

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR – MG
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
MADALENA RODRIGUES BELO DA CUNHA

**APLICAÇÕES E EVOLUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE EMPUXOS
EM SOLOS PELO MÉTODO DO DILATÔMETRO DE MARCHETTI**

FORMIGA – MG

2014

MADALENA RODRIGUES BELO DA CUNHA

APLICAÇÕES E EVOLUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE EMPUXOS EM
SOLOS PELO MÉTODO DO DILATÔMETRO DE MARCHETTI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ms. Tiago de Moraes Faria
Novais.

FORMIGA - MG

2014

C972 Cunha, Madalena Rodrigues Belo da.

Aplicações e evolução do ensaio de determinação de empuxos em solos pelo método do dilatômetro de Marchetti / Madalena Rodrigues Belo da Cunha. – 2014.

61 f.

Orientador: Tiago de Moraes Faria Novais.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro Universitário de Formiga–UNIFOR - MG, Formiga, 2014.

1. Dilatômetro. 2. Solos. 3. Econômico. I. Título.

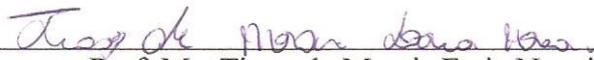
CDD 631.433

Madalena Rodrigues Belo da Cunha

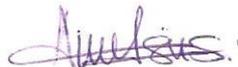
APLICAÇÕES E EVOLUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE EMPUXOS EM
SOLOS PELO MÉTODO DO DILATÔMETRO DE MARCHETTI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR,
como requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil.

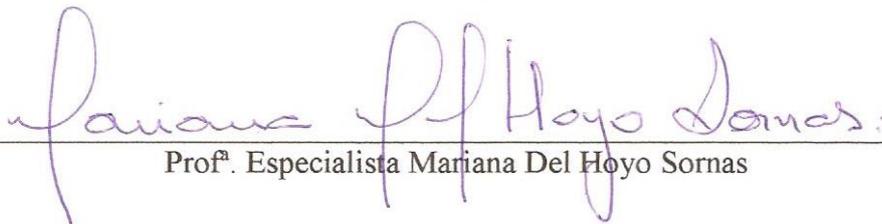
BANCA EXAMINADORA



Prof. Ms. Tiago de Moraes Faria Novais
Orientador



Profª. Msª. Aline Matos Leonel Assis



Profª. Especialista Mariana Del Hoyo Sornas

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e por proporcionar-me a oportunidade de concluir um curso superior.

Agradeço também à minha mãe, a meu marido e filhas pelo apoio incondicional e suporte nessa caminhada que está apenas começando.

Agradeço ao meu orientador Tiago de Moraes Faria Novais, pela gentileza, educação, carinho, sabedoria compartilhada durante esse período.

Agradeço à Dicasa Engenharia Ltda. na pessoa do proprietário Saulo Dias de Carvalho, pois, proporcionou-me estágio que facilitou meu aprendizado e crescimento enquanto estudante e futura profissional da área de engenharia.

Agradeço ao professor Dr. Silvano Marchetti, idealizador da lâmina dilatométrica e do ensaio dilatométrico, pela disponibilidade em encaminhar fotos e textos para o engrandecimento de minhas pesquisas.

Agradeço ao engenheiro civil Dr. Fernando Damasco Penna, por me enviar as descrições e valores do ensaio dilatométrico, executado pelo Grupo Damasco Penna, engenharia geotécnica aqui no Brasil.

E, por último, aos amigos, companheiros de classe e colegas, sem citar nomes para não cometer injustiças, pela colaboração em tantos momentos, paciência e apoio ao longo de todo o curso.

RESUMO

Este trabalho indica o dilatômetro de Marchetti (DMT) como um dos principais equipamentos desenvolvido com a finalidade de obter parâmetros geotécnicos de solos, em investigações *in situ*. Esse aparelho foi idealizado e desenvolvido em 1975 pelo engenheiro Silvano Marchetti, doutor e professor da Universidade L'Aquila, em Roma, na Itália. O dilatômetro constitui-se de uma lâmina de aço inoxidável dotada de uma membrana de aço muito fina em uma de suas faces, e quando inserida no solo produz perturbações inferiores às observadas em outros ensaios de penetração. O penetrômetro foi patenteado em 1977, na Itália, e introduzido nos Estados Unidos em 1975 pela empresa Schmertmann & Crapps Inc., onde ganhou destaque e reconhecimento internacional, sendo utilizado em 40 países. A normalização dos procedimentos para o ensaio dilatométrico está estabelecida nos Estados Unidos pela ASTM "Standart Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer Test" – D6635-01 e na Europa no Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part 3 – "Design assisted by Field testing" – Section 9 – "Flat Dilatometer Test (DMT)". O ensaio dilatométrico é um processo simples, rápido e econômico que complementa e aprimora as investigações geotécnicas de campo. Este trabalho é composto por uma breve abordagem sobre o aparelho e sua evolução, como é a execução do ensaio, suas vantagens e desvantagens. Busca-se orientar alunos que queiram seguir a área de Geotecnia após o ensino superior. Procura-se apresentar os aspectos necessários ao seu uso e interpretação dos parâmetros, pois a experiência brasileira em relação ao aparelho é iniciante.

Palavras-chave: Dilatômetro. Solos. Economia.

ABSTRACT

This work indicates the Marchetti dilatometer (DMT) as one of the main equipment developed in order to obtain geotechnical parameters of soils, in situ investigations. This appliance has been designed and developed in 1975 by engineer Silvano Marchetti, doctor and professor at L'aquila University, in Rome, Italy. The dilatometer is a stainless steel blade with a very thin steel membrane in one of their faces, and when inserted in the soil produces disturbances below those observed in other tests of penetration. The penetrometer was patented in 1977, in Italy, and introduced in the United States in 1975 by Schmertmann Crapps & Company Inc., where he came to prominence and international recognition, being used in 40 countries. The standardisation of procedures for testing dilatometric is established in the United States by ASTM "Standart Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer Test"-D6635-01 and Eurocode 7 Europe – Geotechnical Design – Part 3 – "Design assisted by Field testing" – Section 9 – "Flat Dilatometer Test (DMT)". The dilatometric test is a simple, fast and cost-effective process that complements and enhances the geotechnical field investigations. This work consists of a brief approach on the appliance and its evolution, as is the execution of the test, their advantages and disadvantages. The aim is to guide students who want to follow the area of Geotechnics after higher education. Seeks to present aspects necessary for its use and interpretation of parameters, because the Brazilian experience in relation to the appliance is beginner.

Keywords: Dilatometer. Soils. Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Mapa Mundi.....	17
Figura 2 -	Deformações causadas pela cravação do DMT e CPT.....	19
Figura 3 -	Deformações causadas por elementos com ângulos apicais de 20° (DMT) e 60° (CPT).....	20
Figura 4 -	Cravação DMT à esquerda e cravação CPT, à direita.....	21
Figura 5 -	Placa original do dilatômetro.....	22
Figura 6 -	Lâmina apresentada em 1975, a membrana é feita de aço e as hastes são circulares.....	23
Figura 7 -	Impulso nas hastes.....	24
Figura 8 -	Nova geometria da placa do dilatômetro.....	24
Figura 9 -	Detalhes da membrana do dilatômetro.....	25
Figura 10 -	Atual lâmina.....	25
Figura 11 -	Lâmina do dilatômetro.....	26
Figura 12 -	Membrana de aço.....	26
Figura 13 -	Maleta contendo um manômetro e a lâmina utilizada no ensaio dilatométrico.....	27
Figura 14 -	Ensaio dilatométrico com utilização da maleta contendo um manômetro.....	28
Figura 15 -	Esquema geral do ensaio.....	29
Figura 16 -	Princípio de funcionamento da membrana.....	30
Figura 17 -	Inserção da lâmina dilatométrica através de percussão.....	31
Figura 18 -	Inserção da lâmina dilatométrica no solo, através de sistema hidráulico.....	31
Figura 19 -	Componentes e suas conexões.....	32
Figura 20 -	Vista lateral, frente e verso da lâmina.....	33
Figura 21 -	Dilatômetro offshore delimitado por linhas pontilhadas.....	34
Figura 22 -	Posições da membrana.....	35
Figura 23 -	Calibração da membrana com seringa, ao ar.....	36
Figura 24 -	Mini-calibrador.....	37
Figura 25 -	Esquema de calibração, apresentado por Marchetti et al. (2001).....	37

Figura 26 -	Seringa exercício.....	38
Figura 27 -	Esquema da disposição e ligação das várias componentes do ensaio DMT.....	39
Figura 28 -	Equipamento e expansão da membrana no solo.....	40
Figura 29 -	Válvula de fluxo e descarga.....	41
Figura 30 -	Expansão da membrana detalhada.....	41
Figura 31 -	Unidade de controle.....	42
Figura 32 -	Cabo P-E.....	43
Figura 33 -	Botão de teste do circuito.....	43
Figura 34 -	Esquema de válvulas.....	44
Figura 35 -	Cabo-terra.....	45
Figura 36 -	Depósito de gás.....	45
Figura 37 -	Varas de cravação.....	46
Figura 38 -	Adaptador.....	46
Figura 39 -	Penetração da lâmina no solo.....	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tipos de solo.....	53
--------------------------------	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Parâmetros intermediários.....	51
Quadro 2 -	Correlações existentes entre índices dilatométricos e parâmetros geotécnicos.....	52
Quadro 3 -	Exemplo de valores, ensaio dilatométrico.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	Standart Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer Test
bar	Uma unidade de pressão
Cabo P-E	Cabo pneumático elétrico
cm	Centímetro
CPT	Cone Penetration Test (Ensaio de penetração de cone)
CPTU	Piezocone Penetration Test (Ensaio de penetração do piezocone)
DMT	Dilatômetro de Marchetti (<i>Dilatometer test</i>)
Kpa	Kilopascal
mm	Milímetro
Mpa	Megapascal
OCR	Razão de sobre adensamento
SPT	Standard Penetration Test (Ensaio de penetração padrão)
UBC	<i>The University of British Columbia</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\pm	Mais ou menos
$A\Delta$	Pressão externa a ser aplicada à membrana, ao ar livre, para a correção da rigidez da membrana
A_{antes}	Ponto de repouso antes do ensaio
A_{depois}	Ponto de repouso após o ensaio
$B\Delta$	Pressão interior a ser aplicada à membrana, ao ar livre, levanta o centro da membrana de 1,1 milímetros a partir da sua posição inicial, para correção da rigidez da membrana
B_{antes}	Ponto inflado antes do ensaio
B_{depois}	Ponto inflado depois do ensaio
C_v	Coefficiente de adensamento
DA	Deslocamento A
DB	Deslocamento B
E	Módulo de elasticidade
E_D	Módulo dilatométrico
E_s	Módulo de elasticidade do solo
Eurocode 7	Eurocódigo 7
I_D	Índice de material
K	Coefficiente de permeabilidade
K_0	Coefficiente de empuxo em repouso
K_D	Índice de tensão horizontal
$^\circ$	Grau
P_0	Pressão no repouso
P_1	Pressão inicial
$P_{\text{máx}}$	Pressão máxima
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
Z_m	Desvio zero do manômetro.
ΔA	Pressão de gás relativa à leitura A
ΔB	Pressão de gás relativa à leitura B

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	JUSTIFICATIVA.....	16
4	DEFINIÇÃO.....	17
4.1	Histórico.....	21
5	O ENSAIO DILATOMÉTRICO.....	34
5.1	Interpretação dos resultados.....	52
5.2	Aplicações.....	54
5.3	Vantagens e desvantagens.....	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

O dilatômetro de Marchetti (DMT) é um aparelho utilizado para medir as propriedades mecânicas dos solos e foi idealizado e desenvolvido pelo engenheiro civil Silvano Marchetti, professor da Universidade L'Áquila, em Roma, Itália. A denominação dilatômetro de Marchetti originou-se do nome de seu idealizador. O ensaio dilatométrico foi desenvolvido na Itália por esse professor e pesquisador, responsável pela concepção e construção do equipamento, como também pela formulação dos conceitos básicos associados à sua interpretação. (MARCHETTI, 1975; 1980; 1997). A técnica, concebida em meados da década de 1970, foi patenteada na Itália em 1977. (SCHNAID, 2000).

