



Universidade Federal
de São João del-Rei

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA**

GUSTAVO SILVA SAMPAIO

**CORRELAÇÕES PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO
SOLO POR MEIO DO ENSAIO DMT**

OURO BRANCO – MG

JULHO – 2019



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA

GUSTAVO SILVA SAMPAIO

**CORRELAÇÕES PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO
SOLO POR MEIO DO ENSAIO DMT**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Tales Moreira de Oliveira.

OURO BRANCO – MG

JULHO – 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S192c Sampaio, Gustavo Silva.
Correlações para obtenção de parâmetros de
resistência do solo por meio do ensaio DMT / Gustavo
Silva Sampaio ; orientador Tales Moreira de
Oliveira; coorientador Leandro Neves Duarte. --
Ouro Branco, 2019.
61 p.

Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia
Civil) -- Universidade Federal de São João del-Rei,
2019.

1. Ensaio dilatométrico de Marchetti. 2. Coesão.
3. Ângulo de atrito. 4. Sondagem a percussão
mecanizada. I. Oliveira, Tales Moreira de, orient.
II. Duarte, Leandro Neves , co-orient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado durante esses anos, por ter me dado saúde, força e sabedoria, em especial para desenvolver esse trabalho.

Ao professor Tales por toda a paciência durante o desenvolvimento desse trabalho, apesar das controvérsias, por todo conhecimento compartilhado e por sempre estar à disposição para ajudar, inclusive nas atividades de campo. Agradeço por ter se mostrado como mais do que um orientador e sim como um verdadeiro amigo, saiba que sou muito grato por todo apoio.

Ao Marcus e Ricardo, técnicos dos laboratórios, por todo o apoio e boa vontade no desenvolvimento das atividades de laboratório e ensaio de campo em horários muitas vezes complicados. Agradeço imensamente por todo apoio.

Ao Orlando, Túlio, Ana, Matheus, Elisa e os demais membros do INFRAGEO que sempre estiveram à disposição para me ajudar na execução dos ensaios ou qualquer outra atividade, tenho certeza que sem o apoio de vocês não teria finalizado esse trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais e irmão, por todo apoio nos momentos difíceis e por sempre estarem ao meu lado.

RESUMO

O objeto deste Trabalho de Conclusão de Curso foi o ensaio dilatométrico de Marchetti (DMT). Buscou-se aferir para um solo residual de gnaiss, localizado no campo experimental da Universidade Federal de São João del-Rei Campus Alto Paraopeba, os parâmetros de resistência obtidos via correlação do ensaio DMT.

Para execução de DMT em campo foi desenvolvido uma adaptação no equipamento de SPT, para permitir a execução dos ensaios dilatométricos, nos quais a lâmina é cravada no solo com um martelo mecanizado do SPT.

A análise desenvolvida consiste em verificar a autenticidade dos parâmetros geotécnicos, coesão e ângulo de atrito, obtidos através do ensaio dilatométrico (DMT). Para isso realizou-se uma comparação com os parâmetros obtidos em ensaios triaxiais, para o mesmo solo residual.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Universidade Federal de São João del-Rei Campus Alto Paraopeba.....	8
Figura 2 - Detalhe da localização do campo experimental.....	8
Figura 3 - Unidades geológicas do campo experimental, com locação do ponto de execução do ensaio DMT.....	10
Figura 4 - Trincheira apresentando variação do tipo de solo	11
Figura 5 - Equipamento do DMT pronto para ensaio	12
Figura 6 - Lâmina dilatométrica	12
Figura 7 - Lâmina dilatométrica sem parafusos.....	13
Figura 8 - Lâmina dilatométrica desmontada	13
Figura 9 - Remoção do disco sensitivo	14
Figura 10 - Interior da lâmina dilatométrica	14
Figura 11 - Peças internas da lâmina dilatométrica.....	14
Figura 12 - Calibração do disco sensitivo.....	15
Figura 13 - Calibração da antena do disco sensitivo.....	15
Figura 14 - Hastes e conexões do ensaio SPT	16
Figura 15 - Adaptador para unir lâmina e hastes do SPT	16
Figura 16 - Cabo eletropneumático	17
Figura 17 - Cabo pneumático	17
Figura 18 - Cilindro de nitrogênio	18
Figura 19 - Cabo de aterramento	18
Figura 20 - Cabo de calibração	19
Figura 21 - Seringa de calibração e extensão	19
Figura 22 - Unidade de controle	21
Figura 23 - Verificação da vedação da membrana da lâmina dilatométrica	23
Figura 24 - Calibração da membrana.....	24
Figura 25 - Ábaco para classificação do solo, avaliação do peso específico e consistência.....	31
Figura 26 - Bulbo metálico soldado a haste do SPT	34
Figura 27 - Detalhe do bulbo metálico.....	34
Figura 28 - Abertura no solo proporcionada pelo bulbo metálico	34
Figura 29 - Furo na haste metálica.....	35
Figura 30 - Haste perfurada e bulbo metálico montados para ensaio	35
Figura 31 - Adaptador da lâmina dilatométrica para o SPT.....	36

Figura 32 - Equipamento de execução do SPT	36
Figura 33 - Acoplamento do motor elétrico desenvolvido.....	37
Figura 34 - Equipamento SPT com motor elétrico.....	37
Figura 35 - Pesagem do martelo de 125 kg	38
Figura 36 - Martelo para SPT de 125 kg	39
Figura 37 - Execução do ensaio DMT	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Leitura A, B e C do primeiro ensaio DMT	40
Tabela 2 - Leitura A, B e C do segundo ensaio DMT	41
Tabela 3 - P0, P1 e P2 do primeiro ensaio DMT	41
Tabela 4 - P0, P1 e P2 do segundo ensaio DMT	42
Tabela 5 - I _D , E _D e classificação do solo do primeiro ensaio DMT.....	42
Tabela 6 - I _D , E _D e classificação do solo do segundo ensaio DMT.....	42
Tabela 7 - Tensão efetiva do solo do primeiro e segundo ensaio DMT	43
Tabela 8 - Índice de tensão horizontal, parâmetros R e RC, ângulo de atrito e coesão do solo do primeiro ensaio DMT.....	43
Tabela 9 - Índice de tensão horizontal, parâmetros R e RC, ângulo de atrito e coesão do solo do segundo ensaio DMT.....	44
Tabela 10 - Ângulo de atrito e coesão do solo obtidos pelo ensaio Triaxial tipo CID	44
Tabela 11 - Desvio do DMT em relação ao triaxial em porcentagem para o primeiro ensaio.....	45
Tabela 12 - Desvio do DMT em relação ao triaxial em porcentagem para o segundo ensaio.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	Sondagem a percussão (SPT)	3
3.2	Ensaio com o cone penetrométrico (CPT)	3
3.3	Pressiômetro tipo Ménard (PMT)	4
3.4	Prova de carga	5
3.5	Dilatômetro de Marchetti (DMT)	6
3.6	Localização do campo experimental	7
3.7	Classificação do solo.....	9
3.8	Ensaio Dilatométrico de Marchetti (DMT).....	11
3.8.1	Equipamento.....	12
3.8.1.1	Lâmina dilatométrica	12
3.8.1.2	Membrana	13
3.8.1.3	Haste de cravação	16
3.8.1.4	Cabo eletropneumático	16
3.8.1.5	Cabo pneumático	17
3.8.1.6	Tanque de gás	17
3.8.1.7	Cabo de aterramento	18
3.8.1.8	Cabo de calibração	18
3.8.1.9	Seringa de calibração	19
3.8.1.10	Unidade de controle	20
3.8.2	Formas de cravação	21
3.8.3	Verificação da vedação da lâmina dilatométrica	22
3.8.4	Calibração inicial do ensaio	23
3.8.5	Operações preliminares ao ensaio	25
3.8.6	Execução do ensaio	26
3.8.7	Parâmetros Iniciais	28

3.8.8	Correlações dos parâmetros intermediários do ensaio.....	28
3.8.8.1	Pressões (P_0 , P_1 e P_2).....	28
3.8.8.2	Tensão vertical e poro-pressão da água.....	29
3.8.8.3	Índice de material (I_D).....	30
3.8.8.4	Índice de tensão horizontal (K_D).....	30
3.8.8.5	Módulo dilatométrico (E_D).....	30
3.8.9	Correlações dos parâmetros geotécnicos a partir do ensaio.....	32
3.8.9.1	Ângulo de atrito interno do solo (ϕ').....	32
3.8.9.2	Coesão do solo (c').....	32
3.9	Ensaio de Compressão Triaxial.....	33
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	33
4.1	Bulbo metálico e furos nas hastes metálicas.....	33
4.2	Adaptador da lâmina dilatométrica para o SPT.....	36
4.3	Adaptação do motor elétrico para o SPT.....	36
4.4	Novo martelo para o SPT (125 kg).....	38
4.5	Execução do ensaio DMT com equipamento adaptado.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
6	CONCLUSÃO.....	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

As investigações geotécnicas podem ser definidas pela avaliação dos parâmetros do solo, de forma a garantir a segurança, baixo custo e qualidade na execução de projetos para obras geotécnicas. Tais investigações são de grande importância, uma vez que se reduzem as incertezas nos resultados utilizados para os projetos garantindo uma maior segurança dos indivíduos e do meio ambiente associados (MARINHO, 2005).

A investigação de uma determinada área deve ser realizada de forma minuciosa, levando em consideração extensão e variação dos parâmetros. Essa caracterização detalhada da área deve-se a heterogeneidade do solo e ao fato de que cada projeto e local serem únicos. Entretanto, essas medidas não extinguem por completo as incertezas e imprevistos, visto que uma obra de geotécnica sempre está propensa a eles (COUTINHO; SEVERO, 2009).

Os riscos geotécnicos envolvidos devem ser classificados previamente entre baixo, moderado ou alto. Para essa avaliação é preciso analisar os seguintes fatores: os objetivos do projeto, experiência local e anteriores, nível do risco geotécnico e potencial de redução de custos (ROBERTSON; CABAL, 2009).

Um dos principais fatores para escolha do tipo de investigação geotécnica a ser adotada é o risco, uma vez que se recomenda a utilização de metodologias mais sofisticadas e um maior número de análises para projetos que causem grandes impactos ao meio ambiente e população do local de implantação (ROBERTSON; CABAL, 2009).

Os gastos na investigação geotécnica são indispensáveis para gerar economia no dimensionamento e execução do projeto. Portanto, é importante não poupar investimentos nessa etapa, visto que os benefícios gerados são numerosos.

O controle de qualidade e da execução também são fundamentais para resultados concisos e objetivos, na falta dessa supervisão adversidades técnicas e de custo são sempre recorrentes. As normas regulamentadoras para projetos servem para esse controle e devem ser seguidas para a definição dos pontos de análise e procedimentos de investigação, pois dessa forma limita-se os transtornos (COUTINHO; SEVERO, 2009).

