

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

ESTIMATIVA DE RECALQUES EM SOLO ARENOSO POR MEIO DO ENSAIO DMT

MARIA CLARA APARECIDA DE SOUZA¹, BRENO PADOVEZI ROCHA²

¹ Discente do Curso Técnico em Edificações Integrado ao Ensino Médio, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Ilha Solteira, clara.aparecida@aluno.ifsp.edu.br.

² Docente do Curso Técnico em Edificações Integrado ao Ensino Médio, IFSP, Câmpus Ilha Solteira, Área: Engenharia Civil/Construção Civil, breno.rocha@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento: 3.01.03.03-7 - Mecânica dos Solos

RESUMO: Qualquer obra civil, ao ser carregada, recalcará, logo a estimativa de recalque deve fazer parte de seu projeto. Nessa estimativa, é necessário o conhecimento do módulo de deformabilidade do solo (Es). No entanto, a sua determinação em solos arenosos é mais complexa, pois a obtenção de amostras indeformadas é uma tarefa complexa. Logo, os ensaios de campo, como o Dilatômetro de Marchetti (DMT), são ferramentas interessantes para essa finalidade. Neste sentido, este artigo apresenta e discute resultados de três ensaios DMT realizados em um perfil de areia fina pouco argilosa, localizada no campus experimental da Unesp de Bauru. A partir desses resultados, realizou-se a estimativa de recalque por meio da abordagem elástico-linear tradicional e comparou-se estes resultados com ensaios de prova de carga em placa previamente realizados neste campus experimental a 1,0 e 2,0 m de profundidades. Observou-se que em solos não saturados, há necessidade de se considerar o efeito da sucção na interpretação de ensaios de campo, uma vez que o comportamento mecânico dos solos tropicais não saturados é fortemente influenciado por ela, afetando as previsões de comportamento.

PALAVRAS-CHAVE: Investigação do Subsolo, Ensaio DMT, Solos Arenosos, Estimativa de Recalques.

SETTLEMENTS PREDICTION IN SANDY SOIL BY DMT

ABSTRACT: Any civil engineering project, when loaded, will settle, so the settlement estimate must be part of its design. In this estimation, it is necessary to know the soil's modulus of deformability (Es). However, its determination in sandy soils is more complex, as obtaining undisturbed samples is a complex task. In situ tests, such as the Marchetti Dilatometer (DMT), are interesting tools for this purpose. In this sense, this paper presents and discusses the results of three DMT tests carried out on a profile of fine, slightly clayey sand located on the experimental campus of Unesp in Bauru. Based on these results, settlement was estimated using the traditional elastic-linear approach. These results were compared with plate load tests on this experimental campus at 1.0 and 2.0 m depths. It was observed that in unsaturated soils, there is a need to consider the effect of suction when interpreting field tests, since the mechanical behavior of unsaturated tropical soils is strongly influenced by it, affecting behavior predictions.

KEYWORDS: Site investigation, DMT, Sandy soils, Settlements estimation.

INTRODUÇÃO

A aplicação de um carregamento vertical em uma fundação superficial (sapata) provocará deformações no solo. As deformações ou recalques correspondem ao deslocamento vertical, para baixo, da base do elemento de fundação em relação ao indeformável, sendo resultante basicamente da diminuição de volume ou mudança de forma do maciço (Cintra et al. 2011).

A previsão de recalques em solos arenosos é um procedimento complexo, devido à dificuldade em se obter amostras indeformadas para ensaios de laboratório, além da variação da deformabilidade do

solo com o nível de tensões atuantes. Deste modo, os ensaios de campo, como o ensaio de Dilatômetro de Marchetti (DMT), possuem papel de destaque na definição de parâmetros de deformabilidade em areias, uma vez que, por meio da aplicação de correlações empíricas, é possível definir este parâmetro e conseqüentemente realizar a estimativa do recalque do solo (Rocha et al. 2021a, b; Saab et al., 2023).

O ensaio de prova de carga em placa é um método experimental clássico para a previsão de recalques imediatos em sapatas. De acordo com Décourt e Quaresma Filho (1996), a forma mais adequada para definir as características da curva tensão-recalque, é por meio da realização do ensaio de prova de carga em placa. Entretanto, este ensaio apresenta custo elevado, longo tempo para sua realização e equipamentos especiais para a sua execução, o que torna este procedimento difícil de incorporar na prática da construção civil.

