13** – Comparação de dados primários do DMT em diferentes locais para a (a) época chuvosa e (b) época seca.

#### 5.1.4 – Efeito da distância do local de ensaio em relação ao túnel, medido pelo SPTT

Foram feitas também comparações entre N (no. golpes do amostrador) e T (torque máximo aplicado) para ambos os locais A e B, respectivamente denominados de ensaios SPT AC e BC na Figura 15. Ambos relativos somente à época chuvosa C.

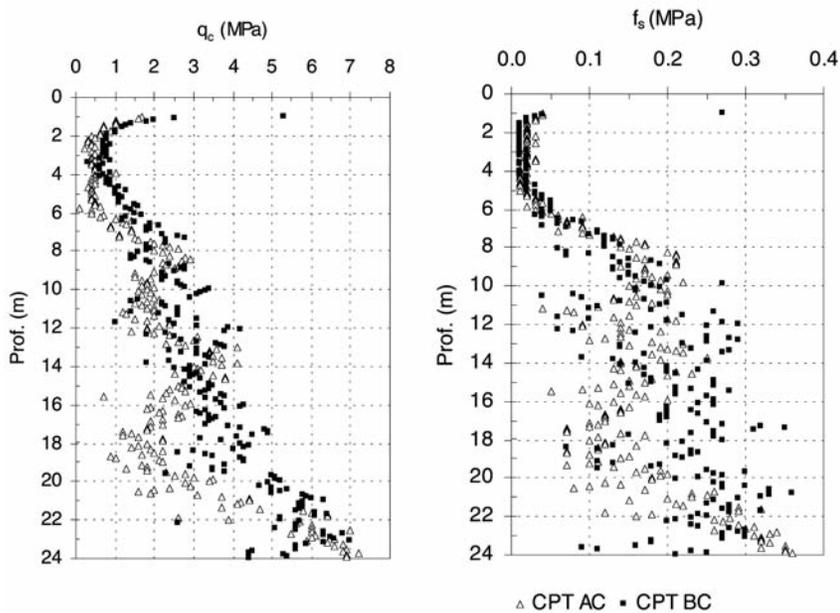


Fig. 14 – Comparação de dados primários do CPT em diferentes locais.

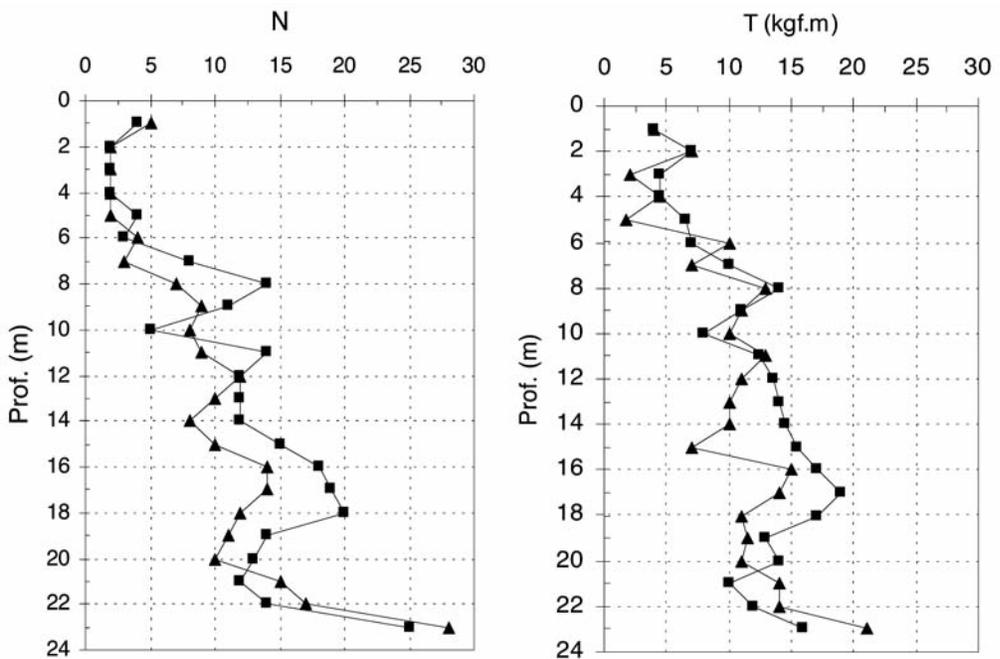


Fig. 15 – Comparação de dados primários do SPT em diferentes locais.

