

Capítulo 20

ENSAIOS DE CAMPO EM SOLOS NÃO SATURADOS

Breno Padovezi Rocha
Roger Augusto Rodrigues
Heraldo Luiz Giacheti

1. INTRODUÇÃO

Os solos não saturados são comuns em várias regiões do mundo, sobretudo em regiões de clima seco e de nítida sazonalidade, a exemplo do clima tropical em que a variabilidade temporal do conteúdo de água nos poros dos solos tende a exercer efeito significativo nas propriedades dos solos.

Na Geotecnia, inúmeras construções têm seu comportamento influenciado pela condição não saturada. Muitos aspectos do comportamento desses solos estão diretamente ligados com balanço de água e energia entre a atmosfera e a Terra, o que determina diversas características do meio, tais como a profundidade do lençol freático e os perfis de pressão na água intersticial médio e sazonal (Blight, 1997).

Nesse aspecto, uma das variáveis de interesse é a sucção matricial no solo (pressão negativa da água intersticial), que contribui para mudanças nas propriedades mecânicas e hidráulica do solo. Assim, mudanças de sucção e umidade dos solos podem ocorrer devido a variações climáticas (Blight, 1997; Blight, 2003; Cui *et al.*, 2005). Alterações na química do meio vão afetar a sucção osmótica, que, embora pouco considerada, pode ser também interveniente das propriedades e comportamento dos solos.

Nos períodos mais secos do ano, os valores da sucção tendem a aumentar, ou seja, o aumento da sucção pode ser observado com a redução da umidade do solo. A profundidade na qual ocorrem mudanças da sucção no solo é conhecida como zona ativa. A zona ativa é comumente definida como a região de flutuação de umidade e sucção de um solo não saturado em que a umidade e a sucção mudam sazonalmente devido às variações climáticas (Fredlund & Rahardjo, 1993; Nelson *et al.*, 2001). A previsão da profundidade da zona ativa e a influência da variação da umidade e da sucção ao longo do tempo são relevantes para os projetos de engenharia. Embora pouco considerada, uma segunda zona de flutuação de umidade se faz, muitas vezes, presentes no perfil de solo, é aquela situada na zona fronteira com o lençol freático. Ela se deve a variações no nível freático, que, por sua vez, provocam alterações na posição da franja capilar.

Nos projetos de engenharia, muitas vezes, mudanças significativas de pressão na água intersticial do solo não são levadas em consideração, como registrado no caso histórico de Pereira Barreto-SP, que, durante e após a construção da UHE de Três Irmãos, o lençol freático sofreu um processo de elevação induzida provocando recalques por colapso em fundações de centenas de edificações localizadas às margens do reservatório hidrelétrico (Rodrigues, 2007; Vilar & Rodrigues, 2011).

Esse caso de Pereira Barreto-SP indica a necessidade de estudos mais detalhados na etapa de investigação geotécnica antes da implantação das obras de engenharia. Importante destacar que o custo de uma investigação geotécnica para fins de projeto de fundações é relativamente baixo quando comparado ao custo final da obra. No caso específico de Pereira Barreto, diversos problemas deflagrados pela elevação do lençol freático poderiam ter sido minimizados, caso medidas tivessem sido tomadas nos projetos de fundações das edificações do município antes da construção da UHE de Três Irmãos.

Para a investigação do subsolo em geotecnia, recomenda-se utilizar um método de ensaio de campo que possibilite definir o perfil do subsolo e estimar os parâmetros mecânicos de cada camada. A partir dessa investigação, se for necessário, identificam-se as camadas críticas e realizam-se ensaios específicos no laboratório ou no próprio campo para a determinação dos parâmetros mecânicos de interesse. Na engenharia de fundações, as investigações são quase sempre realizadas exclusivamente com sondagens SPT. O projeto é geralmente feito segundo uma abordagem direta, correlacionando o comportamento do elemento de fundação com resultados do SPT.

Com efeito, variações dos valores de SPT entre períodos seco e chuvoso, bem como sua relação com as sucções nesses dois períodos têm sido observadas em diversos trabalhos de investigação (Guimarães, 2002; Mascarenha, 2003). Nesse caso, não se trata de variabilidade espacial resultante da história geológica e do ambiente de formação do solo, tampouco da variabilidade decorrente de operadores, equipamentos e metodologias empregadas na execução dos ensaios, mas sim da variabilidade temporal, pois a sucção varia ao longo do tempo em função dos fenômenos meteorológico-atmosféricos, afetando os resultados desses ensaios.

Dentre os ensaios de campo, tem-se os geofísicos, a sondagens de simples reconhecimento com SPT, os ensaios de cone e do piezocone (CPT e CPTu) e o ensaio de dilatômetro plano (DMT), em que as medidas obtidas usualmente são correlacionadas com a resistência e ou a deformabilidade do solo ou diretamente para a previsão do comportamento de elementos de fundações. Destacam-se ainda o ensaio pressiométrico (PMT) e as técnicas híbridas, como o RCPTu, SCPT, SDMT e CPM. Tais ensaios são realizados tanto em solos saturados quanto não saturados, no entanto, o desconhecimento da sucção, na maioria dos casos, não permite uma análise mais detalhada, sendo os resultados nesses solos interpretados a partir de conceitos empíricos e semiempíricos.

Diversas tentativas têm sido feitas com o intuito de aprimorar as técnicas de campo pela introdução de alguma forma de aferir ou estimar a sucção, como estabelecê-la a partir de medidas de umidade subsidiada pela curva de retenção ou de realizar ensaios nos períodos secos e chuvosos do ano e ensaios com inundação do solo, buscando-se medir as variações entre os diferentes casos. Nesses tipos de estudos, as informações meteorológicas, como indicado por Mascarenha (2003) e Rocha (2018), são de grande valia, pois a dinâmica da umidade e, por consequência, ao longo do perfil, é complexa, pois a ques-

tão sazonal interage ao longo do tempo, dentre outros, com questões geomorfológicas de superfície e subsuperfície, com a topografia, a altimétrica, o tipo e estrutura do solo, e o estado de saturação.

As metodologias que incorporam o efeito da condição não saturada para os ensaios de campo em solos ainda não estão suficientemente estabelecidas, porém deve-se destacar que melhoramentos na realização dos ensaios de campo têm sido propostos e a interpretação dos resultados tem tido como base os conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados. Esses aspectos serão discutidos neste capítulo. Não se pode esquecer que os resultados dos ensaios de campo retratam um momento do perfil de solo, e alterações no uso e ocupação do terreno podem levar a comportamentos distintos dos obtidos, mas esses resultados poderão justificar a necessidade de estudos complementares em análises de riscos. Por exemplo, o SPT pode avaliar mal o comportamento de um manto de solo poroso colapsível; outra técnica menos destrutiva da estrutura do solo pode avaliar melhor o comportamento do solo, mas o uso integrado das duas técnicas pode ser relevante na definição da possibilidade de ocorrência de colapso devido a infiltrações de águas pluviais ou servidas. Em se tratando de águas servidas, os colapsos poderão ocorrer em consequência de variações na sucção total (matricial e osmótica).

2. INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

A investigação do subsolo é o processo pelo qual são obtidas informações geológicas, geotécnicas e outros dados relevantes que possam afetar a construção ou o desempenho de obras civis (Clayton *et al.*, 1995). Campanella e Howie (2005) destacam que a investigação do subsolo requer que sejam determinados os seguintes aspectos:

- Estratigrafia;
- Parâmetros hidrogeológicos;
- Parâmetros geotécnicos;
- Características geomecânicas e biológicas do solo e do fluido presente nos vazios.

Segundo esses autores, todos são necessários em uma investigação geoambiental, mas apenas os três primeiros são necessários para a maioria dos projetos geotécnicos. Cabe destacar, porém, a relevância, quando se estudam perfis de solos, de se acrescentar ao quarto aspecto as características químicas do fluido quando o local de estudos passou ou passará por processo de contaminação. Esses mesmos autores também destacam que, na prática, apenas sondagens a trado, às vezes com SPT e amostragem, são empregadas no processo de investigação. Em muitas situações, faz-se uma avaliação deficiente da estratigrafia, sem qualquer informação útil dos parâmetros hidrogeológicos. Os parâmetros geomecânicos de projeto são, em geral, estimados por meio de correlações empíricas a partir de poucos valores do índice de resistência a penetração do SPT (N). As amostras deformadas coletadas durante as sondagens SPT fornecem material para obter informação da composição granulométrica e da plasticidade, cabendo destacar que o nível de deformação imposto ao solo pela cravação do amostrador SPT limita, mas não impede nem invalida uma avaliação das características genéticas do perfil de evolução do solo, permitindo inclusive orientação de camadas, o que pode ser de grande relevância em projetos como os de fundações e análises de estabilidade de taludes, especialmente em solos tropicais.

Dentro deste contexto, é importante enfatizar que um bom programa de investigação do subsolo para aplicação em obras civis deve ser realizado com a finalidade de se definir a estratigrafia, o que inclui identificar as camadas com as mesmas características, suas espessuras, os diferentes tipos de solos que as compõe, bem como a posição do nível de água. Os parâmetros mecânicos e hidrogeológicos de cada uma das camadas de interesse devem ser determinados por meio de correlações na primeira fase da investigação, sendo relevantes suas confirmações por meio de experiência local consolidada, embora sempre passíveis de serem revistas ou por resultados de ensaios de laboratório ou outros ensaios de campo.

É importante destacar que a interpretação dos resultados de uma campanha de investigação deve fornecer a visualização tridimensional do subsolo com o intuito de identificar uma possível continuidade lateral dessas camadas, mas também objetivando definir a geomorfologia de subsuperfície, que assume grande relevância na distribuição de umidade e fluxo, tão relevante quando se estudam as propriedades e os comportamento hidráulico e mecânico dos solos, indo do estado não saturado ao saturado. Assim, o conhecimento do histórico dos processos geológicos que atuaram na formação de solos e rochas é fundamental para a interpretação da estratigrafia, conforme destaca De Mio e Giacheti (2007), mas lembrando que, em uma obra de engenharia, uma análise estratigráfica e de perfil de alteração requer, muitas vezes, um estudo mais detalhado. Em solos altamente homogêneos ou em regiões de camadas sedimentares com continuidade lateral, essa interpretação é feita interligando-se pontos similares e extrapolando-se os dados de sondagens para as regiões situadas entre eles. Quando há uma heterogeneidade considerável, indicada pelas características muito distintas do solo entre as sondagens, essa interpretação é mais complexa (De Mio *et al.*, 2010), mas, muitas vezes, ela assume grande relevância, pois a heterogeneidade pode estar refletindo as características da rocha e do solo formado. Nos perfis de intemperismo tropicais, ela pode ainda estar refletindo a presença de uma camada em processo de intemperização entre o solo pouco e muito intemperizado.

Nas regiões de clima tropical e subtropical, características, propriedades e comportamentos dos solos estão relacionados ao grau de intemperização dos minerais, à pedogênese, à morfogênese e às lixiviações físico-químicas e neoformações de minerais (Lima, 2003; Senaha, 2019). Nas situações em que não exista continuidade lateral, o termo “camada” deve ser utilizado com restrições, sendo mais adequado tratá-lo como horizonte, conforme discute De Mio (2005). De Mio *et al.* (2010) enfatizam que a interpretação da distribuição espacial dos materiais, considerando-se a história geológica e a possibilidade de variações bruscas em função de estruturas herdadas de rochas mãe, em perfis de solos residuais deve ser feita com cautela.

3. TÉCNICAS DE ENSAIOS DE CAMPO

3.1 Geofísica

O conhecimento da distribuição espacial dos materiais geológicos é relevante na investigação do subsolo, assim como de suas propriedades. A geofísica é um recurso importante para essa finalidade, uma vez que possibilita a aquisição e interpretação de dados

instrumentais a partir da superfície do terreno, por meio de métodos não invasivos ou não destrutivos. O uso de ensaios geofísicos pode permitir não só uma estimativa preliminar dessa distribuição espacial, da posição do nível freático e do topo rochoso, como auxiliar na definição da geomorfologia de subsuperfície e na escolha dos locais de ensaios intrusivos. Eles também podem ser empregados para identificarem interferências subterrâneas e de fontes de contaminação ou ainda na avaliação do maciço entre pontos de sondagem já realizadas, sendo o emprego da geofísica particularmente útil, nesse caso, nos estudos dos leitos rodoviários, onde os pontos de sondagem são relativamente distantes ou podem ter o espaçamento otimizado.

Há diversos métodos geofísicos que podem ser utilizados na investigação do subsolo para aplicação em problemas de geotecnia e de meio ambiente. Dentre eles, destacam-se os sísmicos, mais aplicados a geotecnia, e os geoeletricos, em problemas ambientais.

Os métodos sísmicos (refração, reflexão, ondas de superfície e em furos de sondagens) utilizam a velocidade de propagação de ondas elásticas através do meio investigado, geradas artificialmente na superfície ou dentro de furos de sondagem. Em interfaces nas quais a densidade ou velocidade sísmica sofre mudanças, as ondas sísmicas sofrem os fenômenos de difração, refração ou reflexão. As ondas percorrem o meio geológico e sofrem os fenômenos citados e, em seguida, retornam à superfície, onde são captadas em sensores denominados geofones. Os sinais captados pelos geofones são transformados em registros sísmicos nos sismógrafos, cuja análise possibilita obter informações sobre os materiais geológicos.

Os métodos geoeletricos de prospecção geofísica (eletroresistividade, eletromagnético indutivo e georadar) utilizam parâmetros elétricos dos solos e das rochas, como condutividade, resistividade, potencial espontâneo, polarização, campo eletromagnético, para investigar o subsolo. Os valores numéricos e a interpretação da variação destes possibilitam obter informações sobre os materiais que compõem o subsolo. Tais métodos se destacam para aplicação na investigação de áreas contaminadas com o objetivo de identificar o tipo, a quantidade e a formação e a migração de uma possível pluma de contaminação.

3.2 SPT

A Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT, em inglês *Standard Penetration Test*, foi desenvolvida nos Estados Unidos no final da década de 1920 e tem sido utilizada na maioria dos países do mundo. No Brasil, esse ensaio de campo foi introduzido em 1939 (Vargas, 1989) e está estabelecido na prática da engenharia, especialmente em projetos de fundações, devido à sua simplicidade, robustez e grande experiência acumulada.

Nessa sondagem, a perfuração do terreno é feita com um trado ou com a circulação de água, utilizando-se um trépano de lavagem como ferramenta de escavação. Amostras representativas do solo são coletadas a cada metro de profundidade por meio de amostrador padrão de diâmetro externo de 50 mm. O procedimento de ensaio consiste na cravação do amostrador padrão em furo de sondagem (revestido ou não), utilizando a queda de um martelo de 65 kg de uma altura de 750 mm. O ensaio SPT consiste em se medir o número de golpes necessários a fazer o amostrador padrão penetrar no solo três trechos

sucessivos de 15 cm cada um. O valor de N do SPT é dado pelo número de golpes necessários à penetração dos últimos 30 cm (Décourt, 1989). A representação esquemática desse ensaio está na Figura 1.

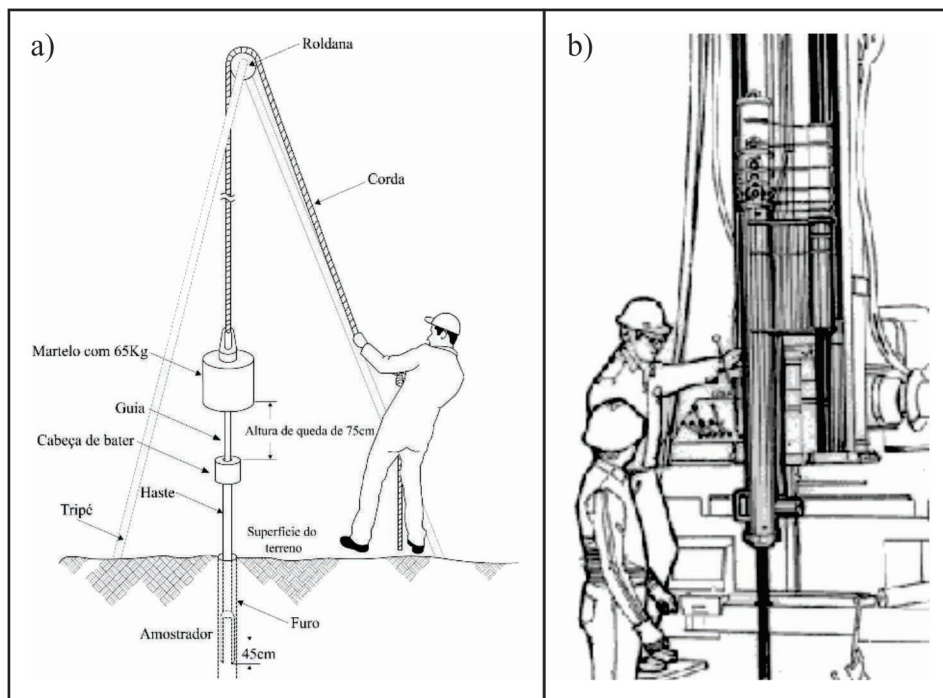


Figura 1 – Representação esquemática de um SPT com: a) um sistema manual (adaptado de Robertson *et al.*, 1992); b) sistema de acionamento automático (adaptado de Baillot & Júnior, 1999)

Ainda nos dias de hoje, apesar de esse ensaio de campo ser regido por norma própria, recentemente revisada no Brasil (ABNT NBR 6484, 2020), muitas empresas continuam executando com equipamento e procedimento não padronizado. Diferentes equipamentos e procedimentos resultam em diferentes energias disponíveis para a cravação do amostrador e, conseqüentemente, diferentes valores de N para um mesmo solo (Cavalcante *et al.*, 2006).

Os fatores que afetam os valores de N do SPT têm sido discutidos por diversos autores e, no Brasil, tem-se os trabalhos de De Mello (1971), Teixeira (1974, 1993), Belincanta (1985, 1998), Décourt (1989), Cavalcante (2002), Odebrecht (2003), Lobo (2009), Lukiantchuki (2012) e Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021). Os fatores considerados mais importantes são: os procedimentos de cravação do amostrador, o comprimento da composição, a altura de queda do martelo, o uso ou a falta do coxim de madeira e o tamanho e a massa da cabeça de bater. Esses fatores podem alterar a eficiência da energia do SPT (η) definida pela relação entre a energia potencial teórica do martelo (E_0) e a ener-

gia efetivamente transferida ao amostrador (E_T) na forma de onda longitudinal de compressão que se propaga ao longo da composição de hastes a partir do impacto do martelo na cabeça de bater.

Medições de energia transferida às hastes começaram a serem feitas nos EUA a partir de células de carga elétricas instaladas próximas da cabeça de bater (Palacios, 1977). No Brasil, as pesquisas pioneiras foram realizadas por Belincanta (1985, 1998), empregando instrumentação semelhante àquela usada por Palacios (1977). Os resultados sugeriam que a eficiência era dependente do comprimento das hastes. Mais recentemente, usando-se instrumentação com *strain-gages* e acelerômetros, Cavalcante (2002) e Odebrecht (2003) mostraram que a eficiência praticamente independe do comprimento da composição, com valor médio em torno de 80%.

Assim, no SPT, é necessário conhecer a energia que é efetivamente usada para cravar o amostrador no solo, pois o N medido é inversamente proporcional a essa energia (Schmertmann & Palacios, 1979). Assim, sabendo-se o valor da energia mobilizada em uma sondagem, é possível corrigir o valor do N medido, e calcular o valor do N corrigido para qualquer nível de eficiência de referência. A eficiência que tem sido considerada como padrão é 60% da energia teórica, típica daquela observada em equipamentos e procedimentos empregados dos EUA.

Ranzini (1988) propôs incorporar a medida do torque (T) necessário para mobilizar o atrito/adesão entre o solo e o amostrador do SPT, medindo-se mais um índice nesse ensaio, que passa a ser tratado como o ensaio SPT-T. O autor propôs a Equação 1 para a previsão da parcela de atrito lateral de capacidade de carga de estacas, em que f_T é a tensão de atrito lateral (kPa), T é o torque aplicado (kgf.m) e h é a altura total de penetração do amostrador (cm). Alonso (1996) sugeriu correlações entre f_T e a adesão de diversas estacas, e Décourt (1998) procurou demonstrar que a relação T/N depende da estrutura do solo.

$$f_T = \frac{T}{41,3360 \cdot h - 0,0317} \quad (\text{Eq. 1})$$

Diante do que está posto, são necessárias considerações complementares, de modo que se possibilite uma avaliação mais adequada do comportamento mecânico dos solos a partir do SPT e do SPT-T, pois a interpretação desses resultados é realizada com foco tão somente na energia aplicada, sem que se considerem peculiaridades da energia resistente do solo (Camapum de Carvalho & Gitirana, 2021). Os autores mostram que existe um elo significativo entre os resultados de sondagens SPT-T obtidos em um perfil de solo com intemperismo tropical do Distrito Federal e a sucção, as tensões atuantes e o índice de vazios do solo. Os valores de N e de torque aumentam com a sucção e tensões atuantes e diminuem com o aumento do índice de vazios. Esses autores destacam que, embora não previsto em norma, é relevante que se determinem os perfis de umidade e de índice de vazios, mesmo que de forma preliminar, pois ambos interferem na energia resistente do solo, fruto da sucção atuante, que varia durante o ano e ao longo do perfil. Os autores apontam ainda que o estado de tensão atuante pode se alterar em consequência de intervenções antrópicas após a realização dos ensaios SPT e SPT-T, por exemplo, por escavações, aterros, colocação de grampo, tirantes e mesmo das fundações da obra (Perez, 2017; Ferrari de Campos, 2018).

3.3 CPTu

O ensaio de penetração de cone teve sua origem na Holanda em 1934 e passou a ser uma técnica de investigação do subsolo reconhecida na década de 50. Ponteiras de cone com a possibilidade de medir resistência de ponta, atrito lateral e a poro-pressão foram introduzidas por De Ruiter no início da década de 80 e passaram a ser chamadas de piezocone. Os ensaios de penetração de cone (CPT) ou do piezocone (CPTu) são ensaios de penetração quasi-estática *in situ* que permitem identificar o perfil estratigráfico do subsolo e avaliar preliminarmente os parâmetros geotécnicos dos solos (Lunne *et al.*, 1997).

Nesse ensaio, uma ponteira em forma cônica (Figura 2) é conectada à extremidade de um conjunto de hastes e introduzida no solo a uma velocidade constante igual a 20 mm/s. O cone tem um vértice de 60° e um diâmetro típico de 35,68 mm (10 cm² de área). O piezocone possui células de carga que registram a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s), além de um transdutor que mede a poro-pressão (u).