Logo, este artigo avalia o emprego do ensaio DMT na previsão do recalque em solos arenosos, em comparação com recalques medidos em ensaios de prova de carga em placa (PLTs), com diâmetro de 0,805m, realizadas a 1,0 e 2,0 m de profundidade, no campus experimental da Unesp de Bauru.

MATERIAL E MÉTODOS

Ensaio DMT

O DMT, desenvolvido pelo professor Silvano Marchetti (Marchetti 1980), é um ensaio simples, possui alta repetibilidade e seus resultados podem ser correlacionados com o tipo de solo, o coeficiente de empuxo de repouso, a resistência não drenada, ângulo de atrito, a razão de pré-adensamento, módulo de deformabilidade, entre outros. O principal elemento desse ensaio é uma lâmina de aço de 14 mm de espessura, 95 mm de largura e 220 mm de comprimento, com uma membrana de 60 mm de diâmetro posicionada na face dessa lâmina. Os demais componentes do sistema são uma unidade de controle e cabos elétricos e pneumáticos. O layout do ensaio dilatométrico é apresentado na Figura 1.

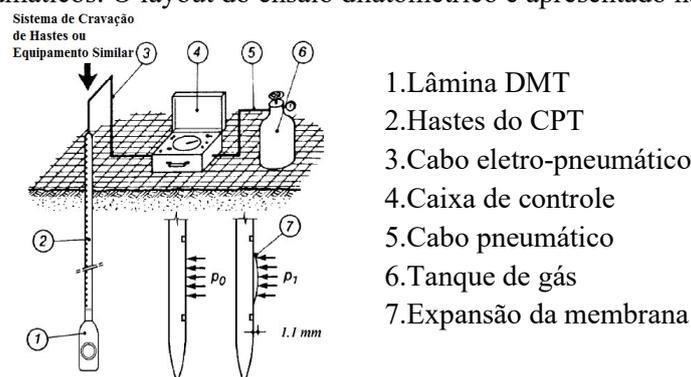


Figura 1: Representação esquemática do ensaio DMT (Marchetti, 1980).

A realização do ensaio DMT consiste na cravação da lâmina em profundidade (tipicamente em intervalos de 200 mm), e determinação das pressões necessárias para deslocar a membrana metálica, de modo que esta perca o contato com o equipamento sensível (denominada leitura A), aquela necessária para provocar um deslocamento de 1,1 mm (leitura B) e a pressão remanescente após a liberação do gás (leitura C). A interpretação do ensaio DMT começa com o cálculo dos três parâmetros intermediários (I_D , K_D e E_D). O índice do material (I_D – Equação 1) é calculado para identificar o tipo de solo. O índice de tensão horizontal (K_D – Equação 2) fornece a base para várias correlações para estimativa de parâmetros. Já o módulo dilatométrico (E_D – Equação 3), deve ser empregado em conjunto com I_D e K_D , devido à falta de informação sobre o histórico de tensões (Marchetti et al., 2001).

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (1)$$

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_v} \quad (2)$$

$$E_D = 34,7 * (p_1 - p_0) \quad (3)$$

em que,

p_0 e p_1 - são as leituras de pressão (A e B) corrigidas pela rigidez da membrana (Marchetti et al., 2001);

u_0 - pressão hidrostática, kPa;

σ'_v - tensão vertical efetiva, kPa.

Estimativa de recalque via DMT

O recalque é estimado via DMT por meio do Módulo Confinado (M_{DMT}), definido como a relação entre a variação da tensão vertical efetiva com deformação axial ($M = \Delta\sigma'_v / \Delta\epsilon$). M_{DMT} é obtido a partir do módulo dilatométrico E_D , empregando a equação 4.

$$M_{DMT} = R_m * E_D \quad (4)$$

R_M é um fator de correção função de I_D e K_D , necessário em função de E_D ser obtido a partir do solo deformado pela penetração da lâmina da direção do carregamento ser horizontal, enquanto M_{DMT} é vertical. Além disso, E_D não apresenta informações sobre o histórico de tensões, sendo este de grande importância na análise de recalques (Massarsch 1994).