Atualmente no reconhecimento do subsolo os principais ensaios que se tem utilizado são os seguintes:

- Sondagem a percussão (SPT);
- Ensaio com o cone penetrométrico (CPT);
- Ensaio pressiométrico tipo Ménard (PMT);
- Ensaio de prova de carga;
- Ensaio com o dilatômetro de Marchetti (DMT).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros geotécnicos, coesão e ângulo de atrito, obtidos através do ensaio dilatométrico (DMT) executado com um equipamento de ensaio de sondagem à percussão (SPT) mecanizado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Utilização de um equipamento de ensaio de sondagem à percussão (SPT) mecanizado para possibilitar execução de um ensaio dilatométrico (DMT);
- Realização de ensaios dilatométricos (DMT) com o equipamento em campo experimental;
- Análise dos parâmetros geotécnicos obtidos pelo ensaio dilatométrico (DMT);
- Análise dos parâmetros geotécnicos obtidos pelos ensaios triaxiais para o mesmo campo experimental;
- Comparação dos parâmetros encontrados, a fim de validar os resultados obtidos, de forma a assegurar a aplicação deles em pesquisas ou obras geotécnicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sondagem a percussão (SPT)

A sondagem a percussão (SPT) é um procedimento geotécnico de campo, no qual se utiliza um amostrador padrão que é cravado no solo para classificação do perfil do subsolo e aferição da sua resistência. O índice de resistência deste solo é medido pelo número de golpes necessários para que o amostrador penetre os últimos 30 cm da profundidade analisada. O procedimento consiste na cravação de 45 cm no solo e é realizado por de três avanços consecuentes de 15 cm, através do impacto de um martelo com massa padronizada de 65 kg que despenca em queda livre (OLIVEIRA, 2018). Este é um dos ensaios mais realizados no campo da geotecnia, visto que ele permite uma correlação simples para obter-se a resistência do solo. A sua principal aplicação é nas obras de fundações, sejam rasas ou profundas, sempre se utiliza o ensaio SPT. A depender das dimensões da obra, do número de fundação e dos demais fatores, também são utilizados outros ensaios complementares (OLIVEIRA, 2018).

Contudo, esse ensaio pode apresentar incertezas e anomalias nos resultados que geralmente são ocasionadas durante sua execução. Os principais problemas segundo Custódio (2003) são:

- Fadiga do operador, que proporciona uma inconstância na altura padronizada de queda do martelo;
- Erros na leitura das cravações sucessivas de 15 cm;
- Limitação nos parâmetros encontrados no ensaio para correlação com as propriedades do solo, uma vez que apresenta apenas um parâmetro;
- Não cumprimento da NBR 8036:1983 quanto aos critérios de parada do ensaio.

3.2 Ensaio com o cone penetrométrico (CPT)

O ensaio com o cone penetrométrico (CPT) consiste no processo de cravação de uma ponteira de formato cônico, geralmente com seção transversal de 10 cm², a uma velocidade constante de 20 mm/s (RODRIGUEZ, 2013).

Os principais resultados obtidos no ensaio CPT são atrito lateral e resistência de ponta, variando em relação a profundidade, esses parâmetros são obtidos de

forma direta pelo ensaio. Os valores encontrados são importantes na classificação dos solos, principalmente quanto as camadas encontradas ao longo da profundidade da região ensaiada. Além disso, pode ser aplicado na obtenção de parâmetros geotécnicos para utilização em projetos de fundação (RODRIGUEZ, 2013).

O ensaio é muito usual na Europa, mas no Brasil ainda está ganhando espaço e tem sido usado cada vez mais nos projetos de geotecnia. O ensaio é muito versátil, pois tem uma aplicação diversificada nas obras de engenharia e também no ramo da geotecnia ambiental. Uma das inovações do ensaio tem sido o uso de adaptações na ponteira, de forma a mapear, por filmagem, o perfil do solo durante o processo de cravação do equipamento (RODRIGUEZ, 2013).

Em contrapartida, o ensaio apresenta limitações com por exemplo:

- Classificação do solo exclusivamente pelo seu comportamento mecânico;
- Carência em pesquisas sobre a aplicação do ensaio em solos tropicais;
- Custo elevado do equipamento;
- Necessidade de mão de obra especializada.

Tais fatores são obstáculos para disseminação desse ensaio no campo da geotecnia brasileira.

3.3 Pressiômetro tipo Ménard (PMT)

Uma outra de forma de investigação geotécnica é utilizando o pressiômetro tipo Ménard (PMT), com esse equipamento é possível determinar a rigidez de uma ampla gama de solos e rochas. Essa ferramenta foi desenvolvida e patenteada pelo francês Loius Ménard em 1995.

O ensaio é realizado através da introdução de uma sonda cilíndrica de 45 centímetros de comprimento, denominada pressiômetro, com células de pressão nas camadas do solo. Esse ensaio permite a estimativa de parâmetros de deformabilidade e resistência do solo (OLIVEIRA, 2018).

A execução do ensaio consiste no aumento de pressão na célula após introduzir a sonda no furo, dessa forma promove-se a expansão cilíndrica do solo em volta dela. A deformação radial é encontrada de forma direta pela quantidade de água que é introduzida no interior da célula.

As principais vantagens do pressiômetro são: facilidade de montagem do equipamento, execução do ensaio em locais com terrenos razoavelmente

irregulares, retirada de amostras deformadas do solo em toda a extensão do ensaio e execução em solo e rocha (CUSTÓDIO, 2003).

Contudo, o ensaio apresenta limitações, sendo elas o custo elevado do equipamento, necessidade de mão de obra especializada, não sendo recomendado para solos com pouca coesão e que possua pedregulhos, principalmente pontiagudos (CUSTÓDIO, 2003).

3.4 Prova de carga

A prova de carga é a melhor maneira de determinar as características de deformação do solo, visto que é o método mais eficaz para análise do desempenho de fundações. Esse recurso é amplamente utilizado para as fundações, em especial para as estacas, pois permite o controle da qualidade na execução e da capacidade de carga do sistema composto pelo solo e estaca (SCALLET,2011).

Atualmente existem dois tipos de prova de carga a estática, mais utilizada, e dinâmica. A primeira consiste na aplicação de esforços estáticos, próximos ou iguais ao de serviço, e registro de deslocamentos do elemento ensaiado. Já a dinâmica baseia-se na aplicação de carregamentos dinâmicos, através de golpes de um sistema de percussão, que são utilizados para acompanhamento da oscilação da estrutura e análise do seu comportamento quando está em vibração (OLIVEIRA, 2006).

O ensaio estático consiste no carregamento gradativo do elemento de fundação acompanhado da medição dos deslocamentos verticais referentes a cada acréscimo de carga. Os dois principais objetivos do ensaio são: definição da capacidade de carga da estrutura e obtenção da curva carga por recalque (REIS; BELINCANTA; GUTIERREZ, 2013).

A NBR 12131 (ABNT, 2006) descreve que os equipamentos necessários para a execução da prova de carga estática são: dispositivo de aplicação de carga, dispositivo de medição e sistema de reação.

O acompanhamento cuidadoso na execução da prova de carga é muito importante, pois quando realizada corretamente é o método mais competente para definir a capacidade de carga real do sistema solo e estaca. O ensaio visa reproduzir os carregamentos futuros que o elemento de fundação será submetido ao longo dos anos (ALBUQUERQUE et al, 2004).

Entretanto o ensaio apresenta algumas desvantagens devido a necessidade de equipamentos especiais tais como sistemas de reação, referência, iluminação, cobertura, entre outros. Além disso, tem-se a necessidade de mão de obra especializada. Esses fatores são adversidades que exigem tempo e recursos financeiros para serem instalados, o que acaba inviabilizando sua execução em alguns casos (MEDEIROS, 2005).

3.5 Dilatômetro de Marchetti (DMT)

O dilatômetro de Marchetti, popularmente conhecido como DMT, foi criado em 1975 pelo professor Silvano Marchetti na Itália. Em 1977 foi patenteado, também na Itália (BRIAND; MIRAN, 1992). No Brasil a tecnologia do DMT chegou apenas em 1986 (QUEIROZ, 2008).

A princípio os principais resultados esperados do ensaio eram a obtenção de módulos de elasticidade associados ao desempenho de estacas cravadas sujeitas a carregamento lateral. Entretanto, Schmertmann, um dos idealizadores e aprimoradores do ensaio, descobriram a possibilidade de obter uma correlação dos resultados do ensaio com inúmeros parâmetros geotécnicos iniciando-se uma nova linha de pesquisa (QUEIROZ, 2008).

“O DMT é um ensaio simples, possui alta repetibilidade e seus resultados podem ser correlacionados com o tipo de solo, o coeficiente de empuxo de repouso, a resistência não drenada, ângulo de atrito, a razão de pré-adensamento, módulo de deformabilidade, entre outros (ROCHA; GIACHETI, 2016) ”.

O dilatômetro consiste de uma lâmina de aço inoxidável que possui em uma de suas faces uma membrana circular de aço muito tênue. Esse equipamento é cravado no terreno, com o auxílio de um equipamento de cravação. Finalizada o ciclo de cravação injeta-se pressão de gás para expandir a membrana no interior da massa de solo, com isso se faz as leituras e em seguida continua-se o processo de cravação até uma nova profundidade. O ensaio geralmente é realizado a cada 20 centímetros de cravação.

Segundo Custódio (2003) os equipamentos que compõe o ensaio DMT são: a lâmina dilatométrica, a haste de inserção, o cabo eletropneumático e o pneumático, a unidade de controle e o tanque de gás.

Na execução do ensaio DMT, segundo Marchetti (1980), dois preceitos são estabelecidos. O primeiro é que se admite que as perturbações causadas pela cravação do dilatômetro são consideradas inferiores à média analisada em outras metodologias semelhantes. Já o segundo refere-se as medidas aferidas que são das pequenas deformações do diafragma e equivalem ao comportamento do solo na fase elástica.

Em alguns casos, apesar das premissas de Marchetti serem verdade, é necessário levar em consideração o fato do processo de cravação perturbar a estrutura original do solo. Contudo para maciços compactos a influência não é tão relevante (QUEIROZ, 2008).

As aplicações dos resultados obtidos através dos parâmetros do ensaio DMT são usados principalmente em projetos de fundações, sejam essas profundas ou rasas, também são empregues em controles de compactação, além de outras possibilidades de aplicação nas obras geotécnicas (BRIAND; MIRAN, 1992).

A execução do ensaio DMT é simples e rápida devido os benefícios oferecidas pelo equipamento como a sua portabilidade e facilidade de manuseio. Além dessas vantagens o DMT também pode ser aplicado na maioria dos solos e fornece um perfil praticamente contínuo do solo, a cada 20 centímetros. Portanto, esses proveitos demonstram a qualidade e importância desse ensaio no campo da geotécnica (CUSTÓDIO, 2003).

Contudo o DMT possui algumas desvantagens, como os inconvenientes da execução em solos muito rígidos e o fato de não conseguir retirar-se amostras do solo ensaiado. Apesar disso, tais fatores não desvalorizam o ensaio visto que, de certo modo, seus benefícios compensam suas desvantagens.