Figura 2 – Ponteira de um piezocone com representação esquemática das medidas da resistência de ponta (q_c), do atrito lateral (f_s) e da poro-pressão na posição padrão (u_2)

A resistência de ponta (q_c) é tipicamente alta em areias e baixa em argilas, enquanto o atrito lateral (f_s) é baixo em areias e alto em argilas. A partir dos registros de q_c e f_s , calcula-se a razão de atrito, $R_f (=f_s/q_c)$, que é utilizado na identificação e a classificação de solos a partir do emprego de cartas de classificação. Em solos tropicais, cabe destacar que esses comportamentos típicos não se sustentam, requerendo maior atenção na análise dos resultados, sendo relevante obterem-se amostras, o que pode ser feito por meio de amostradores especiais ou realização integrada CPT e SPT.

As cartas de classificação para definição do tipo de comportamento do solo investigado foram propostas por diversos pesquisadores (Robertson *et al.*, 1986; Robertson, 1990, Robertson, 2009; Robertson, 2016) empregando-se os registros da resistência de ponta (q_c) e razão de atrito (R_f) medidos com cones elétricos. O piezocone possibilita que se classifique o solo utilizando-se a poro-pressão pelo índice de poro-pressão (B_q), o que é especialmente interessante para solos moles, nos quais os valores de resistência de ponta são baixos e a geração de poro-pressão é elevada.

Na abordagem direta de interpretação de resultados de ensaios CPT, correlacionam-se empiricamente os valores de q_c e f_s medidos com o comportamento observado em fundações. Essa abordagem tem sido utilizada, em especial no Brasil, onde ocorrem solos tropicais não saturados, que apresentam comportamento não convencional, ou melhor, com suas particularidades. Na abordagem indireta, indicada para previsão de comportamento de areias e argila, os valores de q_c , f_s e u medidos são utilizados para se estimarem os parâmetros de resistência, compressibilidade e permeabilidade do solo a partir de correlações empíricas.

Com a interrupção da penetração de uma ponteira de piezocone em qualquer profundidade de interesse, pode-se realizar o ensaio de dissipação do excesso de poro-pressões geradas, registrando-se os valores de poro-pressão com o tempo. A poro-pressão de equilíbrio definida a partir desse ensaio é uma informação importante para se avaliarem as características hidrogeológicas de um aquífero. Além disso, a interpretação do resultado desse ensaio também possibilita estimativas do coeficiente de compressibilidade horizontal (c_h) e do coeficiente de permeabilidade do solo penetrado (Lunne *et al.*, 1997).

3.4 DMT

O ensaio de dilatômetro plano (DMT) foi desenvolvido na Itália, por Marchetti, em 1974, e introduzido nos Estados Unidos e Europa em 1980. Marchetti (1997) descreve o dilatômetro plano, composto por uma lâmina de aço inoxidável de 14 mm de espessura, 95 mm de largura e 220 mm de comprimento, com uma fina membrana de 60 mm de diâmetro posicionada numa das faces dessa lâmina. O ensaio consiste, basicamente, em cravar a lâmina do dilatômetro, utilizando-se um sistema hidráulico e uma estrutura de reação, de forma equivalente ao que é feito no CPT. Atingida a profundidade de ensaio, normalmente em intervalos de 200 mm, a membrana é inflada, utilizando-se um dispositivo de alta pressão de gás nitrogênio, por meio de uma mangueira que passa pelo interior das hastes usadas para cravação (Figura 3).

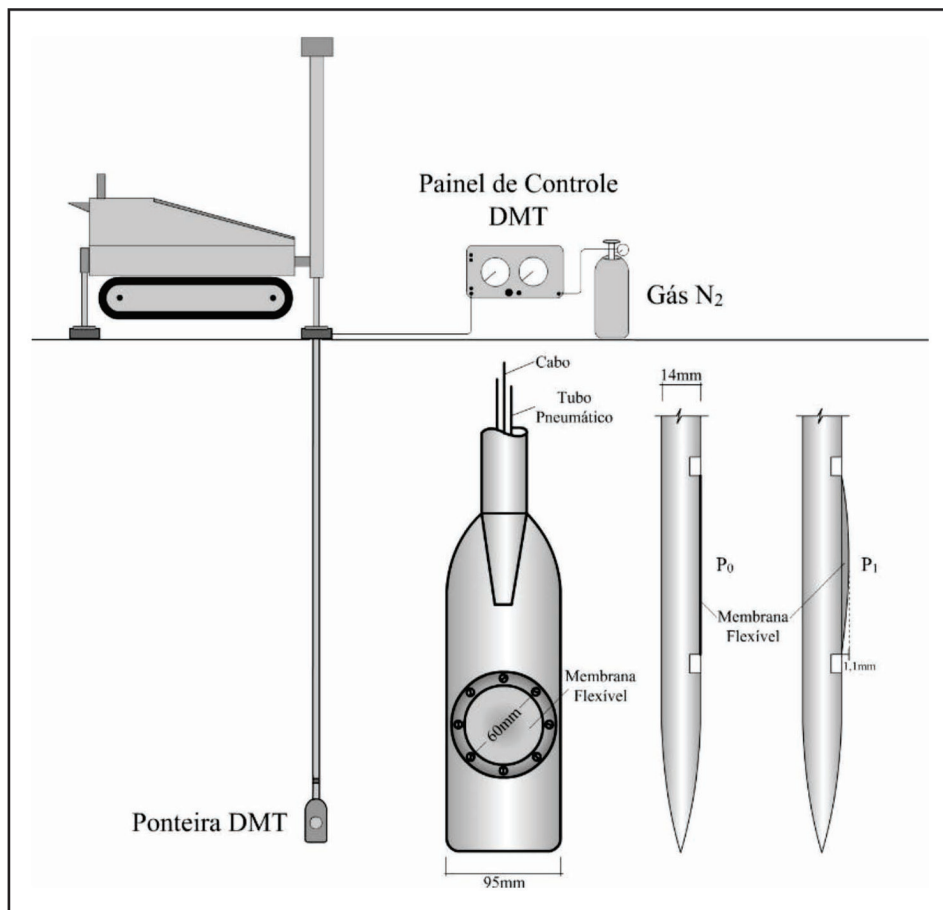


Figura 3 – Representação esquemática de um ensaio de dilatômetro plano (adaptado de Marchetti, 2015)

Abaixo da membrana há um sensor sonoro que indica as pressões necessárias para que ela perca o contato com o equipamento sensível (leitura p_0), e aquela necessária para provocar um deslocamento do centro da membrana de 1,1 mm (leitura p_1), conforme ilustrado na Figura 3. Essas leituras são feitas em um manômetro na caixa de controle e registradas em um formulário padrão ou por meio de um sistema de aquisição de dados. Também pode-se medir o esforço aplicado para cravar a lâmina do DMT, como informação adicional na estimativa de alguns parâmetros dos solos. Detalhes desse ensaio encontram-se em Marchetti *et al.* (2001) e Marchetti (2015).

Segundo Marchetti (2001), a maneira mais apropriada para se usarem os resultados do DMT é interpretá-los em termos dos parâmetros usuais dos solos, abrindo-se uma variedade de aplicações em engenharia. A interpretação dos resultados do DMT começa com o cálculo de três parâmetros intermediários (I_D , K_D e E_D) baseado em correlações

empíricas (Equações 2, 3 e 4, respectivamente) que empregam os valores de p_0 e p_1 , tensão geostática vertical efetiva (σ'_v) e poro-pressão hidrostática no equilíbrio (u_0), em geral assumida em função da posição do nível de água.

$$I_D = \frac{(p_1 - p_0)}{(p_0 - u_0)} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$K_D = \frac{(p_0 - u_0)}{(\sigma'_{v0})} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$E_D = 34,7 \cdot (p_1 - p_0) \quad (\text{Eq. 4})$$

O Índice do Material (I_D) é calculado para identificar o tipo de solo investigado. Em geral, I_D fornece o perfil do tipo de solo e, em solos “normais” (areias e argilas convencionais), uma descrição razoável da textura desse solo (Marchetti *et al.*, 2001). O índice de tensão horizontal (K_D) é fundamental nesse ensaio, pois é base para várias correlações para estimativa de parâmetros. O módulo dilatométrico (E_D) é determinado a partir das pressões p_0 e p_1 pela Teoria da Elasticidade. E_D , em geral, não pode ser utilizado como o módulo de deformabilidade do solo, especialmente devido à falta de informação sobre o histórico de tensões. Parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos podem ser determinados empregando-se correlações empíricas disponíveis na literatura (Marchetti *et al.*, 2001). Passos *et al.* (2002) mostram que esse ensaio pode ser útil na estimativa do grau de anisotropia horizontal do perfil de solo.

3.5 PMT

O pressiômetro (PMT) teve sua origem na França (Ménard, 1975) e, basicamente, é uma sonda composta por um tubo cilíndrico, inserida no terreno e expandida sob condições controladas, seja de tensão ou de deformação. A representação esquemática desse ensaio, após abertura de um pré-furo, encontra-se na Figura 4.

Uma das principais preocupações nesse ensaio é a perturbação que o processo de instalação da sonda pode causar no solo situado no entorno dela. Assim, diferentes tipos de equipamentos estão disponíveis, subdivididos em três tipos: pré-furo, autoperfurante e de deslocamento.

A realização desse ensaio possibilita obter uma curva tensão *versus* deformação do material investigado, medindo-se diretamente as tensões *in situ* e o comportamento tensão *versus* deformação numa direção perpendicular ao eixo do furo. Assim, simula-se a expansão assimétrica de uma cavidade cilíndrica infinita, que possui soluções elásticas e elasto-plásticas bem fundamentadas.

A interpretação dos resultados de ensaios pressiométricos pode ser feita por meio de uma abordagem direta baseada em correlações empíricas para a estimativa de capacidade de carga e recalques de estruturas, conforme sugerido por Ménard (1975). Na abordagem indireta, empregam-se modelos para representar o processo de expansão do material ensaiado (Gibson & Anderson, 1961; Hughes *et al.*, 1977).

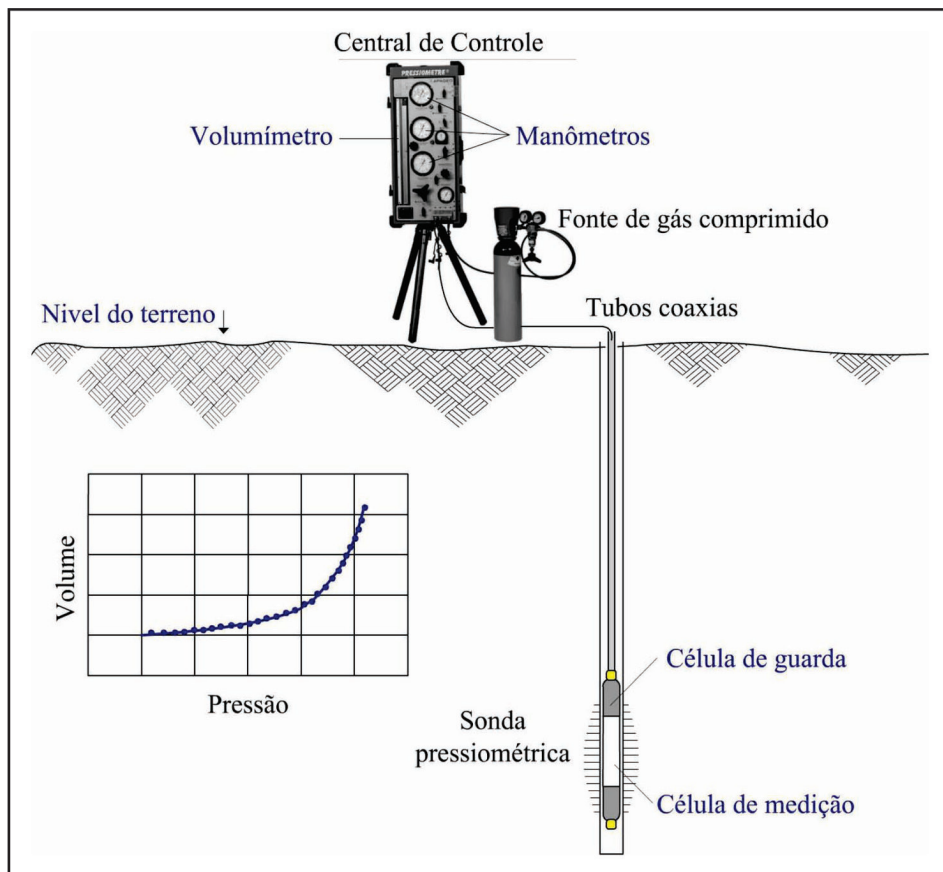


Figura 4 – Representação esquemática de um ensaio com pressiômetro pré-furo tipo Ménard (adaptado Schnaid & Oderbercht, 2012)

O PMT é um dos ensaios mais promissores disponíveis para definição de parâmetros de projeto no campo, mesmo com todas as dificuldades de execução e interpretação dos resultados, em especial, os do tipo autoperfurante. Destaca-se o fato de que nenhum outro ensaio *in situ* permite realizar uma avaliação realista sobre o comportamento do solo com controle do carregamento para trajetórias de tensões ou de deformações.

3.6 Ensaios híbridos

3.6.1 RCPTu

Nessa técnica híbrida de ensaio, denominada de piezocone de resistividade, tem-se um módulo conectado atrás da ponteira de um piezocone padrão (Figura 5), que permite medir continuamente a resistência a um fluxo de corrente elétrica aplicada ao

solo. Bolinelli Jr. *et al.* (2005) descrevem a execução, calibração e interpretação desses ensaios.



Figura 5 – Piezocone de resistividade

A preparação e a realização de um RCPTu são equivalentes à de qualquer outro ensaio de piezocone. Nele tem-se como recurso adicional um gerador de sinal acoplado ao sistema de aquisição de dados, que controla o nível de corrente e a frequência para as medidas de resistência elétrica. A partir da resistência que o solo oferece à passagem dessa corrente, é possível detectar a presença ou estimar a concentração de certas substâncias presentes no lençol freático.

Davies e Campanella (1995) mostram que há uma grande variação nos valores da resistividade (condutividade) no subsolo, desde $0,01 \Omega.m$ ($106 \mu s/cm$) a $100 \Omega.m$ ($10 \mu s/cm$). Esses autores destacam que a resistividade é bastante sensível à presença de sais dissolvidos, como a contaminantes orgânicos de baixa solubilidade.

A forma mais comum de interpretação dos resultados desse ensaio se dá pela comparação do valor da resistividade medida onde existe indícios de contaminação com um valor de referência, estabelecido pela experiência em ambientes geologicamente similares, onde se sabe que a contaminação não existe (Campanella *et al.*, 1997). Ao se constatarem valores muito discrepantes, amostras de água subterrânea podem ser coletadas em profundidades discretas para uma posterior análise química em laboratório.

3.6.2 SCPT e SDMT

A partir de 1984 (Campanella & Robertson, 1984; Robertson *et al.*, 1986), incorporou-se ao cone um sistema para aquisição de ondas sísmicas, denominado de cone sísmico (SCPT). Ele apresenta as mesmas características de um cone padrão, com um geofone ou um acelerômetro no seu interior, conforme descrito por Stewart e Campanella (1992). Mais recentemente, esse recurso também passou a fazer parte do DMT (Mayne *et al.*, 1999), e essa técnica de ensaio passou a ter as mesmas vantagens do cone sísmico.

O ensaio sísmico *down-hole* em conjunto com o CPT ou com o DMT segue o mesmo procedimento de um ensaio *down-hole* convencional (Figura 6). A velocidade de propagação da onda cisalhante (V_s) pode ser determinada empregando-se métodos distintos, um que resulta num valor médio para todo o trecho percorrido pela onda ou outro que resulta na velocidade V_s por intervalo, que é o mais interessante e mais empregado na investigação do subsolo, calculado conforme a equação que se encontra transcrita na Figura 6.

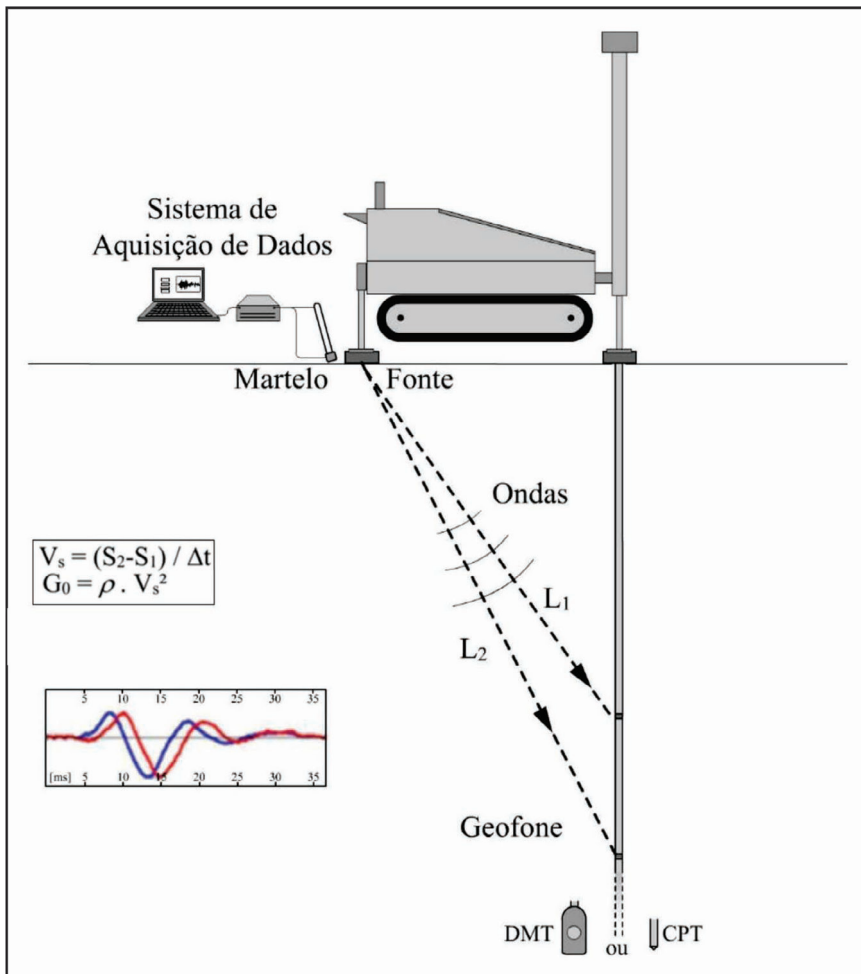


Figura 6 – Representação esquemática um ensaio *down-hole* com um CPT ou com um DMT no final da composição de hastes (adaptado de Stewart & Campanella, 1992)

3.6.3 CPM

O cone pressiômetro (CPM) é composto por uma ponteira de cone elétrico convencional e uma sonda pressiométrica, empregados em conjunto num mesmo ensaio de campo. Essa sonda localiza-se logo atrás do cone, e ambos têm uma área de ponta igual a 15 cm^2 (43,7 mm de diâmetro). A sonda tem um comprimento tal que a relação com o diâmetro seja igual a 10 para garantir uma expansão predominantemente radial da membrana.

O procedimento de ensaio consiste na cravação do cone como normalmente é feito num ensaio CPT. Interrompe-se a penetração da ponteira para se expandir a sonda pressiométrica em profundidades pré-estabelecidas pelo operador a partir da identificação do perfil do subsolo baseado nos registros de q_c e f_s . A descrição desse ensaio híbrido é feita por Withers *et al.* (1986). Dessa forma, a execução desse ensaio é bem mais simples do que aquele com o pressiómetro autoperfurante. Por outro lado, sua interpretação é mais complexa, uma vez que a expansão da cavidade cilíndrica ocorre em um solo amolgado pela penetração da ponteira. Por isso, na análise dos resultados desse ensaio para definição dos parâmetros de projeto, deve-se considerar o efeito do processo de instalação.

4. PERFIS DE UMIDADE, SUÇÃO E CURVA DE RETENÇÃO

Tendo-se em vista o comportamento dos solos não saturados, alternativas relativamente simples podem ser incorporadas para uma melhor interpretação dos resultados, como a determinação da umidade do solo durante a etapa da investigação e o conhecimento da curva de retenção de água do solo determinada em laboratório. Em geral, a umidade dos solos não saturados varia ao longo da profundidade e do tempo e a maior variação geralmente ocorre próximo à superfície do terreno, onde o solo interage com a atmosfera, e diminui com o aumento da profundidade, no entanto, em certas situações, ela pode também ser expressiva próximo ao lençol freático devido a oscilações na franja capilar ou próximo ao extrato menos intemperizado e quase sempre menos permeável, devido ao seu maior potencial de acumulação da umidade proveniente da água que infiltra.

A curva de retenção de água é definida como a relação entre a quantidade de água no solo e a sucção (Fredlund & Xing, 1994). A água pode ser quantificada em termos de umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ) ou grau de saturação (S_r), e a sucção pode ser sucção matricial ou osmótica, cuja soma resulta na sucção total. A curva de retenção de água pode ser determinada experimentalmente em laboratório, e a sucção pode ser medida diretamente *in situ*, sendo o tema discutido de modo amplo nos Capítulos 10 e 11 deste livro.

A Figura 7 ilustra curvas de retenção de água unimodal e bimodal com algumas das suas principais características, que serão úteis em discussões que seguem. Além das características indicadas, diversos solos apresentam maior quantidade de água retida na curva de secagem do que na curva de umedecimento para um mesmo valor de sucção e essa peculiaridade é chamada de histerese (Figura 8). A histerese ocorre basicamente devido à presença de ar no solo e à distribuição não uniforme dos tamanhos dos poros. Outras informações sobre a curva de retenção de água podem ser encontradas no Capítulo 10.

Os solos não saturados das regiões de clima tropical sofrem mudanças sazonais de umidade e, por consequência, de sucção devido aos ciclos de umedecimento e secagem. No tocante à variabilidade sazonal desses solos, a umidade é, geralmente, mais fácil de ser obtida do que a sucção, podendo ser determinada, por exemplo, a partir de amostras de solo que são coletadas a trado ou mesmo por meio de sondas do tipo TDR e SPT sem lavagem, entre outras.