O cálculo de recalques por meio do ensaio DMT se baseia na abordagem elástico-linear tradicional (unidirecional), onde os incrementos de tensão ($\Delta\sigma$) são calculados pela teoria da elasticidade (Boussinesq) e o módulo de deformabilidade é determinado pelo ensaio DMT. Marchetti et al. (2001) recomenda o cálculo do recalque de fundações superficiais por meio da equação (5):

$$S_{DMT} = \sum \frac{\Delta\sigma_v}{M_{DMT}} \Delta z \quad (5)$$

em que,

$\Delta\sigma$ - incremento de tensão,

Δz - incremento de profundidade

O incremento de tensão vertical e o módulo confinado determinado pelo ensaio DMT (M_{DMT}) são atribuídos a cada intervalo de cálculo (tipicamente 0,20 m). O cálculo dos recalques a partir do ensaio DMT foi realizado por meio do software desenvolvido por Studio Prof. Marchetti (2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Solo estudado

O campo experimental da Unesp de Bauru está localizado na cidade de Bauru (SP). O solo deste campo consiste em uma areia fina pouco argilosa não saturada, com comportamento laterítico até 13 m de profundidade (Giacheti et al. 1998).

Ensaio DMT

Foram realizados três ensaios DMT no Campo experimental da Unesp de Bauru até a profundidade de 16 m. Assim, foi possível determinar os perfis médios de variação com a profundidade dos parâmetros intermediários (I_D , K_D , E_D) apresentados na Figura 2. Além disso, na Figura 2f, apresentam-se os valores médios de M_{DMT} vs profundidade, parâmetro este empregado na estimativa de recalques por meio do software desenvolvido por Studio Prof. Marchetti (2022).

Prova de Carga em Placa

A determinação da capacidade de carga e estimativa de recalques imediatos em fundações superficiais podem ser realizadas por meio de provas de carga em placa (PLTs). Esse ensaio, que segue a NBR 6489/2019, consiste na instalação de uma placa metálica de 0,805 m de diâmetro, na cota de projeto da base da fundação, e aplicação de carga, em estágios, com medida simultânea de recalques.

Ensaio de prova de carga em placa previamente realizados por Agnelli (1997) (Figura 3) foram empregados para realizar a comparação entre os recalques medidos e os estimados pelo ensaio DMT. Para a estimativa do recalque por meio do ensaio DMT, adotou-se como critério para definição das tensões atuantes as recomendações de Terzaghi e Peck (1967).

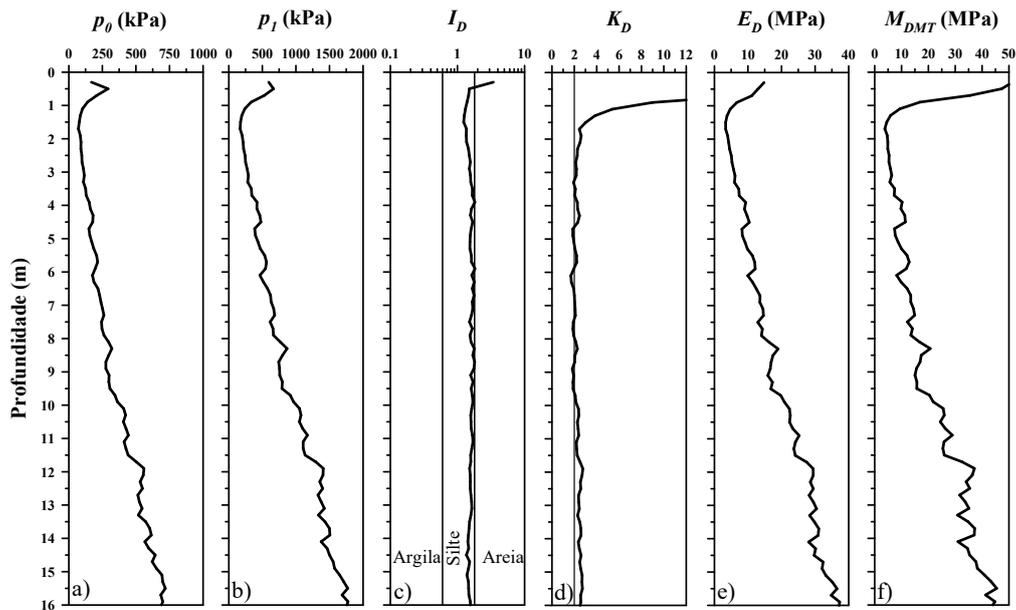


Figura 2: Perfis médios de p_0 , p_1 , I_D , K_D , E_D e M_{DMT} (Fonte: Autor 2024).