3.6 Localização do campo experimental

O campo experimental utilizado para execução do ensaio fica localizado na Universidade Federal de São João Del Rei, Campus do Alto Paraopeba (UFS - CAP) que se encontra entre os municípios de Ouro Branco e Congonhas, no estado de Minas Gerais, na Rodovia MG-443, km 7 - Fazenda do Cadete. Uma imagem do Campus está apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Universidade Federal de São João del-Rei Campus Alto Paraopeba



Fonte: Google Maps.

A Figura 2 localiza de forma mais específica a região onde foi realizado o ensaio, conforme está destacado de vermelho.

Figura 2 - Detalhe da localização do campo experimental



Fonte: Google Maps.

3.7 Classificação do solo

Para o campo experimental analisado foi desenvolvida uma pesquisa que envolveu a caracterização do solo em questão e os resultados apontaram que ele tem o comportamento de um solo residual jovem de gnaiss (OLIVEIRA, 2018). Portanto é importante inicialmente desenvolver uma contextualização da sua formação e origem.

O solo propriamente dito é formado a partir de um processo de intemperização de rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas. Tal processo demanda vários anos. Portanto, o solo é formado a partir da sua interação com o clima, fauna e flora, após seu desprendimento da rocha de origem.

Os solos são compostos por vários minerais que vem desde a sua formação, alguns mantêm-se inalterados enquanto outros sofrem decomposição com o decorrer dos anos. Essa diversidade mineralógica dá origem a diferentes tipos de solo.

A classificação dos solos considerando sua formação pode ser subdividida em duas são elas os solos residuais e os solos transportados. O primeiro apresenta mineralogia equivalente à da sua rocha de origem, geralmente são sedimentos que permaneceram no seu local de origem. Já o segundo apresenta significativas alterações, na sua forma e dimensões, proporcionadas pelo seu transporte para outras regiões. Esse transporte pode ocorrer por gravidade, ação do vento ou da água, entre outras possibilidades.

As camadas de solo residual apresentam dimensões de partículas distintas, tal fato ocorre devido a variada resistência dos minerais existentes na rocha de origem aos agentes intempéricos.

As rochas metamórficas são formadas pelas alterações químicas ou físicas de rochas ígneas ou sedimentares por conta de variações das condições de temperatura e pressão. Esse processo ocorre em camadas mais profundas do solo que não estão submetidas a intempéries e cimentação. As alterações nesses fatores promovem a reordenação da estrutura dos minerais, nessas situações podem ocorrer a recristalização deles. A recristalização consiste no conjunto de dois acontecimentos que podem ou não ocorrer simultaneamente, são eles o aumento da dimensão e a transformação do aspecto externo dos minerais (BERNARDES, 2003).

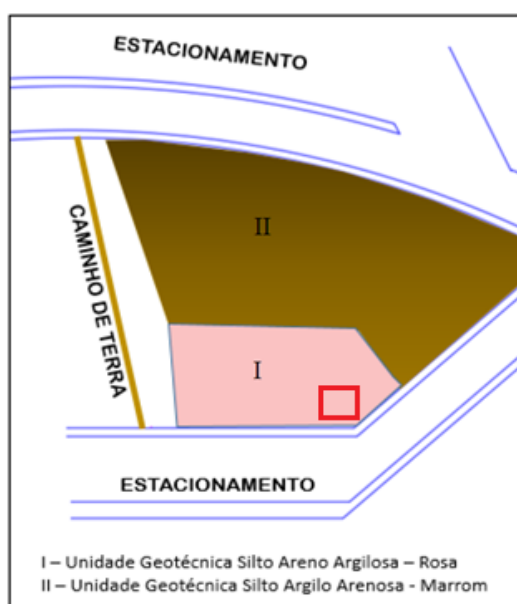
Os gnaisses são rochas geralmente quartzo-fedespálticas, composta por uma estrutura granular de média a grossa e com moderada a forte orientação planar, designada estrutura gnáissica. Podem ser derivadas da alteração de rochas graníticas submetidas a um metamorfismo dinâmico das rochas sedimentares, sobretudo as pelíticas, submetidas a condições metamórficas de alto grau. Ao alcançarem determinados valores de pressão e temperatura, as rochas pelíticas podem se fundir na presença de água, gerando compostos que cristalizam o quartzo, feldspato potássico e plagioclásio (FRASCÁ; SATORI, 1998).

Um fator importante dos solos residuais de gnaissite é a sua composição. Devido sua formação oriunda da sua rocha matriz, o gnaissite, que são rochas ácidas, costumam ser pouco argilosos quando comparados com os solos formados a partir de rochas simples, como o basalto (BERNARDES, 2003).

A caracterização do solo encontrado foi desenvolvida por Oliveira (2018), na qual as diferentes unidades geológicas foram classificadas através de ensaio de campo e de laboratório.

No campo experimental executou-se sondagens a trado, coletando-se amostras para realizar a análise táctil visual. Além disso executou-se sondagens à percussão para obter os parâmetros de resistência do solo. Os resultados encontrados permitiram a classificação das unidades geológicas conforme apresentado na Figura 3 (OLIVEIRA, 2018).

Figura 3 - Unidades geológicas do campo experimental, com locação do ponto de execução do ensaio DMT



Fonte: OLIVEIRA (2018) adaptado.

Uma caracterização visual do campo experimental pode ser realizada observando a Figura 4, na qual uma trincheira rasa foi realizada num ponto que foi possível identificar as diferentes unidades geológicas do solo (OLIVEIRA, 2018).

Figura 4 - Trincheira apresentando variação do tipo de solo



Fonte: OLIVEIRA (2018).

Segundo Oliveira (2018) a área geotécnica I possui cerca de 297 m², região onde o ensaio DMT foi realizado, é caracterizada por um solo residual de gnaiss de cor rosa cuja composição varia entre silte areno argiloso a silte argilo arenoso.

3.8 Ensaio Dilatométrico de Marchetti (DMT)

A estruturação do ensaio DMT consiste na conexão da lâmina dilatométrica a unidade de controle, que é alimentada via pressão pelo gás utilizado no cilindro e pela corrente elétrica, fornecida por pilhas ou baterias (CUSTÓDIO, 2003).

Para execução do ensaio utiliza-se um equipamento de cravação seja ele dinâmico, como o SPT, ou estático a uma velocidade constante de cravação (geralmente entre 2 e 4 m/s), como o caminhão com equipamento de penetração estática. A cravação da lâmina é executada a cada 20 centímetros, interrompendo-se o processo para aplicação de pressão na membrana através do gás. Durante esse processo são registradas as leituras e prossegue-se com a cravação de forma subsequente (SILVA, 2008).

3.8.1 Equipamento

Os equipamentos usados no DMT montados para execução do ensaio são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Equipamento do DMT pronto para ensaio



3.8.1.1 Lâmina dilatométrica

A lâmina é composta de aço inox, ou alguma liga especial, de forma a resistir a penetração em solos de elevada rigidez sem sofrer danos funcionais. Antes de executar os ensaios é importante verificar as condições da lâmina, uma vez que com o tempo ela pode apresentar alguns problemas como curvaturas superiores a 0,5 milímetros, arranhões, dobras e fissuras. Esses problemas podem resultar em desvios durante a cravação e até mesmo não permitir a penetração da lâmina no solo, dependendo da falha (GOMES, 2007).

A lâmina dilatométrica está apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Lâmina dilatométrica



3.8.1.2 Membrana

A membrana tem formato circular sendo composta de aço inoxidável e possui uma espessura que varia entre 0,20 e 0,25 milímetros. Para solos mais rígidos aplica-se membranas mais espessas para obtenção de melhores resultados (SILVA, 2008).

Esse dispositivo não tem função de medição, mas é um indicador do momento correto em que se deve aferir as medidas registradas nos manômetros da unidade de controle (GOMES, 2007).

Os sinais sonoros são emitidos com base na expansão de medidas padronizadas da membrana, quando se insere o gás no sistema, esse aviso ocorre em duas situações: a primeira quando a membrana se expande em 0,05 milímetros e a segunda quando ela se expande em 1,10 milímetros. Sendo esses sinais de extrema importância na calibração e execução do ensaio (GOMES, 2007).

Segundo Marchetti e Crapps (1981), quando for necessária a substituição da membrana, devido algum dano sofrido, os seguintes passos devem ser seguidos:

- Remoção dos parafusos, conforme apresentado na Figura 7;

Figura 7 - Lâmina dilatométrica sem parafusos



- Remoção do anel de fixação, membrana metálica e borracha de vedação, conforme apresentado na Figura 8, caso alguma dessas peças também esteja danificada ela deve ser substituída;

Figura 8 - Lâmina dilatométrica desmontada



- Em seguida deve-se retirar o disco metálico para verificar a integridade das peças internas. O procedimento deve ser realizado conforme apresentado nas Figuras 9 e 10;

Figura 9 - Remoção do disco sensitivo



Figura 10 - Interior da lâmina dilatométrica



- Após retiradas as peças internas da lâmina, apresentadas na Figura 11, deve-se verificar a integridade delas e em caso de algum dano deve-se substituí-las;

Figura 11 - Peças internas da lâmina dilatométrica



- Por fim, deve-se repor as peças internas na ordem apresentada na Figura 11;

- Após posicionado o disco sensitivo é necessário calibrá-lo. Para esse processo utiliza-se o extensômetro, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13;

Figura 12 - Calibração do disco sensitivo



Figura 13 - Calibração da antena do disco sensitivo



- É de extrema importância para o ensaio que a calibração seja realizada de forma correta, para isso o disco deve estar 0,05 milímetros acima da sua base de encaixe, Figura 12, e a pequena antena que ele possui deve estar a 0,10 milímetros acima da mesma base, Figura 13;

- Por último deve-se repor as peças apresentadas na Figura 8 seguindo a ordem apresentada.

3.8.1.3 Haste de cravação

As hastes que serão utilizadas no ensaio DMT são as mesmas aplicadas no ensaio SPT. Elas possuem diâmetro externo de 33,7 milímetros, roscas macho/fêmea e segmentos de 1 metro, apresentadas na Figura 14. Contudo é necessário utilizar um adaptador para conectar a lâmina a haste, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 14 - Hastes e conexões do ensaio SPT



Figura 15 - Adaptador para unir lâmina e hastes do SPT



3.8.1.4 Cabo eletropneumático

Os cabos eletropneumáticos têm a função de estabelecer a ligação entre a unidade de controle e a lâmina dilatométrica. Tais cabos são compostos por um fio de aço envolto por um tubo de náilon com conectores específicos em suas extremidades, conforme apresentado na Figura 16. Em relação a sua resistência,

apresentam elevados resultados, entretanto não devem ser retorcidos (CUSTÓDIO, 2003).

Figura 16 - Cabo eletropneumático



3.8.1.5 Cabo pneumático

Os cabos pneumáticos tem a função de inserir o gás no sistema de forma a expandir a membrana presente na lâmina e permitir a aferição das medidas do ensaio, esse cabo é apresentado na Figura 17 (CUSTÓDIO, 2003).