Estas análises também indicam que a escavação do túnel causou relevantes alterações no perfil de solo do Local A, porém tais alterações puderam somente ser observadas na camada III, onde se percebe que os valores de  $N$  e  $T$  no Local A entre as profundidades de 12 a 21 m de profundidade são menores do que os do Local B. O decréscimo percentual no valor médio de  $N$  foi de 31% enquanto que no valor

de T foi de 27%, aproximadamente. Assim, constata-se novamente que, pelos motivos já citados, a modificação no estado de tensões do maciço provocou uma queda nos valores de resistência da camada III do Local A. Nota-se no entanto que não há uma nítida diferenciação para as camadas superiores, I e II, e, igualmente ao caso anterior ( $f_s$  do CPT), as variáveis do SPT não parecem ser muito sensíveis à mudança do nível de tensões horizontal no solo, com exceção da camada onde isto ocorreu de forma bem mais pronunciada. De fato as características dinâmicas e destrutivas deste ensaio não são indicadas para este tipo de avaliação, embora uma tendência tenha sido constatado na camada III.

## 5.2 – Análise dos dados primários quanto à sazonalidade

### 5.2.1 – Efeito de sazonalidade medida pelo DMT

A avaliação dos dados dilatométricos em relação aos efeitos de sazonalidade, ou de influência da umidade natural (leia-se também sucção) ao longo da profundidade, se realizou com base em perfis de  $p_0$  (e  $p_1$ ) comparado nas épocas seca versus chuvosa, respectivamente para os locais A e B. A Figura 16 apresenta estes resultados, enquanto que na Figura 17 são plotados os teores de umidade natural ao longo da profundidade para ambos os locais, na época chuvosa e seca.

Da Figura 17 se observa que, com exceção da camada de solo relativa à parte intermediária e inferior do Local B (profundidades abaixo de 8 m), há uma tendência de umidades maiores na época chuvosa em relação à época seca. No Local A, por exemplo, esta tendência é bem nítida, com diferenças de até 7% (a 4 m) nas umidades. Desta forma se espera, de antemão, que os resultados do Local A mostrem mais claramente as tendências de valores superiores das variáveis do DMT na época de seca (face à maior sucção) em relação à chuvosa, para mesma profundidade. No entanto, conforme a Figura 16, esta clara tendência não se observa, para nenhum dos locais. Por exemplo, no Local A os valores de  $p_0$  e  $p_1$  só se materializam superiores na época de seca dos 8 aos 18 m de profundidade, enquanto no restante do perfil a tendência é inexistente ou inversa (valores de seca inferiores aos da época chuvosa). Igualmente, no Local B é clara a tendência de valores de  $p_0$  e  $p_1$  na época de seca serem inferiores aos da chuvosa, para profundidades abaixo dos 15 m.

Pode-se então especular que as diferenças encontradas, não esperadas, são advindas da pequena variação de umidade de uma estação a outra (em particular para o Local B) e/ou diferenças estratigráficas do solo nos pontos exatos de realização dos ensaios para o mesmo local. Ou seja, os ensaios de cada local distaram entre si em até 10 m, o que pode também ter influenciado as diferenças.

De qualquer modo, com base nos resultados apresentados, conclui-se que a sazonalidade não provocou variações significativas nos resultados do DMT, que indicassem qualquer tendência de aumento ou diminuição das variáveis deste ensaio com a época do ano.

### 5.2.2 – Efeito de sazonalidade medida pelo SPTT

Foram feitas também comparações entre N para ambos os locais A e B, respectivamente nas épocas chuvosa (SPT AC e BC) e seca (SPT AS e BS). Estes resultados são expressos na Figura 18.

Igualmente ao caso anterior observa-se que de forma geral não existem diferenças representativas entre os resultados obtidos nas estações seca e chuvosa para ambos os locais, embora, para o Local A, possa-se notar uma pequena tendência de valores superiores de N para a época seca em várias profundidades.

Prevalece, no entanto, a mesma conclusão do subitem anterior, que expressa a falta de correspondência ou tendências entre os resultados de campo e a época do ano em que os mesmos foram executados.