O ensaio DMT é amplamente utilizado em todo mundo, com diferentes finalidades. Sua introdução na América do Norte foi realizada pela empresa Schmertmann & Crapps Inc., onde ganhou destaque e reconhecimento internacional (PENNA, 2011). Foi introduzido no Brasil somente em 1986 (QUEIROZ, 2008) e não há normalização específica no Brasil. (ANGELIM, 2011). A normalização dos procedimentos está estabelecida nos Estados Unidos desde 1986, pela ASTM “*Standart Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer Test*” – D6635-01 e na Europa (1995) no *Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part 3 – “Design assisted by Field te Sting” – Section 9 – “Flat Dilatometer test (DMT)”*. (SCHNAID, 2000).

O dilatômetro constitui-se de uma lâmina de aço inoxidável dotada de uma membrana circular de aço muito fina em uma de suas faces, similar a um instrumento tipo célula de pressão total. O ensaio dilatométrico (*Dilatometer test – DMT*) consiste na cravação da lâmina dilatométrica no terreno, medindo o esforço necessário à penetração, para em seguida usar a pressão de gás para expandir a membrana de aço (diafragma) no interior da massa de solo. O equipamento é portátil e de fácil manuseio, sendo a operação simples e relativamente econômica. (SCHNAID, 2000).

A experiência brasileira é ainda incipiente, restringindo-se à validação da experiência internacional em condições locais, com base na comparação com outros ensaios de campo e laboratório. (SOARES et al., 1986).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Adquirir conhecimentos sobre o aparelho desenvolvido pelo professor Silvano Marchetti, entender e descrever o ensaio dilatométrico, o seu modo de funcionamento, parâmetros geotécnicos e direcionar os estudos para as suas aplicações.

2.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos os seguintes itens:

- a) apresentar justificativas de que o ensaio representa um processo simples, rápido e muito econômico, de complementação e aprimoramento das investigações geotécnicas de campo, tornando-se necessário suas aplicações;
- b) ampliar os conhecimentos a cerca do dilatômetro de Marchetti para difusão do seu uso na região.

3 JUSTIFICATIVA

O DMT é utilizado por diversos institutos de pesquisa e empresas que trabalham na área geotécnica nos Estados Unidos, Itália, Inglaterra, China, Portugal, entre outros países. A validade do método foi comprovada em centenas de testes em campo, sendo esses padronizados de acordo com diversas diretrizes vigentes, tiveram realização em sítios localizados em quase todas as partes do mundo, inclusive no Brasil, sendo apoiada por várias publicações.

Apresentar e mostrar o uso do DMT em engenharia geotécnica brasileira despertará interesse de conhecimento do aparelho e do ensaio dilatométrico, apesar do país utilizar a prática de investigações no local dominadas pelo Standard Penetration Test (SPT). O equipamento DMT foi introduzido em algumas Universidades Federais e algumas empresas privadas, tornando-o conhecido pelos engenheiros geotécnicos e proporcionando uma mudança tecnológica no Brasil.

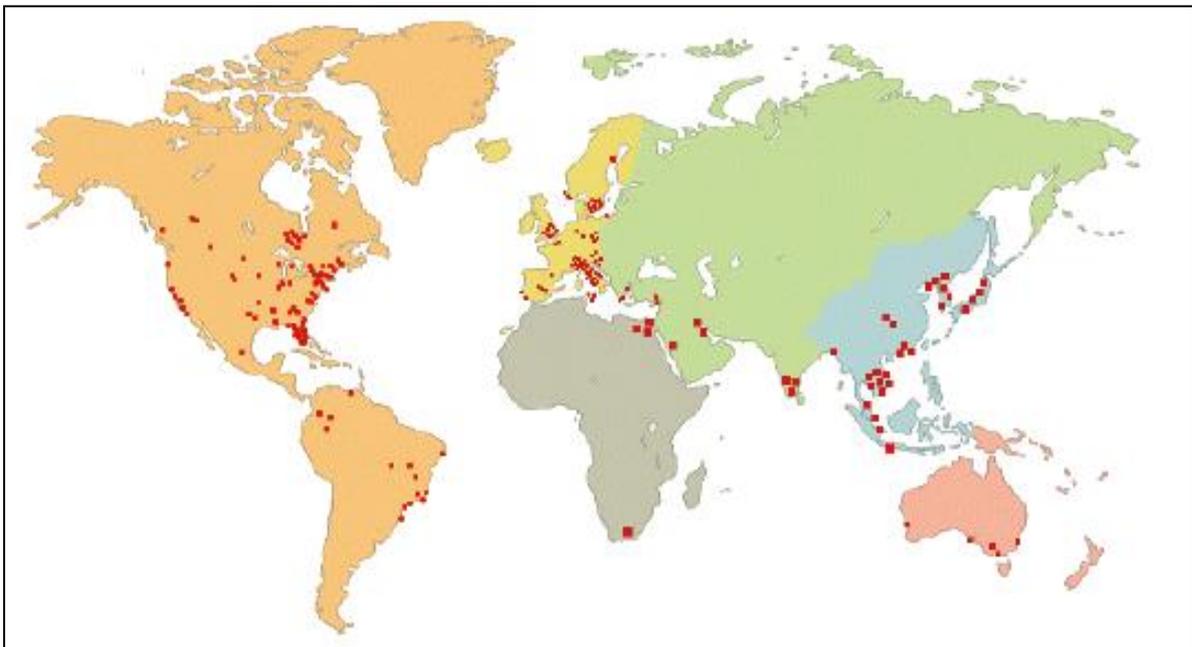
Por causa da maior parte dos problemas geotécnicos estarem vinculados à precariedade do reconhecimento do terreno e às incertezas do comportamento das camadas condicionantes, há a necessidade de apresentação do ensaio dilatométrico, pois, o aparelho e suas propriedades ainda são desconhecidos por muitos profissionais, principalmente no Brasil.

4 DEFINIÇÃO

É crescente a demanda mundial pela realização de ensaios geotécnicos de campo. Com os atuais avanços tecnológicos os ensaios geotécnicos têm sido rigorosamente indicados pelos projetistas para investigação do subsolo. A realização de ensaios geotécnicos de campo tem sido cada vez mais frequente nas investigações de solo na maioria dos projetos de engenharia, trazendo ganhos substanciais em comparação com os tradicionais ensaios de laboratório. (SILVA, 2008).

Segundo o Dr. Antônio Sérgio Damasco Penna, o DMT é um equipamento desenvolvido com a finalidade de obter parâmetros geotécnicos de solos, em investigação de campo. Nos Estados Unidos ganhou destaque e reconhecimento internacional, atualmente, em uso, em quarenta países, conforme indicações. (FIG. 1). Entre os quarenta países que utilizam o aparelho estão: Brasil, Colômbia, Venezuela, Estados Unidos da América, República da África do Sul, Egito, Arábia Saudita, Itália, Portugal, Espanha, Suécia, Noruega, Inglaterra, Índia, China, Japão, Austrália, entre outros. (PENNA, 2011).

Figura 1 – Mapa Mundi.



Legenda: ■ Localidades que utilizam o aparelho
Fonte: Penna (2011)

A princípio, a determinação de deformações horizontais no solo assim como a obtenção de valores do módulo de deformabilidade do solo, associado ao comportamento de estacas cravadas submetidas aos esforços horizontais eram os principais objetivos idealizados por Marchetti. A ideia do ensaio surgiu com base na cravação de estacas carregadas lateralmente que, assim como o dilatômetro, são sujeitas a movimentos horizontais antecedidos pela penetração. (ROJAS-REYES, 2012).

Para uma avaliação adequada das características de um solo tornou-se necessário o desenvolvimento de novos equipamentos de laboratório e de campo, sendo que alguns ensaios tornaram-se consagrados na obtenção de determinados parâmetros do solo. (MONTEIRO, 1999).

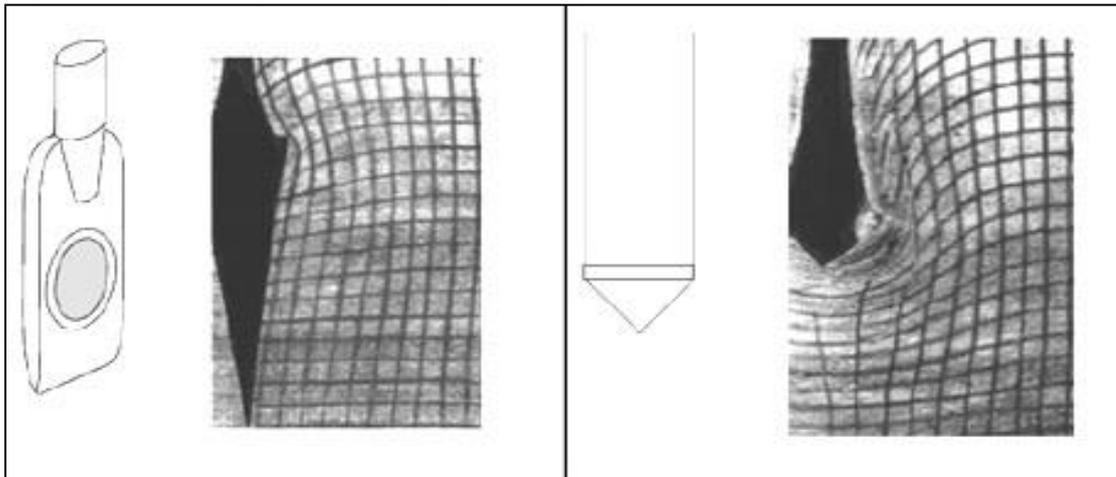
Marchetti publicou um trabalho contendo correlações empíricas (correlações entre os resultados obtidos pelo ensaio com vários parâmetros geotécnicos), o qual também apresentava as principais modificações do ensaio com relação ao primeiro, que foi apresentado em 1975. (MARQUETTI, 1980).

Portanto, segundo Schmertmann (1983) seu idealizador vislumbrou a possibilidade de correlacionar seus resultados com diversos parâmetros geotécnicos e abandonou temporariamente seu objetivo inicial. (QUEIROZ, 2008).

Marchetti idealizou um equipamento de fácil manuseio, robusto, de simples reparação *in situ* que, por fim, ao inseri-lo no solo, produzisse perturbações inferiores às observadas em outros ensaios de penetração. Comparadas com as deformações provocadas pelo ensaio de cone, conhecido pela sigla CPT (Cone Penetration Test), as mínimas distorções causadas no solo pela penetração da lâmina do dilatômetro, são características distintivas da DMT. Representação das perturbações induzidas no solo pelas diferentes ponteiros, lâmina (à esquerda) e cone (à direita). (FIG. 2). Com o intuito de manter o comportamento do solo em fase elástica, elaborou-se o ensaio para que as deformações da membrana fossem pequenas na fase de expansão. Por meio de correlações semiempíricas foi possível obter parâmetros geotécnicos relacionados à resistência, deformabilidade e histórico de tensões do solo. (FELIZARDO, 2008).