Terzaghi e Peck (1967) recomendam que para estruturas comuns (edifícios comerciais e residenciais) em solo arenoso, o recalque total para sapatas não deve ultrapassar 25 mm. Deste modo, este valor será utilizado como recalque admissível (ρ_a). A Tabela 1 apresenta os valores de tensão aplicada nas placas para o valor de recalque admissível.

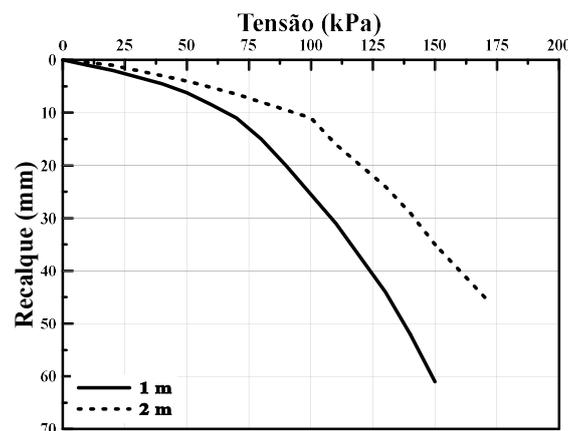


Figura 3: Provas de carga sobre placa em solo natural (Fonte: Agnelli 1997).

Estimativa de recalques

A Tabela 2 apresenta os valores de recalque calculados por meio dos resultados dos ensaios DMT, bem como a relação entre o recalque medido (ρ_{med}) e o recalque calculado (ρ_{DMT}) ($R = \rho_{med}/\rho_{DMT}$). A Figura 4 apresenta os resultados do emprego do programa de cálculo de recalques do DMT, para o cálculo de recalque para uma sapata circular de 0,805 m de diâmetro instalada a 2 m de profundidade. Esse programa permite calcular o incremento de tensão vertical ao longo da profundidade e a correspondente deformação vertical, assim como o recalque total da sapata.

Observando os resultados da Tabela 2, verifica-se que a estimativa do recalque pelo ensaio DMT foi satisfatória apenas para a sapata apoiada a 2 m de profundidade, o qual apresentou R igual a 1,24. Este valor encontra-se dentro do valor médio indicado por Monaco et al. (2006), onde para mais de 40 casos históricos, encontraram um valor médio de R igual 1,3.

As diferenças encontradas para as profundidades podem ser devidas a influência da condição não saturada na medida de p_0 e p_1 do ensaio DMT, e conseqüentemente nos valores dos parâmetros intermediários (I_D , K_D , E_D). Giacheti et al. (2019) apresentam e discutem resultados de ensaios de cone (CPT) neste campus experimental, e constataram a grande influência da sucção nas medidas de

resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) até 4 m de profundidade, concluindo que é necessário considerar o efeito da sucção que atua na época do ano que o ensaio foi realizado.

TABELA 1. Tensões previamente definidas a partir dos recalques admissíveis (Fonte: Autor 2024).

Profundidade (m)	1,0	2,0
ρ_{med} (mm)	25	25
Tensão definida (kPa)	110	140

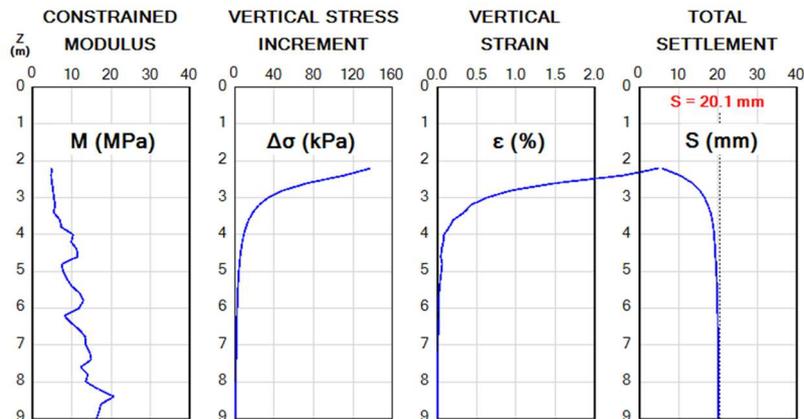


Figura 4: Cálculo de recalques do DMT, para uma sapata circular apoiada a 2 m de profundidade no local estudado (Fonte: Autor 2024).

TABELA 2. Tensões previamente definidas a partir dos recalques admissíveis (Fonte: Autor 2024).