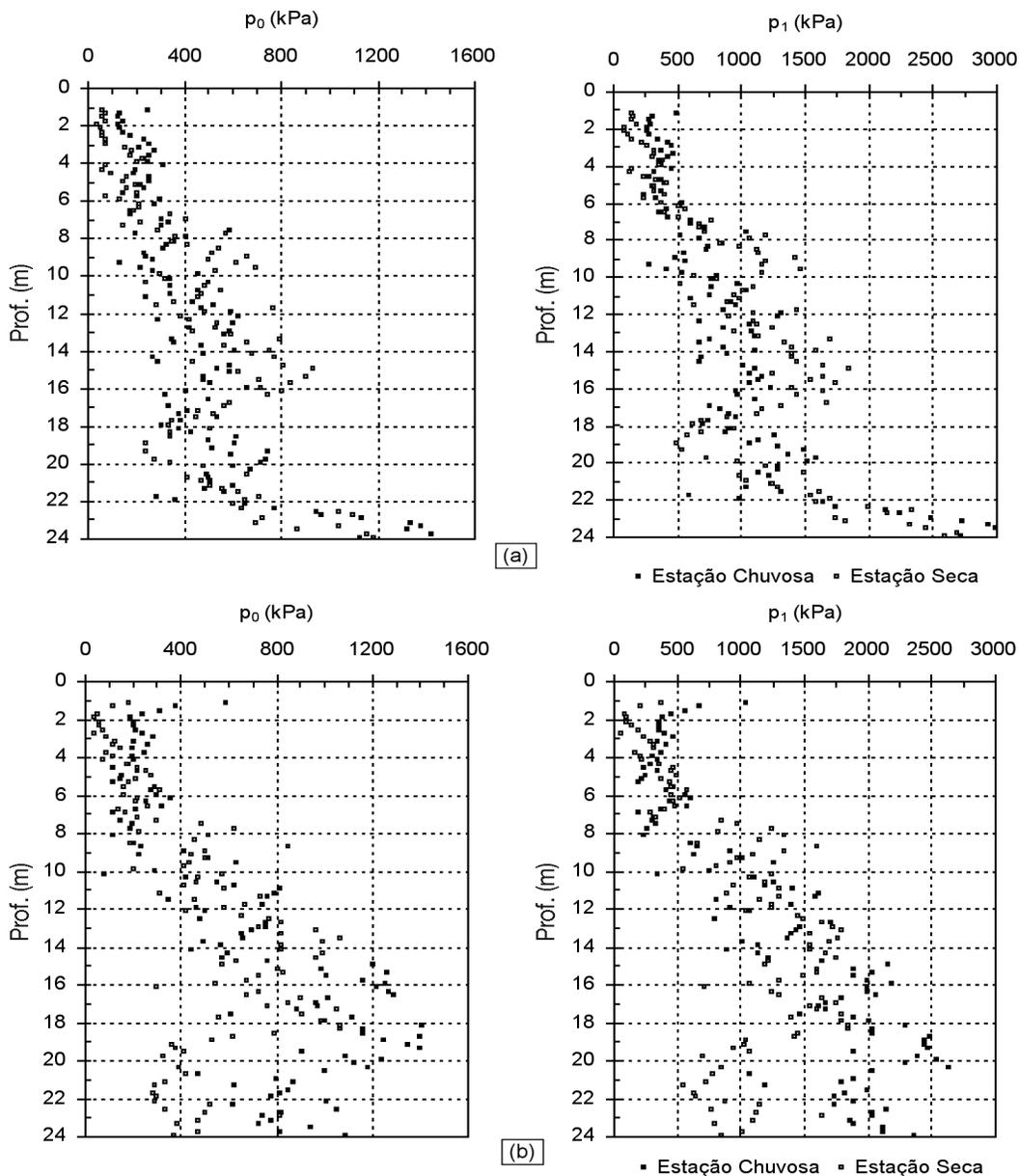


Fig. 16 – Comparação de dados primários do DMT em diferentes épocas do ano para o (a) Local A e (b) Local B.

### 5.3 – Análise dos dados secundários (parâmetros geotécnicos) quanto à modificação do estado de tensões

Com base no conhecimento adquirido e discutido anteriormente, este item tratará somente da influência da modificação do estado de tensões, pela escavação do túnel, nos parâmetros geotécnicos oriundos dos ensaios de campo considerados. Estes foram determinados por formulações empíricas bem conhecidas e usualmente empregadas nestes ensaios, tendo sido avaliados “por camada”, ou seja, para cada uma das

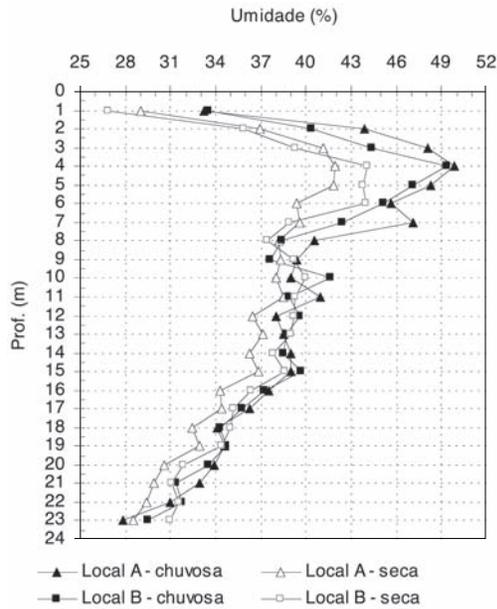


Fig. 17 – Comparação de úmidades para os locais A e B em ambas as épocas do ano.

camadas especificadas na Figura 12 são apresentados os valores médios relativos aos locais A e B. Estes valores são relativos à época chuvosa. Vale novamente lembrar que a camada II foi a que apresentou, anteriormente, a menor influência do estado de tensões nos dados originais, primários, dos ensaios de campo.