Os parâmetros do solo obtidos pelo DMT são geralmente aplicados em projetos de fundações rasas e profundas, em controles de compactação, entre outros estudos geotécnicos que possam utilizar tais parâmetros. (BRIAUD; MIRIAN, 1992).

Figura 2 - Deformações causadas pela cravação do DMT e CPT



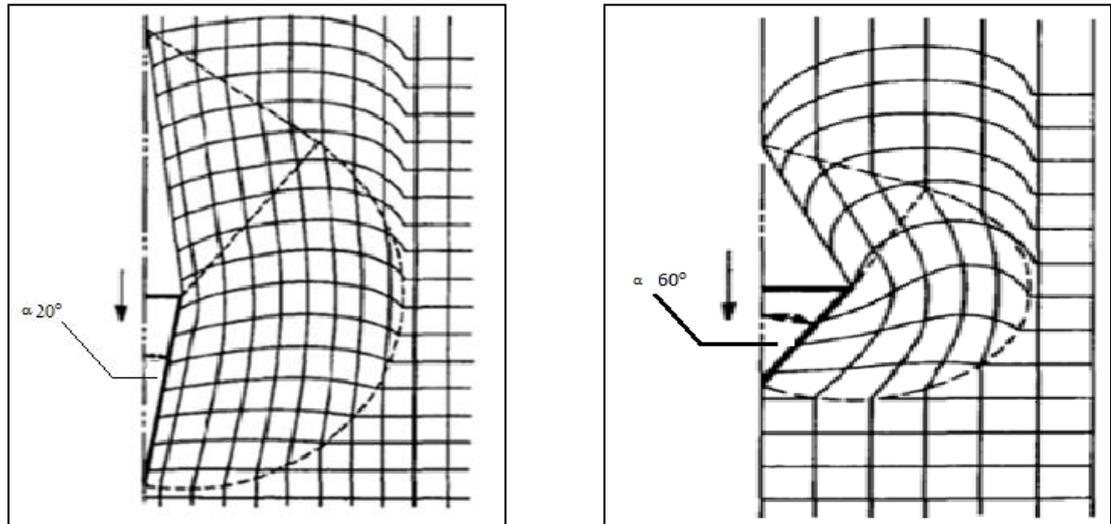
Fonte: Marchetti (1980)

As deformações causadas por elementos com ângulos apicais de 20° (DMT) e 60° (CPT) ressaltam da figura que a concentração de deformações de corte se dá, preferencialmente junto às arestas, apresentando-se, as mesmas, inferiores para os elementos que exibem menor ângulo de abertura. Desse modo, as perturbações induzidas na fase de cravação da lâmina dilatométrica são, substancialmente, reduzidas em relação ao que acontece nos ensaios de penetração, quer pelo seu menor ângulo de abertura como também, pelo fato das pressões serem determinadas na face lateral, onde a concentração de deformações é inferior. A esse respeito, verifica-se que o elemento do solo experimenta um incremento inicial das tensões à medida que a aresta se move no seu interior, reduzindo-se posteriormente com o restante avanço da lâmina, o que significa que o solo adjacente ao diafragma experimenta um ciclo de carga / descarga anterior a execução do ensaio. (CLARKE; WROTH, 1988). (FIG. 3).

A penetração da lâmina do dilatômetro causa um deslocamento horizontal das partículas do solo, no eixo vertical, de 7 mm (metade da espessura do dilatômetro), um deslocamento consideravelmente abaixo, comparando com o que é induzido pelo ensaio CPTU (18 mm para CPT), frequentemente usado. (MARCHETTI, 1980).

O ensaio, a princípio, tinha como prioridade a obtenção do módulo de elasticidade (deformabilidade) (E), associado aos comportamentos de estacas cravadas submetidas aos carregamentos laterais. Nele a lâmina é cravada verticalmente no solo usando compressão semiestática ou método dinâmico (martelo), sendo preferível o método semiestático devido a menor perturbação do solo. (MARCHETTI, 1981).

Figura 3 - Deformações causadas por elementos com ângulos apicais de 20° (DMT) e 60° (CPT)



Fonte: Marchetti (1980)

As perturbações geradas pela inserção do dilatômetro no solo são inferiores à média observada em outras técnicas de penetração; e, as medidas são obtidas para pequenas deformações do diafragma e correspondem ao comportamento do solo na fase elástica. (MARCHETTI, 1980).

Vale ressaltar, que embora essa observação possa ser verdade, não deve ser descartado o fato de a cravação desestruturar o solo, ou seja, a sua estrutura inicial. Com uma profundidade fixa, as membranas se expandem horizontalmente, onde a cravação é interrompida a cada 20 cm e reiniciada a expansão das membranas, seguida da leitura dos manômetros. A carga de ensaio é horizontal e, portanto, a resistência do solo é derivada de medições da pressão do ar introduzido no instrumento, obtendo-se a expansão pré-determinada da membrana. Da resistência horizontal do solo, pode-se obter uma série de parâmetros geotécnicos. (QUEIROZ, 2008).

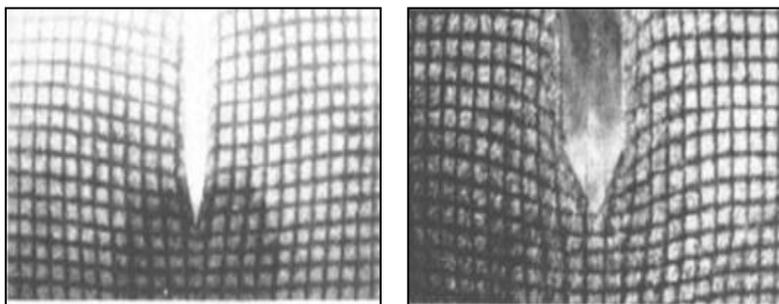
O equipamento consiste em três principais itens: lâmina, unidade de controle e cabo elétrico pneumático e dois itens auxiliares: dispositivo de calibração e caixa de ferramentas. (MARCHETTI, 1981).

4.1 Histórico

Marchetti (1997) relatou que estando em companhia de sua esposa na praia, observou as sombrinhas cravadas na areia e questionou a possibilidade de conceber um mecanismo para forçar e medir a reação que o solo se opõe a tal deformação.

Quando idealizou o aparelho, projetou um equipamento de fácil manuseio, robusto, de simples reparação *in situ*, e, que ao ser inserido, produzisse perturbações inferiores às observadas em outros ensaios de penetração. Para reduzir as deformações devido à penetração no solo e, portanto, para melhor correlacionar o DMT com o comportamento pré-inserção, ele escolheu uma prova fina, em forma de lâmina, com uma membrana circular situada em uma das faces. (SILVA, 2008). Quando comparada ao CPT, a lâmina, por causa da sua forma geométrica impõe menores deformações ao solo. (FIG. 4). Por outro lado, com o intuito de manter o comportamento do solo em fase elástica, elaborou o ensaio para que as deformações da membrana fossem pequenas na fase de expansão. Ao partir de correlações semiempíricas é possível à obtenção de uma variada gama de parâmetros geotécnicos relacionados à resistência, deformabilidade e história de tensões do solo. (FELIZARDO, 2008).

Figura 4 - Cravação DMT à esquerda e cravação CPT, à direita



Fonte: Marchetti (1980)

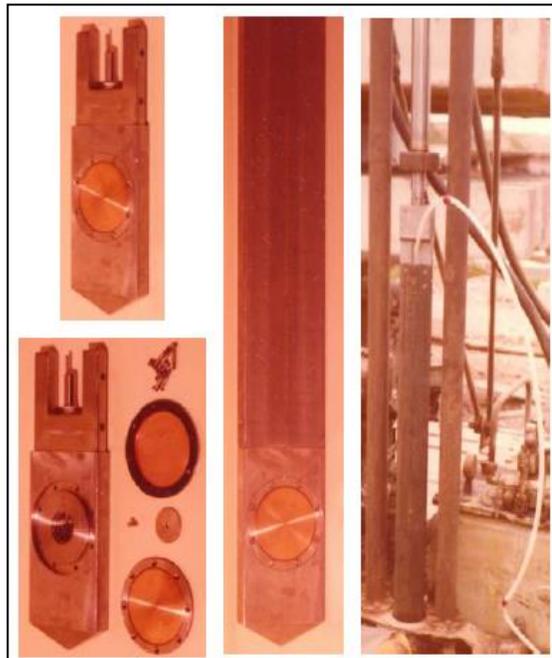
Devido ao fato das deformações cisalhantes se concentrarem próximas à extremidade da placa, o solo adjacente à membrana experimenta uma deformação cisalhante menor que a média. (MARCHETTI, 1980).

Segundo Marchetti (1981) o DMT é um aparelho com o qual se executa um ensaio de penetração, a distorção provocada depende da geometria. As deformações volumétricas e cisalhantes do DMT são mais uniformes se comparadas àquelas do CPT. (JAMILOKOWSKI et al., 1985).

A determinação de deformações horizontais no solo assim como a obtenção de valores do módulo de elasticidade do solo (E_s), associado ao comportamento de estacas cravadas submetidas aos esforços horizontais, eram os principais objetivos idealizados por Marchetti. A ideia do ensaio surgiu com base na cravação de estacas que, assim como o dilatômetro, geram movimentos horizontais antecedidos pela penetração. (ROJAS-REYES, 2012).

O primeiro protótipo da lâmina que foi apresentado no ano de 1974 é uma placa de aço inoxidável com 20 mm de espessura e 80 mm de largura, dispoendo em ambas as faces de uma membrana feita de cobre, fina e expansível, com 60 mm de diâmetro, que é deformada por meio de ar comprimido ou nitrogênio. A ponta tem um formato pontiagudo e as hastes tem inicialmente uma seção transversal retangular, de difícil montagem. (FIG. 5). Os tubos utilizados foram coaxiais, de modo que o escape encontrou o seu caminho até a superfície, através do espaço intermédio anular. (MARCHETTI, 1981). Um sistema que inclui tubos pneumáticos e faz com que uma pressão seja aplicada atrás das membranas, provocando o deslocamento dessas contra o solo. (ROJAS-REYES, 2012). Quando o centro de cada membrana atinge 1 mm de expansão, é obtida a leitura de pressão $p_{m\acute{a}x}$ e o excesso de pressão é liberado. A principal proposta do ensaio é medir o incremento de pressão necessário para produzir 1 mm de deslocamento do centro de cada membrana. (VIEIRA, 1994).

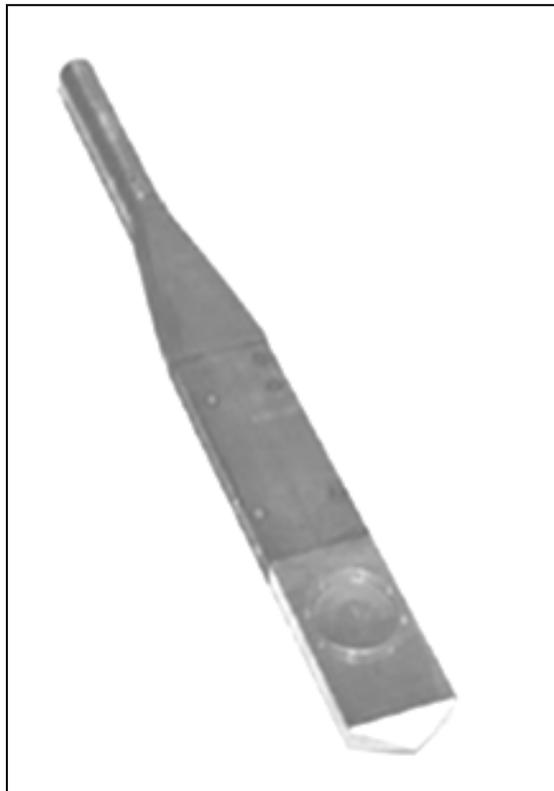
Figura 5 - Placa original do dilatômetro



Fonte: Marchetti (1980)

O segundo aparelho desenvolvido constitui-se basicamente de uma placa de aço inoxidável, com 20 mm de espessura e 80 mm de largura, disposta em uma das faces de uma membrana feita de aço, fina e expansível, com 60 mm de diâmetro, que é deformada por meio de ar comprimido ou nitrogênio. (ROJAS-REYES, 2012). O segundo aparelho desenvolvido e apresentado em 1975. (FIG. 6).