Figura 17 - Cabo pneumático



3.8.1.6 Tanque de gás

A função do tanque é alimentar a unidade de controle com pressão através do cabo pneumático e em seguida transferir ela para a membrana do dilatômetro, de forma a permitir a execução do ensaio. Pode ser utilizado o nitrogênio, gás carbônico ou ar comprimido (CUSTÓDIO, 2003). O cilindro de nitrogênio utilizado está apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Cilindro de nitrogênio



3.8.1.7 Cabo de aterramento

Esse cabo tem uma grande importância nos procedimentos iniciais e na execução do ensaio, pois ele permite verificar se as ligações elétricas foram efetuadas corretamente, além de detectar curto circuitos e erros de montagem dos equipamentos. Ele é composto por um conector que é encaixado na unidade de controle e um grampo do tipo jacaré (MARCHETTI; CRAPPS, 1981). O cabo de aterramento utilizada está apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Cabo de aterramento



3.8.1.8 Cabo de calibração

Para determinação dos parâmetros de calibração utiliza-se um cabo eletropneumático curto com um cabo de aterramento acoplado. O intuito do comprimento é minimizar as perdas de pressão e obter resultados mais precisos para a calibração. Esse cabo é apresentado na Figura 20.

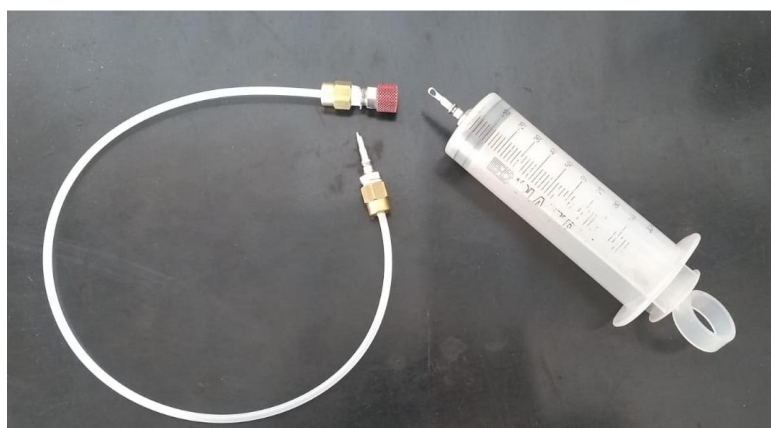
Figura 20 - Cabo de calibração



3.8.1.9 Seringa de calibração

Esse equipamento tem a função de gerar pressão na membrana tanto de sucção quanto de extensão, de forma semelhante ao papel que o tanque de gás desempenha. A seringa é um dos principais elementos na calibração da membrana. Entretanto, deve-se tomar cuidado com seu uso, porque com o tempo ela pode ser danificada, mas para evitar isso, utiliza-se uma extensão de forma que o esforço aplicado sobre a seringa durante a calibração seja menor, ambas as peças são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 - Seringa de calibração e extensão



3.8.1.10 Unidade de controle

A sua principal função é o controle e monitoramento das pressões fornecidas pelo tanque de gás ao sistema, com base nisso é possível verificar o deslocamento da membrana durante o ensaio (SILVA, 2008).

A unidade possui dois manômetros, ambos com unidade de medida em bar. O primeiro é utilizado para medidas de maior rigor, pressões mais baixas, principalmente durante a calibração da membrana. A escala de leituras desse manômetro varia de 0 a 10. Já o segundo afere leituras de 0 a 60, sendo mais utilizado na execução do ensaio propriamente dito, no caso de pressões mais elevadas. (CUSTÓDIO, 2003).

A unidade apresenta diversas válvulas e entradas utilizadas tanto na calibração quanto na execução do ensaio. As válvulas e suas principais funções são:

- “*Main*”: válvula para controle geral da unidade, responsável por permitir a entrada do gás no sistema;
- “*Flow*”: válvula que possui um micrômetro na sua parte inferior e tem função de regular a entrada do gás comprimido acoplado ao sistema, ela funciona apenas quando a *Main* está aberta;
- “*Vent – fast*”: válvula utilizada para ventilar, de forma quase instantânea, a unidade de controle liberando o gás que está solicitando a expansão da membrana;
- “*Vent – slow*”: válvula utilizada para ventilar, de forma lenta, a unidade de controle (usada geralmente na leitura do parâmetro “C”);

Além das válvulas também existem as entradas que tem a função de estabelecer as ligações da unidade de controle com seus acessórios (lâmina dilatométrica, tanque de gás, seringa e cabo de aterramento). As entradas que fazem parte da unidade são:

- “*Dilatometer*”: entrada utilizada para entrada do cabo eletropneumático que vem da lâmina dilatométrica;
- “*Syringe*”: entrada utilizada para conectar a seringa durante o processo de calibração;
- “*Ground*”: entrada utilizada para conectar o cabo de aterramento;
- “*Pressure source*”: entrada utilizada para conectar o cabo pneumático que vem do tanque de gás e é responsável por inserir pressão ao sistema;

Por último, existem 3 dispositivos relacionados as ligações elétricas da unidade, são eles:

- “*Circuit test*”: botão que ativa o sinal sonoro. Ele tem a função de verificar se a bateria tem carga ou se está corretamente posicionada, além de verificar se as ligações elétricas da unidade estão funcionando perfeitamente;
- “*Audio*”: chave que ativa a emissão de sinais sonoros pela unidade;
- Galvanômetro: dispositivo de cor vermelha e preta utilizado para detectar as correntes elétricas do equipamento quando ele é montado para ensaio ou calibração.

Todos os elementos mencionados podem ser visualizados na Figura 22.

Figura 22 - Unidade de controle



3.8.2 Formas de cravação

Para cravar a lâmina dilatométrica no solo existem duas formas a estática e a dinâmica. É preferível optar pela cravação estática uma vez que ela oferece uma penetração a uma velocidade constante no solo e evita as vibrações causadas pela dinâmica (GOMES, 2007).

A cravação estática é considerada a melhor solução desde que o local de ensaio seja acessível e o solo seja penetrável. O equipamento mais comum utilizado para esse tipo de ensaio é o caminhão utilizado no ensaio CPT (ensaio de penetração de cone). Esse equipamento tem como principais vantagens a redução do tempo de atraso entre o sinal de um aviso sonoro e o início do seguinte, além da cravação mais uniforme e linear da lâmina dilatométrica (MARCHETTI; CRAPPS, 1981). Segundo o EUROCODE 7 (2007) a velocidade de cravação deve ser de 1 a 3 cm/s em qualquer tipo de solo.

Já na cravação dinâmica costuma-se utilizar o equipamento de sondagem à percussão (SPT) que é uma excelente alternativa para locais de acesso prejudicado. Essa vantagem é por conta de apresentar um maior dinamismo na montagem e desmontagem do que o caminhão do CPT quando usado para cravação.

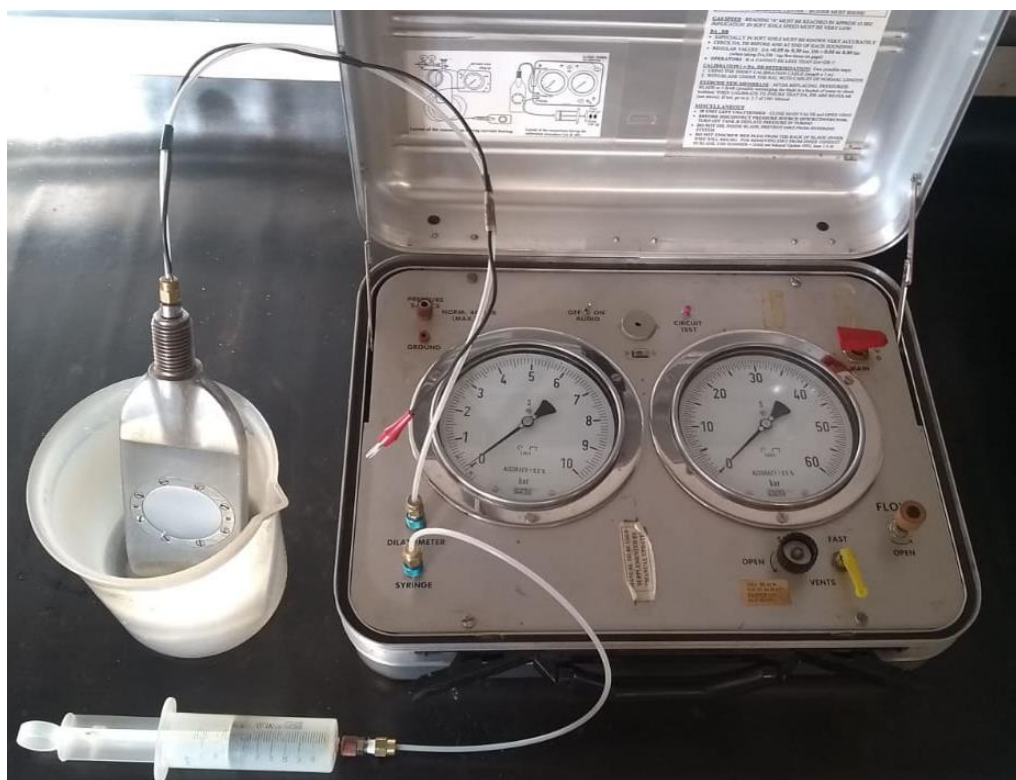
Para solos que tem em sua composição areias fofas ou argilas sensitivas deve-se optar sempre pela cravação estática, porque estudos comprovam que a cravação dinâmica causa uma repercussão considerável nos resultados aferidos pelo ensaio DMT (GOMES, 2007).

3.8.3 Verificação da vedação da lâmina dilatométrica

Antes de começar a calibração da membrana é importante verificar se as peças da lâmina dilatométrica foram posicionadas corretamente de forma a garantir a sua vedação. Tal cuidado se deve ao fato de que durante o ensaio pode-se atingir o nível d'água do solo e caso não haja uma correta vedação a lâmina será danificada internamente, principalmente as suas ligações elétricas.

Para realizar essa verificação é preciso submergir a membrana em água, conforme apresentado na Figura 23. Em seguida deve-se utilizar uma seringa de calibração para inserir pressão na membrana pelo cabo de calibração, não é preciso ligar a parte elétrica do cabo. Caso comece a sair bolhas de ar no recipiente onde está a membrana isso significa que a vedação está ruim e, portanto, deve-se trocar o anel de borracha e todos as demais peças que estejam inapropriadas para uso.

Figura 23 - Verificação da vedação da membrana da lâmina dilatométrica



Finalizado esse processo, caso a vedação esteja garantida, pode-se prosseguir com a calibração da membrana, conforme apresentado no item subsequente.

3.8.4 Calibração inicial do ensaio

O procedimento de calibração do DMT deve ser realizado em dois momentos, antes da execução do ensaio e logo após finalizá-lo. O intuito da calibração é obter dois parâmetros chamados de ΔA e ΔB . O primeiro refere-se a pressão de sucção necessária para promover o contato do disco sensível com a membrana, sendo esse deslocamento de 0,05 milímetros. Já o segundo se trata do incremento de pressão necessário para promover a expansão da membrana em 1,10 milímetros (ESPARZA, 2016).