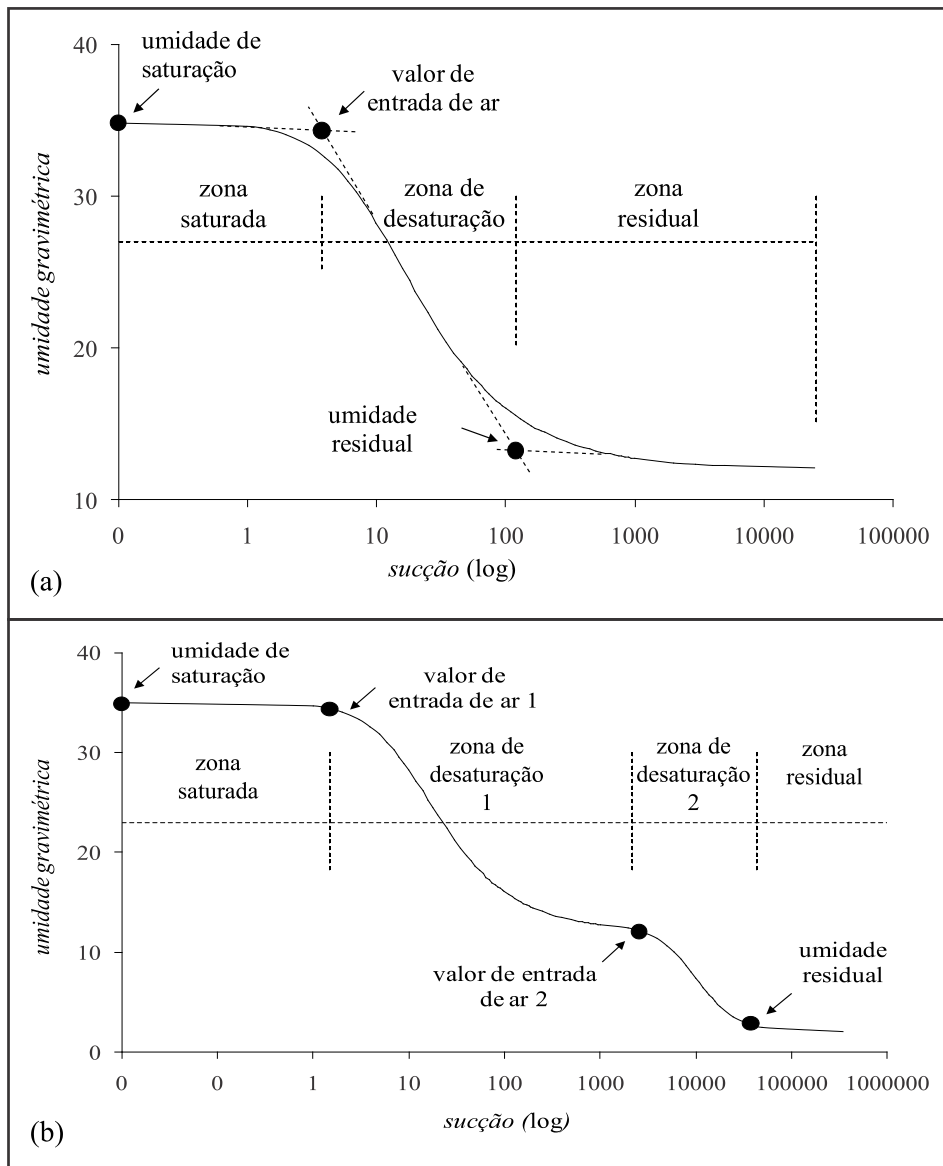


Figura 7 – Curva de retenção de água no solo (a) unimodal e (b) bimodal de secagem

Como o objeto de interesse para a interpretação do comportamento dos solos não saturados é a sucção, uma alternativa interessante, mesmo que simplista, é determinar a umidade e estimar a sucção por meio da curva de retenção de água. Obviamente, medir a umidade e correlacioná-la diretamente com a sucção por meio da curva de retenção de água representa uma estimativa aproximada e deve ser realizada com cautela, pois não só

a curva costuma não representar uma relação única entre umidade e sucção devido à histerese, como em campo o perfil de umidade é dinâmico ao longo do tempo. No contexto da histerese, destaca-se que, para uma mesma umidade, dois valores de sucção são obtidos na curva de retenção de água, conforme ilustrado pelos pontos em azul na curva de umedecimento e vermelho na curva de secagem (Figura 8).

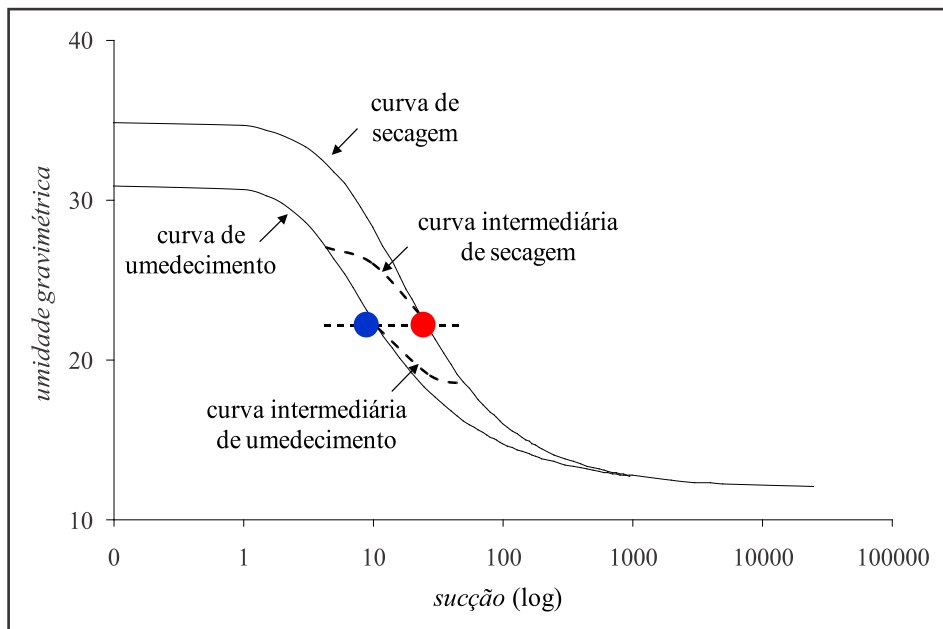


Figura 8 – Curvas de retenção de água unimodal de secagem e de umedecimento com histerese

A umidade obtida a partir do dado no campo não fornece uma indicação clara se a sucção correspondente está sobre a curva de secagem ou sobre a curva de umedecimento. Por outro lado, se a variação da sucção no campo for baixa, como acontece para diversos solos de regiões de clima tropical, onde não há deficiência de umidade, e, claro, se o solo apresentar pouca histerese, a estimativa da sucção pode ser realizada de forma aceitável. Portanto, a estimativa indireta da sucção *in situ* utilizando-se medidas de umidade obtidas em campo e a curva de retenção de água obtida em laboratório pode ser aplicada com menor restrição de validade desde que o solo não apresente histerese significativa no intervalo de sucção correspondente a variação sazonal de umidade.

Uma alternativa que pode ser incorporada para melhor interpretação dos resultados dos ensaios *in situ* é medir diretamente a sucção no campo por meio de tensiômetros, sensores de matriz granular, dentre outros instrumentos. Essa alternativa é melhor, evidentemente, porém, necessita de instrumentação própria, manutenção periódica dessa instrumentação e o custo, embora aparentemente alto para a aquisição, instalação, manutenção e coleta dos dados, deve ser ponderado em relação ao custo da obra e aos riscos inerentes

ao desconhecimento das sucções atuantes no maciço. Uma técnica interessante para se avaliar indiretamente o impacto das variações da sucção no comportamento do maciço é a avaliação temporal do índice de umidade do solo nele, contextualizando-se os resultados das sondagens e provas de carga (Mascarenha, 2003).

Em áreas marcadas por sazonalidade, como nas regiões de clima tropical, a incorporação dessas alternativas é fundamental, principalmente na zona ativa, conforme discutido nos Capítulos 17 e 27. A zona ativa é comumente definida como a região de flutuação de umidade e sucção de um solo não saturado, em que a umidade e a sucção mudam sazonalmente devido às variações climáticas (Fredlund & Rahardjo, 1993; Nelson *et al.*, 2001).

Como ilustração, os dados experimentais de Rocha (2018) mostram perfis de umidade obtidos a partir de sete campanhas de ensaios realizadas no campo experimental da Unesp de Bauru-SP (Figura 9). Para as campanhas realizadas na condição de umidade de campo (Figura 9a), é possível observar não apenas uma dinâmica temporal ao longo do ano como entre anos. Por exemplo, o perfil de umidade em abril de 2016 é bastante distinto do registrado em abril de 2017, ou seja, as avaliações devem cobrir períodos mais amplos considerando-se os níveis e distribuição das precipitações. A Figura 9b determinada em cava inundada aponta para o fato de que vazamento e infiltrações de águas pluviais e servidas podem promover uma elevada ampliação da umidade do solo.

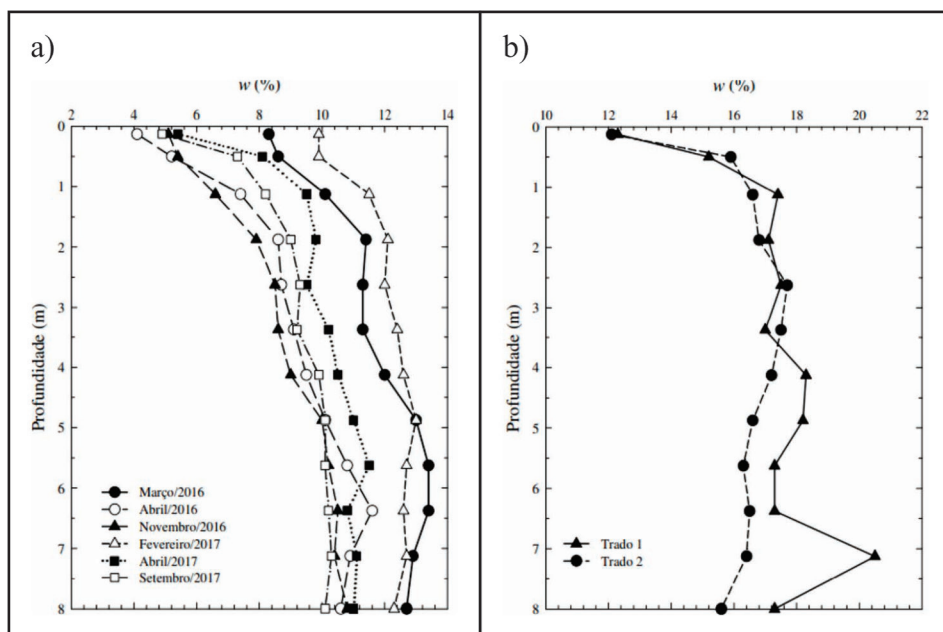


Figura 9 – a) Perfis de umidade determinados nas seis campanhas realizadas em condição natural; b) perfis de umidade determinados em cava inundada (Rocha, 2018)

Na Figura 10, são apresentados os resultados de precipitação e do monitoramento da sucção a 0,4, 0,9, 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 m de profundidade para o mesmo local onde foram determinados os perfis de umidade mostrados na Figura 9. Observa-se, nessa figura, que, como as sucções foram determinadas ao longo do perfil, não existe uma coincidência entre os picos de precipitação e de sucção, o que mostra a relevância da contextualização temporal e espacial das precipitações, da umidade e da sucção atuando ao longo do perfil.

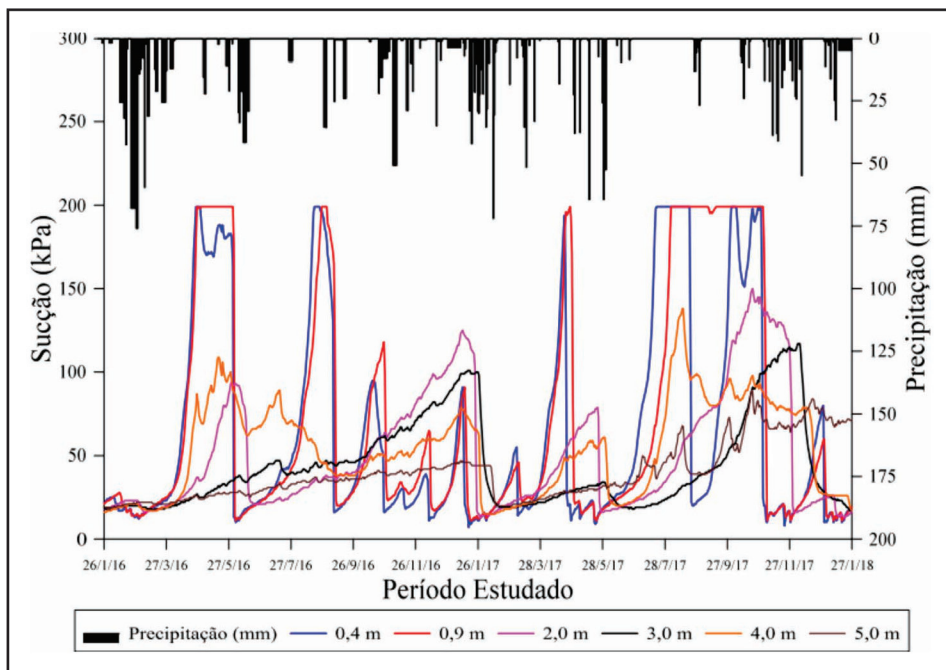


Figura 10 – Valores de sucção e de precipitação ao longo do tempo (Rocha, 2018)

Em geral, os resultados mostrados na Figura 11 para o perfil de solo ora analisado indicam que as medidas de sucção são dependentes da precipitação pluviométrica, mas não exatamente concomitante, pois dependem da infiltração da água que avança no perfil com o tempo, refletindo em variações de sucção mais rápidas e maiores nos horizontes mais superficiais, onde o solo interage com a atmosfera, diminuindo com o aumento da profundidade (Saab, 2016). Na interface solo-atmosfera, os gradientes associados aos fluxos de água, de ar e de calor são maiores e, por isso, as medidas de sucção a 0,4 e 0,9 m de profundidade são mais sensíveis a tais variações. A sucção a 3,0, 4,0 e 5,0 m de profundidade sem que perca relevância é menos afetada pela precipitação do que na superfície do terreno.

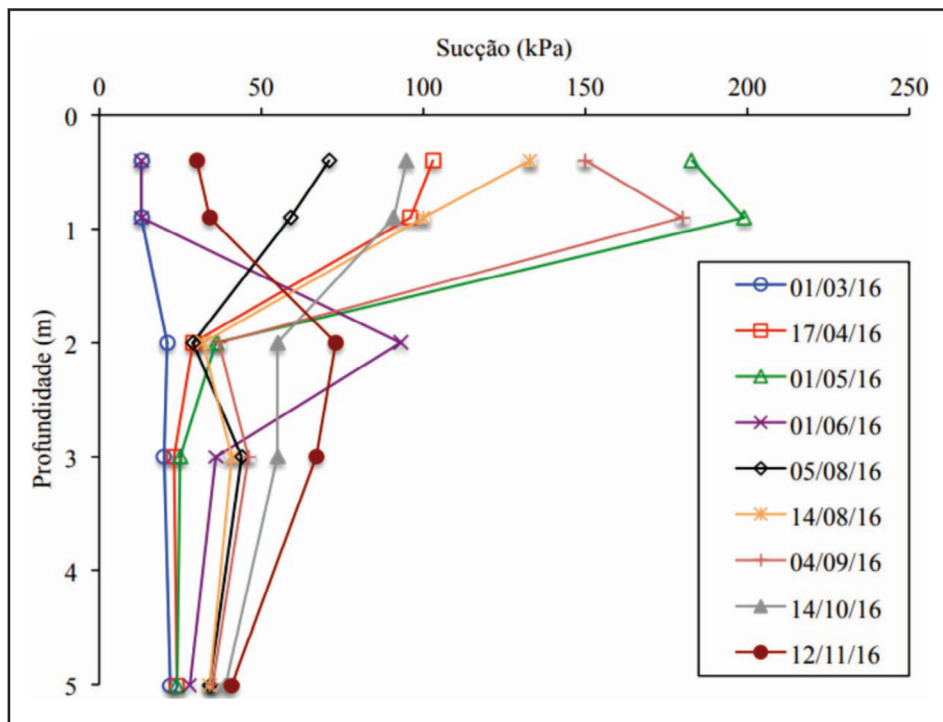


Figura 11 – Perfis de sucção (Saab, 2016)

5. ENSAIOS DE CAMPO E VARIABILIDADE EM SOLOS NÃO SATURADOS

De acordo com Wickremasinghe (1989), a variabilidade é um aspecto que deve ser adequadamente avaliado na investigação do subsolo, uma vez que leva a incertezas na definição do perfil do subsolo e na estimativa de parâmetros geotécnicos. Ela é controlada pelos agentes formadores e transformadores atuantes e ambiente de formação, erros de medida e quantidade limitada de dados (De Mio, 2005).

Conforme já apresentado, a caracterização estratigráfica, em especial para projetos geotécnicos, consiste na compartimentação do maciço em unidades razoavelmente homogêneas. A identificação das transições entre unidades, a classificação dos vários tipos de solo e a identificação da variabilidade interna na escala é necessária em nível de detalhe exigido pelo projeto em função das condições geológicas de cada local. O entendimento da história geológica da área é fundamental na interpretação dos ensaios de campo, principalmente na etapa de integração entre ensaios pontuais, para identificação da geometria e variabilidade dos solos. A quantidade de processos ou de variáveis independentes que contribuem para a formação do perfil de solo normalmente aumenta essa variabilidade (De Mio, 2005).

Assim, na investigação do subsolo, trabalha-se com incertezas devido às condições geológicas que afetam os parâmetros geotécnicos. Em perfis de solos não saturados, ocor-

rem variações sazonais devido, dentre outros, à infiltração de água refletindo na umidade do solo e mudanças na posição do nível da água quando presente, à cobertura e uso do solo, à geomorfologia e à orientação das vertentes. A variabilidade dos solos, seja devido às condições geológicas ou sazonais, influenciam o grau de incerteza para a definição dos parâmetros geotécnicos e na tomada de decisão no projeto e execução da obra.

Mesmo com todas essas incertezas, em muitos projetos geotécnicos, a definição da representatividade dos parâmetros é qualitativa. De Mio (2005) destaca que a obtenção da distribuição e variação das propriedades do solo frequentemente resumem-se na avaliação de alguns registros da propriedade medida por um profissional experiente e numa escolha empírica de um valor representativo com base na experiência, sendo, no entanto, indispensáveis o conhecimento técnico e a reflexão. O uso de análises racionais das incertezas baseado em teoria da confiabilidade é, em certos casos, mais adequado para a tomada de decisões de engenharia em um meio físico heterogêneo e variável para tratar as incertezas devido à variabilidade natural dos solos, seja espacial ou sazonal.

O entendimento das variações espaciais e sazonais dos índices e parâmetros geotécnicos depende, dentre outros, do conhecimento da geologia, da hidrologia, da hidrogeologia, da geomorfologia, do microclima, do uso e ocupação do solo passado, presente e futuro.

A investigação geotécnica de regiões de clima tropical, típicas pela presença de espessos mantos de solos não saturados, deve considerar a influência de variações sazonais devido à alternância de períodos de chuva e seca, os quais proporcionam a movimentação da água no solo, seja pela presença de uma zona ativa com infiltração e secagem, seja pela variação da posição do lençol freático.

Os solos tropicais possuem heterogeneidades advindas dos agentes e condições formadoras do solo e, muitas vezes, têm nível de água freático profundo ou mesmo inexistente. A influência da condição não saturada no comportamento desses solos ocorre pelo efeito da sucção, que tem uma relação direta com o teor de umidade. Logo, a variação do teor de água no solo pode acarretar variações importantes nos índices e parâmetros medidos por meio dos ensaios de campo, e, assim, no comportamento mecânico do solo.

Mondelli *et al.* (2004) apresentam e discutem resultados de ensaios de piezocone realizados no campo experimental da EESC-USP (Figura 12). Esses autores demonstram a importância da avaliação da variabilidade espacial do solo nas correlações entre parâmetros. Para fins de análise, os autores compartimentaram o perfil do subsolo e utilizaram a relação entre a resistência de ponta e o N do SPT (q_c/N). Eles concluíram que há variações sensíveis nos valores da relação q_c/N , atribuídas à variabilidade do solo. Esses resultados indicam que a utilização e validação de correlações, bem como os próprios parâmetros determinados a partir dessas correlações, devem ser sempre avaliadas considerando-se a variabilidade do solo. Os autores também observam a variação dos resultados de q_c e f_s nos horizontes mais superficiais do solo, e atribuem essa variação aos efeitos da sazonalidade, que pode ter alterado a sucção do solo e, assim, a resistência dele. As amostras coletadas com SPT e identificadas tátil e visualmente e por granulometria conjunta sem defloculante indica que o perfil é composto por um solo arenoso, enquanto a interpretação dos resultados de CPTu, segundo os ábacos de classificação, indicam que parte do perfil tem comportamento de solo siltoso ou argiloso.

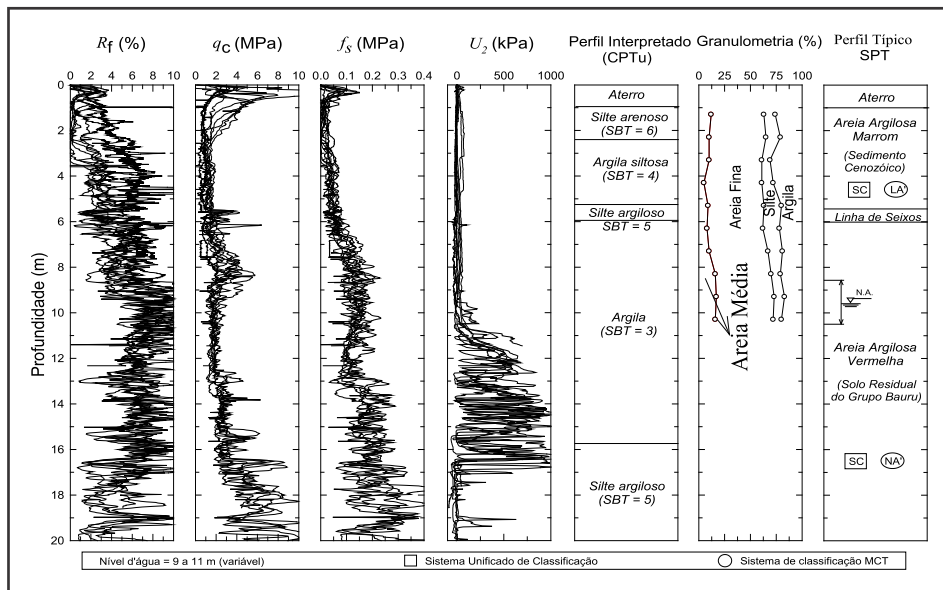


Figura 12 – Resultados de ensaios CPTu, composição granulométrica e perfil interpretado a partir de ensaios SPT para o campo experimental da EESC-USP (adaptado de Mondelli *et al.*, 2004)

Camapum de Carvalho e Pereira (2001) e Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) avaliaram a influência da sucção em resultados de ensaios de campo a partir de resultados de ensaios SPT e SPT-T em um solo poroso colapsível de Brasília e mostraram a importância de se normalizar a sucção em relação ao índice de vazios do solo. Concluíram que os resultados de ensaios são afetados pelo estado do solo não saturado no momento do ensaio, ou seja, há uma forte relação entre a variação da sucção, N (Figura 13) e o torque. Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) mostraram ainda a relevância não só da sucção como das tensões verticais nos resultados de N do SPT e das tensões horizontais na análise de resultados de torque oriundos de ensaios SPT-T, colocando em evidência a relevância da geomorfologia, muitas vezes, alterada pela própria obra após as sondagens preliminares.