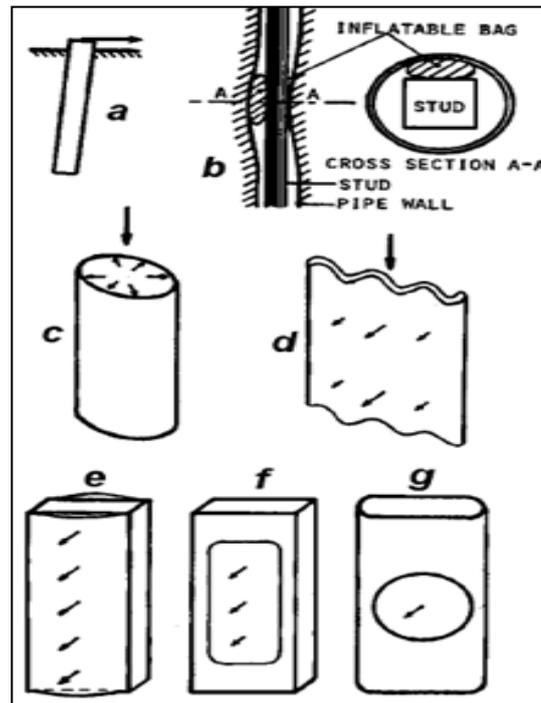
Figura 6 - Lâmina apresentada em 1975, a membrana é feita de aço e as hastes são circulares



Fonte: Marchetti (1975)

A placa do dilatômetro é cravada estaticamente no solo utilizando o mesmo equipamento e hastes do ensaio de cone mecânico. O impulso nas hastes é feito com movimento circulares. (FIG. 7). (MARQUETTI, 1975).

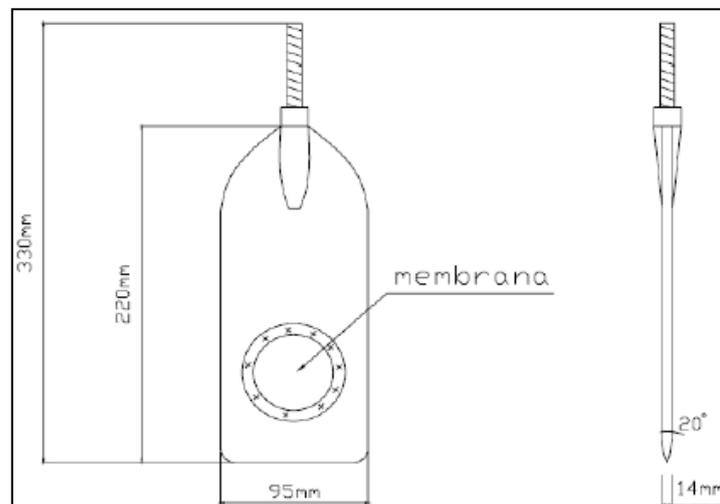
Figura 7 - Impulso nas hastes



Fonte: Campanella e Robertson (1987)

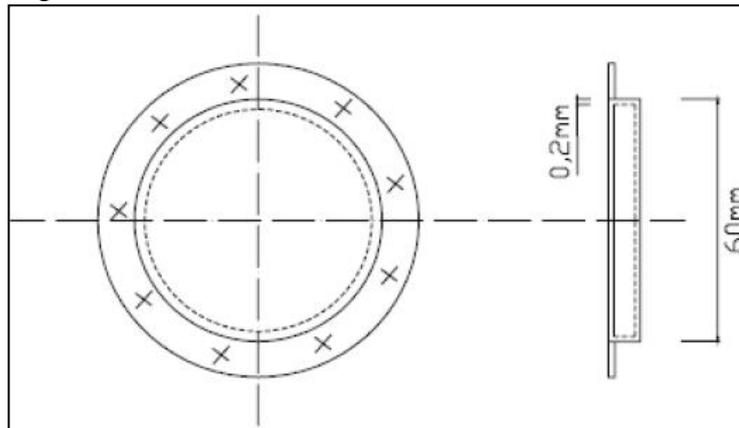
O atual aparelho apresentado em 1980 possui uma lâmina de aço inoxidável com 220 mm de comprimento total, 95 mm de largura, 14 mm de espessura e a ponta formando um ângulo de 20° , para melhor penetração no solo. O equipamento passou a apresentar apenas uma das faces da placa, possuir somente uma membrana, com 60 mm de diâmetro e espessura de 0,2 mm. A nova geometria da placa do dilatômetro pode ser observada na FIG. 8 e detalhes da membrana do dilatômetro na FIG. 9. (GUIMARÃES, 2007).

Figura 8 - Nova geometria da placa do dilatômetro



Fonte: Briaud e Mirian (1992)

Figura 9 - Detalhes da membrana do dilatômetro

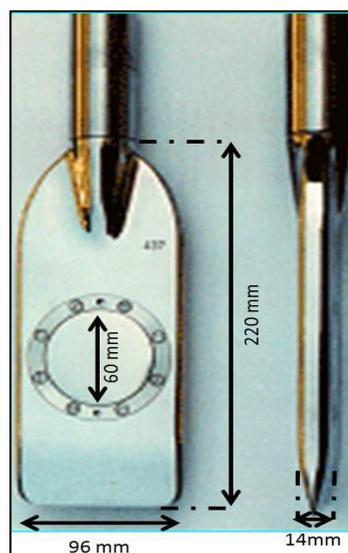


Fonte: Briaud e Mirian (1992)

Marchetti (1981) esclareceu que o dilatômetro como ensaio de penetração, provoca uma distorção forçada do solo dependente principalmente da sua geometria. A sua forma plana com borda cortante altera o estado de tensão-deformação original do solo em menor grau que o cone mecânico e a sondagem à percussão.

Os objetivos do desenvolvimento do equipamento, conforme relatado por Jamilokowski et al. (1985), são: dispor de um equipamento de campo simples, econômico e de alta repetibilidade, a fim de produzir informações a respeito da rigidez, resistência e história de tensões do solo; minimizar as desuniformidades e deformações volumétricas e cisalhantes causadas pela inserção da placa no solo. (VIEIRA, 1994). Em destaque a atual lâmina do equipamento e suas respectivas dimensões. (FIG. 10).

Figura 10 – Atual lâmina



Fonte: Marchetti (1980)

A ponteira dilatométrica é plana e biselada na extremidade inferior, tendo 14 mm de espessura, 96 mm de largura e 220 mm de comprimento. (FIG. 11). Numa das faces da denominada lâmina, encontra-se uma membrana de aço flexível de 60 mm de diâmetro e 0,20 mm de espessura (0,25 mm para solos em que a anterior não resista) que se encontra fixa por um anel de retenção. (FIG. 12). Sob a membrana existe um dispositivo de medida que, conforme abre ou fecha um circuito, ativa ou desativa uma buzina e um galvanômetro. (FELIZARDO, 2008).

Figura 11 - Lâmina do dilatômetro



Fonte: Felizardo (2008)

Figura 12 - Membrana de aço



Fonte: Felizardo (2008)

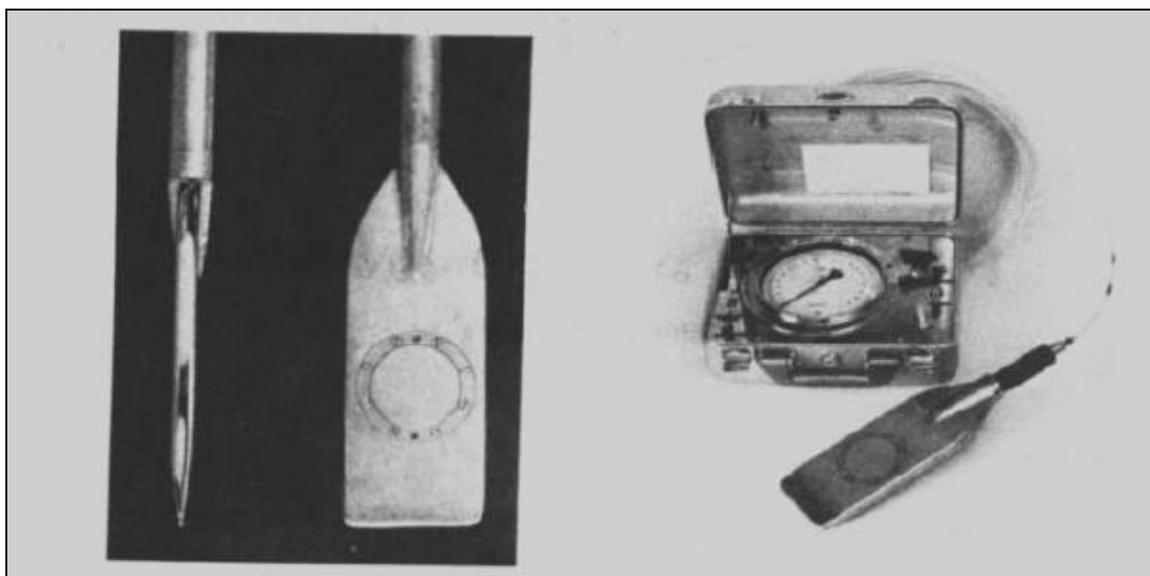
O equipamento necessário à realização do ensaio consiste em uma lâmina dilatométrica, uma unidade de controle de pressões (dotada de um sinal acústico), um cabo elétrico pneumático, um sistema de calibração e uma unidade de pressão, além do sistema de cravação. (SCHNAID, 2000).

Marchetti (1981) e Schmertmann (1986) mencionaram a possibilidade da utilização de equipamento de percussão para inserir a lâmina dilatométrica no solo, embora seja dito em ambos os trabalhos que o sistema de cravação estático seja preferido. Schmertmann (1986) observou que em solos sensíveis ao impacto e vibrações, como areias fofas e argilas sensíveis, a penetração dinâmica pode alterar os resultados do ensaio de forma conservativa. Nesses casos, esse autor comentou que seria necessário verificar tais efeitos, efetuando calibrações e ajustando interpretações do ensaio. Briaud e Miran (1992) comentaram que a cravação dinâmica altera os resultados e diminui a perfeição das correlações. Portanto, recomenda-se que a cravação da placa no solo seja realizada de forma estática. (VIEIRA, 1994).

O DMT é um equipamento desenvolvido com a finalidade de obter parâmetros geotécnicos de solos, em investigações de campo. (PENNA, 2011).

A unidade de pressão anexada a uma maleta foi apresentada em 1980, possui apenas um manômetro. (FIG. 13).