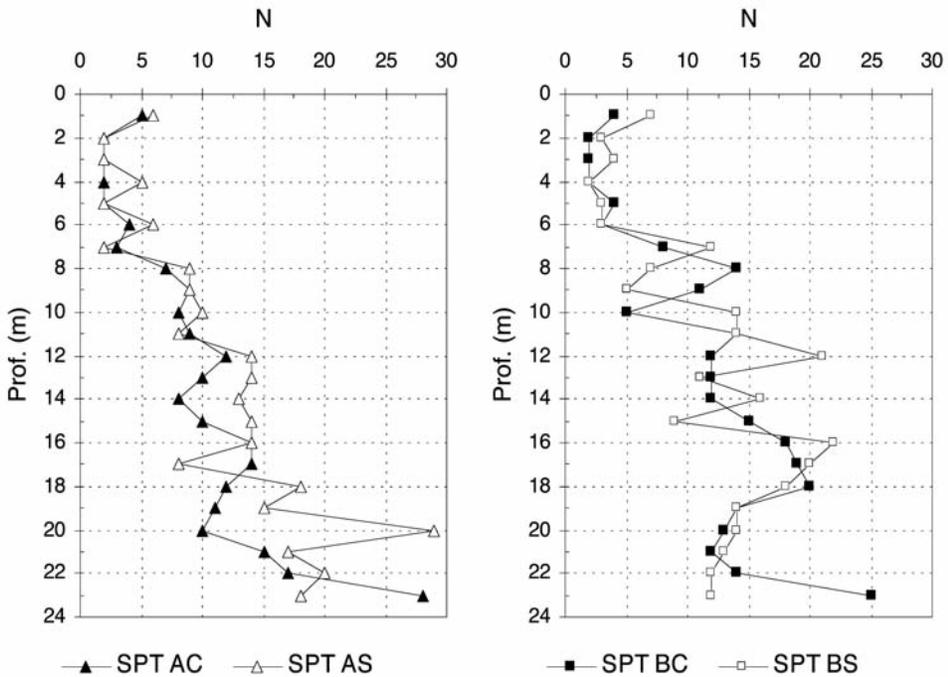


Fig. 18 – Comparação de dados primários do SPT para ambos os locais em diferentes épocas do ano.

### 5.3.1 – Efeito da modificação do estado de tensões nos parâmetros interpretados pelo DMT

Os parâmetros geotécnicos do DMT são obtidos por meio dos parâmetros intermediários  $I_D$ ,  $K_D$  e  $E_D$  (Marchetti, 1980) que por sua vez são função dos valores de pressão  $p_0$  e  $p_1$  obtidos no ensaio. Dessa forma, o comportamento de  $p_0$  e  $p_1$  observados nas figuras anteriores pode vir a se refletir nos parâmetros intermediários, e, por sua vez, nos geotécnicos. De forma a avaliar este aspecto, e suas implicações no projeto (que geralmente é feito com base em premissas de ensaios em locais tipo “B”, sem a influência da escavação do túnel), é que foram realizadas as análises do presente subitem.

Portanto, foram comparados os principais parâmetros oriundos do DMT, a saber:  $K_0$  ou coeficiente de empuxo no repouso e  $M$ , módulo oedométrico. Em ambos os casos se usaram os resultados da expansão 3, por ter sido esta a mais sensível à variação do estado de tensões de um local ao outro, como já comentado. Note que, como comentado no parágrafo anterior, as correlações existentes para estes parâmetros supõe que o solo esteja livre de influência externa (locais tipo “B”), daí denominar o empuxo obtido de “no repouso”, ou  $K_0$ . Entretanto, para o Local A o empuxo obtido da correlação não será, estritamente, “no repouso”, visto que esta região está afetada pela construção do túnel. De forma a manter coerência com a correlação proposta, será mantido aqui o coeficiente obtido no Local A como sendo  $K_0$ , apesar da afirmativa anterior.

Logo, para a obtenção de  $K_0$  foi utilizada a correlação sugerida por Lunne *et al.*, (1990) aplicada às argilas de formação jovem, que se dá primordialmente como função de  $K_D$ . Estas comparações são apresentadas na Figura 19 onde se percebe que, igualmente ao caso dos dados primários, as diferenças nos valores de  $K_0$  ocorreram de forma mais acentuadas na camada superficial e inferior do perfil. Nota-se novamente que a camada intermediária, II, sofreu pouca influência da escavação.