A membrana em estado de repouso encontra-se em alguma posição entre o 0,05 milímetros no estado de sucção e os 1,10 milímetros no estado de expansão. Os valores aferidos de pressão para ΔA e ΔB são utilizados para corrigir as leituras efetuadas durante a execução do ensaio (SILVA, 2008).

As leituras para calibração geralmente estabilizam-se para valores entre 10 kPa e 20 kPa para ΔA e entre 10 e 70 kPa para ΔB (MARCHETTI; CRAPPS, 1981).

Entretanto são considerados aceitáveis leituras entre 5 kPa e 30 kPa para ΔA e entre 5 e 80 kPa para ΔB (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Para situações em que não tenha sido praticável a calibração do DMT, os valores médios podem ser adotados, sendo eles 12 e 40 kPa, para ΔA e ΔB , respectivamente. Contudo esses valores são considerados satisfatórios apenas para solos moderadamente rígidos (MARCHETTI; CRAPPS, 1981).

Um outro parâmetro relevante para análise é o desvio do medidor de pressão em relação a zero, denotado de Z_m . Esse parâmetro também é importante para a correção das leituras de pressão do ensaio (CUSTÓDIO, 2003).

No processo de calibração não se utiliza o tanque de gás como fonte de pressão, mas sim a seringa. Para garantir a ventilação e evitar qualquer influência de uma pressão residual após o tanque de gás ser removido, é importante ventilar a unidade de controle através da válvula de ventilação.

Em relação as válvulas da unidade de controle, durante o processo de calibração devem-se manter fechadas a geral e a “flow”.

Para iniciar a calibração do equipamento primeiramente deve-se organizar as conexões do cabo de calibração, da seringa e de sua extensão da forma como é apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Calibração da membrana



Segundo Marchetti e Crapps (1981), o processo de determinação de ΔA e ΔB deve ser desenvolvido através de ciclos de sucção e expansão. Primeiramente começa o processo pela sucção, para isso empurra-se o pistão completamente para dentro da seringa e fecha-se a válvula de ventilação. Para saber quando anotar o valor de ΔA é preciso ativar o sinal sonoro. Por fim, basta puxar o pistão da seringa cuidadosamente até o sinal ser emitido quando isso ocorrer deve-se registrar a pressão encontrada que será o valor de ΔA e depois ventilar a unidade. Esse processo deve ser repetido por três vezes para que seja possível calcular uma média do parâmetro. Finalizada essa primeira etapa inicia-se a segunda, referente a ΔB , mas inicialmente deve-se abrir novamente a válvula de ventilação para evitar qualquer influência na pressão aferida. Agora de forma contrária a primeira etapa posiciona-se o pistão o mais longe possível e fecha-se a válvula de ventilação. Em seguida empurra-se o pistão cuidadosamente aumentando a pressão até que o sinal sonoro seja emitido, quando isso ocorrer afere-se a pressão registrada que será o valor de ΔB . Da mesma forma que na etapa anterior, esse processo deve ser repetido por três vezes para que seja possível calcular uma média do parâmetro.

Com os dados de calibração antes e após o ensaio DMT deve-se calcular uma média, para determinar os índices de ΔA e ΔB que serão aplicados nas correções das leituras (SILVA, 2008).

Dessa forma, é de suma importância as calibrações iniciais e finais para que se obtenha resultados satisfatórios do ensaio DMT. Tal preocupação é devido ao fato de que durante o ensaio a membrana pode ser muito exigida e acabar alterando os valores de ΔA e ΔB , mesmo que em alguns casos essa alteração seja irrisória ela deve ser considerada, por isso realiza-se leituras iniciais e finais.

3.8.5 Operações preliminares ao ensaio

Segundo Marchetti e Crapps (1981), algumas medidas iniciais devem ser tomadas antes de iniciar o ensaio, são elas:

- Verificação da integridade do cabo eletropneumático, certificando que não existem torções remanescentes ou dobras;
- Verificar integridade das conexões e sempre utilizar as suas tampas para protegê-las;

- Passar as hastes de cravação pelo cabo para facilitar a execução do ensaio. Deve-se evitar passar o cabo pelas hastes, pois experiências tem mostrado que é melhor andar com as hastes pelo cabo;
- Realizar a conexão entre o cabo eletropneumático e a unidade de controle, além disso também conectar a lâmina dilatométrica na outra extremidade do cabo;
- Conectar cabo de aterramento a unidade de controle e a lâmina dilatométrica;
- Certificar se as conexões elétricas estão corretas, para isso basta pressionar o centro da membrana e verificar se um sinal sonoro é emitido;
- Fechar as válvulas “main” e “flow”;
- Conectar o tanque de gás a unidade de controle pelo cabo pneumático;
- Ajustar o regulador de pressão do tanque de gás a uma capacidade de no máximo 40 bar, pressão normal de uso da unidade de controle. É de extrema importância evitar atingir a pressão máxima da unidade, 70 bar, para evitar danos ao equipamento;
- Abrir a válvula de saída do regulador de pressão de forma que o gás comprimido adentre na unidade de controle;
- Por fim, abre-se a válvula de ventilação e afere-se o valor de Z_m , ao dar leves toques no vidro de controle do manômetro.

3.8.6 Execução do ensaio

A execução do ensaio propriamente dito depende da calibração inicial e das operações preliminares, quando se finaliza essas duas etapas pode-se iniciar o ensaio DMT propriamente dito. É importante ressaltar que durante o ensaio o cabo de aterramento tem que estar conectado a lâmina ou as hastes utilizadas para cravação, pois dessa forma fecha-se o circuito elétrico e permite-se as leituras.

A lâmina dilatométrica deve ser cravada no terreno utilizando algum equipamento de cravação estática ou dinâmica. Contudo as medições realizadas no ensaio são aferidas a cada 20 centímetros de profundidade, dessa forma deve-se haver um controle para que esse valor não seja ultrapassado e atrapalhe o desenvolvimento do ensaio.

Em relação ao controle da profundidade de cravação deve-se sempre medir os 20 centímetros de profundidade em relação ao centro da membrana.

Inicialmente alguns cuidados devem ser tomados para que o ensaio seja desenvolvido corretamente, são eles: certificar-se de que a válvula “*flow*” esteja fechada, abrir totalmente a válvula geral e ativar o aviso sonoro. O sinal sonoro estará sendo emitido ininterruptamente isso é normal, pois a membrana está sendo comprimida pelo solo a uma posição inferior aos 0,05 milímetros de sucção, medidos na calibração (SILVA, 2008).

Em seguida, deve-se abrir lentamente a válvula “*flow*” e se atentar aos manômetros, pois assim que o sinal sonoro parar de ser emitido significa que a membrana foi expandida em 0,05 milímetros sendo essa a pressão necessária para fazer com que o solo retorne a sua posição inicial, antes da lâmina ser cravada. Essa pressão deve ser registrada sendo denominada de leitura A que deve ser obtida em aproximadamente 15 segundos após o início do ensaio na primeira profundidade atingida. Ainda na mesma profundidade deve-se continuar acrescentando pressão lentamente ao sistema através da válvula “*flow*” até que o sinal sonoro volte a ser emitido, quando isso ocorrer significa que a membrana foi expandida em 1,1 milímetros. Essa medida de pressão deve ser registrada sendo denominada de leitura B que deve ser obtida em aproximadamente 15 segundos após a leitura de A (SILVA, 2008).

Por fim, antes de continuar o processo de cravação a última leitura deve ser registrada, a leitura C. Para medir essa leitura a membrana deve ser desinflada lentamente (cerca de 1 minuto) por meio da válvula “*vent – slow*” até ela retornar a sua posição inicial, ou seja, até que o sinal sonoro seja acionado novamente, isso geralmente ocorre quando o manômetro se aproxima de zero. Caso não seja emitido significa que não há presença do nível d’água no ponto medido (SILVA, 2008).

Durante a cravação até a próxima profundidade de teste a válvula “*vent – fast*” deve permanecer aberta, para evitar danos na membrana. Assim que a lâmina atingir a nova profundidade de medição deve-se fechar a válvula “*vent – fast*” e repetir o procedimento.

Após terminadas todas as leituras do ensaio e ao retirar a lâmina dilatométrica do solo, uma nova medida dos parâmetros de calibração, ΔA e ΔB , deve ser efetuada.

3.8.7 Parâmetros Iniciais

Após a conclusão do ensaio obtém-se diretamente os seguintes parâmetros:

- ΔA : pressão de sucção promovida pela seringa para resultar no deslocamento de 0,05 milímetros da membrana ao ar livre;
- ΔB : pressão necessário para promover a expansão da membrana em 1,10 milímetros ao ar livre;
- A: pressão imposta pelo gás sobre membrana, quando ela está cravada no solo, suficiente para promover um deslocamento horizontal do seu centro em 0,05 milímetros;
- B: pressão imposta pelo gás sobre membrana, quando ela está cravada no solo, suficiente para promover um deslocamento horizontal do seu centro em 1,10 milímetros;
- C: pressão interna na membrana, quando ela está cravada no solo, durante a despressurização no momento em que ela retorna ao deslocamento de 0,05 milímetros;
- Z_m : desvio do medidor de pressão, quando a membrana está em repouso, medido em relação a zero.

Partindo-se deles e através de correlações é possível obter propriedades específicas para o solo analisado.

3.8.8 Correlações dos parâmetros intermediários do ensaio

3.8.8.1 Pressões (P_0 , P_1 e P_2)

A análise das medições aferidas inicia-se pelos parâmetros A, B e C que através de correlações resultam nas pressões P_0 , P_1 e P_2 .

O valor de P_0 corresponde a pressão do solo contra a face da membrana antes dele iniciar a sua expansão. Também pode ser considerado o valor corrigido da pressão A que foi aferida durante o ensaio (CUSTÓDIO, 2003). Esse valor é obtido por extrapolação que pode ser resumida na Equação 1 abaixo.

$$P_0 = 1,05(A - Z_m + \Delta A) - 0,05(B - Z_m - \Delta B) \quad (1)$$

O valor de P_1 corresponde ao valor corrigido da pressão B que foi medida durante o ensaio. Considera-se que a membrana apresente comportamento tensão-

deformação linear até atingir a pressão B (MARCHETTI, 1980). O cálculo da pressão corrigida é realizado pela Equação 2 abaixo.

$$P_1 = B - Z_m - \Delta B \quad (2)$$

O valor de P_2 corresponde a correção da pressão de descarregamento da membrana. Essa pressão é importante, pois possibilita a medição direta e precisa da poro-pressão em solos arenosos (CUSTÓDIO, 2003). O cálculo dessa pressão é realizado pela Equação 3 abaixo.

$$P_2 = C - Z_m + \Delta A \quad (3)$$

O parâmetros P_0 , P_2 e a diferença entre P_1 e P_0 podem ser relacionados com a tensão horizontal em campo, módulo de Young e ao excesso de poro-pressão por conta do processo de cravação da lâmina dilatométrica, respectivamente (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

3.8.8.2 Tensão vertical e poro-pressão da água

Os parâmetros subsequentes dependem da tensão vertical e poro-pressão do solo, a metodologia aplicada por Marchetti para esses cálculos é fundamentada na teoria clássica da mecânica dos solos, conforme apresentado nas Equações 4, 5 e 6 abaixo (CUSTÓDIO, 2003).

$$\sigma_{v'} = \sigma_v - u_0 \quad (4)$$

$$\sigma_v = \gamma_i z_i \quad (5)$$

$$u_0 = \gamma_w z_w \quad (6)$$

Onde:

- $\sigma_{v'}$ = tensão vertical efetiva do solo;
- σ_v = tensão vertical total do solo;
- u_0 = poro-pressão da água;
- γ_i = peso específico do solo;
- z_i = comprimento da camada de solo analisada;
- γ_w = peso específico da água;
- z_w = comprimento da camada submersa.