Figura 13 - Maleta contendo um manômetro e a lâmina utilizada no ensaio dilatométrico

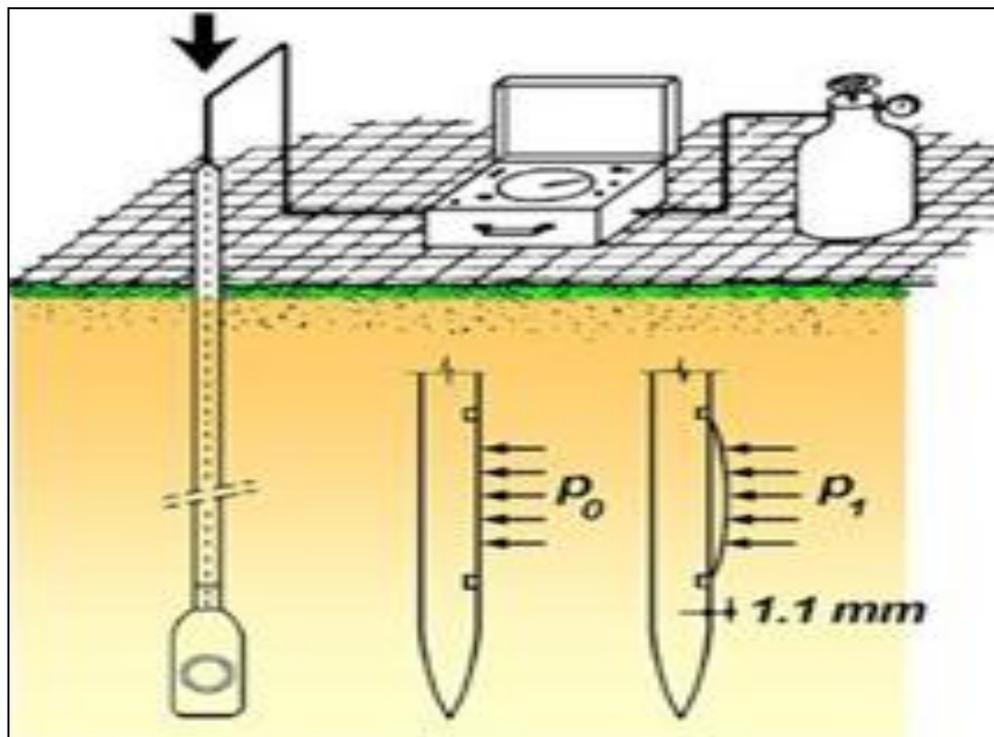


Fonte: Marchetti (1980)

Para executar o ensaio dilatométrico nota-se que é utilizada a maleta contendo apenas um manômetro. (FIG. 14). O funcionamento geral de ensaio, assim como o fornecimento de

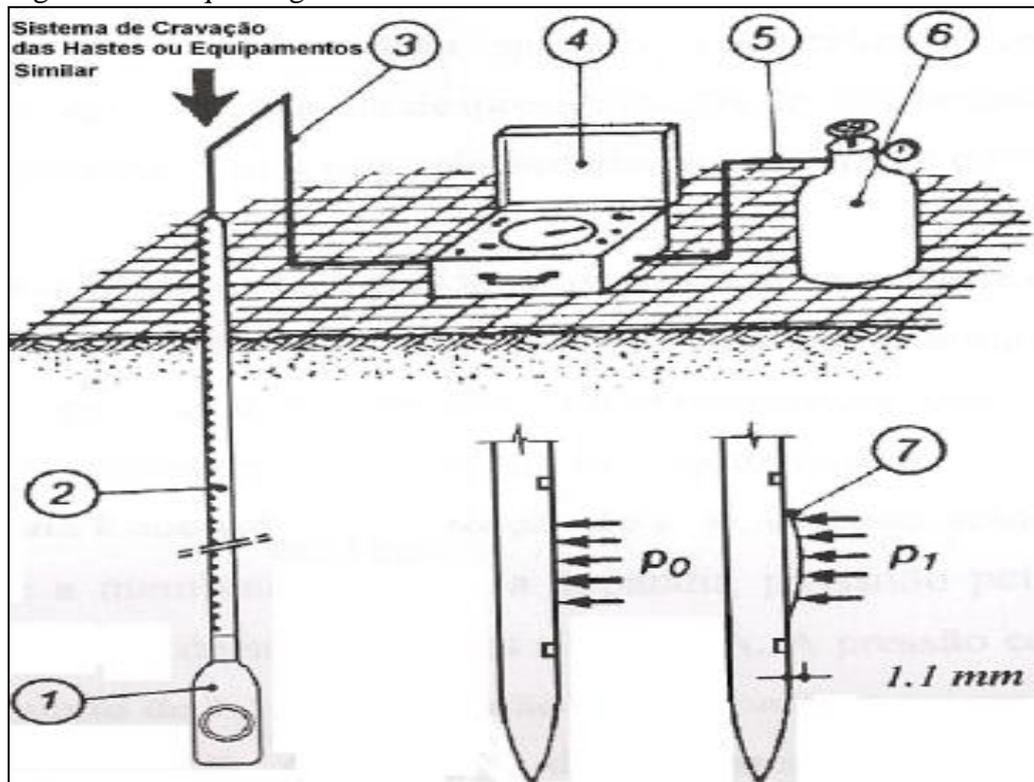
corrente elétrica e de pressão de gás são providas pela unidade de controle através do cabo elétrico pneumático, o qual é ligado à lâmina. (FIG. 15). Internamente, um fio atravessa a lâmina até atrás da membrana. Onde existe uma área rebaixada para acomodação do disco sensor e da membrana. O disco sensor é um dispositivo elétrico sensível de três posições, que se assenta no centro dessa área. Esse disco é dotado de pinos acionantes padronizados de maneira que ativem o sinal sonoro ao serem deslocados pela membrana. (VIEIRA, 1994). Deve-se ressaltar que o trabalho original (MARCHETTI, 1980) indicou que as pressões são anotadas para deslocamentos nulo e de 1 mm. Posteriormente, Marchetti (1981) mencionou a introdução de um sensor cuja finalidade é melhorar a definição do instante no qual o circuito elétrico é interrompido. Com esse sensor, as leituras são obtidas a 0,05 mm e 1,10 mm. A leitura na posição 0,05 mm exige uma correção para se obter o valor relativo a um deslocamento nulo. As leituras A e B devem ser corrigidas para levar em conta a rigidez da membrana e a posição do zero do manômetro de leitura.

Figura 14 - Ensaio dilatométrico com utilização da maleta contendo um manômetro



Fonte: Marchetti (1980)

Figura 15 – Esquema geral do ensaio

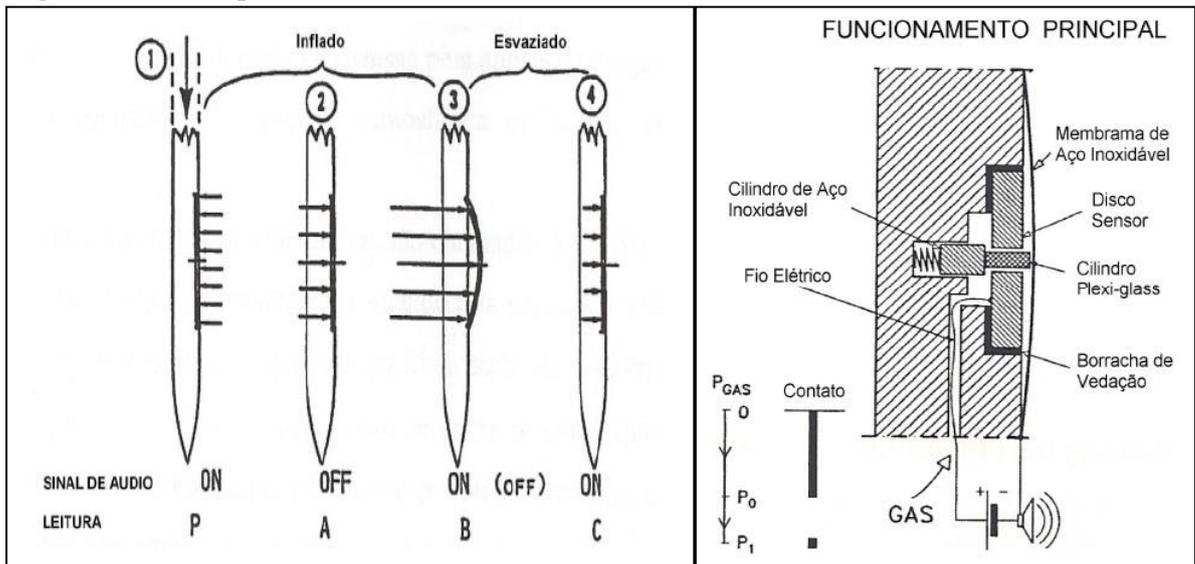


Legenda: 1 Lâmina. 2 Hastes do CPT. 3 Cabo Elétrico Pneumático. 4 Caixa do Controle
5 Cabo Pneumático. 6 Tanque de Gás. 7 Expansão da Membrana.

Fonte: Mateus (2008)

A lâmina consiste de uma placa de aço inoxidável, tendo uma membrana metálica circular fina expansível de 60 mm de diâmetro montada em uma das faces. No princípio de funcionamento da membrana (FIG. 16), a primeira condição de sinal ligado se dá pelo contato da membrana com o “espaçador” do disco sensor a uma distância de 0,05 mm deste. A segunda condição de sinal desligado se dá porque não há contato e o circuito é interrompido. A terceira condição se dá ao sinal ser ligado novamente quando o cilindro de aço inoxidável faz contato com o disco sensor reativando o sinal, posição em que a distância do extremo do cilindro de plexiglass ao disco sensor tem exatamente 1,1 mm. (PAULA, 1998).

Figura 16 - Princípio de funcionamento da membrana

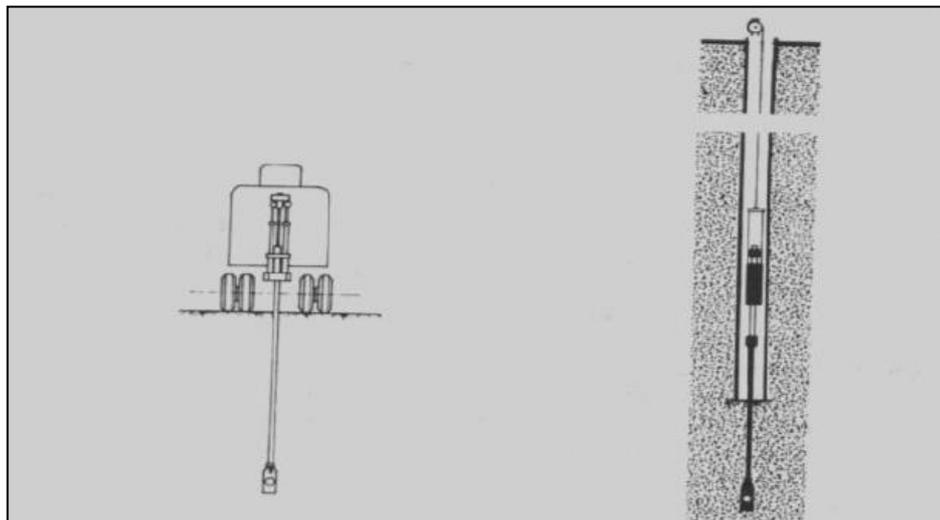


Fonte: Marchetti (1980)

O procedimento de ensaio, conforme recomendações das ASTM consistem na penetração da lâmina dilatométrica verticalmente no interior da massa de solo, utilizando-se preferencialmente um sistema hidráulico de cravação. (MARCHETTI, 1980).