Em termos percentuais médios pode-se observar que, na camada I, o valor de  $K_0$  sofreu uma redução de 24% do Local B para o A. Já na camada III a redução foi de quase o dobro deste valor, ou seja de 50%. Na camada II esta redução foi de apenas 5%. Embora altos, estes valores são significativamente inferiores à variação média dos dados primários  $p_0$  e  $p_1$  observada no subitem 5.1.2, e refletem uma certa “atenuação” da influência das tensões horizontais em função de correlações empíricas que são originadas do uso combinado dos parâmetros  $p_0$  e  $p_1$ , entre outros.

Já o módulo oedométrico  $M$  foi obtido pela equação original sugerida por Marchetti (1980), em função de  $E_D$  e do coeficiente  $R_m$ , que por sua vez é dado como função de  $I_D$  e  $K_D$ . Foram considerados os mesmos locais e camadas anteriores. A mesma Figura 19 apresenta os resultados,

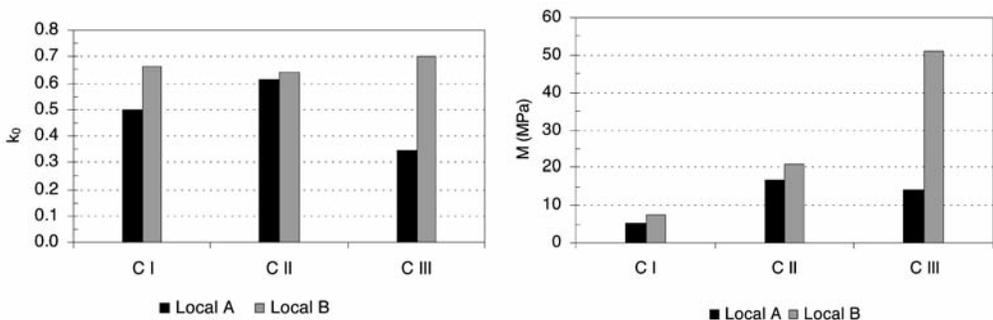


Fig. 19 – Comparação de parâmetros geotécnicos do DMT para ambos os locais A e B.

donde se observa que, percentualmente, as variações são superiores às encontradas para o valor de  $K_0$ . Por exemplo, na camada I o valor de  $M$  sofreu uma redução de 30% do Local B para o A. Na camada II esta redução foi de 20% enquanto que na III, a mais afetada, a redução se situou na faixa dos 72%. Ou seja, similar à variação média dos dados primários  $p_0$  e  $p_1$  expressa no subitem 5.1.2, indicando que, em termos de  $M$ , nenhuma “atenuação” da influência das tensões horizontais neste parâmetro foi encontrada.

### 5.3.2 – Efeito da modificação do estado de tensões nos parâmetros interpretados pelo CPT

Igualmente ao caso anterior as comparações serão feitas por camada e considerando os valores médios para os locais A e B, na época chuvosa. No caso do CPT os parâmetros geotécnicos são obtidos por correlações que fazem uso do valor de  $q_c$  e  $f_s$ . Portanto, foram comparados os principais parâmetros oriundos do CPT, a saber:  $\phi'$  ou ângulo de atrito e  $E_{25}$ , módulo de Young equivalente a um nível de tensão de 25 % do valor de ruptura do solo em um ensaio triaxial.

Para a obtenção de  $\phi'$  foi utilizada a correlação sugerida por Robertson e Campanella (1983) que faz uso primordialmente do  $q_c$ . Estas comparações são apresentadas na Figura 20 onde se percebe que, como no caso anterior e nos dados primários, as diferenças ocorreram de forma mais acentuadas na camada superficial e inferior do perfil. Nota-se novamente que a camada intermediária, II, sofreu pouca influência da escavação.

Em termos percentuais médios pode-se observar que, na camada I, o valor de  $\phi'$  sofreu uma redução de 7% do Local B para o A. Já na camada III a redução foi de 10% enquanto que na camada II esta redução foi de apenas 2%. Estes valores são significativamente inferiores à variação média dos dados primários  $q_c$  e  $f_s$  observada no subitem 5.1.3.

Já o módulo de Young  $E_{25}$  foi obtido pela equação original sugerida por Robertson e Campanella (1988), que adota um coeficiente  $\alpha$  (assumido em 1,5) e o parâmetro  $q_c$ . A Figura 20 também traz esta comparação, donde se observa que, percentualmente, as variações são superiores às encontradas para o valor de  $\phi'$ . Ou seja, na camada I o valor de  $E_{25}$  sofreu uma redução de 41% do Local B para o A. Na camada II esta redução foi de 10% enquanto que na camada III a redução também se situou na faixa dos 41%. Ou seja, similar à variação média do  $q_c$  expressa no subitem 5.1.3.