3.8.8.3 Índice de material (I_D)

Esse parâmetro é aplicado como indicador do tipo de solo, para o cálculo dele relaciona-se a amplitude da faixa de diferença entre P_1 e P_0 com a tensão horizontal efetiva do solo (ESPARZA, 2016). Essa relação é apresentada pela Equação 7.

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0} \quad (7)$$

O índice de material estabelece uma classificação do solo com base em seu comportamento mecânico, não substituindo uma análise granulométrica ou tátil visual do material de ensaio (GOMES, 2007).

3.8.8.4 Índice de tensão horizontal (K_D)

O índice de tensão horizontal é um parâmetro que se assemelha ao coeficiente de empuxo no repouso, conhecido como K_0 , que é obtido pela razão entre a tensão horizontal efetiva e a tensão vertical efetiva (GOMES, 2007). Contudo o cálculo do índice de tensão horizontal é dado pela Equação 8 abaixo.

$$K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma_v} \quad (8)$$

Para solos normalmente adensados o valor desse parâmetro é constante em relação a profundidade, variando geralmente entre 1,8 e 2,3. Já em solos muito adensados esse parâmetro atinge valores superiores a 2,3 e normalmente reduz com a profundidade (MARCHETTI, 1980)

3.8.8.5 Módulo dilatométrico (E_D)

O módulo dilatométrico é um parâmetro que, através da aplicação da teoria da elasticidade, possibilita a definição das características de compressibilidade do solo. Para isso considera-se que a expansão da membrana no interior do solo é modelada como um carregamento de uma área circular na superfície de um semi-espaço infinito elástico não havendo movimentos normais a essa superfície, solução obtida por Gravesen (1960). Com base nessa solução Marchetti (1980) obteve a equação para determinação do módulo dilatométrico a partir da diferença entre P_1 e P_0 , levando em conta que esse parâmetro fosse função do módulo de Young e do coeficiente de Poisson.

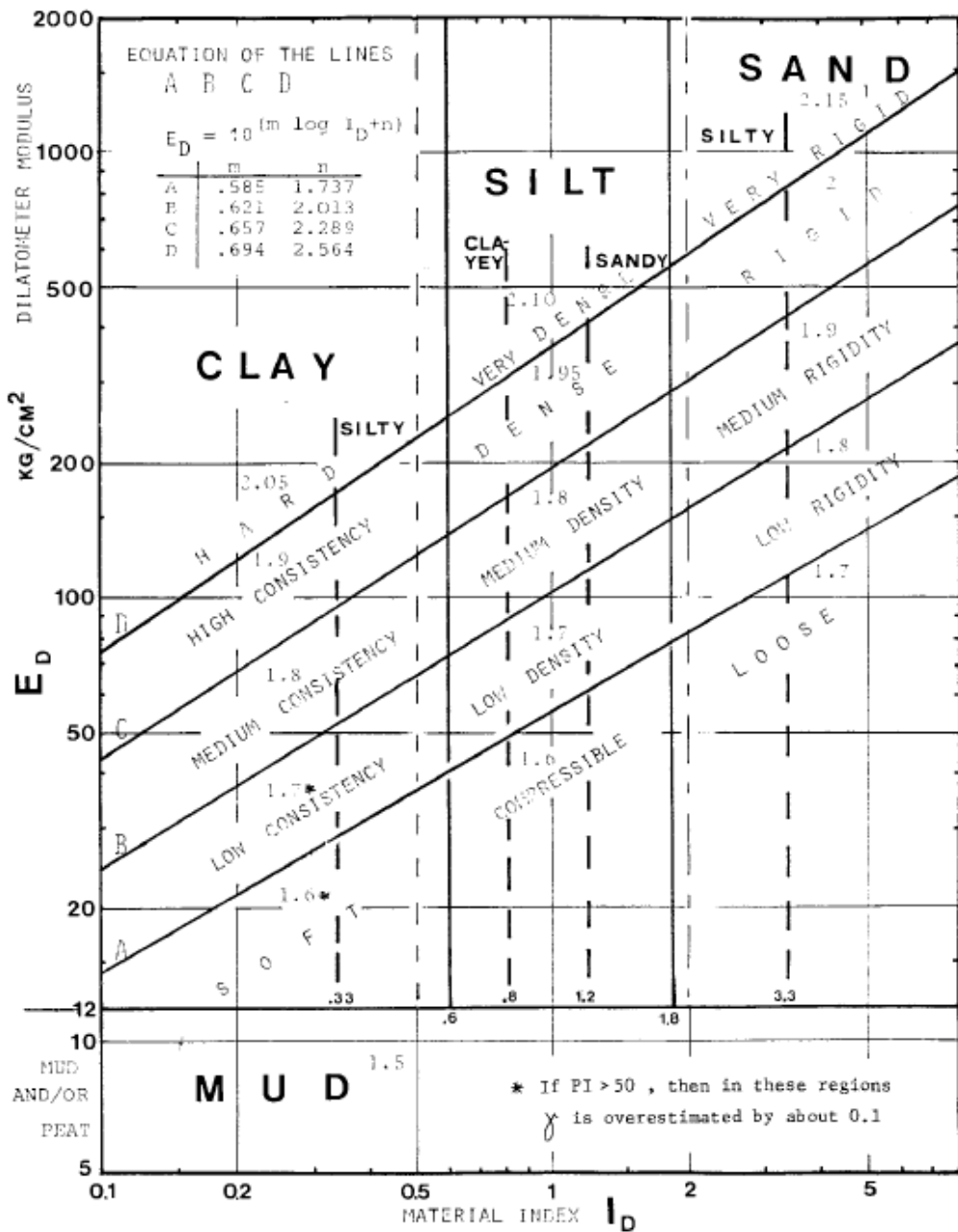
Por fim, o resultado é apresentado pela Equação 9 abaixo.

$$E_D = 34,7 (P_1 - P_0) \quad (9)$$

O módulo dilatométrico não deve ser utilizado separadamente, é importante que ele seja relacionado com o índice do material ou com o índice de tensão horizontal (MARCHETTI, 1997).

Marchetti e Crapps (1981), estabeleceram um modelo de classificação no qual a consistência do solo é assinalada pelo módulo dilatométrico (E_D) e o tipo pelo índice de material (I_D). Esse modelo é apresentado pelo ábaco da Figura 25.

Figura 25 - Ábaco para classificação do solo, avaliação do peso específico e consistência.



Fonte: MARCHETTI; CRAPPS (1981).

3.8.9 Correlações dos parâmetros geotécnicos a partir do ensaio

3.8.9.1 Ângulo de atrito interno do solo (ϕ')

A estimativa do ângulo de atrito foi desenvolvida inicialmente, em fase experimental, por Marchetti e Crapps (1981) sendo válida apenas para solos com valores de índice de material superiores a 1,2 utilizando a seguinte relação estabelecida pela Equação 10 abaixo.

$$\phi' = 25 + 0,19\sqrt{I_D R_C - 100} \quad (10)$$

Onde o parâmetro R_C é calculado de acordo com as seguintes faixas dos parâmetros R e $\sigma_{v'}$:

- Quando R inferior a 500 e $\sigma_{v'}$ inferior a 0,5 bar utiliza-se a Equação 11:

$$R_C = 500 + \frac{R-500}{1+\frac{R-500}{1500}} \quad (11)$$

- Quando R superior a 500 e $\sigma_{v'}$ superior a 0,5 bar utiliza-se a Equação 12:

$$R_C = R \quad (12)$$

O parâmetro R é calculado através da equação 13 abaixo.

$$R = \frac{E_D}{\sigma_{v'}} \quad (13)$$

Devido a essa relação ter sido baseada em poucos dados e ser muito preliminar Marchetti (1997) desenvolveu uma maneira alternativa para estimativa do ângulo de atrito interno do solo, nessa nova relação utilizou o índice de tensão horizontal, que é calculada pela Equação 14 abaixo.

$$\phi' = 28 + 14,6 \log K_D - 2,1 \log^2 K_D \quad (14)$$

3.8.9.2 Coesão do solo (c')

Para solos residuais cimentados, da região de Portugal, foi desenvolvida a Equação 27. Cruz *et. al.* (2004) estabeleceu essa equação para solos correspondentes a siltes arenosos com porcentagem de finos na faixa de 15 a 35% que eram o tipo de solo do campo experimental utilizado. Essa relação foi ajustada com base em ensaio triaxiais e é apresentada pela Equação 15 abaixo.

$$c' = 2,179e^{0,1775K_D} \quad (15)$$

3.9 Ensaio de Compressão Triaxial

O ensaio de compressão triaxial consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico. Para isso, o corpo de prova é colocado no interior de uma câmara de ensaio e é envolvido por uma membrana de borracha. Logo após, enche-se a câmara de água e aplica-se uma pressão, que é chamada pressão confinante ou pressão de confinamento do ensaio. A pressão confinante atua em todas as direções, inclusive na direção vertical. O corpo de prova fica sob um estado hidrostático de tensões.

Devido as numerosas conexões da câmara com o ambiente externo é possível medir ou dissipar pressões neutras, além disso é possível acompanhar as variações de volume. Portanto, é possível realizar o ensaio de diversas formas a depender das necessidades e aplicação dos resultados. Os principais tipos de ensaio triaxial são:

- Consolidado drenado (CD): esse tipo possibilita a dissipação das pressões neutras enquanto é aplicada a pressão confinante tanto na fase de adensamento quanto na de cisalhamento. Durante todo o ensaio são aferidas as variações volumétricas;
- Consolidado não drenado (CU): esse tipo possibilita a dissipação das pressões neutras enquanto é aplicada a pressão confinante apenas na fase de adensamento, pois há restrições de saída das pressões neutras na etapa de cisalhamento. Dessa forma, afere-se as pressões neutras gerada no cisalhamento;
- Não consolidado e não drenado (UU): esse tipo não possibilita a dissipação das pressões neutras, dessa forma afere-se apenas as pressões neutras geradas.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Bulbo metálico e furos nas hastes metálicas

Para execução do ensaio utilizando o equipamento do SPT o maior empecilho é manter a integridade do cabo eletropneumático. Contudo desenvolveu-se um bulbo metálico com a função de criar uma abertura no solo de forma a permitir a passagem

do cabo sem causar-lhe danos. Tal peça foi desenvolvida em aço de forma maciça e soldada a uma haste do SPT conforme apresentado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Bulbo metálico soldado a haste do SPT



Figura 27 - Detalhe do bulbo metálico



O bulbo metálico tem apenas a função de fazer a abertura no solo acima de onde a lâmina dilatométrica vai sendo cravada, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Abertura no solo proporcionada pelo bulbo metálico



Entretanto, o bulbo ainda depende de um furo na haste do SPT para proteger o cabo eletropneumático, pois dessa forma o cabo sai do interior da haste e passa livremente pela abertura no solo. Isso é importante porque caso o cabo ficasse no interior da haste a guia do martelo do SPT poderia danificá-lo ou até mesmo cortá-lo.