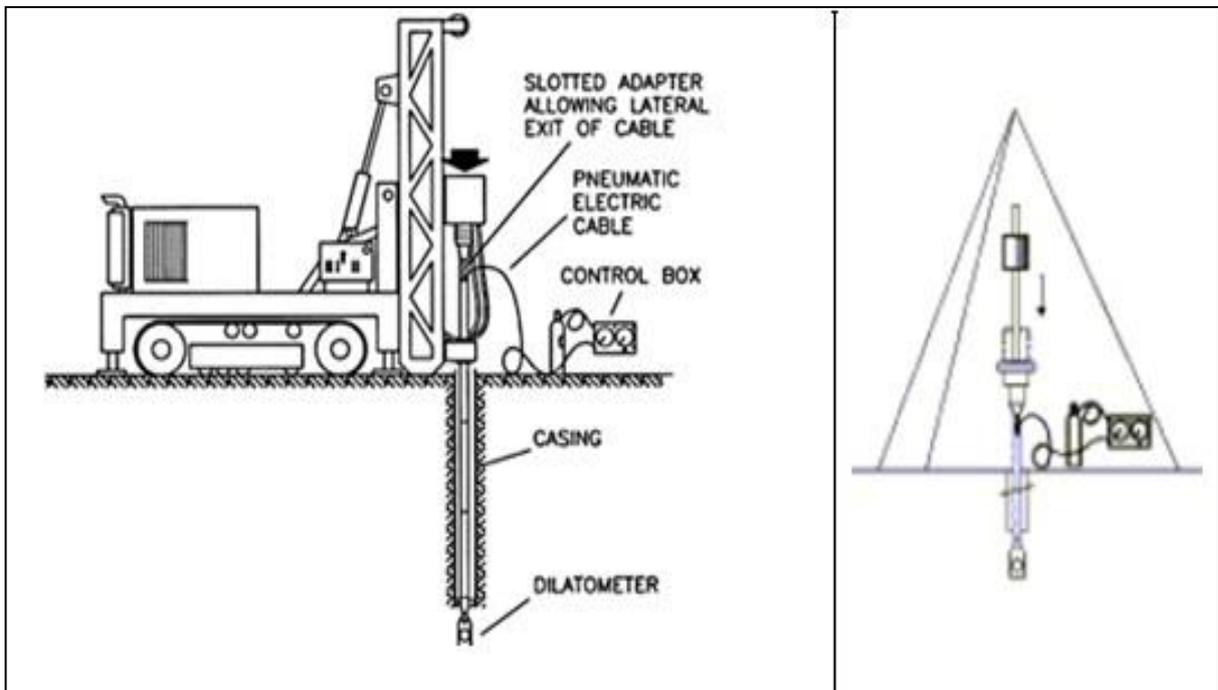
Briaud e Miran (1992) observaram que se pode utilizar qualquer sistema hidráulico para cravação da placa no solo. (FIG. 17). Os autores ainda admitem que seja utilizado o martelo do SPT, sabendo-se, porém que a penetração dinâmica afeta os resultados do ensaio do dilatômetro. (FIG. 18).

Figura 17 - Inserção da lâmina dilatométrica no solo, através de sistema hidráulico



Fonte: Marchetti (1980)

Figura 18 - Inserção da lâmina dilatométrica através de percussão



Fonte: Sánchez, Naranjo e Serpa (2002)

Marchetti (1981) e Schmertmann (1986) mencionaram a possibilidade da utilização de equipamentos de percussão, SPT, embora seja dito em ambos os trabalhos que o sistema de cravação estático seja preferido. Schmertmann (1986) observou que em solos sensíveis, como areias fofas e argilas sensíveis, a penetração dinâmica pode alterar os resultados do ensaio de forma conservativa. Nesses casos, esse autor comentou que seria necessário verificar tais efeitos, efetuando calibrações e ajustando interpretações do ensaio.

Entretanto, conforme observou Lutegger (1988), até mesmo aqueles ensaios com longa história de uso pela profissão apresentam problemas, como por exemplo, a alta variabilidade do SPT e a necessidade de correção de S_u obtido pelo Vane Test. O autor comentou que, como todos os ensaios de campo, o dilatômetro apresenta limitações, não pode ser aplicado a todos os problemas e materiais geotécnicos. Observou que as limitações relacionam-se à presença de materiais que ofereçam resistência à penetração, como pedregulhos e matacões, causando danos à placa ou à membrana. (VIEIRA, 1994).

Briaud e Miran (1992) ressaltaram ainda sua limitação quanto à profundidade em solos muito rijos, podendo ocorrer danos à placa. Observaram que ainda não existe um consenso quanto às correlações utilizadas para a estimativa dos parâmetros geotécnicos. (VIEIRA, 1994).

Lacasse e Lunne (1988) recomendaram em areias compactadas ou na presença de pedregulhos, a utilização de membranas mais resistentes que a padrão (tipo S = “*standard*”). Essa membrana de alta resistência (tipo H = “*hard*”), foi colocada no mercado a partir de março de 1985, é menos suscetível aos danos, fornecendo uma melhor manutenção. (SCHMERTMANN, 1988).

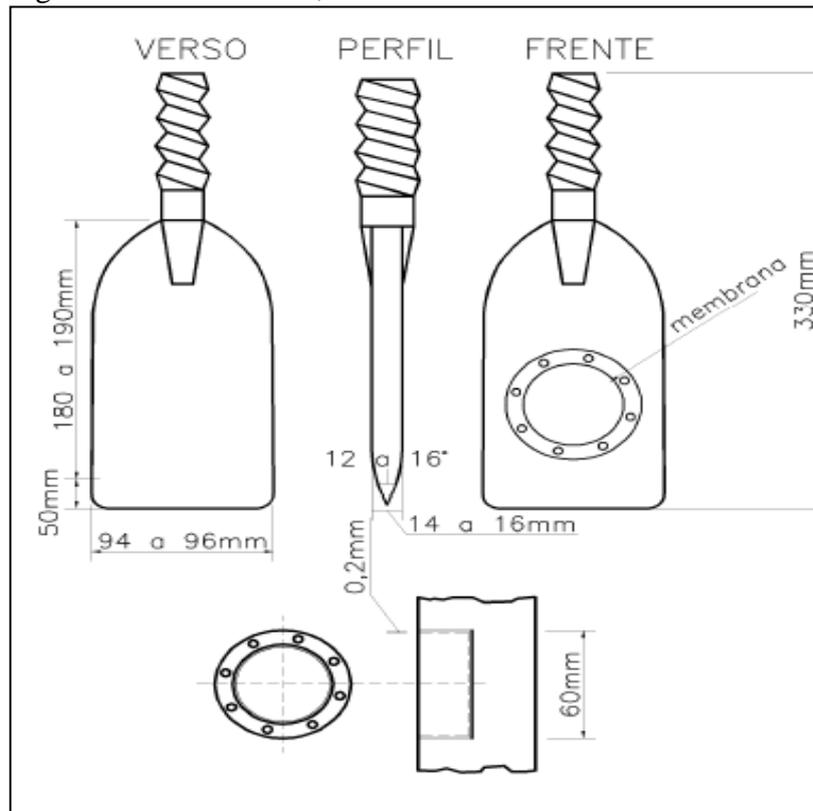
Além das membranas outra modificação realizada relaciona-se à unidade de controle, que passou a apresentar dois manômetros. O manômetro de baixa pressão fornece uma maior perfeição, necessária para as baixas leituras A encontradas em solos moles e para as leituras C. O manômetro de alta pressão permite leituras B mesmo em solos muito resistentes. (MARCHETTI, 1980). Os componentes e suas conexões, uma vista lateral e frontal frente e verso da lâmina e a maleta já modificada são apresentados. (FIG.19 e FIG. 20).

Figura 19 - Componentes e suas conexões



Fonte: Marchetti (1980)

Figura 20 - Vista lateral, frente e verso da lâmina



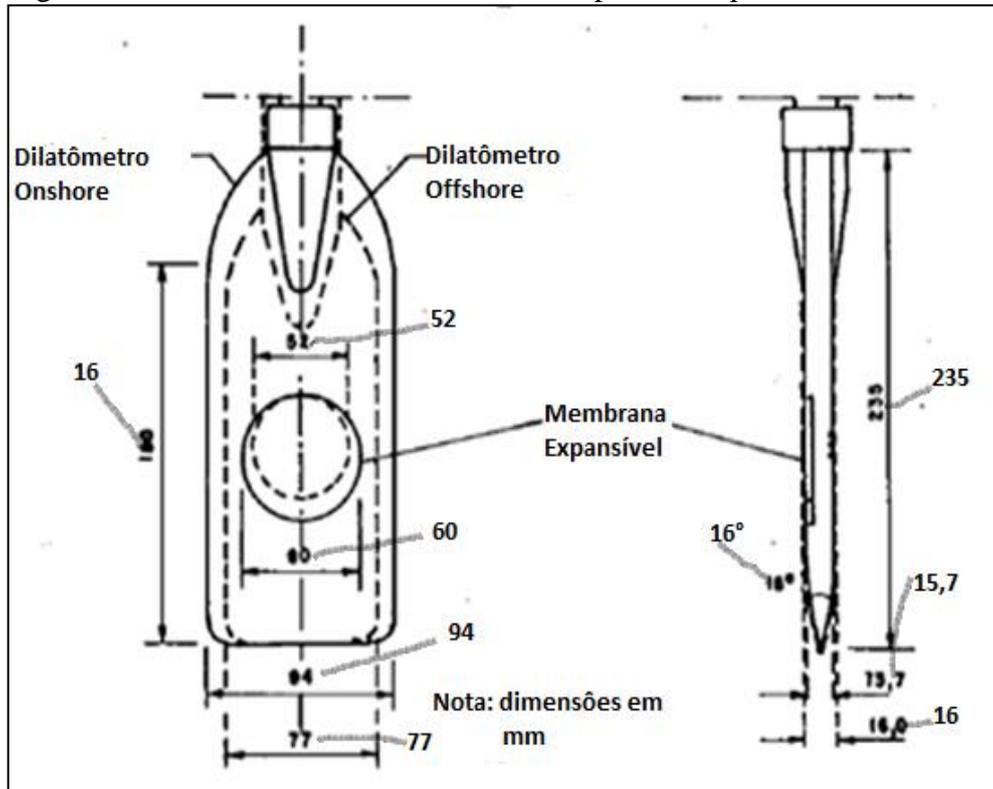
Fonte: Marchetti (1980)

Em 1985 foi desenvolvido o dilatômetro *offshore* por Lunne et al. (1990), com a orientação do Professor Silvano Marchetti. De modo a operar no interior de um tubo de revestimento padrão usado para perfuração no mar, a placa apresenta algumas alterações em relação às dimensões originais: 77 mm de largura, 16 mm de espessura, 52 mm de diâmetro, porém com o formato semelhante ao equipamento de Marchetti (1980).

A poro-pressão é medida no lado oposto da placa, na projeção do centro da membrana. A pressão de óleo é gerada por meio de uma bomba de pistão, cujo movimento é obtido por um motor elétrico. A poro-pressão é registrada continuamente, além das leituras p_0 e p_1 a cada 20 cm. O equipamento *offshore* dispõe ainda de um sistema de aquisição eletrônica de dados, de modo a ser controlado a bordo do navio. (MITCHELL, 1986).

Lunne, Robertson e Powell (1997) por meio da realização de ensaios com o dilatômetro *offshore* em terrenos *onshore*, compararam seus resultados com aqueles provenientes do equipamento de Marchetti (1980) em uma argila mole e em uma areia fofa a medianamente compacta. Os autores observaram que os resultados referentes aos dois tipos de equipamento são quase coincidentes, o que coloca o dilatômetro *offshore* como um novo método para estimativa de parâmetros geotécnicos em condições *onshore*. (FIG. 21).