Hryciw e Dowding (1987) avaliaram, em laboratório, a influência da condição não saturada em resultados de ensaios CPT realizados em areias não saturadas. Os autores discutem que, em um solo não saturado, seu comportamento mecânico é diretamente influenciado pelas três fases constituintes (sólida, líquida e gasosa) e suas interações. Nesse sentido, os autores citam que podem existir três sistemas formados pela interação entre essas fases. Para baixos valores de grau de saturação, a fase gasosa é contínua, enquanto a fase líquida não. Com o aumento do teor de umidade, um sistema intermediário é alcançado, em que cada fase (líquida e gasosa) pode ser contínua em distâncias curtas, entretanto, nenhuma fase é totalmente contínua. Um terceiro sistema consiste em bolhas de gás aprisionadas e uma fase aquosa contínua. Os autores denominaram esses três sis-

temas como água fechada (*closed-water system*), bi-aberto (*bi-opened*) e gás fechado (*closed-gas system*), respectivamente.

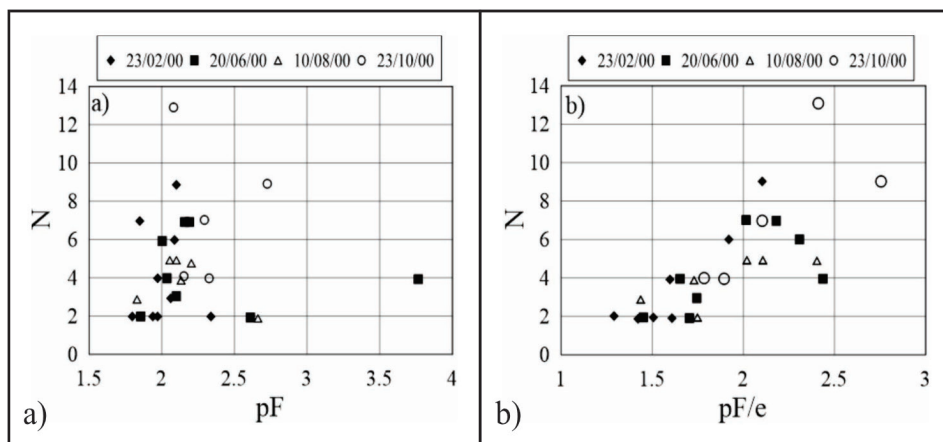


Figura 13 – Relação entre resultados do ensaio SPT e sucção (a), e sucção normalizada (b) (adaptado de Camapum de Carvalho & Pereira, 2001)

Hryciw e Dowding (1987) apresentaram os resultados de ensaios CPT realizados para valores de grau de saturação de 5% e 9% (*closed-water system*), valores característicos da zona capilar em perfis de solos não saturados. Os autores constataram que os valores de q_c são bem maiores do que aqueles medidos na condição saturada. Além disso, verifica-se que, quanto menor o grau de saturação, maior será o valor de q_c , uma vez que maior será o estado de tensões (função da sucção no solo) atuante no solo.

Tan (2005) discute a necessidade de métodos para a interpretação de ensaios piezométricos (PMT) e CPT em solos não saturados, uma vez que, na prática, grande parte desses ensaios são realizados em perfis de solos não saturados, principalmente em regiões áridas do mundo. O autor investigou a influência da sucção nos resultados de ensaios PMT e CPT realizados em câmara de calibração pelo uso de mini PMT e mini CPT. Por meio de análise estatística, os autores verificaram influência significativa da sucção nos resultados desses ensaios. Além disso, análises realizadas por meio de equações baseadas na teoria de expansão da cavidade mostraram que a deformação volumétrica do solo na zona de influência diminui com o aumento da sucção presente no solo. A partir dos ensaios realizados, o autor verificou que a resistência de ponta (q_c) e a pressão limite (P_L) aumentam com o aumento da sucção e do peso específico seco do solo (γ_d).

Lehane *et al.* (2004) verificaram a influência da sucção do solo em resultados de ensaios CPT, que foram realizados em dois locais em Perth, Austrália. Uma campanha foi realizada em uma área sem vegetação, e outra campanha foi realizada em área com vegetação nativa em grande quantidade (eucaliptos), gerando, por consequência, variação nos perfis de umidade e sucção. Essa vegetação apresentava sistema ramificado de raízes e uma raiz que se estendia até o nível d'água. Os ensaios foram realizados no final do pe-

ríodo de seca (aproximadamente, 30 mm de chuva nos seis meses anteriores) e no final do período de chuva (aproximadamente, 600 mm de chuva nos três meses anteriores). Os autores apresentaram perfis de q_c , f_s e G_o obtidos nas duas estações, realizados por duas empresas distintas (empresa 1 e empresa 2). Eles concluíram, a partir das interpretações dos resultados de campo, que:

- Os valores de q_c medidos por ambas as empresas, em um mesmo local, apresentam boa concordância. Entretanto, os valores de f_s medidos pelas empresas diferem. Essa diferença pode ser devida ao desgaste da luva de atrito empregada pela empresa 1, bem como ao fato de a empresa 1 apresentar uma única célula de carga para a medida de q_c e f_s .
- Perfis de q_c , f_s e G_o obtidos nos períodos seco e chuvoso na área sem vegetação são semelhantes, não exibindo influência da sazonalidade.
- Entretanto, os perfis de q_c , f_s e G_o obtidos na área com vegetação apresentam influência significativa da sazonalidade. Por exemplo, entre três e quatro metros de profundidade, os valores de q_c medidos no período seco são da ordem de duas vezes maiores do que aqueles medidos no período de chuva.
- Os valores de q_c , f_s e G_o medidos na área com vegetação no final do período chuvoso são muito similares aos valores registrados ao longo do ano na área sem vegetação.

Essas discrepâncias são função da sazonalidade nos valores de grau de saturação (S_r) e, consequentemente, da sucção. Os autores discutem que a absorção de água pelas raízes das árvores acarreta a diminuição de S_r , aumentando a sucção do solo até, aproximadamente, 125 kPa, proporcionando elevados valores de q_c , f_s e G_o .

Collins e Miller (2014) apresentam resultados de ensaios CPT (q_c e f_s), perfis de umidade e de sucção de ensaios realizados em diferentes épocas. Os resultados indicam grande influência da sucção do solo nos resultados dos ensaios CPT. Os valores de q_c tendem a diminuir com a redução da sucção, enquanto em f_s se observou o oposto.

Pournaghiazar *et al.* (2013) apresentam resultados de ensaios de cone elétrico em miniatura realizados em amostras de areia limpa quartzosa não saturada, utilizando-se uma câmara de calibração com tensão confinante e sucção controladas (Figura 14). Os autores avaliaram a influência da tensão de confinamento, densidade relativa e sucção nos resultados de q_c . Para amostras fofas (solo com densidade relativa de 33%), sucções de 25 e 200 kPa, o valor de q_c aumentou 24% e 50%, respectivamente, para uma tensão de confinamento de 50 kPa (Figura 14a), e 14 e 31% quando a tensão de confinamento era de 100 kPa (Figura 14b). Além disso, os autores demonstram que a incorporação da sucção nas tensões efetivas por meio de χ (parâmetro de tensão efetiva proposto por Bishop, 1959) possibilita uma adequada caracterização de solos não saturados (por exemplo, estimativa de ângulo de atrito e densidade relativa). Esse comportamento é devido à areia limpa não saturada não apresentar *suction hardening* e se comportar como um material drenado durante a penetração do cone em qualquer condição (seca, saturada e não saturada). Os autores concluem que a influência da sucção nos resultados de ensaios CPT é mais pronunciado para areias menos compactas e nas camadas mais superiores do perfil de solos não saturados (até 5 m).

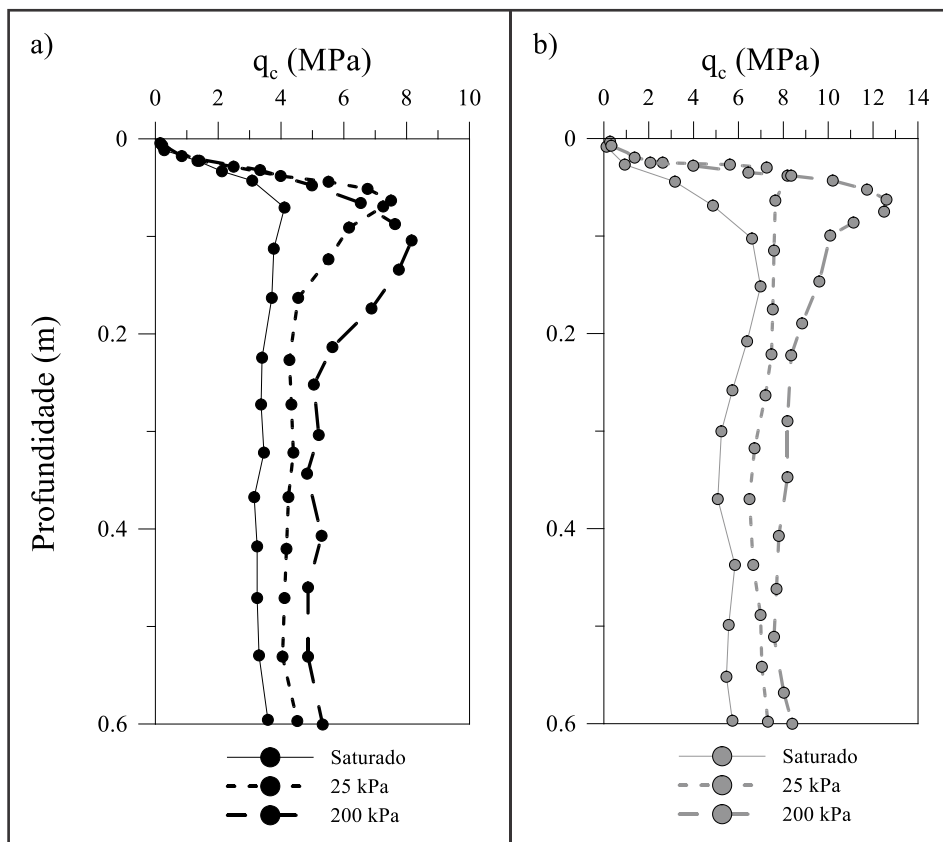


Figura 14 – Dados de q_c vs profundidade para densidade relativa de 33%, tensão de confinamento de 50 kPa (a) e 100 kPa (b), variando sucção em $s = 0, 25$ e 200 kPa. (adaptado de Pournaghiazar *et al.*, 2013)

Russell e Reid (2016) discutem a influência da sucção em ensaios CPT realizados em câmara de calibração, bem como sua influência na identificação do comportamento do solo. Os autores apresentam três estudos de caso em que não considerar o efeito da sucção levou a uma classificação inadequada do tipo de solo, bem como o tipo de comportamento na ruptura (contrátil e dilatante).

A Figura 15a apresenta a classificação do tipo de solo para a areia de Sydney com os efeitos da sucção incorporados na tensão vertical efetiva (σ'_v), cujos símbolos circulares em branco representam os ensaios CPT realizados na condição saturada ou seca e símbolos circulares hachurados os ensaios na condição não saturada. Além disso, são apresentados os dados quando os efeitos da sucção são ignorados, isto é, quando σ'_v é considerado igual à tensão total (σ_v) para ensaios na condição não saturada com símbolos em cruz. Observa-se que, para todas as condições (saturada, seca e não saturada), os dados localizam-se na região 6, classificando-se o material como uma areia limpa. A incorporação do

efeito da sucção nos resultados do ensaio CPT levaram a uma classificação adequada do solo. Entretanto, a não consideração do efeito da sucção (símbolos em cruz), indicam um comportamento mais dilatante do material, embora isso não interfira na sua classificação. Nesse sentido, destaca-se que se deve considerar a sucção nos resultados de ensaios CPT, permitindo-se uma classificação mais adequada do tipo de solo, bem como o comportamento na ruptura.

A Figura 15b apresenta os dados de ensaios CPT realizados em uma areia marinha quartzosa com 8% de finos (Lee *et al.*, 1999). Nesse caso, não foram incorporados os efeitos da sucção em σ'_v . Símbolos triangulares hachurados representam dados dos ensaios na condição saturada e os símbolos triangulares em branco os dados na condição não saturada (onde σ'_v é considerado igual a σ_v). Observa-se que os símbolos hachurados se encontram nas regiões 4 e 5, correspondentes a misturas de siltes e areias, respectivamente. Além disso, o solo apresenta comportamento ligeiramente dilatante, exceto em um ponto. Já os símbolos em cruz estão localizados na região 6, classificando o comportamento do solo erroneamente como uma areia limpa muito dilatante. A mudança drástica na classificação do solo é função da não consideração da sucção nas tensões efetivas, função do teor de finos. Outra característica consiste no fato de que, para solos saturados com mais do que 5% de finos, a penetração do cone ocorra numa condição parcialmente não drenada, e apresente comportamento drenado na condição não saturada, influenciando o comportamento do solo.

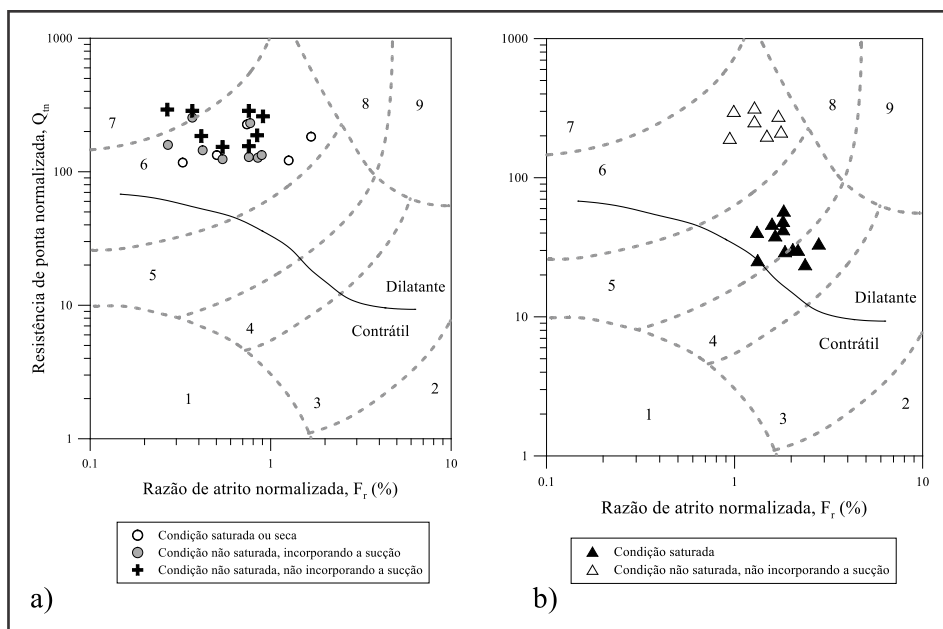


Figura 15 – a) Ensaios CPT realizados a) na areia de Sydney incorporando e não incorporando o efeito da sucção nos valores de q_c e f_s ; b) em uma areia marinha com mais do que 8% de finos (adaptado de Russell & Reid, 2016)

Os autores concluem que o efeito da sucção nos resultados de ensaios CPT é mais pronunciado para baixos valores de densidade relativa (D_r). Além disso, os efeitos da sucção são mais significativos à medida que a tensão de confinamento líquida ($\sigma - u_a$) diminui. Nesse sentido, em situações de não saturação, os efeitos da sucção nos ensaios de campo são mais evidentes nas camadas mais superficiais do solo (até 5 m), onde as variações sazonais de umidade são mais amplas.

Yang e Russell (2016) apresentam resultados de ensaios CPT realizados em câmara de calibração em uma areia siltosa não saturada. Os ensaios foram realizados em amostras confeccionadas por meio de compactação estática. As tensões de confinamento impostas foram de 60, 120 e 240 kPa, para índices de vazios iguais a 0,65, 0,64 e 0,59, respectivamente. Os ensaios foram realizados em amostras com sucções de 24, 37 e 72 kPa. Os autores verificaram que, para a sucção de 37 kPa, q_c é 50% maior do que q_c para sucção de 24 kPa, e que, para a sucção de 72 kPa, o valor de q_c é 55% maior do que o valor de q_c para a sucção de 24 kPa. Vale ressaltar que esses valores estão entre 0,3 e 0,5 m de profundidade em região não afetada pelo efeito de borda.

De modo equivalente ao que foi feito por Pournaghiazar *et al.* (2013) e Russell e Reid (2016), os autores observaram que os efeitos da sucção são mais significativos à medida que a tensão de confinamento líquida ($\sigma - u_a$) e a densidade relativa diminui, logo, os efeitos da sucção nos resultados de ensaios de campo devem ser considerados nas camadas mais superficiais do solo, onde é mais comum que o solo esteja na condição não saturada.

Zawadzki e Bajda (2016) apresentam e discutem a influência da variação do teor de umidade do solo em resultados de ensaios CPTu realizados em solo arenoso em um dispositivo específico para trabalhar com amostras de grande dimensão. Os autores observaram que as alterações no teor de umidade influenciaram tanto a resistência de ponta corrigida (q_c) como o atrito da lateral (f_s) e que os valores medidos no solo em condição não saturada podem ser duas vezes maiores que os medidos em condição saturada, o que leva a uma sobre-estimativa de parâmetros de projeto. Os autores concluíram que a condição não saturada de solos arenosos é importante e deve ser considerada na interpretação de ensaios CPTu. Esse fato é particularmente relevante para os dados obtidos na zona ativa, onde há mudanças dinâmicas mais amplas da saturação do solo a partir de fatores externos, tais como a precipitação e a evapotranspiração. Zawadzki e Bajda (2016) propuseram uma equação simples para corrigir o valor da resistência da ponta devido à influência do grau de saturação para definir o valor de q_c no estado saturado. Os autores destacaram que a sua aplicabilidade e suas limitações depende de uma revisão e estudos adicionais.

Santos (2003) avalia o efeito da sazonalidade em ensaios DMT na argila porosa de Brasília. Duas campanhas de ensaios DMT foram realizadas, uma na estação chuvosa e outra na estação seca em dois locais (Local A e Local B). Na Figura 16, são apresentados os perfis de umidade para ambos os locais (A e B) e estações e, na Figura 17, os perfis de p_0 e p_1 determinados no Local A. A variação percentual média entre os valores de p_0 foi de 10,7% e 16,2% para o Local A e Local B, respectivamente. Nesse caso, o autor constatou pouca influência da sazonalidade nos parâmetros medidos e estimados pelo DMT.

O autor também fez a estimativa de parâmetros geotécnicos a partir das correlações clássicas desenvolvidas para o DMT (Marchetti, 1980). Os parâmetros geotécnicos determinados desse modo apresentaram variações sazonais de 4,8, 0,4, 13,6 e 9,8%, respectivamente, para os valores médios de K_0 , ϕ' , M_{DMT} e E_{25} .

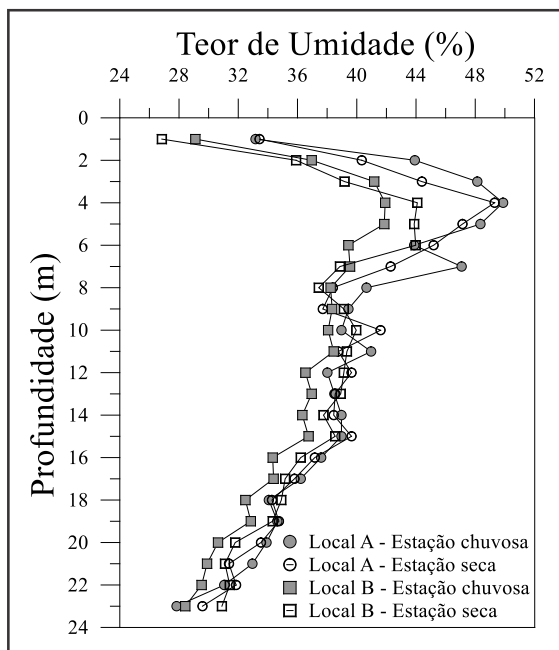


Figura 16 – Perfis de Umidade do Local A e B nas diferentes condições climáticas (adaptado de Santos, 2003)

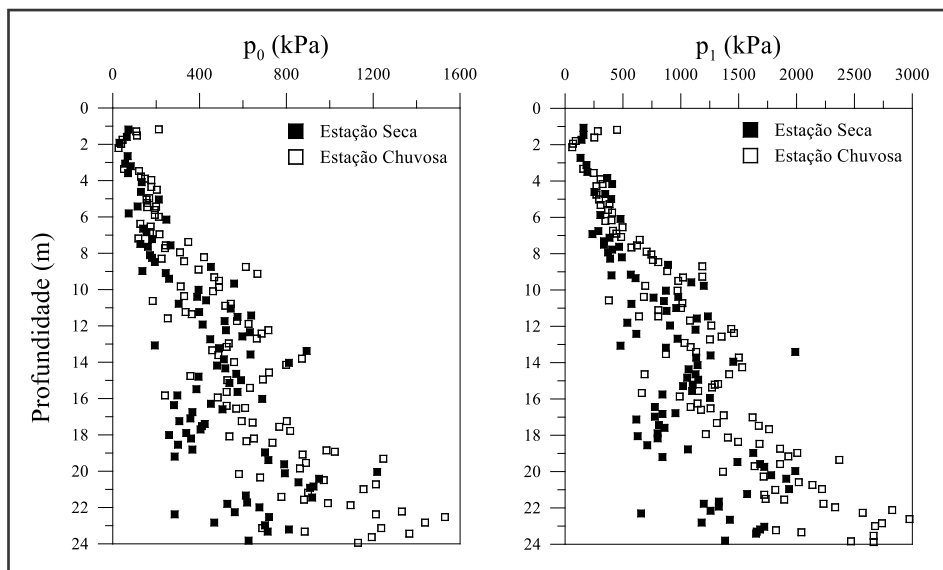


Figura 17 – Pressões p_0 e p_1 do ensaio DMT realizado no Local A nas diferentes condições climáticas (adaptado de Santos, 2003)

É importante salientar que a análise realizada por Santos (2003) se baseou apenas na variação do teor de umidade. No entanto, o comportamento mecânico dos solos não saturados é dependente das variáveis de estado, no caso, a sucção, e não apenas do teor de umidade, pois nela interferem outros fatores, como porosidade, propriedades químicas do meio e temperatura. Assim, para análises como essa, recomenda-se que se proceda ao controle da sucção *in situ* ou que elas sejam consideradas por meio de estimativas, utilizando-se a curva de retenção de água do solo a fim de se avaliar de fato o efeito da sucção na medida e estimativa de parâmetros do solo pelo ensaio DMT. Nesse sentido, curvas de retenção de água no solo obtidas por Guimarães (2002) para o solo do campo experimental da UnB (Figura 18) foram utilizadas com a intenção de avaliar se houve variação significativa da sucção nas diferentes estações climáticas (seca e chuvosa) investigadas.