Pelas análises anteriores conclui-se que os principais parâmetros geotécnicos da deformabilidade do solo,  $M$  e  $E_{25}$ , respectivamente oriundos do DMT e CPT, sofrem influência da variação de tensões horizontais pela escavação do túnel de maneira similar àquela encontrada para os dados primários destes ensaios medidos em campo.

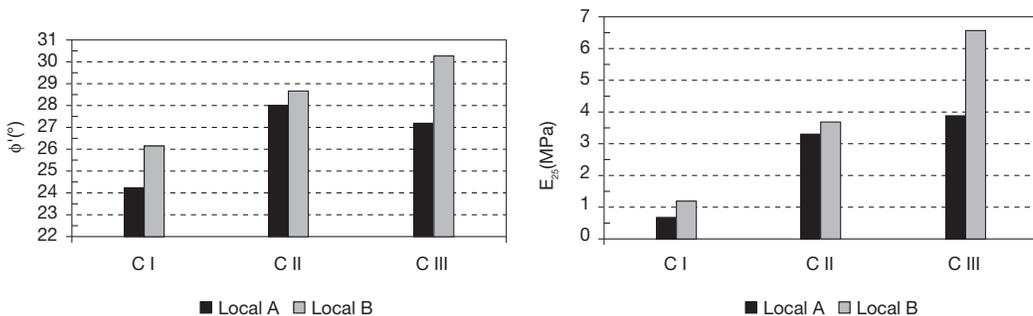


Fig. 20 – Comparação de parâmetros geotécnicos do CPT para ambos os locais A e B.

## 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou a discussão do efeito isolado e simultâneo de variações no estado de tensão e umidade natural (ou sucção) do solo nos dados originais e parâmetros previsíveis de ensaios de campo tipo SPTT, DMT e CPT. Ensaios em dois locais distintos (A e B) e em diferentes épocas do ano (seca e chuvosa) foram usados para este fim. As interferências geradas foram oriundas do processo de colapso superficial do solo poroso de Brasília, por influência da relaxação de tensões causada pela escavação de um túnel nesta cidade conjugada (ou não) ao simultâneo aumento da umidade do solo.

As análises se dividiram em tipos de ensaios, épocas do ano e efeito da escavação do túnel, efeito este estudado em termos de modificação dos parâmetros primários e secundários (geotécnicos) oriundos destes ensaios, e, particularmente para o DMT, em termos de anisotropia de tensões induzidas. Esta última análise foi conseguida com ensaios dilatométricos em que se variou a direção da membrana metálica, em relação ao eixo longitudinal do túnel.

Com base nas discussões anteriormente apresentadas, observam-se as seguintes considerações finais:

- Puderam ser notadas três camadas distintas, de influência variável, ao longo do solo circundante ao túnel. Estas por sua vez sofreram influência distinta, ao longo da profundidade, do efeito de relaxação de tensões e colapso do solo. A camada superficial sofreu ambos os efeitos, embora acredita-se que o efeito do colapso tenha sido o preponderante, já a inferior foi bastante afetada pela relaxação de tensões causada pela presença do túnel. A camada intermediária, acima do teto do túnel, sofreu pouca influência (embora esta tenha sido notada) de ambos fenômenos;
- Os efeitos citados anteriormente não se mostraram evidentes em local distante do eixo do túnel (Local B), provavelmente pela distância acentuada (7,5 diâmetros) deste. Isto contribui para a afirmativa de que o Local B é isento dos efeitos de relaxação e anisotropia de tensões induzidas pelo túnel;
- A influência da relaxação anisotrópica de tensões do solo ao redor do túnel pôde ser notada e medida pelo DMT. Este fenômeno se deu de forma mais evidente na camada inferior, embora tenha sido também notado na camada superior. Nesta última acredita-se, como no caso anterior, que o colapso do solo teve influência nas tensões horizontais anisotrópicas pós construção do túnel ao nível da superfície do terreno. Este aspecto, no entanto, necessita de maiores estudos;
- Estas camadas sofreram diferentemente a influência da relaxação de tensões originada pelo túnel, quando se compararam os resultados dos ensaios de campo em local isento destes efeitos (B) com o local próximo ao túnel (A). Em termos dos parâmetros primários, originais dos ensaios de campo, notou-se uma grande redução das variáveis dos locais B para o A, em especial para a camada inferior, mais próxima ao túnel. Para a camada superior este efeito também se fez notar, embora em magnitude muito inferior à redução encontrada na camada inferior. Na camada intermediária também se notou a influência da relaxação de tensões, embora em pequeno percentual quando comparado à influência das duas camadas previamente citadas. Estas influências só puderam ser claramente detectadas na época chuvosa, visto que, na época seca, não houve uma perceptível tendência dos dados de um local ao outro. Atribuiu-se este aspecto, como comentado no artigo, principalmente à influência da sucção do solo nos parâmetros primários dos ensaios, influência esta que está intimamente relacionada ao grau de umidade do mesmo nas diferentes épocas sazonais. Em suma, o efeito da sucção “mascarou” o respectivo da relaxação de tensões na época seca;