O detalhe do furo na haste está apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Furo na haste metálica



Ao unir essas duas adaptações nas hastas do SPT o cabo eletropneumático fica totalmente protegido e consegue-se levar a conexão da lâmina dilatométrica até a unidade de controle permitindo a execução do ensaio. Esse equipamento adaptado, montado para a execução do ensaio DMT, está apresentado em detalhe na Figura 30.

Figura 30 - Haste perfurada e bulbo metálico montados para ensaio



4.2 Adaptador da lâmina dilatométrica para o SPT

Para possibilitar a união da haste do SPT com a lâmina dilatométrica foi necessário desenvolver uma luva redutora, conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Adaptador da lâmina dilatométrica para o SPT



4.3 Adaptação do motor elétrico para o SPT

Com o intuito de automatizar a execução do ensaio DMT utilizando o equipamento do SPT optou-se por utilizar o motor elétrico para içar o martelo de bater. Entretanto para permitir isso foi necessário adaptar o equipamento do SPT da Universidade Federal de São João del-Rei, porque da forma como ele se encontrava não era possível acoplar o motor, conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Equipamento de execução do SPT



O equipamento desenvolvido foi um acoplamento semelhante a um “carrinho”. O intuito disso foi evitar qualquer alteração no equipamento do SPT de forma que caso

fosse necessário utilizar o SPT convencional basta-se retirar o acoplamento e executar o ensaio. Outro ponto levado em consideração foi o peso do motor, para facilitar o deslocamento dele foram adicionadas rodas ao “carrinho”. O resultado do equipamento criado é apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Acoplamento do motor elétrico desenvolvido



Ao fixar o “carrinho” no equipamento do SPT e realizar todas as ligações e conexões necessárias o resultado do equipamento do SPT pronto para execução do ensaio é apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Equipamento SPT com motor elétrico



4.4 Novo martelo para o SPT (125 kg)

A execução do ensaio DMT utilizando o bulbo metálico para cravação oferece uma alta resistência a cravação no solo, devido ao seu considerável diâmetro. Por conta disso ao invés de utilizar o martelo padrão do SPT para cravação (65 kg) desenvolveu-se um novo martelo de 125 kg, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Pesagem do martelo de 125 kg



Para criar esse martelo utilizou-se os seguintes materiais:

- Uma seção de um tubo de aço de aproximadamente 30 centímetros de diâmetro e 30 centímetros de comprimento;
- Um disco maciço de 7 centímetros de espessura;
- Um vergalhão de cerca de 100 centímetros de comprimento;
- Chapas metálicas para compor a tampa e ligações acima dela;
- Um olhal giratório;
- Mistura de concreto com escória de aciaria ao invés de brita.

As peças metálicas foram soldadas, exceto a tampa, o interior do tubo foi preenchido com o concreto e por último soldou-se a tampa fechando a parte superior. Durante esse processo de concretagem do martelo a haste permaneceu no interior do tubo para moldar o concreto durante o processo de cura. O resultado final do martelo pronto para execução de ensaios está apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Martelo para SPT de 125 kg



4.5 Execução do ensaio DMT com equipamento adaptado

O equipamento finalizado garantiu o principal objetivo para execução do ensaio utilizando o equipamento do SPT que é proteger a integridade do cabo desde da cravação da lâmina até a sua retirar do solo.

A Figura 37 apresenta o equipamento do SPT montado para execução do ensaio DMT.

Figura 37 - Execução do ensaio DMT



As leituras aferidas durante o ensaio (A, B e C) foram correlacionadas através das equações de Marchetti para obtenção dos parâmetros intermediários, sendo eles:

- Pressões (P1, P2 e P0);
- Índice de material;
- Índice de tensão horizontal;
- Módulo dilatométrico.

Com base nos resultados encontrados e através de novas correlações, também de Marchetti, desses obtém-se os seguintes parâmetros geotécnicos:

- Ângulo de atrito interno do solo;
- Coesão do solo.

Com esses dados foi possível analisar a efetividade dos resultados encontrados, quando obtidos através do ensaio dilatométrico (DMT) executado com um equipamento de ensaio de sondagem à percussão (SPT) mecanizado, através de uma comparação com os resultados do mesmo campo experimental para um ensaio triaxial consolidado drenado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após calibrada a membrana os valores médios encontrados para ΔA e ΔB foram 0,10 e 0,60 bar para o primeiro ensaio, já para o segundo foram 0,18 e 0,50 bar.

Para o campo experimental em questão foram desenvolvidos dois furos para realizar o ensaio DMT. O resultado aferido após a execução do ensaio está apresentado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Leitura A, B e C do primeiro ensaio DMT

Profundidade (m)	A (kN/m ²)	B (kN/m ²)	C (kN/m ²)
0,5	190,0	670,0	0,0
0,7	130,0	510,0	0,0
0,9	130,0	570,0	0,0
1,1	190,0	730,0	0,0
1,3	210,0	650,0	0,0
1,5	60,0	270,0	0,0
1,7	90,0	570,0	0,0
1,9	480,0	1550,0	0,0

Tabela 2 - Leitura A, B e C do segundo ensaio DMT

Profundidade (m)	A (kN/m ²)	B (kN/m ²)	C (kN/m ²)
0,5	70	310	0,0
0,7	50	240	0,0
0,9	70	230	0,0
1,1	-	-	-
1,3	30	140	0,0
1,5	30	170	0,0

No primeiro furo (Tabela 1) houve um empenamento da haste durante a cravação do 1,9 metro, por conta disso o ensaio foi finalizado nessa profundidade e o equipamento foi levado para reparo.

No segundo furo (Tabela 2) houve um problema na ligação elétrica que não indicou a movimentação da lâmina com o sinal sonoro na profundidade de 1,1 metro, dessa forma optou-se por evitar danos a membrana e continuar a cravação até a próxima profundidade de leitura, 1,5 metro. Esse problema retornou na profundidade de 1,7 metro e persistiu até a profundidade de 2,5 metros, aonde foi encerrado o ensaio devido a não ser possível aferir as leituras. Uma tentativa para solucionar o problema foi a retirada da lâmina do solo e a execução de testes de corrente, entretanto apesar de esses testes realizados ao ar livre não terem apontado qualquer problema, ao cravar novamente a lâmina o mesmo problema foi identificado.

Para obter-se as pressões P_0 , P_1 e P_2 aplicou-se as Equações 1, 2 e 3 nos dados obtidos nos ensaios e por fim os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 3 e 4.

Tabela 3 - P_0 , P_1 e P_2 do primeiro ensaio DMT

Profundidade (m)	P_0 (kN/m ²)	P_1 (kN/m ²)	P_2 (kN/m ²)
0,5	179,50	610,00	10,00
0,7	124,50	450,00	10,00
0,9	121,50	510,00	10,00
1,1	176,50	670,00	10,00
1,3	201,50	590,00	10,00
1,5	63,00	210,00	10,00
1,7	79,50	510,00	10,00
1,9	440,00	1490,00	10,00

Tabela 4 - P₀, P₁ e P₂ do segundo ensaio DMT

Profundidade (m)	P ₀ (kN/m ²)	P ₁ (kN/m ²)	P ₂ (kN/m ²)
0,5	78,88	260,00	17,50
0,7	61,38	190,00	17,50
0,9	82,88	180,00	17,50
1,1	-	-	-
1,3	45,38	90,00	17,50
1,5	43,88	120,00	17,50

Os principais parâmetros de correlação foram o índice de material (I_D) e o módulo dilatométrico (E_D), pois eles servem de base para as demais correlações do ensaio DMT. Além disso, são fundamentais para classificação do solo e obtenção do peso específico do solo. Esses parâmetros são calculados através das correlações das Equações 7 e 9 e utilizando o ábaco da Figura 25.

Os resultados obtidos através dessas relações são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - I_D , E_D e classificação do solo do primeiro ensaio DMT

Profundidade (m)	I_D	E_D (kN/m ²)	γ_i (kN/m ³)	Classificação do solo
0,5	2,40	14938,35	18	Areia siltosa
0,7	2,61	11294,85	18	Areia siltosa
0,9	3,20	13480,95	18	Areia siltosa
1,1	2,80	17124,45	18	Areia siltosa
1,3	1,93	13480,95	18	Areia siltosa
1,5	2,33	5100,90	20	Areia siltosa
1,7	5,42	14938,35	18	Areia siltosa
1,9	2,39	36435,00	20	Areia siltosa

Tabela 6 - I_D , E_D e classificação do solo do segundo ensaio DMT

Profundidade (m)	I_D	E_D (kN/m ²)	γ_i (kN/m ³)	Classificação do solo
0,5	2,30	6285,04	17	Areia siltosa
0,7	2,10	4463,29	17	Areia siltosa
0,9	1,17	3370,24	16	Silte
1,1	-	-	-	-
1,3	0,98	1548,49	16	Areia siltosa
1,5	1,74	2641,54	16	Silte arenoso

Depois de determinado o peso específico do solo é possível determinar a sua tensão efetiva através da Equação 5, ao invés da Equação 4, uma vez que

analisando o parâmetro C (indicador do nível d'água) tanto da Tabela 1 quanto da Tabela 2 percebe-se que não foi encontrado o nível d'água, pois todos os valores são iguais a zero. Portanto a poro pressão é igual a zero.

Os resultados encontrados para tensão efetiva são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Tensão efetiva do solo do primeiro e segundo ensaio DMT

Profundidade (m)	σ_v' do 1º furo (kN/m ²)	σ_v' 2º do furo (kN/m ²)
0,5	9	8,5
0,7	12,6	11,9
0,9	16,2	15,1
1,1	19,8	18,3
1,3	23,4	21,5
1,5	27,4	24,7
1,7	31	-
1,9	35	-

O parâmetro mais importante na correlação utilizada para cálculo do ângulo de atrito e coesão (Equações 10, 14 e 15) é o índice de tensão horizontal obtido pela Equação 8. O ângulo de atrito foi calculado pelas duas equações desenvolvidas por Marchetti (1981 e 1997) com o intuito de obter o valor que melhor se enquadre no solo em análise. As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados encontrados.