Na Figura 18, as curvas de retenção estão representadas em função do grau de saturação (S_r). Assim, fez-se a estimativa do S_r de campo por meio de índices físicos das amostras ensaiadas por Guimarães (2002) e do teor de umidade medido por Santos (2003).

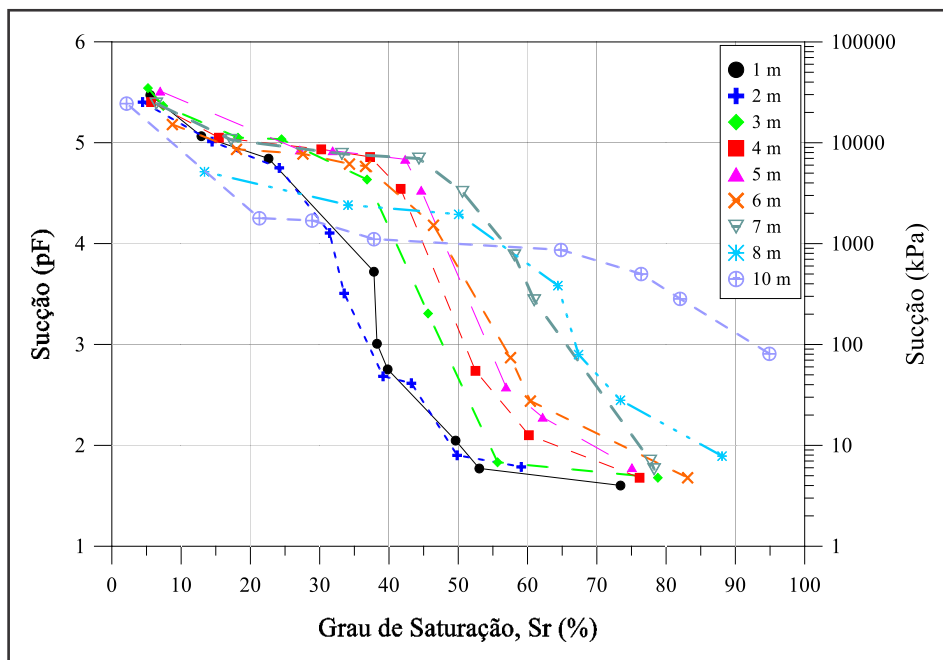


Figura 18 – Curvas de retenção de água do solo do campo experimental da UnB (adaptado de Guimarães, 2002)

Na Tabela 1, são apresentados os índices físicos utilizados na estimativa do grau de saturação (S_r), e, a partir daí, fez-se a estimativa da sucção. A Figura 19 apresenta os valores de teor de umidade e, consequentemente, os valores de sucção para ambos os locais (Local A e Local B) nas duas condições climáticas avaliadas. Interpretando-se os resul-

tados apresentados na Figura 19, observa-se que os valores de sucção são relativamente baixos, além da pouca variação nas condições climáticas avaliadas. Isso justifica a pouca influência da condição não saturada nos resultados dos ensaios DMT realizados por Santos (2003).

Tabela 1 – Índices físicos utilizados na estimativa do grau de saturação (S_r)
(adaptado de Guimarães 2002 & Santos 2003)

Índices Físicos	Profundidade (m)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	10
γ_s (kN/m³)	26,86	26,78	26,11	25,97	26,94	25,75	26,52	26,25	27,62
γ_d (kN/m³)	10,32	10,41	11,49	11,46	11,96	11,98	12,82	13,84	13,29
e	1,60	1,57	1,27	1,27	1,25	1,15	1,07	0,89	1,08
n (%)	61,6	61,1	56,0	55,9	55,6	53,5	51,7	47,2	51,9
w (%) Local A - chuvosa	33,11	43,60	47,82	49,54	48,03	43,68	46,84	40,42	38,86
w (%) Local A - seca	29,06	36,84	40,98	41,74	41,69	39,24	39,42	38,10	37,93
w (%) Local B - chuvosa	33,29	40,17	44,22	49,00	46,80	44,86	42,16	38,23	41,44
w (%) Local B - seca	26,78	35,69	39,03	43,85	43,59	43,72	38,69	37,13	39,79

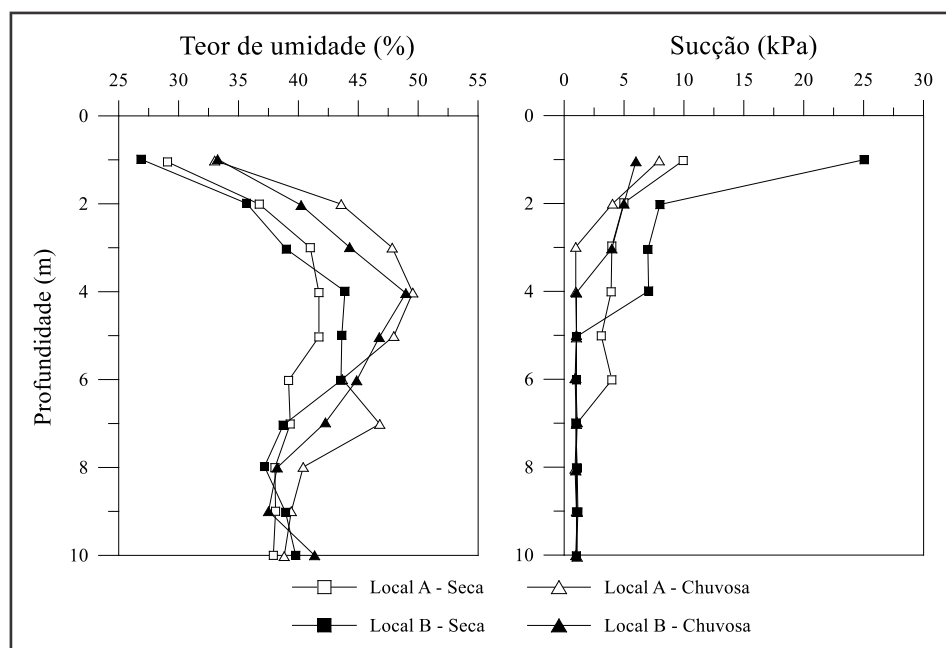


Figura 19 – Valores de umidade e sucção para os dois locais e para as duas estações climáticas (elaborado a partir dos dados de Santos, 2003)

6. CONSIDERAÇÕES SOBRE A INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE CAMPO EM SOLOS NÃO SATURADOS

Os ensaios de campo, como SPT, CPT e DMT, vêm sendo cada vez mais empregados na prática de engenharia geotécnica para a definição do perfil estratigráfico e estimativa de parâmetros de projeto. Os principais conceitos empregados na interpretação do comportamento mecânico do solo *in situ* foram baseados no comportamento de solos convencionais (argilas e areias sedimentares secas ou saturadas), sem levar em conta o efeito da sucção no comportamento dos solos não saturados. Além disso, pouco tem sido realizado com a finalidade de desenvolver métodos para interpretar os resultados de campo realizados em perfis de solo não saturado.

Existem poucos estudos que tratam da interpretação de ensaios de campo em solos não saturados. Parte deles, baseiam-se na definição do estado de tensões efetivas atuante no solo, considerando-se o efeito da sucção (Bishop, 1959; Khalili & Khabbaz, 1998; Lo Presti *et al.*, 2016), e a partir daí, sua aplicação na interpretação de ensaios de campo, como o CPT e o DMT. Outros trabalhos utilizam o ensaio pressiométrico para a previsão de parâmetros de deformabilidade e resistência de solos não saturados por meio do emprego de modelos elasto-plásticos que utilizam soluções analíticas de expansão de cavidade, bem como o uso de análises numéricas acopladas a modelo não linear elástico (Schnaid *et al.*, 1995; Schnaid & Silva, 1997). Tem-se também a proposta por Miller *et al.* (2018) para a interpretação de ensaios CPT, que incorpora o efeito da condição não saturada na previsão da resistência de ponta do cone em condição não saturada, bem como a proposta de Bernardi (2018), que incorpora a proposta de Khalili e Khabbaz (1998) na investigação de ensaios DMT realizados em laboratório considerando-se a sucção do solo. Nesse sentido, faz-se, a seguir, uma breve discussão sobre algumas dessas propostas, com o intuito de se mostrarem os princípios da interpretação de ensaios de campo considerando-se o efeito da condição não saturada.

6.1 Abordagem de tensões efetivas proposta por Bishop (1959)

Bishop (1959) propôs uma equação para tensões efetivas em solos não saturados, representada pela Equação 5:

$$\sigma'_v = (\sigma_v - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (\text{Eq. 5})$$

Nessa equação, σ'_v é a tensão efetiva do solo, σ_v é a tensão total, u_a é a pressão de ar nos vazios do solo, u_w é a pressão de água nos vazios do solo e χ é um parâmetro que reflete a influência da sucção na tensão efetiva. Esse parâmetro equivale a 1 para o solo na condição saturada e zero quando o solo está totalmente seco.

Bishop *et al.* (1960) apresentam resultados de ensaios de compressão triaxial, em que a resistência é analisada considerando-se essa equação e discutem as influências sobre o parâmetro χ . Constataram que ele é dependente do grau de saturação e, se seguidas as mesmas trajetórias de carregamento e umedecimento, é possível representar a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, considerando-se a envoltória de Mohr-Coul-

lomb e a tensão efetiva expressa de acordo com a Equação 5. A Figura 20 mostra as relações entre χ e o grau de saturação (S_r) disponíveis na literatura para diferentes tipos de solos (Jennings & Burland, 1962; Bishop *et al.*, 1960; Bishop & Donald, 1961), de onde se pode observar que não há uma relação simples entre esses valores, pois são vários os fatores intervenientes na sucção.

Em que pese a razoável eficiência dessa equação na avaliação da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, ela não se revelou satisfatória para representar variações volumétricas em solos não saturados (Vilar, 2003).

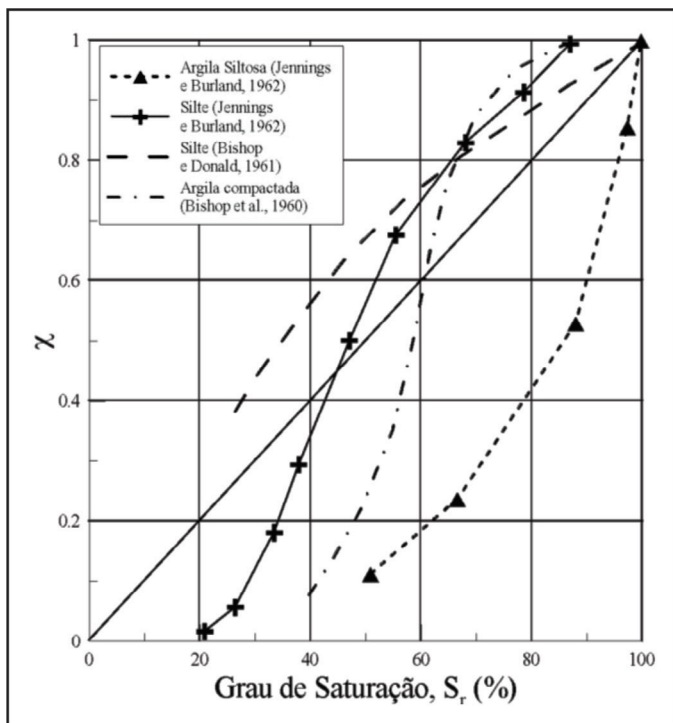


Figura 20 – Relação entre o grau de saturação e o fator χ para diferentes solos (adaptado de Jennings & Burland, 1962; Bishop *et al.*, 1960; Bishop & Donald, 1961)

A sucção presente no solo não saturado leva a um aumento do estado de tensões efetivas (σ'_v) atuantes, proporcionando o aumento da resistência e da rigidez desses solos. Para fins práticos, é comum assumir que a variação do parâmetro χ é considerada linear com o grau de saturação, S_r (isto é, de 0 a 1) (Robertson *et al.*, 2017).

6.2 Abordagem de tensões efetivas proposta por Khalili e Khabbaz (1998)

Khalili e Khabbaz (1998) apresentam uma proposta para definir o valor de χ pela equação de tensões efetivas proposta por Bishop (1959). Os autores sugerem uma relação

única para o valor de χ , dada pela relação entre a sucção e a sucção correspondente à entrada de ar. A equação de resistência ao cisalhamento, utilizando-se a proposta de Bishop (1959), é igual a:

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w)] \cdot \tan \phi' \quad (\text{Eq. 6})$$

Na condição saturada $u_a = u_w$, e a equação anterior se reduz a:

$$\tau_0 = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi' \quad (\text{Eq. 7})$$

A diferença entre as Equações 6 e 7 representa o acréscimo de resistência atribuída à sucção matricial, representada pela seguinte equação:

$$\tau_0 - \tau = \chi (u_a - u_w) \cdot \tan \phi' \quad (\text{Eq. 8})$$

Desse modo, o valor de χ pode ser obtido por meio da Equação 9:

$$\chi = \frac{\tau - \tau_0}{(u_a - u_w) \cdot \tan \phi'} \quad (\text{Eq. 9})$$

Khalili de Khabbaz (1998) analisaram 14 casos publicados na literatura em que foram fornecidos os valores da resistência ao cisalhamento em função da sucção, permitindo determinar os valores de χ em função da sucção. Os valores de χ em função da sucção foram normalizados em relação aos respectivos valores de entrada de ar (VEA), fornecendo a seguinte equação

$$\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0.55} \quad (\text{Eq. 10})$$

onde:

$(u_a - u_w)$ = sucção atuante;

$(u_a - u_w)_b$ = sucção correspondente ao valor de entrada de ar.

6.3 Abordagem de tensões efetivas proposta por Lo Presti *et al.* (2016, 2018)

Lo Presti *et al.* (2016, 2018) apresentam um método para a interpretação de ensaios CPTu realizados em solos argilosos encontrados acima do nível de água, bem como solos siltsos, caracterizados por apresentarem permeabilidade intermediária.

O método consiste em determinar de maneira rápida o estado de tensões efetivo presente na região não saturada do perfil de solo investigado, uma vez que o estado de tensões é influenciado pela sucção presente no solo, acarretando em erros na classificação e estimativa de parâmetros de projeto, caso não seja considerada.

Para a aplicação desse método, há necessidade de que o solo seja homogêneo e que a posição do lençol freático seja conhecida. Além disso, o ensaio CPTu deve ser realizado até uma profundidade abaixo do lençol freático. Respeitadas essas hipóteses, considera-se o valor do índice de classificação do material (I_c) abaixo do nível de água como um *valor*

alvo, e os valores de I_c acima dele são corrigidos por meio da correção do valor da tensão efetiva vertical, de acordo com as Equações 11 a 14, propostas por Robertson (2009).

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_v}{\sigma_{atm}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_v} \right)^n \quad (\text{Eq. 11})$$

$$n = 0,381 \cdot I_c + 0,05 \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_{atm}} \right) - 0,15 \quad (\text{Eq. 12})$$

$$F_r = \left(\frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2} \quad (\text{Eq. 14})$$

em que Q_{tn} é a resistência de ponta normalizada; q_t é a resistência real mobilizada; σ_v é a tensão vertical total; σ_{atm} é a pressão atmosférica (100 kPa); n é o expoente de tensão, função de I_c ; σ'_v é a tensão vertical efetiva; F_r é a razão de atrito normalizada e f_s é o atrito lateral.

Para solos finos, n será igual a 1 e para solos grossos, esse expoente irá variar entre 0,5 e 0,9 (Robertson, 2009). Definindo-se o *valor alvo* ($I_{c,t}$), a tensão vertical efetiva (σ'_{vo}) pode ser avaliada de acordo com a Equação 15.

$$\sigma'_{vo} = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{10^{3,47} - \sqrt{I_{c,t}^2 - (\log F_r + 1,22)^2}} \quad (\text{Eq. 15})$$

Uma vez determinado o estado de tensões efetiva, é possível normalizar o ensaio CPTu considerando o efeito da condição não saturada nos ensaios CPTu, além disso, por meio da Equação 15 e da Equação 5, proposta por Bishop (1959), é possível estimar a sucção atuante na época da realização da campanha de ensaios.

6.4 Ensaio pressiométrico em solos não saturados

Schnaid (1995) e Schnaid e Silva (1997) apresentaram uma proposta para determinar parâmetros de resistência e deformabilidade de solos não saturados a partir da interpretação de ensaios pressiométricos pré-furo por meio de modelos elasto-plásticos empregando-se as formulações de Carter *et al.* (1986) e Yu e Houlsby (1991, 1993), bem como análises numéricas, baseando-se em um modelo não linear elástico (Duncan & Chang, 1970).

Schnaid e Silva (1997) realizaram ensaios pressiométricos em condição natural e inundada a fim de avaliar o efeito da condição não saturada nos resultados de ensaios PMT, bem como na sua interpretação. Os autores observaram, para ensaios pressiométricos realizados a 4,0 m de profundidade, que a inundação do solo e a consequente redução da sucção, reduziu o módulo de cisalhamento (G) e a pressão limite (ψ_1). Na Tabela 2, são

apresentados os valores dos parâmetros obtidos a partir dos ensaios pressiométricos realizados a 4,0 m de profundidade para as duas condições, natural e inundada.

Tabela 2 – Valores médios determinados por meio de ensaios pressiométricos nas condições naturais e inundadas (Schnaid & Silva, 1997)

Prof. (m)	Condição	P_{om} (kPa)	P_f (kPa)	G_i (MPa)	γ (%)	E_{pm} (MPa)	ψ_1 (kPa)
4,0	Natural	30	485	3.78	12,10	9,82	1196
	Inundada	129	503	2.29	16,33	5,95	693

A proposta apresentada por esses autores consiste em empregar um método alternativo para interpretação de um ensaio PMT, para facilitar a identificação e definição dos valores de P_{om} , P_f e ψ_1 . A interpretação da curva pressiométrica de campo é feita por meio de um ajuste com a curva teórica definida a partir de simulação numérica.

Na Figura 21, tem-se as curvas medida e teórica (estimada) para a condição inundada. Observa-se uma boa concordância entre elas, destacando-se a aplicabilidade dessa abordagem para interpretação de ensaios pressiométricos.

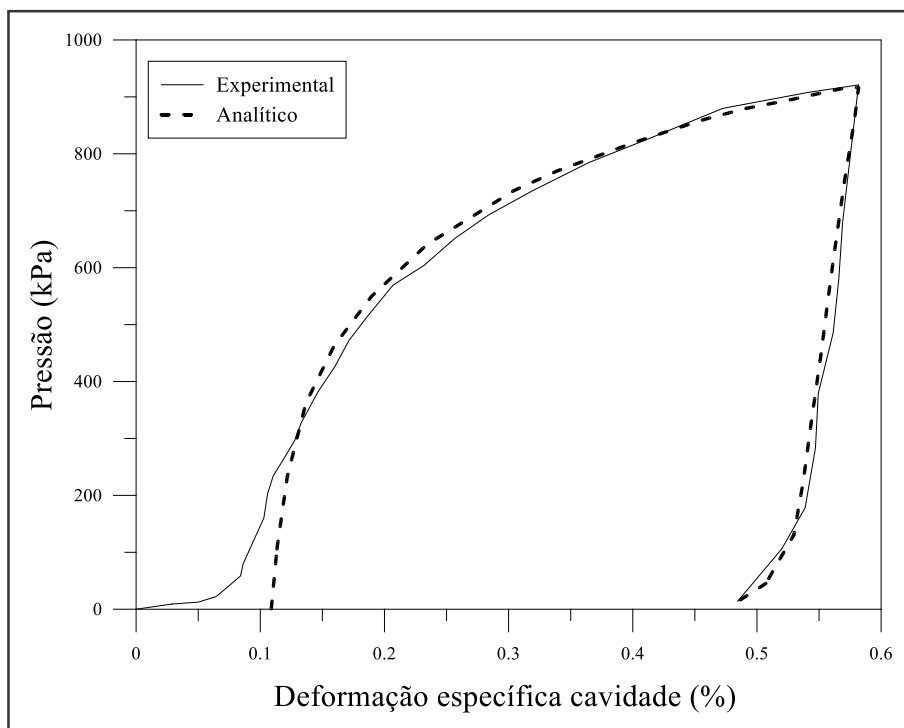


Figura 21 – Comparação entre a curva experimental e a teórica ajustada para a condição inundada para o ensaio PMT realizado a 4,00 m de profundidade (adaptado de Schnaid & Silva, 1997)

Essa abordagem permite quantificar a variação do módulo de deformabilidade em função da sucção. Além disso, é possível estimar a variação do intercepto de coesão em função da sucção medida em campo, empregando-se, por exemplo, a equação de resistência de solos não saturados proposta por Fredlund *et al.* (1978). Os autores apresentam os valores de coesão estimados por meio do PMT para amostras coletadas a 2,25, 3,00, 4,00 e 5,00 m de profundidade (Figura 22). A partir da Figura 22, observa-se a tendência de aumento da coesão com o aumento da sucção. Verifica-se também uma acentuada dispersão dos resultados estimados pelo PMT, porém os valores estimados crescem com a sucção e, em geral, situam-se acima da linha definida pela equação de Fredlund *et al.* (1978). Essa dispersão pode estar, pelo menos, em parte, atrelada às diferenças nos índices de vazios, tendo em vista que os resultados foram determinados para diferentes profundidades. De acordo com os autores, tal dispersão pode estar relacionada, principalmente, à variabilidade natural do solo e à ausência de medidas de sucção em tempo real.