- A “sensibilidade” de medição, ou percepção, dos efeitos da relaxação de tensões horizontais de um local a outro é função da capacidade de medição e características dos ensaios de campo empregados. Por exemplo, observou-se que dos distintos equipamentos empregados o DMT (valores  $p_0$  e  $p_1$ ) teve sensibilidade superior ao CPT ( $q_c$  e  $f_s$ ), que, por sua vez, teve comportamento de previsão do fenômeno de campo superior ao comportamento do SPT (N e T). Dessas três ferramentas, observou-se que o SPT pôde somente observar o fenômeno da relaxação de tensões na camada mais influenciada (III), e que, de todas as variáveis testadas, o  $f_s$  (atrito lateral) do cone foi a que menos sensibilidade mostrou a este fenômeno na área em estudo;
- O efeito da sazonalidade nos parâmetros primários dos ensaios de campo não se mostrou claro, em outras palavras, este efeito não provocou variações significativas e uma tendência de comportamento nos resultados dos ensaios empregados. Isto se deve, provavelmente, a pouca variação de umidade do solo ao longo da profundidade de uma época a outra do ano, e a efeitos de variação estratigráfica, que, embora não sejam mensuráveis diretamente, também influenciaram os resultados obtidos em uma mesma época e local. Com base nesta consideração pode se concluir, preliminarmente, que ensaios de campo em diferentes épocas de ano podem ser empregados para geração de dados úteis a projetos de túneis em solos tropicais (e clima) como o estudado;
- O efeito da diferenciada (ao longo das camadas) relaxação de tensões do solo pela execução do túnel, e do colapso do solo (ao longo da camada superficial) também influencia os parâmetros secundários, geotécnicos, empiricamente interpretados com os dados oriundos dos ensaios de campo avaliados. Na condição mais crítica medida na época chuvosa com o DMT (ou seja, “pior situação de campo”), observaram-se quedas de até 70% no valor médio do módulo oedométrico M em relação ao solo “virgem”, não influenciado (Local B), na camada mais afetada (III). Esta queda se situou na ordem de 50% para o valor do coeficiente de empuxo “no repouso”  $K_0$ , para esta mesma camada. Nas camadas intermediária e superior também houve redução deste parâmetro em função do efeito de relaxação de tensões, embora de menor monta (abaixo de 30%) que os valores citados anteriormente. Já para o CPT observou-se quedas de até 40% no valor médio do módulo de Young  $E_{25}$  na camada mais afetada. Esta queda se situou na faixa dos 10%, nesta camada, para o ângulo de atrito  $\phi'$ . Nas demais camadas, superior e intermediária, também se notaram quedas nos valores interpretados pelo CPT, embora de percentagem inferior ao que já foi acima relatado respectivamente para os valores de  $E_{25}$  e  $\phi'$ . Pelas presentes análises deste item se conclui que os principais parâmetros geotécnicos da deformabilidade do solo, M e  $E_{25}$ , respectivamente oriundos do DMT e CPT, sofrem influência da variação de tensões horizontais pela excavação do túnel, que deve ser considerada, de alguma forma, em projetos desta natureza para solos similares ao estudado.
- Finalmente conclui-se, com base em tudo o que foi abordado, que a programação de ensaios para o projeto de túneis escavados em solos porosos tropicais, como o em questão, e possivelmente em outros solos também, deverá sempre que possível levar em conta uma fase posterior de ensaios pós execução da obra, donde se avaliem as premissas iniciais de parâmetros e de projeto do túnel. Ao acoplar esta “re-avaliação” com medições internas e externas (instrumentação) da obra, é possível que seja gerado conhecimento suficiente para elaboração de projetos de túneis melhor adaptados e mais seguros nestes solos.

## 7 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisas e Desenvolvimento do Brasil, CNPq, à Capes, à Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal (FCT), ao Metrô de Brasília,

às empresas WRJ e Embre Engenharia Ltda., e aos técnicos dos laboratórios da Universidade de Brasília e de Coimbra. O terceiro autor adicionalmente agradece o fornecimento da bolsa de doutoramento SFRF/BD/4862/2001, no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio de Portugal. Os autores finalmente agradecem a ajuda do aluno Ary Franck na elaboração de algumas figuras em “CAD” apresentadas no presente artigo.