Figura 21 - Dilatômetro offshore, delimitado por linhas pontilhadas



Fonte: Vieira (1994)

5 O ENSAIO DILATOMÉTRICO

O ensaio consiste na cravação de uma lâmina, de 20 em 20 cm de profundidade. Em cada intervalo de profundidade a cravação é interrompida e é realizada a expansão da membrana de aço flexível com auxílio de um gás pressurizado, para obtenção das seguintes leituras: leitura A: após o operador abrir a válvula do gás pressurizado, a buzina e o galvanômetro são automaticamente acionados, a leitura A é registrada quando o sinal áudio é desativado, o que corresponde ao momento em que a membrana deixa de contatar o disco sensor onde se encontrava alojada (início do movimento da membrana). Esse movimento tem um deslocamento de 0.05 mm (± 0.02 mm). A leitura B: quando o centro da membrana se desloca 1.10 mm (± 0.03 mm), o circuito é fechado, a buzina e o galvanômetro são ativados, e a leitura B é registrada; e a leitura C: foi introduzida mais tarde por Campanella et al. (1985), e é registrada na fase de descarga (após a leitura B) quando a membrana se contata com o disco sensor, ou seja, quando volta a atingir uma expansão de 0.05 mm. (MATEUS, 2008).

O procedimento de ensaio, conforme recomendação das ASTM consiste na penetração da lâmina dilatométrica verticalmente no interior da massa de solo, utilizando-se preferencialmente um sistema hidráulico de cravação. (MARCHETTI, 1980).

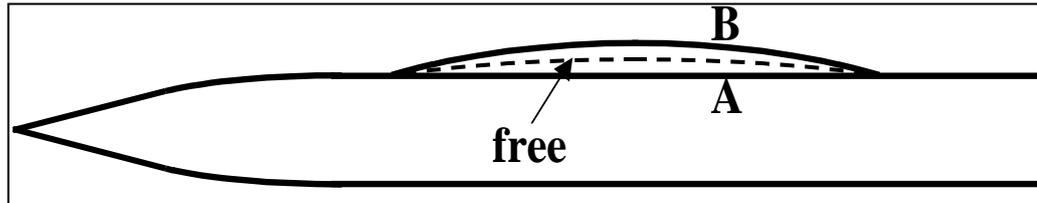
A obtenção dos dados é iniciada corrigindo-se a resistência do deslocamento da membrana e o desvio do zero do medidor de pressão. (MONTEIRO, 1999).

A base física do ensaio consiste na expansão da membrana dentro da massa de solo. Geotecnicamente o interesse está em avaliar somente as grandes deformações do solo. Como a membrana está entre o gás e o solo, e não poderia ser diferente, precisa-se descontar a rigidez que a membrana oferece durante a movimentação de aplicação do gás. Por essa razão é que se calibra o equipamento à pressão atmosférica de acordo com critérios pré-estabelecidos. (GOMES-BOEHL, 2005).

As pressões para vencer a rigidez da membrana são chamadas de A e B. Esses valores são obtidos antes da execução do ensaio por meio de ciclos de sucção e expansão da membrana, executado com calibrador apropriado. A membrana montada na lâmina repousa em algum lugar entre a posição de Pressão “A” a 0,05 mm de retração e a posição de Pressão “B” a 1,1 mm de expansão. O equipamento foi concebido de forma que a resistência para defleccionar a membrana para dentro e para fora se mantenha constante durante a execução do ensaio, de forma que o operador possa determiná-la. Nisso consiste a calibração da membrana, isto é, determina-se a pressão necessária, ao ar, para defleccionar a membrana para as posições da Pressão-A (ou leitura A) e Pressão-B (ou leitura B). Tais calibrações, denominadas A e B, respectivamente, são depois utilizadas para corrigir as leituras de ensaio. (PAULA, 1998).

Note-se que ao ar, sob pressão atmosférica, a membrana livre está numa posição intermédia entre as posições A e B (FIG. 22), porque as membranas apresentam uma ligeira curvatura natural exterior. $A\Delta$ é a pressão externa a ser aplicada à membrana, ao ar livre, para a sua posição inicial em colapso (isto é, a posição A). $B\Delta$ é a pressão interior ao ar livre, levanta o centro da membrana de 1,1 milímetros a partir da sua posição inicial (isto é, a posição B). (MARCHETTI, 1980).

Figura 22 - Posições da membrana



Fonte: Marchetti (1980)

Para se obter as calibrações A e B deve-se realizar ciclos de sucção e expansão da membrana, antes e após a execução do ensaio. Deve-se, ainda, lembrar que membranas novas devem, antes, ser exercitadas para que “perca” um pouco da sua resistência original, e adquirida à rigidez necessária para o bom funcionamento do ensaio. Nos acessórios que compõe o kit para execução do ensaio DMT existe uma seringa de calibração que é conectada à unidade de controle para injeção de pressão de ar no sistema. (FIG. 23). A lâmina do DMT é acoplada na unidade de controle, tem-se início a aplicação de expansão na membrana. Quando ela atingir o deslocamento de 1,1 mm o apito irá soar e deve-se anotar a pressão nesse momento. A seguir, inicia-se a sucção da membrana até essa atingir uma contração de 0,05 mm quando o apito irá soar novamente e deve-se registrar a pressão indicada no manômetro da unidade de controle. Esse procedimento deve ser realizado no mínimo de três procedimentos e anotar os novos valores de A_{depois} e B_{depois} . Os índices A e B finais que serão aplicados para redução dos dados são a médias aritméticas de $A_{\text{antes}} + A_{\text{depois}}$ e $B_{\text{antes}} + B_{\text{depois}}$. (SILVA, 2008).

Figura 23 - Calibração da membrana com seringa, ao ar



Fonte: Silva (2008)

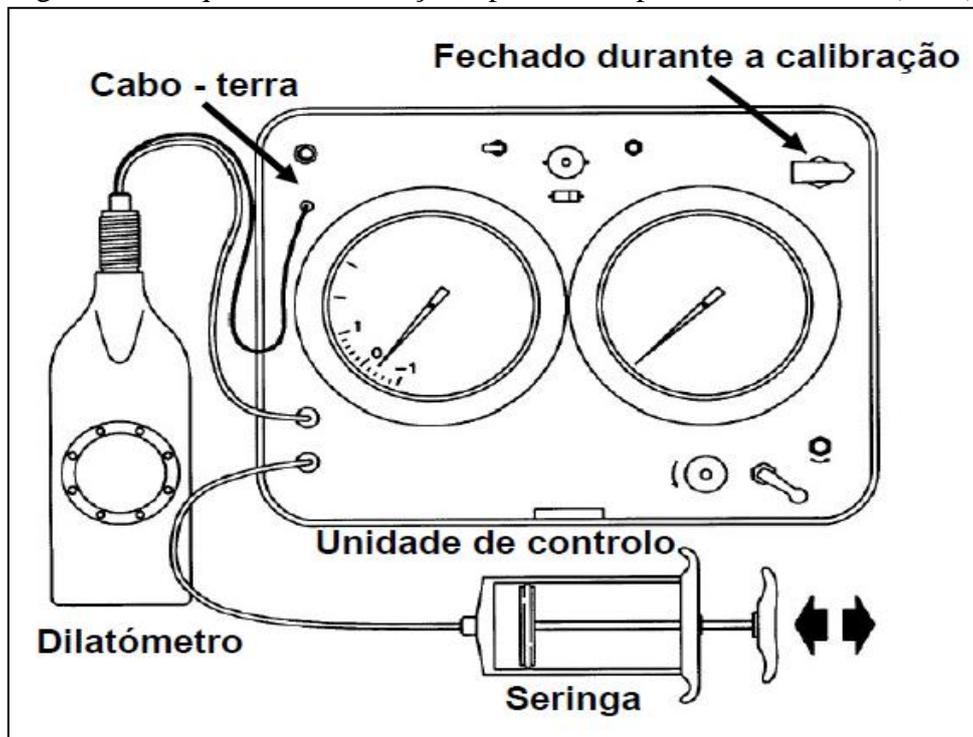
Existe também um mini-calibrador (acessório opcional) que acompanha o equipamento e simplifica a calibração da membrana, mas é recomendável calibrar a membrana na unidade de controle. (FIG. 24). Valores típicos de A e B são respectivamente, 15 kPa e 45 kPa, com uma variação aceitável de A entre 5 e 30 kPa e B de 5 a 80 kPa. Os dois métodos devem ser empregados para confirmação dos valores de A e B. (FIG. 25).

Figura 24 - Mini-calibrador



Fonte: Marchetti (1997)

Figura 25 - Esquema de calibração, apresentado por Marchetti et al. (2001)

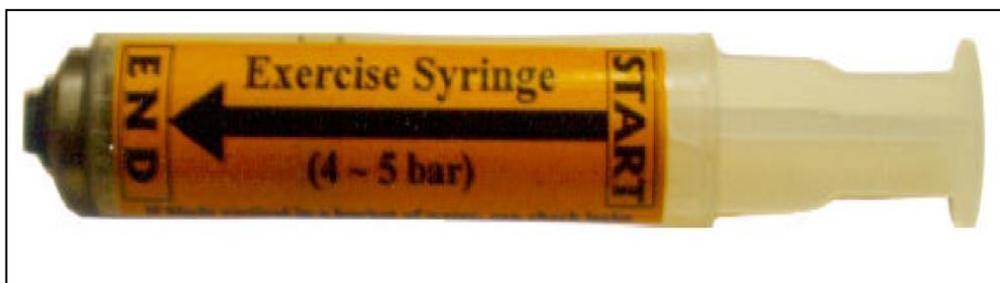


Fonte: Felizardo (2008)

O "seringa exercício" é uma ferramenta auxiliar que permite executar com folga o exercício operação, sem necessidade de usar o gás do tanque, a caixa de controle e um tubo. (FIG. 26). A operação de exercício é realizada sempre que uma nova membrana será utilizada. O escopo é o de estabilizar o deslocamento A (DA), e o deslocamento B (DB). A operação consiste em pressurizar a lâmina ao ar livre a 4-5 bars. O "seringa exercício" é diretamente aparafusado (como uma chave de fenda) na parte de trás da lâmina. Observe que a seringa tem uma marca de *start* (início) e uma marca *end* (fim).

Antes de ligar a seringa à lâmina, o pistão deve estar na posição inicial, em seguida, a seringa pode ser aparafusado à lâmina. Ao empurrar o êmbolo da seringa do início ao fim, a pressão do ar chegará a 4-5 bars, que é a pressão necessária para o exercício (a força é de aproximadamente 25 kg, ou 250 Newton). A pressão de exercício pode ser aplicada duas ou três vezes. Se o exercício é realizado com a lâmina vertical, submersas em um balde de água, é possível verificar a lâmina de estanqueidade. Após o exercício, assegurar que DA, DB estão em tolerância: DA = 0,05-0,30 (tipicamente 0,15), DB = 0,05-0,80 bars (tipicamente 0,40). (MARCHETTI, 1997).