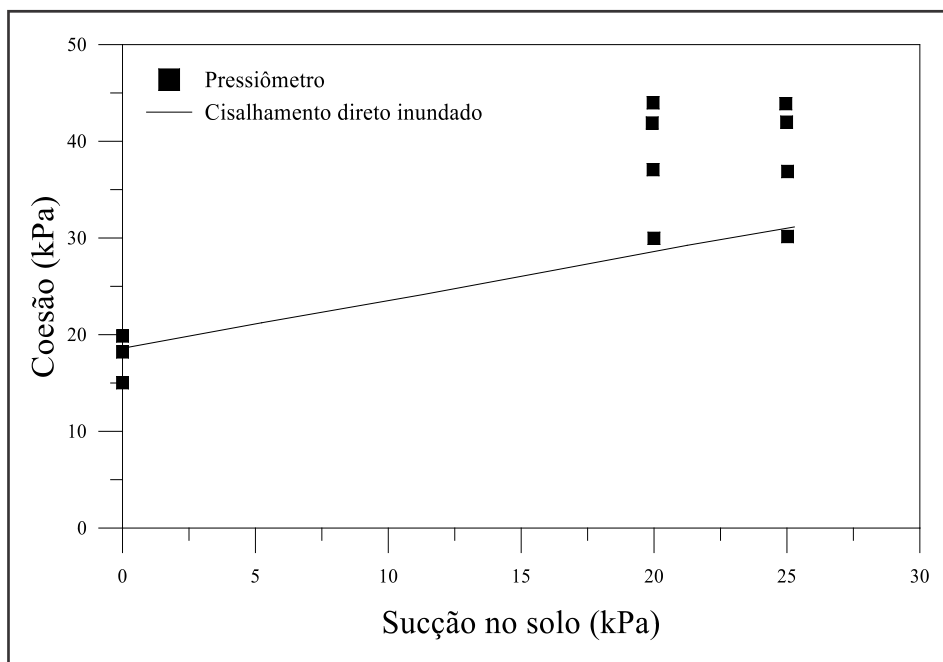


Figura 22 – Variação do intercepto coesivo em função da sucção (adaptado de Schnaid & Silva, 1997)

6.5 Ensaios dilatométrico (DMT) em solos não saturados

A interpretação do ensaio DMT inicia-se pela determinação dos parâmetros intermediários do ensaio (I_D , K_D e E_D), entretanto, as Equações 2, 3 e 4, empregadas para calcular esses parâmetros, não consideram a condição não saturada. Nesse sentido, Bernardi (2018) propôs a adaptações das equações propostas por Marchetti (1980) para a calcular

K_D e I_D . A autora propôs a incorporação da variável sucção tanto no denominador quanto no numerador. Para isso, empregou-se a equação de tensões efetivas proposta por Bishop (1959).

A equação de Bishop (1959) (Equação 5) foi incorporada na tensão horizontal efetiva (Equação 16), resultando na Equação 17.

$$\sigma'_h = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma'_v \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\sigma'_h = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma'_v - u_a) + \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (\text{Eq. 17})$$

onde μ é o coeficiente de Poisson.

Assim, a adaptação da equação do parâmetro K_D resulta na Equação 18. O denominador da equação é a tensão efetiva vertical proposta por Bishop (1959), em que já está incorporada à variável sucção com a correção pelo parâmetro χ .

$$K_D = \frac{p_0 + \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right) \cdot \chi \cdot (u_a - u_w)}{(\sigma'_v - u_a) \cdot \chi \cdot (u_a - u_w)} \quad (\text{Eq. 18})$$

Para o parâmetro I_D , foi proposta a adaptação apresentada na Equação 19.

Nessa equação, o parâmetro u_0 foi substituído pela correção na sucção do solo, em que emprega-se o parâmetro χ e a razão do coeficiente de Poisson.

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 + \chi \cdot (u_a - u_w) \cdot \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)} \quad (\text{Eq. 19})$$

A autora não propôs adaptações para determinar o módulo dilatométrico (E_D) em função da sucção.

6.6 Abordagem proposta por Miller *et al.* (2018)

Miller *et al.* (2018) apresentaram e discutiram resultados de ensaios CPT realizados em um silte argiloso compactado sob diferentes teores de umidade e de sucções matriciais em uma câmara de calibração, em conjunto com os resultados de CPTs realizados em dois perfis de solos argilosos não saturados ao longo de um período de, aproximadamente, dois anos. Os dados obtidos mostraram uma dependência da resistência de ponta do cone em relação ao teor de umidade e, consequentemente, da sucção do solo.

Com o intuito de avaliar possíveis alterações na resistência de ponta (q_c) em função da sucção do solo, os autores propuseram uma abordagem para estimar q_c em função da sucção, baseando-se na teoria de capacidade de carga. Os autores empregaram a equação de capacidade de carga proposta por Durgunoglu e Mitchell (1973) (Equação 20) para a estimativa de q_c .

$$q_c = c \cdot N_c \cdot \xi_c + \gamma \cdot B \cdot N_{\gamma q} \cdot \xi_{\gamma q} \quad (\text{Eq. 20})$$

onde c é a coesão do solo, γ é o peso específico do solo, B é a largura da base do cone, N_c e $N_{\gamma q}$ são fatores de capacidade de carga e ξ_c e $\xi_{\gamma q}$ são fatores de forma. Para se considerar o efeito da condição não saturada, foi empregado o modelo de resistência ao cisalhamento de solos não saturados proposto por Vanapalli *et al.* (1996). Desse modo, para se avaliar o efeito da condição não saturada na estimativa da resistência de ponta do cone, utiliza-se a Equação 21.

$$q_c = \left[c' + (u_a - u_w)(\tan \Phi') \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] N_c \xi_c + \gamma B N_{\gamma q} \xi_c \quad (\text{Eq. 21})$$

onde c' é a coesão efetiva, Φ' é o ângulo de atrito efetivo, θ é a umidade volumétrica, θ_s é a umidade volumétrica de saturação, θ_r é a umidade volumétrica residual.

Desse modo, tendo-se a curva de retenção de água nos solos (SWRC) o ângulo de atrito efetivo e a coesão efetiva, a resistência de ponta pode ser estimada para uma ampla faixa de valores de sucção. É importante ressaltar que os fatores de capacidade de carga e de forma podem ser obtidos por ábacos ou equações apresentadas por Durgunoglu e Mitchell (1973).

7. EXEMPLOS DO EFEITO DA CONDIÇÃO NÃO SATURADA NO CPT E NO DMT

7.1 CPT

7.1.1 Resultados

Um exemplo do efeito da condição não saturada nos resultados de ensaios CPT foi apresentado por Giacheti *et al.* (2019). Tal estudo contemplou campanhas de ensaios, nas quais, em cada uma delas, foram realizados três ensaios CPT e uma amostragem de solo por meio de trado helicoidal. Essas campanhas foram realizadas nos meses de junho, julho, agosto, setembro e dezembro de 2011 e janeiro de 2012.

O perfil de solo investigado é composto por uma areia fina pouco argilosa marrom avermelhada, de comportamento laterítico até, aproximadamente, 13,0 m de profundidade, não saturada, de baixa plasticidade, de origem coluvionar, com alta porosidade. Sua composição granulométrica é relativamente uniforme ao longo do perfil.

A Figura 23 apresenta os perfis de umidade determinados nas seis campanhas realizadas. A partir dessa figura, observa-se maior variação nos teores de umidade no horizonte mais superficial, até cerca de 4,0 m de profundidade, uma vez que esse horizonte tem um contato mais ativo com a atmosfera, sofrendo intensivamente os efeitos de infiltração e evaporação da água. Por meio dos perfis de umidade e das informações de precipitação durante o período de estudo, os autores agruparam as campanhas realizadas em junho, julho, agosto e setembro de 2011 como representativas de meses secos, e as campanhas de dezembro de 2011 e janeiro de 2012 como representativas de meses úmidos. Observa-se

que, para o perfil objeto do estudo, a grande variação de umidade entre os períodos seco e úmido situa-se na zona ativa limitada a 4 m de profundidade.

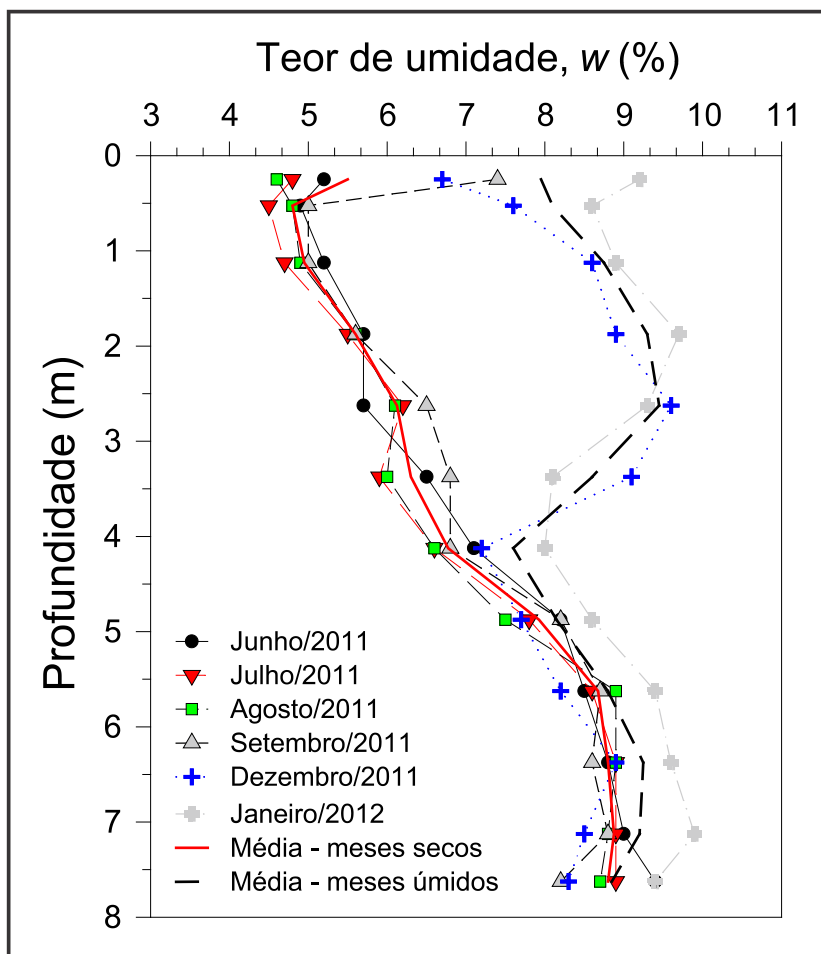


Figura 23 – Perfis de umidade *versus* profundidade determinadas ao longo de junho/2011 a janeiro/2012 (adaptado de Rocha, 2018)

Como a variação da umidade foi maior até os 4,0 primeiros metros do perfil do terreno, os resultados de CPT realizados foram reinterpretados até 8,0 m de profundidade.

A Figura 24 apresenta os perfis médios de q_c e f_s determinados a partir das seis campanhas realizadas. Com o intuito de reinterpretar os ensaios CPTs realizados a fim de se avaliar o efeito da sazonalidade, os resultados de ensaios de curva de retenção, triaxiais e edométricos com sucção controlada realizados em amostras coletadas a 1,5, 3,0 e 5,0 m de profundidade apresentados por Saab (2016) e Fernandes (2016) foram utilizados. A Figura 25 apresenta um resumo dos resultados desses ensaios de laboratório.

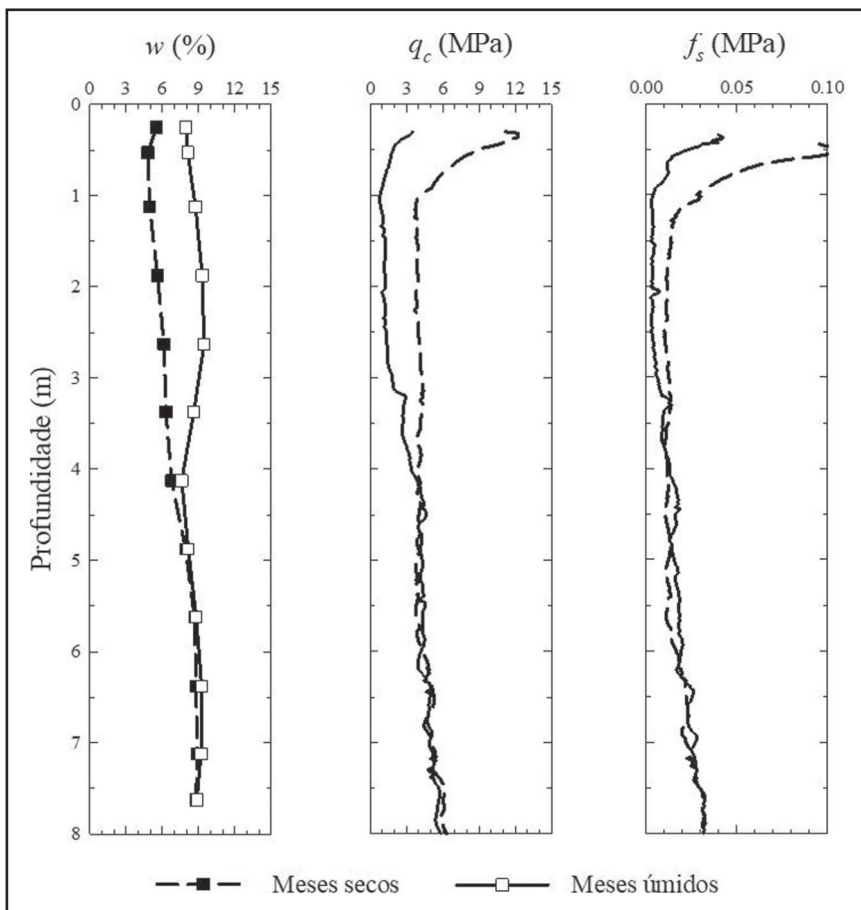


Figura 24 – Valores de teor de umidade, q_c e f_s médios para os meses secos e úmidos para o perfil investigado (adaptado de Rocha, 2018)

A SWRC média desse solo (Figura 25a) é do tipo bimodal, com destaque para as regiões 1 e 2, onde ocorrem as variações da sucção em campo. Na dessaturação da zona de macroporos, tem-se uma pequena variação de sucção (de 1 a 10 kPa), provocando uma grande variação de umidade, região 1. Observa-se também que os valores de intercepto de coesão (c) e da tensão de pré-adensamento (σ'_p) foram pouco afetados para valores de sucção inferiores a 10 kPa, o que corresponde a teores de umidade superiores a 6% a 7 (Região 1 da SWRC média). Entretanto, na região 2 da SWRC média, os valores de c e σ'_p apresentaram grande influência da sucção (valores maiores do que 10 kPa) e com teores de umidade inferiores a 6% a 7%. Desse modo, a partir da Figura 25, verifica-se a influência significativa da sucção na variabilidade dos parâmetros geotécnicos quando se está na Região 2, uma vez que para uma pequena variação do teor de umidade, acarreta uma grande variação na sucção do solo.

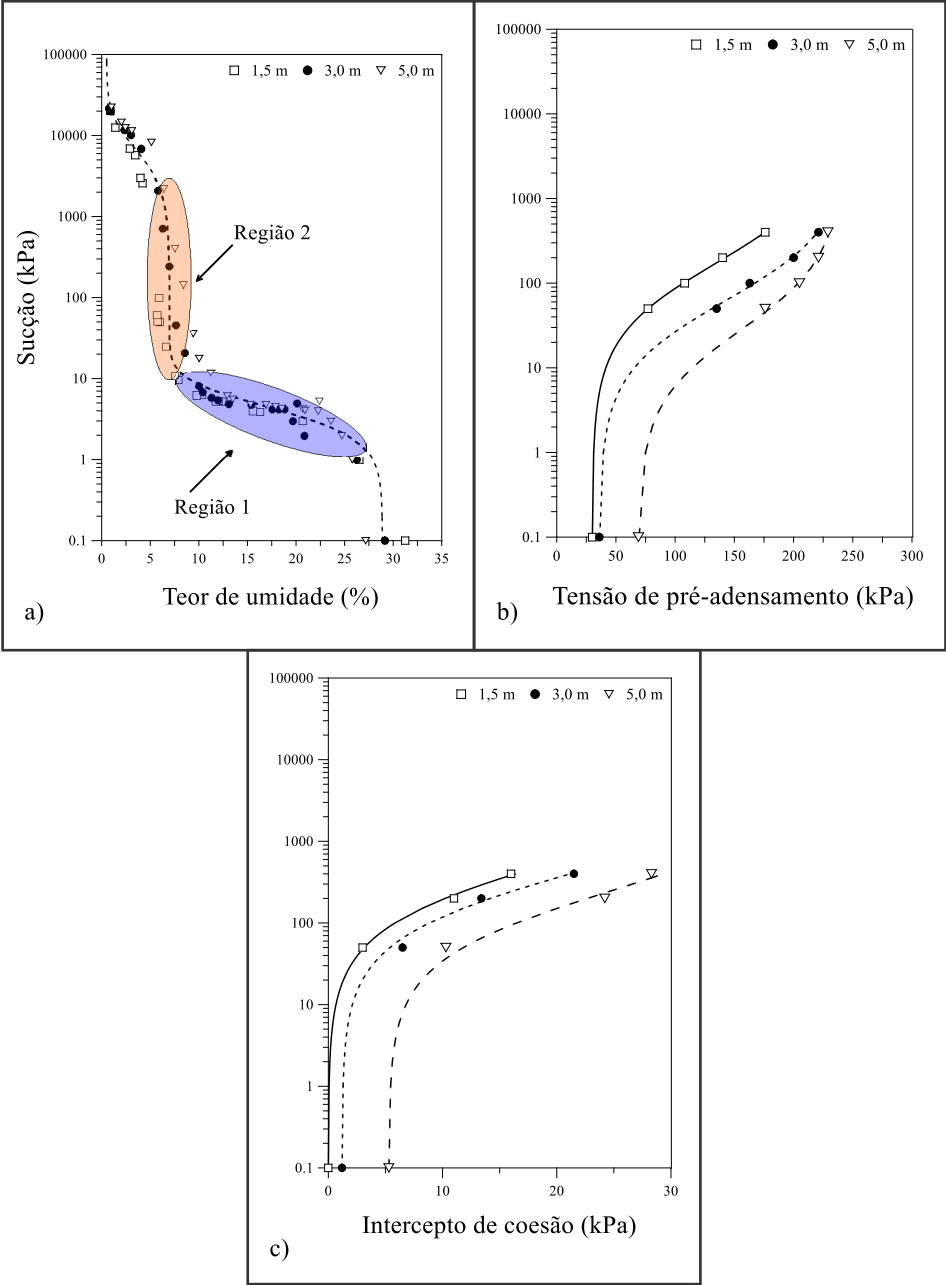


Figura 25 – a) SWRC média, b) tensão de pré-adensamento, c) intercepto de coesão para amostras coletadas a 1,5, 3,0 e 5,0 m de profundidade (adaptado de Rocha, 2018).

7.1.2 Efeito da sucção nos resultados

Robertson (2009) propôs um ábaco de classificação a partir do comportamento contrátil ou dilatante dos materiais. Nesse ábaco, a resistência do cone normalizada (Q_{tn}) é plotada *versus* a razão de atrito normalizada (F_r), sendo ambos respectivamente definidos pelas equações (22) e (23) a seguir:

$$Q_{tn} = \frac{q_c - \sigma_v}{p_a} \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^n \quad (\text{Eq. 22})$$

$$F_r = \frac{f_s - \sigma_v}{q_c - \sigma_v} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 23})$$

onde σ_v é a tensão total, σ'_v é a tensão vertical efetiva *in situ*, p_a é a pressão atmosférica (100 kPa), $(q_c - \sigma_v)/p_a$ é a resistência do cone normalizada, $(p_a/\sigma'_v)^n$ é o fator de tensão normalizado, e n é o expoente que relaciona q_c e σ'_v , sendo definido por:

$$n = 0,381 \cdot I_c + 0,05 \cdot (\sigma'_v/p_a) - 0,15 \quad (\text{Eq. 24})$$

onde $n \leq 1$ e I_c é o índice de classificação do material.

Como já apresentado, a sucção afetou os resultados do CPT e, consequentemente, o comportamento mecânico do solo, portanto, a posição dos dados nos ábacos de classificação dos solos. A consideração da sucção na interpretação de ensaios de campo pode ser feita empregando-se a equação de tensões efetivas proposta por Bishop (1959) (Equação 5). O parâmetro χ foi definido pela relação direta entre χ e o grau de saturação, conforme apresentado e discutido Robertson *et al.* (2017).

A partir dos perfis de umidade determinados nas diferentes campanhas de ensaios, em conjunto com a curva de retenção média do solo e com os índices físicos do solo, foi possível calcular os graus de saturação e os valores χ (Robertson *et al.*, 2017).

A partir da interpretação das SWRC (Figura 25a) e dos perfis de umidade médios (Figura 23), observou-se que os valores de sucção podem ser superiores a 1000 kPa para os meses secos no perfil investigado. Entretanto, para a maioria das aplicações em engenharia geotécnica, os valores de sucção variam de 0 a 600 kPa (Khalili e Khabbaz, 1998; Vanapalli *et al.*, 1996).

A Figura 26 apresenta a resistência do cone normalizada (Q_{tn}), determinada pela Equação 22, considerando-se a sucção do solo nas tensões efetivas. Três valores de sucção do solo (zero, 200 e 600 kPa) foram assumidos para demonstrar a influência da sucção em Q_{tn} .

Quando o valor de sucção igual a 600 kPa é considerado nas tensões efetivas, o perfil médio de q_c obtido durante os meses secos é bastante semelhante ao perfil obtido nos meses úmidos (Figura 26).

A Figura 27 apresenta os valores médios dos ensaios CPT até a profundidade de 4,0 m (região mais influenciada pela condição não saturada), plotados no ábaco de classificação dos solos proposto por Robertson (2009), considerando-se e não se considerando a sucção do solo nas tensões efetivas (σ'_v). A partir dessa figura, observa-se que todos os dados se encontram na região de penetração em condição drenada, o que está de acordo com o comportamento mecânico do perfil de solo investigado (Fernandes, 2016).

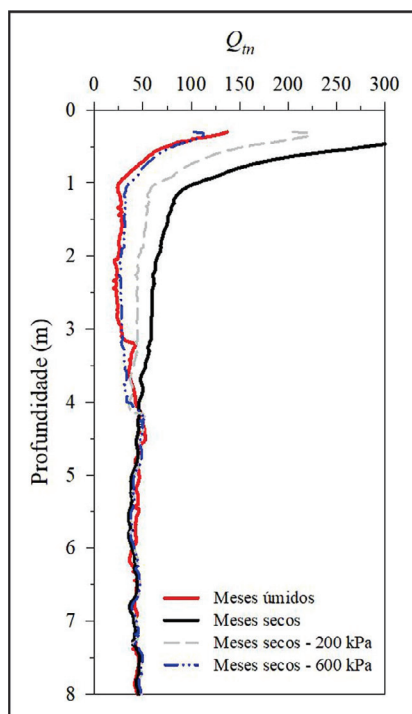


Figura 26 – Valores de Q_{tn} ajustados em função da sucção para os dados de CPT para o perfil de solo investigado (adaptado de Rocha, 2018)

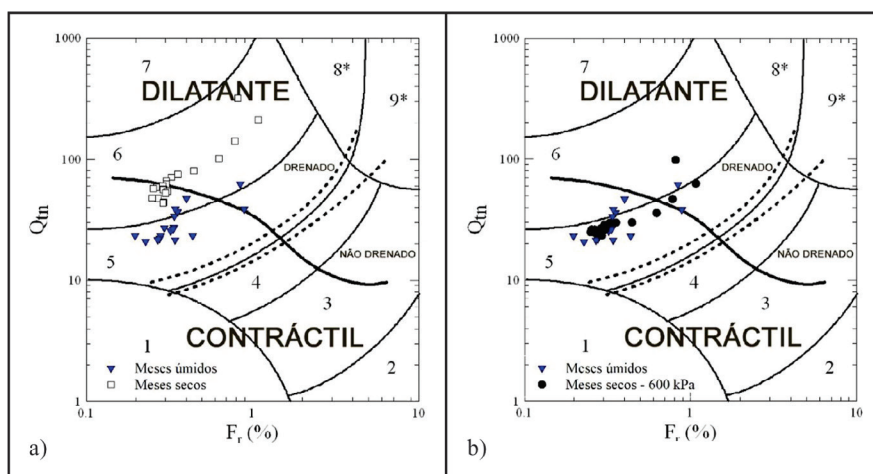


Figura 27 – Resultados dos ensaios CPT realizados no perfil de solo investigado, a) não considerando e b) considerando a sucção do solo nas tensões efetivas (adaptado de Rocha, 2018)

Figura 27a mostra que, quando a sucção do solo não é considerada nas tensões σ'_v , para os meses secos, o solo investigado é classificado como areias a areias siltsosas (zona 6) até a profundidade de 4,0 m e como siltes arenosos a areias siltsosas (zona 5) nos meses úmidos (baixa sucção). Figura 27a também indica que o solo tende a ser mais contrátil nos meses úmidos e apresentar comportamento dilatante nos meses secos. Uma vez que os ensaios foram realizados no mesmo local, visando minimizar a variabilidade espacial, a variação observada está relacionada à variação na sucção do solo, podendo afetar seu comportamento mecânico.