Tabela 8 - Índice de tensão horizontal, parâmetros R e RC, ângulo de atrito e coesão do solo do primeiro ensaio DMT

Profundidade (m)	Kd	R	R _c	ϕ' (1981)	ϕ' (1997)	c' (kN/m ²)
0,5	19,94	1659,82	1154,08	34,81	43,43	75,11
0,7	9,88	896,42	813,55	33,55	40,45	12,59
0,9	7,50	832,16	771,94	34,25	39,17	8,25
1,1	8,91	864,87	793,48	33,75	39,98	10,60
1,3	8,61	576,11	572,43	31,02	39,82	10,05
1,5	2,30	186,16	103,13	27,25	33,00	3,28
1,7	2,56	481,88	481,66	34,52	33,62	3,44
1,9	12,57	1041,00	897,60	33,59	41,51	20,29

Tabela 9 - Índice de tensão horizontal, parâmetros R e R_c, ângulo de atrito e coesão do solo do segundo ensaio DMT

Profundidade (m)	K _d	R	R _c	φ' (1981)	φ' (1997)	c' (kN/m ²)
0,5	9,28	739,42	706,46	32,41	40,16	11,31
0,7	5,16	375,07	363,72	29,89	37,34	5,44
0,9	5,49	223,19	160,55	26,78	37,65	5,77
1,1	-	-	-	-	-	-
1,3	-	-	-	-	32,51	3,17
1,5	-	-	-	-	31,51	2,99

Para as profundidades de 1,3 e 1,5 metro a correlação de Marchetti (1981) não foi aplicável, devido o valor de R_c ter sido negativo, dessa forma eles foram descartados.

A classificação do solo através do primeiro furo realizado foi de uma areia siltosa, conforme apresentado na Tabela 5. Já no segundo ensaio houve uma maior variação apresentando três tipos de solo sendo eles uma areia siltosa, um silte e um silte arenoso, conforme Tabela 6.

Segundo Gomes (2008) para solos coesivos muitas vezes ocorre uma inversão entre silte e areia, dessa forma a combinação de argila e areia é apresentada pelo ensaio com valores representando faixas de silte. Os ensaios de caracterização do perfil do solo desenvolvidos por Oliveira (2018) confirmam essa inversão uma vez que o solo é descrito como um material composto por um silte arenoso. Isso ocorre porque as correlações do ensaio DMT levam em consideração apenas as propriedades mecânicas do solo.

Oliveira (2018) realizou ensaios triaxiais no mesmo campo experimental e os resultados obtidos para coesão e ângulo de atrito encontrados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Ângulo de atrito e coesão do solo obtidos pelo ensaio Triaxial tipo CID

Profundidade (m)	φ'	c' (kN/m ²)
0,5	25,7	39,9
1,5	29,6	36,8
2,5	29,9	24,2
3,5	23,8	35,0

Fonte: OLIVEIRA (2018).

Ao analisar os desvios em porcentagem dos valores para o ângulo de atrito e coesão encontrados através do DMT e do triaxial os seguintes resultados foram encontrados conforme apresentado nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Desvio do DMT em relação ao triaxial em porcentagem para o primeiro ensaio

Profundidade (m)	Desvio do ϕ' (1981)	Desvio do ϕ' (1997)	Desvio do c'
0,5	35,46%	68,99%	88,26%
1,5	-7,93%	11,50%	-91,09%

Tabela 12 - Desvio do DMT em relação ao triaxial em porcentagem para o segundo ensaio

Profundidade (m)	Desvio do ϕ' (1981)	Desvio do ϕ' (1997)	Desvio do c'
0,5	26,12%	56,26%	-71,65%
1,5	-	6,46%	-91,88%

A faixa de variabilidade aceitável para as propriedades de resistência do solo segue um coeficiente de variação inerente do solo que no caso do ângulo de atrito é de 5 a 15% (PHOON; KULHAWY, 1999).

Portanto, os valores encontrados para o ângulo de atrito a uma profundidade de 1,5 metro foram aceitáveis em ambos os ensaios. Entretanto, para profundidades inferiores como a de 0,5 metro as correlações apresentaram resultados fora da faixa aceitável de variação, sendo que a relação de Marchetti (1981) apresentou resultados mais satisfatórios do que Marchetti (1997). Assim sendo, os resultados obtidos para leituras mais profundas são mais precisos. Isso ocorre porque à medida que se aumenta a profundidade o equipamento ganha mais estabilidade e o ensaio fica menos sujeito a vibrações e interferências.

Já para análise de coesão a correlação aplicada referente a Equação 15 não apresentou resultados satisfatórios em nenhum dos dois ensaios executados. Tal fato pode ter ocorrido por dois motivos:

- O primeiro é devido a equação utilizada ter sido desenvolvida para solos residuais cimentados da região de Portugal, que podem apresentar variações quando comparados aos brasileiros;
- Já a segunda está relacionada a execução do ensaio triaxial, pois nesse caso a amostra é saturada, já no ensaio DMT executado em campo experimental a amostra de solo encontra-se num estado não saturada. Sendo isso confirmado por Santana (2016 apud CRUZ, 2014) que salienta que a

saturação de solos residuais pode levar à perda da estrutura e, em consequência, de resistência.

6 CONCLUSÃO

Através de uma adaptação do equipamento SPT foi possível executar o ensaio DMT no campo experimental e observar a correlação dos resultados, apesar das limitações encontradas durante a execução do ensaio foi possível verificar que para leituras mais profundas os valores encontrados para o ângulo de atrito são satisfatórios. Isso foi confirmado devido a aproximação dos resultados encontrados para esse parâmetro ao compará-los com o resultado do ensaio triaxial de Oliveira (2018).

Contudo para a coesão os resultados apresentaram uma grande variação do valor esperado, dessa forma duas soluções são possíveis para corrigir esses resultados:

- Desenvolver-se uma nova correlação com base em solos brasileiros, em especial para o campo experimental em análise. Essa relação seria importante, pois poderia servir de base para outras pesquisas desenvolvidas no mesmo campo;
- Obter-se uma correlação entre a diferença de saturação das amostras de solo usadas no triaxial e no DMT, de forma a corrigir as discrepâncias encontradas.

Posto isso, a execução do DMT utilizando o equipamento SPT mostrou-se como uma metodologia aplicável, porém necessita de ajustes, uma vez que problemas como excesso de vibração, falta de linearidade durante a cravação da lâmina e interferência geradas pelo bulbo metálico podem afetar os resultados encontrados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. J. R.; Carvalho, D.; FERREIRA, C. V. e LOBO, A. S. Determinação da carga de ruptura de fundação avaliada com base no conceito de rigidez e método de Van der Veen. Congresso Argentino de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 17. Sinergia Córdoba, (2004).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR12131: Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

BERNARDES, J. A. Investigação sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual de gnaiss. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BRAJA, M.D. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 1ªed. Cengage Learning. 2007.

BRIAUD, J. L.; MIRAN, J. The Flat Dilatometer Test. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-AS-91-044, Washington, USA, 102p. 1992.

COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F.; DO NORTE, Tecnologia do Rio Grande. Investigação Geotécnica para projeto de estabilidade de encostas. In: 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, São Paulo, SP. 2009.

CRAIG, R.F. Mecânica dos Solos, 7ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CRUZ, N.; VIANA DA FONSECA, A.; NEVES, E. Evaluation of effective cohesive intercept on residual soil by DMT and CPT. Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, 2004.

CUSTÓDIO, G. S. Investigação e análise de parâmetros geotécnicos obtidos com ensaio de laboratório e ensaios in situ (DMT, PMT, SPT, PMD). Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2003.

DUARTE, L. N., 2012. Avaliação do Comportamento Solo – estrutura de Elementos de Fundação Tipo Sapata Estaqueada. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

EUROCODE 7. Geotechnical Design - Part 2, Ground Investigation and Testing, England, 1997-2:2007.

ESPARZA, O. L. R. Emprego do ensaio DMT na previsão da capacidade de carga de estacas em solo de diabásio. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. 2016.

FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE, São Paulo, 1998.

GOMES, D. D. Uso do dilatômetro de Marchetti para previsão da capacidade de carga e dos recalques elásticos de estacas. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, SP. 2007.

GRAVENSEN, S. Elastic Semi-infinite Medium Bounded by a Rigid Wall with a Circular Hole. Copenhagen: Laboratoriet for Bygningsteknik/Danmarks Tekniske Højskole, vol. 1. (Meddelelse n. 10), 1960.

HACHICH, W. Fundações – Teoria e Prática. 2ªed. São Paulo: Pini, 2000.

HANSBO.S. 1994. Foundation Engineering. Elsevier. Amsterdam.

HEAD, K.H. Manual of soil laboratory testing. John Wiley & Sons, 1982. v. 2, 412 p.

MARCHETTI, S. In situ tests by dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v.106. 1980.

MARCHETTI, S; CRAPPS, D. K. Flat Dilatometer Manual. Internal report of GPE Inc., Gainesville, FL. 1981.

MARCHETTI, S. In Situ Tests by Flat Dilatometer: Design Application. Third Geotechnical Engineering Conference, Cairo University, Keynote Lecture. 1997.

MARINHO, F. A. M. Investigação Geotécnica Para Quê? Universidade de São Paulo. In: IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Salvador, BA. 2005.

MASSAD, F. Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia. São Paulo: Oficina dos Textos, 2003.

MEDEIROS, H. Estacas a toda prova. 95ªed. São Paulo: Técnica, 2005.

OLIVEIRA, C. R. Prova de carga em estruturas de concreto. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006.

OLIVEIRA, T. M. Estacas tipo Mini-RAP. Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2018.

ORTIGÃO, J.A.R. Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. 3ªed. Rio de Janeiro. LTC. 2007.

PINTO, C.S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3ªed. Oficina de Textos. 2006.

PHOON, K.K.; KULHAWY F.H. Characterization of geotechnical variability. Canadian geotechnical journal, NRC Research Press. 1999.

QUEIROZ, A. C. G. Uso do DMT na Avaliação de Maciços Compactados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-xxx/2008, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF, 96 p.

REIS, J. H.; BELINCANTA, A.; GUTIERREZ, N. H. M. Investigação geotécnica: algumas considerações sobre a interpretação de ensaios penetrométricos dinâmicos e provas de carga estática. In: GeoSul, Criciúma, SC. 2013.

ROBERTSON P. K.; CABAL K. L. (2009). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Gregg Drilling & Testing, Inc. 3ed. Sogna Hill, California.

ROCHA, B. P.; GIACHETI, H. L. Ensaio DMT na caracterização e estimativa de recalques de fundações superficiais em solo tropical arenoso. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, MG. 2016.

RODRIGUEZ, T. G. Caracterização geotécnica de um solo de diabásio por meio de ensaios SPT e CPT. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2013.

SANTANA, L. G. Estimativa de parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos a partir de sondagens SPT e comparações com resultados de ensaios triaxiais. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, MG. 2016.

SCALLET, M. M. Comportamento de estacas escavadas de pequeno diâmetro em solos lateríticos e colapsível da região de Campinas/SP. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 2011.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações. 2. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.

SCHNAID, F. Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia Geotécnica. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SILVA, F. K. Ensaios dilatométricos – DMT em solos de Santa Catarina: Estudo comparativo com CPT e SPT. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGECC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, SC. 2008.

VELLOSO, D. A. DEREZENDE, L. F. Fundações – Volume Completo. São Paulo: Oficina do texto, 2010.