Profundidade (m)	ρ_{DMT} (mm)	R (ρ_{med}/ρ_{DMT})
1,0	15,2	1,64
2,0	20,1	1,24

CONCLUSÕES

A previsão de recalques em solos arenosos é complexa, devido à dificuldade em se obter amostras indeformadas para ensaios de laboratório. O DMT permite determinar o módulo confinado (M_{DMT}) e assim a estimativa do recalque por meio da aplicação da abordagem elástico-linear tradicional.

Os valores de recalque estimados via DMT foram menores que os medidos nas provas de carga em placa. Com o aumento da profundidade, a relação (R) entre o recalque medido (ρ_{med}) e o recalque calculado (ρ_{DMT}) tende a diminuir e que para 2 m de profundidade, esse valor foi de 1,24. As diferenças observadas entre os valores de recalque medidos e estimados pode estar relacionado a condição não saturada (teor de umidade e conseqüentemente da sucção), típica do perfil de solo investigado. Logo, há necessidade de se considerar o efeito da sucção na interpretação de ensaios de campo, uma vez que o comportamento mecânico dos solos tropicais não saturados é fortemente influenciado por ela.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

M.C.A.S. e B.P.R atuaram na redação do trabalho, curadoria e análise dos dados, bem como procederam a metodologia empregada na pesquisa.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pela bolsa de iniciação científica ao ensino médio (PIBIFSP) concedida a primeira autora deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT/NBR – 6489 (2019). **Prova de carga direta sobre terreno de fundação**. 2 p.

AGNELLI, N. (1997). **Comportamento de um Solo Colapsível Inundado com Líquidos de Diferentes Composições Químicas**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 205 p.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. (2011). **Fundações Diretas – Projeto Geotécnico**, 1º ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 140 p.

DÉCOURT, L.; QUARESMA FILHO, A. R. (1996). Estabelecimento das curvas carga – recalque de fundações através de provas de carga em mini placa. In: **III SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA**, 1996, São Paulo. Anais São Paulo. CD-ROM.

GIACHETI, H. L.; BEZERRA, R. C.; ROCHA, B. P.; RODRIGUES, R. A. Seasonal influence on cone penetration test: An unsaturated soil site example. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, p. 361-368, 2019

GIACHETI, H.; COELHO, V.; CARVALHO, DAVID DE. (1998). Caracterização Geotécnica de Dois Perfis de Solos Tropicais com Base em Ensaios de Laboratório. In: **XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, Brasília/DF. v. 1. p. 195- 202.

MARCHETTI, S. (1980). In Situ Tests by Flat Dilatometer, **ASCE Journal of the Geotechnical Engineering**, V- 106, nº GT3, pp. 299-321. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000934>

MARCHETTI S., MONACO P., TOTANI G. E CALABRESE M. (2001). The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations, TC 16 Report. In: **Proc. International Conference on In situ Measurement of Soil Properties (IN SITU 2001)**, Indonesia, 41 pp.

MASSARSCH, K. R. (1994). Settlement Analysis of Compacted Granular Fill. In: **Proc. XIII ICSMFE**, New Delhi, Vol. 1, p. 325- 328.

MONACO, P.; TOTANI G.; CALABRESE, M. (2006). DMT predicted vs. observed settlements: a review of the available experience. In: **Proc. Second International Conference on the Flat Dilatometer**, Washington D.C., p. 244-252.

ROCHA, B. P. **Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo**. São Carlos, SP: EESC-USP, 272p. 2018.

ROCHA, B. P.; RODRIGUES, R. A.; GIACHETI, H. L. (2021a). The Flat Dilatometer Test in an Unsaturated Tropical Soil Site. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 39, p. 5957-5969, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01849-1>

ROCHA, B. P.; RODRIGUES, A. L. C.; RODRIGUES, R. A.; GIACHETI, H. L. (2021b). Using a Seismic Dilatometer to Identify Collapsible Soils. **International Journal of Civil Engineering**, v. 20, p. 857-867, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00687-9>

SAAB, A. L. RODRIGUES, A. L. C.; ROCHA, B. P.; RODRIGUES, R. A.; GIACHETI, H. L. (2023). Suction Influence on Load-Settlement Curves Predicted by DMT in a Collapsible Sandy Soil. **Sensors**, v. 23, p. 1429-1444, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23031429>

STUDIO PROF. MARCHETTI. **DMT Settlements Software**. V 1.1.2.0. Italy: Studio Prof. Marchetti S.r.l, 2022.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1967) **Soil Mechanics in Engineering Practice**. New York: John Wileyand Sons, 685p.