A Figura 27b mostra que, quando se assume um valor de sucção igual a 600 kPa para calcular σ'_v , o solo tende a ser classificado como misturas de areia e se comportar como contrátil a grandes deformações, que é o mesmo comportamento observado na condição úmida (sem o efeito da condição não saturada) nos resultados de ensaios CPT. Fernandes (2016) apresentou e discutiu resultados de ensaios de compressão triaxial com sucção controlada para diferentes valores de sucção em amostras indeformadas coletas no perfil de solo investigado e constatou o comportamento contrátil do solo para baixos valores de sucção, bem como comportamento dilatante para elevados valores de sucção.

Um programa de caracterização do subsolo adequado em perfis de solos não saturados deve considerar a variabilidade sazonal e a sua influência sobre o comportamento mecânico do solo. A partir dos resultados de ensaios CPT apresentados, observou-se a influência sazonal nos valores de teor de umidade e de sucção do solo e como esta afeta o comportamento mecânico do perfil de solo investigado até 4,0 m de profundidade, podendo essa profundidade de influência ser maior ou menor em função de especificidades como nível de intemperização do maciço, condições climáticas e cobertura do solo. Os resultados dos ensaios CPT sofreram influência da sucção do solo, que resultou em classificações distintas nas diferentes épocas do ano, sendo este um aspecto a ser melhor analisado. A consideração da sucção nas tensões efetivas por meio da equação proposta de Bishop (1959) possibilita identificar esse efeito na classificação do solo e na interpretação dos resultados dos ensaios de CPT.

7.2 DMT

7.2.1 Resultados

Seguindo-se a mesma abordagem empregada para a interpretação de ensaios CPT em solos não saturados, Rocha (2018) e Rocha *et al.* (2021) apresentam e discutem outro exemplo que destaca o efeito da condição não saturada em resultados de ensaios de campo, agora o DMT.

Nesse exemplo, foram realizadas quatro campanhas de ensaios, nas quais, em cada uma delas, foram realizados três ensaios DMT e uma amostragem de solo por meio de trado helicoidal. Essas campanhas foram realizadas nos meses de março e outubro de 2016 e abril e outubro de 2017.

O perfil de solo investigado está localizado no campo experimental da EESC-USP de São Carlos-SP e é constituído por uma areia fina a média argilosa, de cor marrom, porosa e colapsível, com comportamento laterítico, até aproximadamente 7,0 m de profundidade (Sedimento Cenozóico). Em seguida, encontra-se uma linha de seixos de quartzo

e limonita com espessuras de até 1,0 m, que separa esse sedimento de um horizonte de solo residual jovem oriundo de Arenito do Grupo Bauru, constituído por uma areia argilosa vermelha, pouco a medianamente compacta, que atinge cerca de 23,5 m de profundidade. Nesse local, o nível de água varia sazonalmente entre 9,0 e 12,0 m de profundidade.

O monitoramento do teor de umidade teve início nesse local em 2015 para se avaliar o efeito da sazonalidade na resposta térmica em fundações trocadoras de calor (Morais *et al.*, 2020). Na Figura 28, tem-se os perfis de umidade determinados nas quatro campanhas de ensaios DMT realizadas por Rocha *et al.* (2021). A partir dessa figura, observa-se que a campanha de março/2016 apresentou os maiores valores de teor de umidade (acima de 17%), e a campanha de outubro/2017, os menores valores (inferior a 15,3%, variando de 11,3 a 15,3%). Os baixos valores de teor de umidade observados em outubro/2017 podem estar associados à presença de árvores no local investigado. A extração de água por meio das raízes das árvores durante a estação seca acarretou valores de grau de saturação de, aproximadamente, 40% e, consequentemente, valores elevados de sucção no solo. Lehane *et al.* (2004) e Giacheti *et al.* (2019) relataram a influência da sucção do solo em resultados de ensaios CPT, sendo que elevados valores de sucção foram causados pela presença de raízes das árvores. As raízes, na época seca, tendem a retirar água do solo, diminuindo o grau de saturação e aumentando, consequentemente, a sucção do solo. Lehane *et al.* (2004) estimaram valores de sucção no solo iguais a 125 kPa e 220 kPa a 3,5 m de profundidade e valores mais baixos a 6,5 m de profundidade.

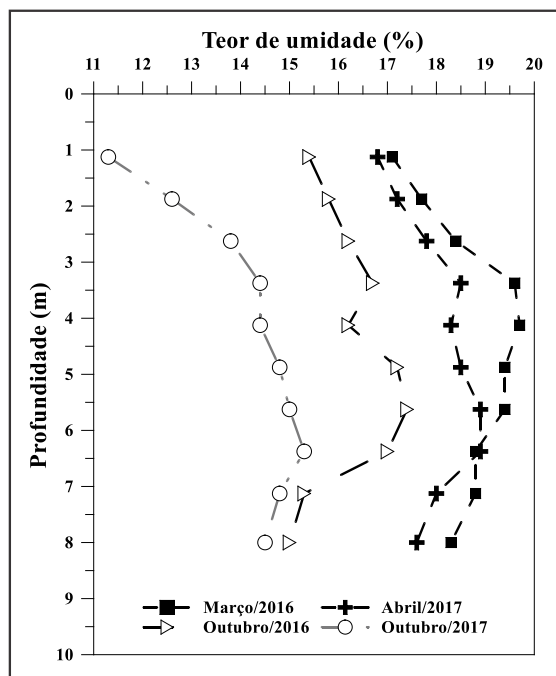


Figura 28 – Perfis de umidade *versus* profundidade determinadas nas quatro campanhas realizadas (adaptado de Rocha 2018)

Os resultados dos ensaios realizados nessas campanhas foram interpretados a fim de se avaliar a influência da condição não saturada nos valores do índice de material (I_D), índice de tensão horizontal (K_D) e do módulo dilatométrico (E_D). A Figura 29 apresenta os perfis médios de I_D , K_D e E_D determinados a partir dessas quatro campanhas. Com o intuito de se avaliar o efeito da sazonalidade, os resultados de ensaios de curva de retenção, triaxiais e edométricos com sucção controlada previamente realizados por Machado (1998) em amostras coletadas a 2,0, 5,0 e 8,0 m de profundidade foram utilizados. A Figura 30 apresenta uma síntese dos resultados dos ensaios de laboratório realizados por Machado (1998).

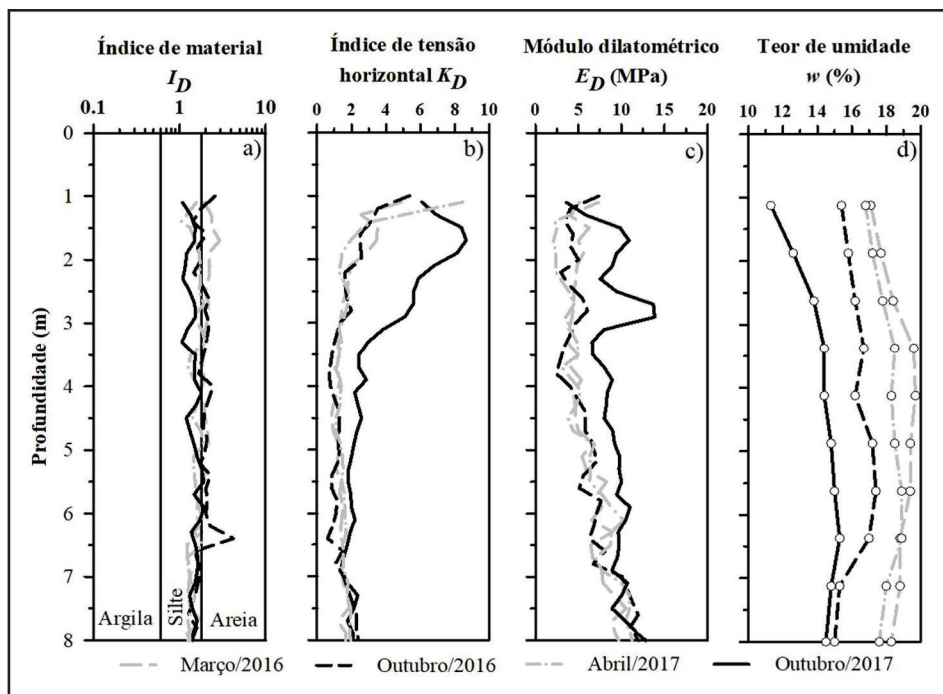


Figura 29 – Valores de teor de umidade, e perfis médios de I_D , K_D e E_D para as quatro campanhas de ensaios realizadas no perfil investigado (adaptado de Rocha, 2018)

A SWRC média do solo do campo experimental da EESC-USP (Figura 30b) tem um trecho de dessaturação de macroestrutura íngreme, isto é, uma pequena variação de sucção (de 0,1 a 10 kPa) provoca uma grande variação de umidade (região 1), e um trecho de dessaturação da microestrutura, onde uma pequena variação de umidade acarreta uma grande variação da sucção (região 2). Pode-se observar ainda, na Figura 30a e Figura 30c, que os valores de c e σ'_p têm pouca variação para baixos valores de sucção (valores menores do que 10 kPa), o que corresponde a teores de umidade superiores a 16% a 17%, região 1 da SWRC média. Na região 2 dessa curva, c e σ'_p tem grande variação devido à sucção (valores maiores do que 20 kPa) e teores de umidade inferiores a 16% a 17%. A

síntese de resultados de ensaios de laboratório apresentada na Figura 30 destaca a variabilidade dos parâmetros geotécnicos na região 2, ou seja, para pouca variação do teor de umidade, há uma grande variação na sucção do solo.

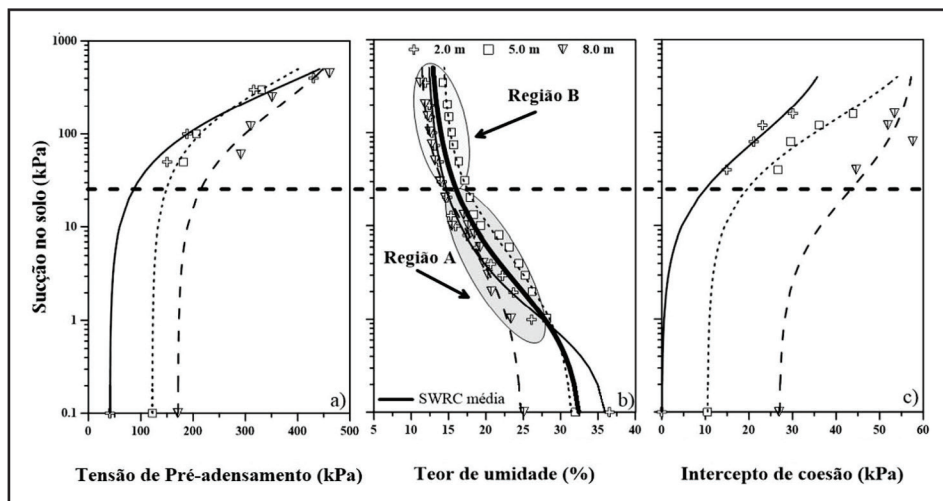


Figura 30 – a) tensão de pré-adensamento, b) SWRC média, c) intercepto de coesão para amostras coletadas a 1,5, 3,0 e 5,0 m de profundidade (adaptado de Rocha, 2018)

A partir da interpretação conjunta das Figura 29 e Figura 30, observa-se que a influência da condição não saturada está presente apenas nos parâmetros K_D (Figura 29b) e E_D (Figura 29c) da campanha de outubro/2017 até, aproximadamente, 6,0 m de profundidade. Tal fato pode ser interpretado analisando-se o perfil de umidade medido nessa campanha, em conjunto com a curva de retenção média do solo (Figura 30b). Dessa análise, observa-se que os valores de umidade dessa campanha estão localizados na região 2 da curva de retenção média do solo, onde ocorre uma grande variação da sucção para uma pequena variação da umidade. Importante destacar que a variação observada para os três parâmetros intermediários do DMT (I_D , K_D e E_D) estão de acordo com aquilo que foi apresentado por Lutenegeger (1988). Esse autor reportou comportamento semelhante, ou seja, uma diminuição sistemática no K_D e E_D à medida que o solo se torna mais úmido e pouca alteração no índice de material (I_D). Assim, os resultados de ensaios DMT realizados em solos não saturados devem ser interpretados considerando-se as variações no teor de umidade em conjunto com as curvas de retenção de água no solo (SWRC).

7.2.2 Efeito da sucção nos resultados

Da mesma forma que foi feito com os resultados de ensaios CPT apresentados no subitem anterior, as quatro campanhas de ensaios DMT realizadas (março e outubro de 2016 e abril e outubro de 2017) foram reinterpretadas considerando-se o efeito da condição não saturada.

Das correlações clássicas desenvolvidas por Marchetti (1980), somente a correlação para a estimativa de K_D é normalizada pelas tensões efetivas. I_D é normalizado pela tensão horizontal efetiva ($p_0 - u_0$), sendo u_0 a pressão hidrostática no solo. Já E_D não é normalizado, sendo definido pela diferença de p_1 e p_0 , considerando-se a Teoria da Elasticidade.

Na estimativa de K_D , foi utilizada a equação de Bishop (1959) para a definição das tensões efetivas. No caso de I_D , como esse índice é empregado como um indicativo do tipo de solo para se definir a faixa de aplicabilidade de correlações empíricas e não houve efeito pronunciado da condição não saturada nesse parâmetro, ele não foi corrigido. Já o efeito da condição não saturada nos valores de E_D foi avaliada empregando-se o índice de rigidez K_E . Vale lembrar que o índice de rigidez relaciona a rigidez do solo com o estado de tensões por meio da Equação 25:

$$E_D = K_E \cdot p_a \left(\frac{\sigma'_v}{p_a} \right)^n \quad (\text{Eq. 25})$$

onde p_a é a pressão atmosférica (100 kPa) e n é o expoente de tensões, assumido igual 0,5 para solos arenosos.

O cálculo de E_D considerando-se a condição não saturada foi feito seguindo duas etapas:

- O índice de rigidez (K_E) é calculado pela Equação 25 considerando-se a sucção do solo no cálculo das tensões efetivas (Equação de Bishop, 1959).
- E_D normalizado é, então, calculado empregando-se a Equação 25 e considerando-se o valor de K_E previamente calculado, assumindo-se sucção do solo igual a zero para o cálculo das tensões efetivas (Equação de Bishop, 1959).

Na Tabela 3, tem-se os valores de χ e sucção utilizados no cálculo das tensões efetivas a serem empregadas na normalização de E_D e K_D . Os valores de sucção foram definidos a partir de análise em conjunto dos perfis de umidade com a curva de retenção média desse solo.

Tabela 3 – Valores de χ e sucção do solo assumido para cada uma das campanhas realizadas (adaptado de Rocha *et al.*, 2021)

Campanha de ensaio	χ	Sucção do solo (kPa)
Março/2016	0,65	10
Outubro/2016	0,56	28
Abril/2017	0,62	14
Outubro/2017	0,42	150

Na Figura 31, tem-se os valores de E_D estimados sem considerar (Figura 31a) e considerando (Figura 31b) o efeito da condição não saturada nas tensões efetivas. Observa-se, nessa figura, a grande influência da sucção nos valores de E_D e que, ao se incorporar o

efeito da condição não saturada, tem-se a estimativa de E_D quase sem efeito da sucção para todas as campanhas. De modo semelhante à estimativa de E_D , os valores de K_D foram estimados incorporando-se o efeito da sucção nas tensões efetivas pela Equação de Bishop (1959). A Figura 32 apresenta os perfis de K_D estimados sem considerar (Figura 32a) e considerando (Figura 32b) o efeito da condição não saturada. Novamente, observa-se boa concordância entre os perfis de K_D estimados quando se retira o efeito da condição não saturada por meio das tensões efetivas.

Um programa de caracterização do subsolo adequado em perfis de solos não saturados deve considerar a variabilidade sazonal e a sua influência sobre o comportamento mecânico do solo. A partir dos resultados de ensaios DMT apresentados e discutidos, observou-se a influência da variação sazonal nos valores de teor de umidade e de sucção do solo e como esta afetou os valores de K_D e E_D e o comportamento mecânico do perfil de solo investigado até a profundidade de 6,0 m. A consideração da sucção nas tensões efetivas pela Equação de Bishop (1959), utilizando-se perfis de umidade e as SWRCs, possibilitou melhor interpretação dos ensaios DMT realizados no perfil de solo não saturado investigado.

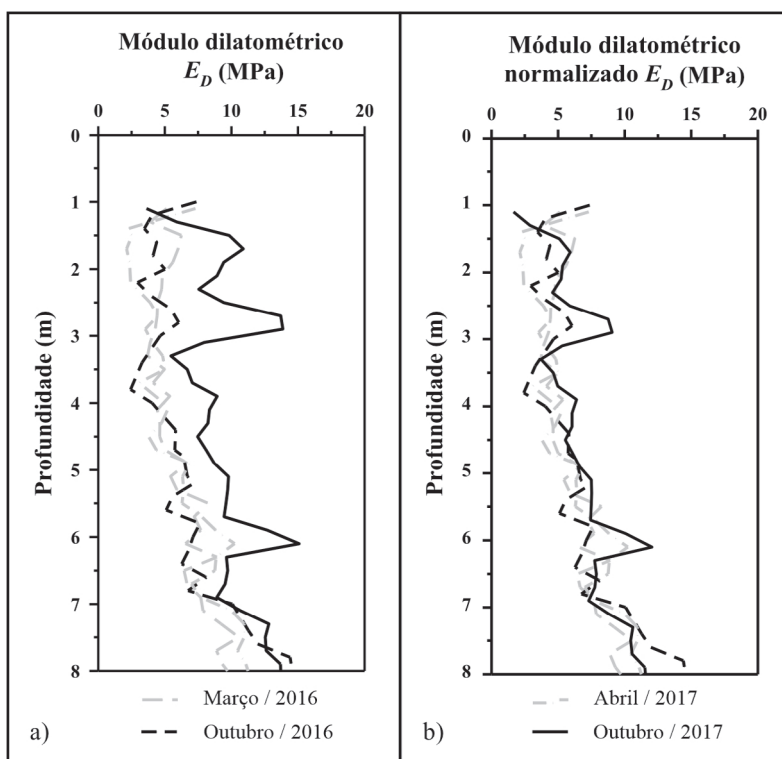


Figura 31 – Módulo Dilatométrico calculado não considerando (a) e considerando (b) o efeito da sucção nas tensões efetivas para as quatro campanhas de ensaios DMT realizados no perfil de solo investigado (adaptado de Rocha, 2018)

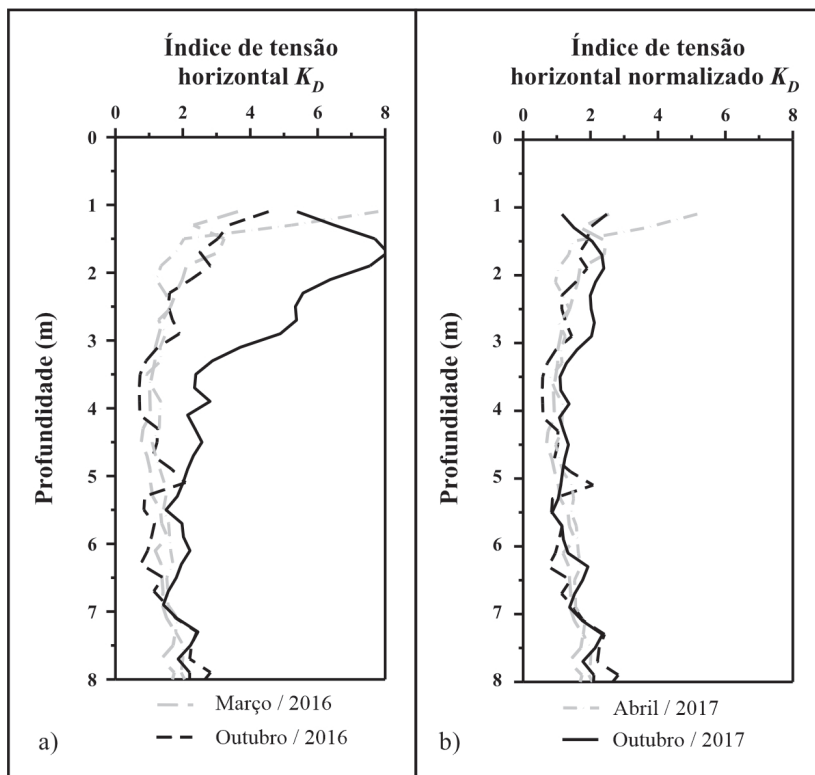


Figura 32 – Índice de tensão horizontal (K_D) calculado não considerando (a) e considerando (b) e efeito da sucção nas tensões efetivas para as quatro campanhas de ensaios DMT realizados no perfil de solo investigado (adaptado de Rocha, 2018)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento adequado da história geológica, da hidrogeologia, da geomorfologia e suas alterações antrópicas, mesmo as mais recentes, e da ocupação e uso do solo do local de interesse permite compreender os condicionantes que controlam as variações das propriedades geotécnicas e orientar as etapas de investigação, a fim de definir o perfil estratigráfico, incluindo-se a posição e a variabilidade do nível de água e estimar com boa aproximação os parâmetros de projeto.