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blanco, S.B. (1995). *Aspectos de Geologia de Engenharia. Escavação do Metrô de Brasília. Dissertação de Mestrado*. Publicação G.DM 018/95, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 92 p.
- Brasmetrô (1992). *Estudos de Alternativas de Execução dos Trechos Subterrâneos do Metrô-DF na Asa Sul do Plano Piloto*. Consórcio Brasmetrô/Metrô/DF, Brasília, DF, 45 p.
- Cardoso, F.B.F. (1995). *Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-026A/95, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 142 p.
- Cunha, R.P., Assis, A.P., Santos, C.R.B. e Marques, F.E.R. (2006). *Influence of stress state and seasonal variability in a DMT campaign for a tunnel project in a porous tropical Brazilian clay*. 2<sup>nd</sup>. Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington, Vol. 1, pp. 76-83.
- Freitas-Silva, F.H. e Campos, J.E.G. (1998). *Geologia do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico do Distrito Federal*, Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G. (eds.). UnB/IEMA, Brasília-DF, Parte I, pp. 1-86.
- Lunne, T., Powell, J.J.M., Hauge, E.A., Uglow, I.M. e Mokkalbost, K.H. (1990). *Correlation of Dilatometer Readings to Lateral Stress*. 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, USA.
- Marchetti, S. (1980). *In Situ Tests by Flat Dilatometer*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 106(GT3), pp. 299-321.
- Marques, F.E.R. (2006). *Comportamento de Túneis Superficiais Escavados em Solos Porosos – O Caso do Metrô de Brasília/DF*. Tese de Doutorado na especialidade de Geotecnia e Fundações, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Marques, F.E.R., Almeida e Sousa, J., Santos, C.B., Assis, A.P. e Cunha, R.P. (2004). *In-situ geotechnical characterisation of the Brasília porous clay*. International Site Characterization – ISC’2, Porto, vol. 2, pp. 1301-1309.
- Mortari, D. (1994). *Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-010A/94, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 200 p.
- Mota, N.M.B., 2003. *Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação*. Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, Publicação G.TD – 013A/03, 336 p.
- Novaes Pinto, M. (1993). *Caracterização Geomorfológica do Distrito Federal - Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectiva*. Ed. Universidade de Brasília, Brasília, 681 p.
- Ortigão, J.A.R. (1994). *O Túnel do Metrô de Brasília - Propriedades Geotécnicas e o Comportamento da Obra*. Monografia de concurso de Professor Titular de Mecânica dos Solos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 116 p.

- Robertson, P.K. e Campanella, R.G. (1983). *Interpretation of cone penetrometer test, Part I: Sand*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 20, no. 4, pp. 718-733.
- Robertson, P.K. e Campanella, R.G. (1988). *Guidelines for using the CPT, CPTU, and Marchetti DMT for geotechnical design*. FHWA-PA-87-023-84-24, Washington, USA.
- Santos, C.R.B. (2003). *Influência da modificação do estado de tensões e da sazonalidade nos parâmetros geotécnicos oriundos de ensaios de campo na argila porosa de Brasília*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-116A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília- DF, 118 p.

## NOMENCLATURA

- H = Distância do teto do túnel ao terreno superficial;
- D = Diâmetro do túnel;
- W = Semi-largura da bacia de recalque;
- i = Distância do ponto de inflexão da bacia de recalque;
- $S_{s\text{ máx}}$  = Inflexão máxima da bacia de recalque;
- $p_0$  = Pressão A, corrigida para a rigidez da membrana, do ensaio dilatométrico;
- $p_1$  = Pressão B, corrigida para a rigidez da membrana do ensaio dilatométrico;
- $q_c$  = Resistência de ponta do ensaio de cone elétrico;
- $f_s$  = Atrito lateral de luva do ensaio de cone elétrico;
- N = Número de golpes do ensaio de penetração standard;
- T = Torque medido no ensaio de penetração standard com torque;
- $I_D$  = Índice de material do ensaio dilatométrico;
- $K_D$  = Índice de tensão horizontal do ensaio dilatométrico;
- $E_D$  = Módulo dilatométrico do ensaio dilatométrico;
- $K_0$  = Coeficiente de empuxo no repouso;
- M = Módulo oedométrico;
- $R_m$  = Variável de correlação do ensaio dilatométrico;
- $\phi'$  = Ângulo de atrito drenado;
- $E_{25}$  = Módulo de Young para nível de tensão de 25% da tensão de ruptura do solo.