Nos perfis de solos não saturados, sobretudo em regiões de clima com alternâncias de períodos secos e úmidos distintos apresentando nítida sazonalidade, tem-se, além da variabilidade espacial condicionada pela geologia e geomorfologia, aquela que é temporal do conteúdo de água nos poros dos solos, incluindo-se as alterações provenientes de fluxos de origem hidrogeológicas intermitentes, que pode ter efeito significativo nas propriedades e comportamentos dos solos.

Avanços nos equipamentos e procedimentos para realização dos ensaios de campo têm acontecido, com destaque para a incorporação da geofísica aos ensaios de perfilagem, lembrando, no entanto, que os resultados obtidos traduzem um momento e um ponto espacial, requerendo integrações e análises amplas quanto ao tempo e ao espaço. Dentre os ensaios de campo específicos, o PMT foi pouco empregado no Brasil, restringindo-se a algumas pesquisas que demonstraram o potencial dessa técnica para estudar o comportamento de solos não saturados, em especial quanto ao efeito da sucção nos parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos. A limitação do uso aplicado dessa técnica, assim como o de outras, está quase sempre ligada a pseudoanálises de avaliações econômicas e de tempo necessário à execução dos estudos, atrelando-as, no primeiro caso, tão somente ao custo direto, sem que se aprecie aqueles que dizem respeito ao empreendimento e aos riscos ambientais e para a segurança das pessoas e da sociedade.

Abordagens que incorporam o efeito da condição não saturada na interpretação de resultados de ensaios de campo ainda não estão suficientemente desenvolvidas, em especial para os ensaios de perfilagem, como o SPT, o CPT e o DMT. Nesse sentido, tem-se procurado incorporar conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados a fim de avaliar o efeito da sucção nos resultados desses ensaios e normalizar os resultados considerando-o. Não só as técnicas de ensaio requerem melhorias, como as normas precisam ser atualizadas para uma melhor apreciação do estado e do comportamento dos solos não saturados. Por exemplo, como tornar o procedimento de ensaios SPT mais condizente com a realidade de um perfil de solo não saturado se não se determinam os perfis de umidade, as porosidades, mesmo que estimadas, e os avanços dos furos são, muitas vezes, realizados com lavagem antes de se atingir o nível d'água? Fazem-se necessárias adequações para que se possa ter uma maior aproximação entre os resultados dos ensaios e o comportamento real do solo, lembrando que, em um projeto de engenharia, pelo menos, dois aspectos precisam ser adequadamente considerados: o econômico e a segurança.

Dentre as propostas disponíveis para se considerar o efeito da sucção nos resultados de ensaios de campo, destaca-se aquela que incorpora o efeito da sucção nas tensões efetivas por meio da equação de Bishop (1959). Nesse caso, considerar a variação do parâmetro χ linear com o grau de saturação (S_r) de 0 a 1, conforme Robertson *et al.* (2017), é um recurso simples, com bons resultados e, portanto, interessante para fins de aplicação prática. Essa abordagem não dispensa reflexões sobre sua real representatividade para situações específicas. Não só tal representatividade, como outras técnicas de análise irão surgindo e se consolidando com a ampliação dos estudos voltados para os solos não saturados, em especial no contexto dos perfis de intemperismo tropical.

Na abordagem sugerida, é necessário conhecer o valor de sucção de campo, mesmo que de modo estimado, pois sua medida direta quase sempre não é viável na fase de investigação do subsolo. Por isso, muitos autores têm optado por medir o teor de umidade, índice físico relativamente fácil de ser obtido, por meio de amostragem de solo ou técnicas TDR, sendo ainda recomendável avaliar o perfil de porosidade, mesmo que de modo estimado. Tais alternativas, mesmo que simplistas, permitem estimar a sucção por meio da curva de retenção de água, que passa a ser informação fundamental para interpretar o efeito da sucção nos resultados de ensaios de campo. Deve-se enfatizar que essa estimativa é aproximada e deve ser realizada com cautela, pois essa curva geralmente não re-

apresenta uma relação única entre umidade e sucção, podendo ser afetada principalmente pela histerese.

Finalmente, cabe destacar que, neste capítulo, procurou-se apontar problemas e possíveis caminhos para uma maior aproximação entre a interpretação de resultados de ensaios de campo e os conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6484 (2020). Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT - Método de Ensaio, CB-02, Rio de Janeiro.

Baillot, R. T.; Júnior, A. R. (1999). Sondagem a Percussão: Comparação entre processos disponíveis para Ensaios SPT. Solos e Rochas, 22, n. 3, 167-178.

Belincanta, A. (1985). Energia dinâmica no SPT - Resultados de uma investigação teórico experimental. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP.

Belincanta, A. (1998). Avaliação dos Fatores Intervenientes no Índice de Resistência a Penetração do SPT, Tese Doutorado, EESC/USP, São Carlos/SP.

Bernardi, C. (2018). Estudo da utilização do ensaio de Dilatômetro de Marchetti em um solo residual compactado com avaliação da influência da sucção, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad 106: p. 859-863.

Bishop, A. W.; Alpan, I.; Blight, G. E.; Donald, I. B. (1960). Factors Controlling the Strength of Partly Saturated Cohesive Soils. Proceedings... Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils; ASCE: New York, NY, USA, p. 503-532,

Bishop, A. W.; Donald, I. B. (1961). The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus. Proceedings... 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, France, v. 1, p. 13-21.

Blight, G. E. (1997). Interactions between the atmosphere and the Earth. Rankine Lecture, Géotechnique, 47, n. 4, p. 715-767.

Blight, G. E. (2003). The vadose zone soil-water balance and transpiration rates of vegetation. Géotechnique, 53, n. 1, p. 55-64.

Bolinelli Jr, H.L.; Mondelli, G.; De Mio, G.; Peixoto, A.S.P.; Giacheti, H.L. (2005). Piezocone de Resistividade na Investigação do Subsolo: Execução, Interpretação e Exemplos de Aplicação, Anais do 11º. CBGE, Florianópolis/SC, CD-Rom, 15 p.

Bryant, J. T.; Fischer, H.; Hossain, M. K.; Cheon, J. Y. (2018). The Active Zone: Unsaturated Soil Volume Change Due to Normal Cycles and Anomalies at Depth. In: Hoyos, L.R.; McCartney, J. S.; Houston S. L.; Likos, W. J. (ed.). *PanAm Unsaturated Soils 2017: Swell-Shrink and Tropical Soils*. Reston, VA: ASCE, GSP 303, p. 246-256.

Camapum de Carvalho, J.; Pereira, J. H. F. (2001). Análise da influência da sucção nos resultados de SPT e SPT-T em solos porosos colapsáveis. In: 4º. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2001, Porto Alegre. *Anais...* São Paulo: ABMS, 2001. p. 509-520.

Camapum de Carvalho, J.; Gitirana Jr, G. F. N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils & Rocks*, 44, n. 3, p.:e2021068121. <https://doi.org/10.28927/SR.2021.068121>

Campanella, R.G.; Robertson, P.K. (1984). A seismic cone penetrometer to measure engineering properties of soil. In *Proceedings of the 54th Annual International Meeting and Exposition of the Society of Exploration Geophysics*. Atlanta, Georgia.

Campanella, R.G.; Davies, M.P.; Kristiansen, H.; Daniel, C. (1997). Environmental Site Characterization of Soil Deposits Using In-Situ Test Methods, 50th Canadian Geotechnical Conference of the Canadian Geotechnical Society, Ottawa, Ontario, pp. 381-388.

Campanella, R. G.; Howie, J. A. (2005). Guidelines for the use, interpretation and application of Seismic Piezocone Test data: A manual on interpretation of seismic piezocone test data for geotechnical design, Geotechnical Research Group, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia.

Carter, J. P.; Booker, J. R.; Yeung, S. K. (1986). Cavity expansion in cohesive frictional soil; *Géotechnique*, 36 (3): p. 349-358, DOI: 10.1680/geot.1986.36.3.349

Cavalcante, E. H. (2002). *Investigação Teórico-experimental sobre o SPT*, Tese Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 430 p.

Cavalcante, E. H.; Coutinho, R. Q.; Danziger, F. A. B. ; Giacheti, H. L. *et al.* (2006). Campos Experimentais Brasileiros. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (XIII COBRAMSEG), Curitiba - PR. v. Único. p. 1-90.

Clayton, C. R. I.; Matthews; M. C.; Simons; N. E. (1995). *Site Investigation*, Wiley-Blackwell; 2nd edition, 592 p.

Collins, M.; Miller, G. A. (2014). Cone Penetration Testing in Unsaturated soils at Two Instrumented Test Sites. In: *International Conference on Unsaturated Soils, Proceedings...*, Sydney, v. 2, p. 1489-1493.

Cui, Y. J., Lu, Y.F., Delage, P.; Riffard, M. (2005). Field simulation of *in situ* water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions. *Géotechnique*, 55, n. 7, p. 557-567.

Davies, M.P.; Campanella, R.G. (1995). Piezocone Technology: Downhole Geophysics for the Geoenvironmental Characterization of Soil, Proceedings SAGEEP. Orlando, Florida, 11 p.

De Mello, V.F.B. (1971). The Standard Penetration Test – A State-of-the-Art Report., Proc. IV PCSMFE. Porto Rico, v. 1, p. 1-86.

De Mio, G. (2005). Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 359p.

De Mio, G.; Giacheti, H.L.; Stevanato, R.; Gois, J.R.; Ferreira, F.J.F. (2005). Investigação de intrusão de água salgada em aquífero superficial a partir de medidas de resistividade elétrica, *Solos e Rochas*, v. 28, n. 3, p. 249-260.

De Mio, G.; Giacheti, H. L. (2007). The use of piezocone tests for high-resolution stratigraphy of Quaternary sediment sequences in the Brazilian coast.” *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 79, n. 1: p. 153-170. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652007000100017>.

De Mio, G.; Giacheti, H. L.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2010). CPTU interpretation for stratigraphic logging: Differences between sedimentary and residual soils. In: 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, 2010, Hingintont Beach - California. CPT'10, 2010. v. CD-Rom. p. 1-8

Décourt, L. (1989). The Standard Penetration Test, State of the Art, Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, p. 2405-2428.

Décourt, L. (1998). A More Rational Utilization of Some Old In Situ Tests, Proc. Geotechnical Site Characterization, ISC'98, Atlanta/USA, p. 913-918.

Duncan, J.M.; Chang, C.M. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 96, SM5, p. 1629-1653

Durgunoglu, H. T.; Mitchell, J. K. (1973). Static penetration resistance of soils. For NASA Grant NGR 05-003-406: Lunar Soil Properties and Soil Mechanics, Space Sciences Laboratory Series 14, Issue 24, UC Berkeley; 223 p.

Fernandes, J. B. (2016). Estudo da Resistência e da Deformabilidade de um Perfil de Solo Laterítico não Saturado a Partir de Ensaio Triaxiais. 2016. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

Ferrari de Campos, D. J. (2018). Energia de execução de estacas hélice contínua como ferramenta de avaliação da competência do terreno. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnica, Universidade de Brasília, G.DM 306/2018, 129 p.

Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R.; Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils, *Can. Geotech. J.*, v. 15, p. 313-321.

Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley, New York, 517p.

Fredlund, D. G.; Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, n. 3, p. 521-532, <https://doi.org/10.1139/t94-061>.

Giacheti, H. L.; Bezerra, R. C.; Rocha, B. P.; Rodrigues, R. A. (2019). Seasonal influence in CPT: an unsaturated soil site example. *J Rock Mech Geotech Eng* 11(2): p. 361-368. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.10.005>

Gibson, R. E.; Anderson, W. (1961). In situ measurement of soil properties with the pressuremeter', *Civil Engineering and Public Work Review*, V. 56 N. 658, 615-618.

Guimarães, R. C. (2002). Análise das propriedades de comportamento de um perfil do solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas, Dissertação de mestrado, Publicação G.DM-091a/02, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 183 p.

Hryciw, R. D.; Dowding, C. H. (1987). Cone Penetration of Partially Saturated Sands. *Geotechnical Testing Journal*, v. 10, n. 3, p. 135-141. <https://doi.org/10.1520/GTJ10945J>.

Hughes, J.M.O, Wroth, C.P.; Windle, D. (1977). Pressuremeter Tests in Sand, *Géotechnique*, v. 27:4. p. 455-477.

Jennings, J. E. B.; Burland, J. B. (1962). Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique*, v. 12, n. 1, p. 125-144,

Khalili, N.; Khabbaz, M. H. A. (1998). Unique Relationship for χ for the Determination of the Shear Strength of Unsaturated Soils. *Geotechnique*. v. 48, n. 5, p. 681-687.

Lee, K. M.; Shen, C. K.; Leung, D. H. K.; Mitchell, J. K. (1999). Effects of placement method on geotechnical behaviour of hydraulic fill sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 125, n. 10, pp. 832-846

Lehane, B. M.; Ismail, M. A.; Fahey, M. (2004). Seasonal dependence of *in situ* test parameters in sand above the water table. *Geotechnique*, v. 54, n. 3, p. 215-218, 2004.

Lima, M.C. (2003). Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Brasília: Tese de Doutorado G.TD – 017A/03, Universidade de Brasília. 336 p.

Lo Presti, D.; Giusti, I.; Cosanti, B.; Squeglia, N.; Pagani, E. Interpretation of CPTu in “unusual” soils. *Riv. Ital. Geotec.* 2016, 50, 23-42

Lo Presti, D; Stacul, S.; Meisina, C; Bordoni, M.; Bittelli, M. (2018). Preliminary validation of a novel method for the assessment of effective stress state in partially saturated soils by cone penetration tests, *Geosciences*, 8 (1), p. 30, 10.3390/geosciences8010030

Lobo, B. O. (2009). Mecanismo de penetração dinâmica em solos granulares”. Tese de doutorado, UFRGS.

Lukiantchuki, J. A. (2012). Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica”. Tese de Doutorado, EESC/USP.

Lunne, T.; Robertson, P.K.; Powell, J. (1997). *Cone Penetration Test in Geotechnical Practice*, London, Blackie Academic Professional. 311 p.

Lutenegger, A. J. (1988) Current status of the Marchetti dilatometer test. In: De Rulter (ed) *Proceedings ISOPT-1 penetration testing: special lecture*, vol 1, Balkema, Rotterdam, pp 137-155

Machado, S. L. (1998). Aplicação de Conceitos de Elastoplasticidade a solos não saturados. 1998. 354 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Marchetti, S. (1980). In Situ Tests by Flat Dilatometer. *Journal Geotechnical Engineering*, GT3, v. 106, p. 299-321.

Marchetti, S. (1997). The Flat Dilatometer: Design Applications. *Proc. 3rd International Geotechnical Engineering Conference*, Keynote Lecture, p. 421-448.

Marchetti, S. (2006). Origin of the Flat Dilatometer. *Proceedings... 2nd International Conference on the Flat Dilatometer*. American Society of Civil Engineering (ASCE). Washington - DC - USA: R A Failmezger & J B Anderson Editors, v. 1. p. 1-2.

Marchetti, S. (2015). Some 2015 Updates to the TC16 DMT Report 2001. *Proceedings... 3rd International Conference on the Flat Dilatometer*. Parco dei Principi Grand Hotel & SPA, Italy, Rome, 23 p.

Marchetti S.; Monaco P.; Totani G.; Calabrese M. (2001). The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations, Proc. IN SITU 2001, Intl. Conf. on In situ Measurement Soil.

Mascarenhas, M. M. A. (2003). Influência do Recarregamento e da Sucção na Capacidade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 141p.

Mayne, P.; Schneider, J.A.; Martin, G.K. (1999). Small- and Large-Strain Soil Properties from Seismic Flat Dilatometer Tests, Proc. Pre-failure Deformation Charact. of Geomaterials, Torino, V.1, p. 419-426.

Ménard, J. L. (1975). The Ménard Pressuremeter, Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design, Soils Soils, N.26, p. 5-44.

Miller G. A; Tanb, N.K.; Collins, R. W. Muraleetharana, K. K. (2018). Cone penetration tests in unsaturated soils. Transp Geotech 17 (Part B): p. 85-99. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.008>

Mondelli, G.; De Mio, G.; Giacheti, H. L. (2004). Investigação do subsolo com o piezocone em um perfil de solo tropical areno-argiloso. In: V Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia e Simpósio Brasileiro de Investigação de Campo, 2004, São Paulo/SP. Anais... v. 1. p. 464-474, 2004.

Morais, T. S. O.; Tsuha, C. H. C.; Bandeira, L. A.; Singh, R. M. (2020). Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil. Energy Build 216:109971. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109971>

Nelson, J. D.; Overton, D. D.; Durkee, D. B. (2001). Depth of wetting and the active zone. In: Vipulanandan, C.; Addison, M. B.; Hasen, M. (ed.). Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations. Reston, VA: ASCE, GSP 115, p. 95-109.

Odebrecht, E. (2003). Medidas de Energia no Ensaio do SPT, Tese Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 230 p.

Palacios, A. (1977). Theory and Measurements of Energy Transfer During Standard Penetration Test Sampling, Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, USA, 391 p.

Passos, P.G.O.; Mascarenha, M.M.A. & Camapum de Carvalho, J. (2002). Estudo comparativo de ensaios *in situ* e em laboratório na argila porosa de Brasília. São Paulo: ABMS, XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, vol. 1, pp. 61-72.

Perez, C. C. (2017). Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM

286/17 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 98 p.

Pournaghiazar, M.; Russel, A. R; Khalili, N. (2013). The cone penetration test in unsaturated sands. *Geotechnique*, v. 63, n. 14, p. 1209-1220, <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.083>.

Ranzini, S.M.T. (1988). SPTF, Solos e Rochas, V.11, p. 29-30.

Ranzini, S.M.T. (1994). SPTF: 2a Parte, Solos e Rochas, V.17, p. 189-190.

Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 27, n. 1, p. 151-158,, <https://doi.org/10.1139/t90-014>.

Robertson, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration tests - a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 46, n. 11, p. 1337-1355, 2009. <https://doi.org/10.1139/T09-065>.

Robertson, P. K. (2016). CPT-based Soil Behavior Type (SBT) Classification System - An update. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53, n. 12, p. 1910-1927, <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>.

Robertson, P.K.; Campanella, R.G.; Gillespie, D.; Rice, A. (1986). Seismic CPT to measure *in situ* shear wave velocity. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 112(8): p. 791-803.

Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. J.; Grieg, J. (1986). Use of Piezometer Cone Data, *Proceedings of In-Situ' 86, ASCE, Geotechnical Special Publication*, n. 6, p. 1263-1280.

Robertson, P. K.; Viana da Fonseca, A.; Ulrich, B.; Coffin, J. (2017). Characterization of unsaturated mine waste: A case history. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 54, n. 12, p. 1752-1761, <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0129>.

Rocha, B. P. (2018). Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 242p.

Rocha, B. P.; Rodrigues, R. A., Giacheti, H. L. (2021). The flat dilatometer test in an unsaturated tropical soil site. *Geotech Geol Eng.* <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01849-1>

Rodrigues, R. A. (2007). Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático. São Carlos, 262p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Russell, A. R.; Reid, D. (2016). Effects of suction on CPT results and soil classification, *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 5 – Lehane, Acosta-Martínez & Kelly (Eds)*, Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, v. 1, p. 521-528.

Saab, A. L. (2016). Análise de um perfil de solo não saturado por meio de ensaios com sucção controlada. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental de Bauru - FEB/UNESP. Bauru.

Santos, C. R. B. (2003). Influência da Modificação do Estado de Tensões e da Sazonalidade nos Parâmetros Geotécnicos oriundos de Ensaio de Campo na Argila Porosa de Brasília. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. p. 144.

Schmertman, J.H.; Palacios, A. (1979). Energy Dynamics of SPT, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, V.105, GT8, p. 909-926.

Schnaid, F. (1995). Aspectos relacionados à interpretação de ensaios de campo em solos não-saturados. In: Encontro sobre solos não-saturados, 1995. Aspectos relacionados à interpretação de ensaios pressiométricos em solos não-saturados. Porto Alegre. v. 1. p. 80-88.

Schnaid, F.; Silva, F. G. (1997). Ensaio Pressimétrico Em Solos Não Saturados da Região Sul do Brasil. In: III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Ensaio pressiométrico de um solo não-saturado da Região sul do Brasil. Brasil. v. 2.

Schnaid, F.; Odebrecht, E. (2012). Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações, *Oficina Textos*, 2ª. Edição, 223 p.

Senaha, S.C.F. (2019). A quartzilização em perfis de intemperismo tropical. Brasília: Dissertação de Mestrado G.DM. – 332/2019, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 159 p.

Stewart, W.P.; Campanella, R.G. (1992). Practical Aspects of In-Situ Measurements of Material Damping with the SCPT, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 30, n. 2, p. 211-219.

Tan, K. N. (2005). Pressuremeter and cone penetrometer testing in a calibration chamber with unsaturated Minco silt (Ph.D. Thesis). University of Oklahoma.

Teixeira, A. H. (1974). A Padronização de Sondagens de Simples Reconhecimento, *V COBRAMSEG*, São Paulo/SP, v. 3, p. 1-22.

Teixeira, A. H. (1993). Um Aperfeiçoamento das Sondagens de Simples Reconhecimento à Percussão. Solos do Interior São Paulo. São Carlos/SP, p. 77-93

Vanapalli, S. K.; Fredlund, D. G.; Pufahl, D. E.; Clifton, A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Can Geotech J*; 33 (3): p. 379-392.

Vargas, M. (1989). Heritage Lecture: Soil Mechanics in Brazil, Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, v. 4, p. 2289-2299.

Vilar, O. M. (2003). Introdução à mecânica dos solos não saturados. Apostila – Notas de Aula da disciplina Resistência ao cisalhamento nos solos (SGS 5846) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Vilar, O. M.; Rodrigues, R. A. (2011). Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by a rising water table. Canadian Geotechnical Journal, 48 (2), p. 226-233.

Wickremesinghe, D. S. (1989). Statistical Characterization of Soil Profiles Using In Situ Tests. (Ph.D. Thesis). University of British Columbia, Vancouver, Canada, 288 p.

Yang, H.; Russell, A. R. (2016). Cone penetration tests in unsaturated silty sands. Canadian Geotechnical Journal, v. 53, n. 3, p. 431-444, <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0142>.

Yu, H. S.; Houlsby, G. T. (1991). Finite cavity expansion in dilatant soils loading analysis. Geotechnique, London, v. 41, n. 2, p. 173-183.

Yu, H. S.; Houlsby, G. T. (1995). A large strain analytical solution for cavity contraction in dilatant soils, Int. Journal of Numerical Anal. Methods Geomech., v. 19, n. 1, p. 793-811.

Zawadzki, L.; Bajda, M. (2016). Impact of the moisture content in medium sands on CP-TU test results. Annals of Warsaw University of Life Sciences e SGGW. Land Reclamation, 48 (3), p. 221-231.