Figura 26 - Seringa exercício



Fonte: Marchetti (1997)

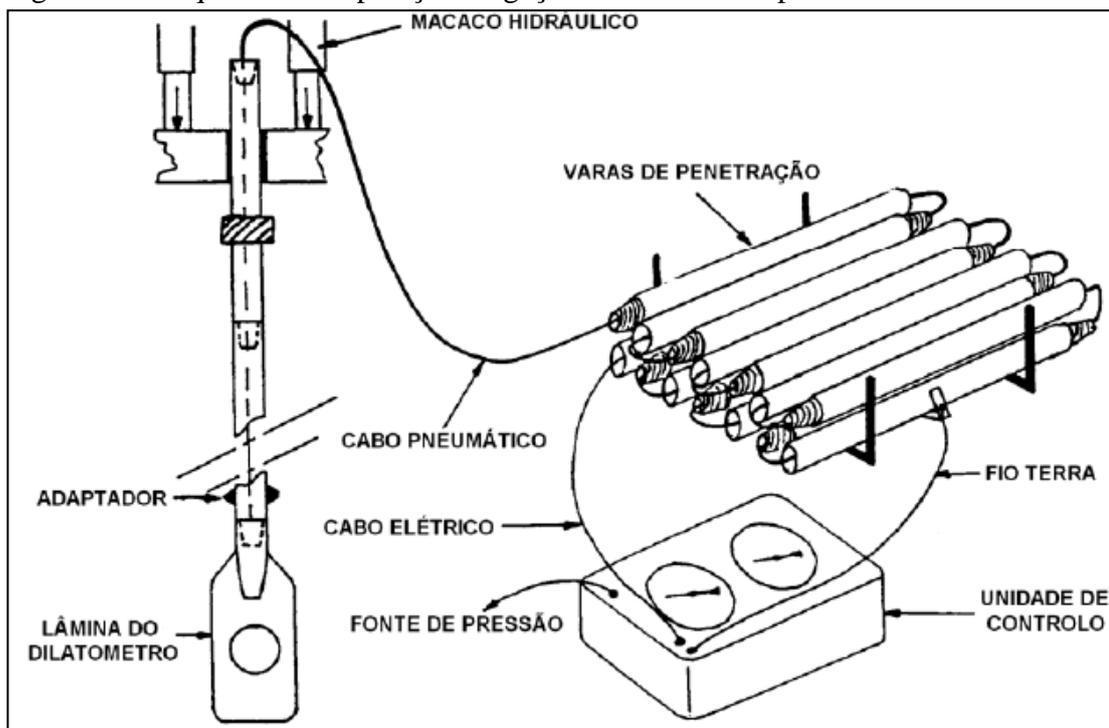
No campo são realizadas calibrações antes e depois das realizações dos ensaios de dilatômetro, com a finalidade de determinar os valores de ΔA e ΔB para corrigir os valores de

p_0 e p_1 . Ressalta-se a importância do cuidado a ser tomado com a variação de temperatura durante a realização das calibrações descritas acima. (VIEIRA, 1994).

A variação de temperaturas na placa resulta na obtenção de valores incoerentes das pressões. Ocorrendo queda de temperatura, a tendência é obter valores maiores, enquanto que um aumento de temperatura resulta em valores menores que os reais. Portanto, convém que a placa fique protegida no solo ou em recipiente com água à temperatura ambiente (FIG. 22), antes da realização dos ensaios no campo. (VIEIRA, 1994).

A lâmina está ligada a uma unidade de controle, que engloba um dispositivo de medição e controle de pressões, por meio de um cabo elétrico e um tubo condutor de gás pressurizado, o que é utilizado para expandir a membrana de aço flexível; ambos conduzidos no interior das varas utilizadas na cravação da lâmina. O esquema do equipamento utilizado no ensaio DMT (FIG. 27) fornecido por Marchetti et al. (2001).

Figura 27 - Esquema da disposição e ligação das várias componentes do ensaio DMT



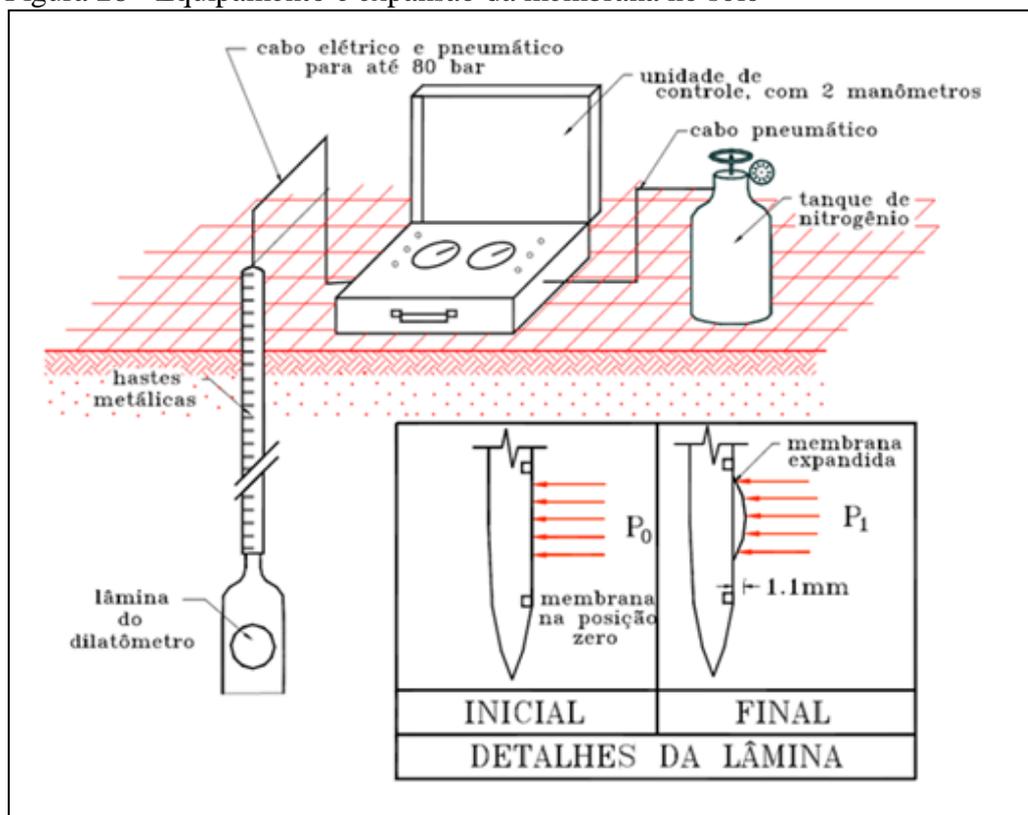
Fonte: Marchetti et al. (2001)

A velocidade de avanço da lâmina é similar à empregada na penetração do cone, sendo aceitável no intervalo de 2 a 4 cm/s. (MARCHETTI, 1980).

A penetração é interrompida a cada 20 cm, quando se procede imediatamente à expansão da membrana, registrando-se as pressões (FIG. 28):

- a) A: pressão necessária para um deslocamento horizontal do centro da membrana de 0,05 mm ($\pm 0,02$ mm);
- b) B: pressão de gás no interior do diafragma para um deslocamento radial da membrana de 1,10 mm ($\pm 0,03$ mm);
- c) C: pressão interna no diafragma durante a despressurização do sistema, quando a membrana retorna ao deslocamento correspondente à pressão A. (SCHNAID, 2000).

Figura 28 - Equipamento e expansão da membrana no solo



Fonte: Penna (2001)

Para se obter estas leituras, com a válvula de fluxo fechada e a válvula de descarga rápida aberta, insere-se a lâmina no terreno até a profundidade das primeiras leituras (20 cm). Durante a penetração o sinal sonoro deve ser ouvido. Quando a lâmina se encontrar a profundidade desejada, deve fechar-se a válvula de descarga rápida (FIG. 29) e abrir

lentamente a válvula de fluxo, mantendo os dedos em posição de voltar a fechar. (FELIZARDO, 2008).

Figura 29 - Válvula de fluxo e descarga



Fonte: Felizardo (2008)

A membrana não é um dispositivo de medição, é apenas um interruptor, do tipo “liga-desliga”, então, a precisão dos resultados é governada pela precisão dos manômetros, da unidade de controle, os quais ficam protegidos, na superfície e não entram em contato com o solo; a membrana é apenas um separador passivo entre o solo e o gás; a lâmina funciona simplesmente, como um interruptor, da campainha de sinal, dando informação ao operador, sobre a posição da membrana. (FIG. 30). A membrana é produzida em aço inox, extremamente fino e está presa à lâmina, por parafusos, aplicados sobre um anel vedante de borracha. Todos os equipamentos e peças de reposição são produzidos na Itália e distribuídos nos países que essa técnica é utilizada. (PENNA, 2011).

Expansão da
detalhada

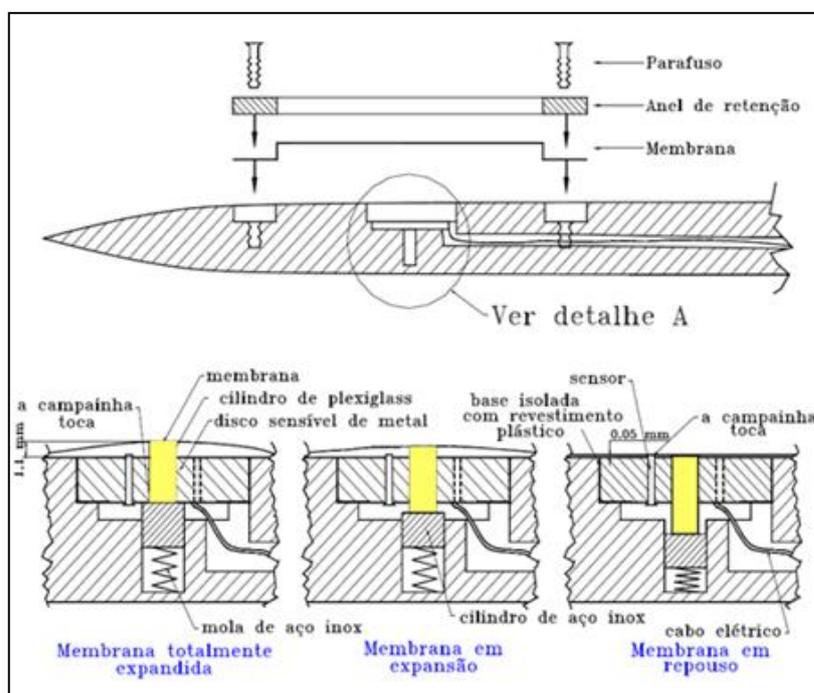


Figura 30 -
membrana

Fonte: Penna (2011)

A unidade de controle (FIG. 31) é constituída por dois manômetros para leitura de pressões, sendo que o primeiro manômetro serve para leitura de pequenas pressões, enquanto o segundo é para leituras que excedam os 6 bars. Para além desses, contém uma ligação para a fonte de pressão, uma ligação para o cabo elétrico pneumático, uma ligação para o cabo terra do circuito elétrico, uma ligação para a seringa de calibração, um galvanômetro, um sinalizador sonoro e válvulas para o controle do fluxo de gás e para ventilação do sistema. (FELIZARDO, 2008).

Figura 31 - Unidade de controle



Fonte: Marchetti (1980)

A ligação entre a unidade de controle e o dilatômetro é promovida por meio de um cabo pneumático elétrico (Cabo P-E), (FIG. 32). É constituído por um fio elétrico que passa

pelo interior de um tubo condutor de gás pressurizado e ligações metálicas nas extremidades. Podem ser de dois tipos, extensível ou não extensível, variando apenas o tipo de ligação existente nas extremidades e o comprimento. (FELIZARDO, 2008).

Figura 32 - Cabo P-E



Fonte: Felizardo (2008)

A unidade de controle de pressões utiliza um sistema eletromecânico bastante simples para registrar as pressões A, B e C. Uma bateria de 9 volts proporciona o circuito elétrico na unidade de controle para o fio dentro do cabo de alimentação pneumática e esse tem o escopo de indicar a condição *on/off*. (MEGIA, 2004). Com o circuito estabelecido, deve verificar-se a sua validade pressionando o botão de *CIRCUIT TEST* ou exercendo força diretamente na membrana da lâmina. Ambas as operações, se estiver tudo correto, acionarão um sinal sonoro. (FIG. 33). Um botão de teste verifica a vitalidade de bateria e funcionamento do galvanômetro e campainha. (FELIZARDO, 2008).

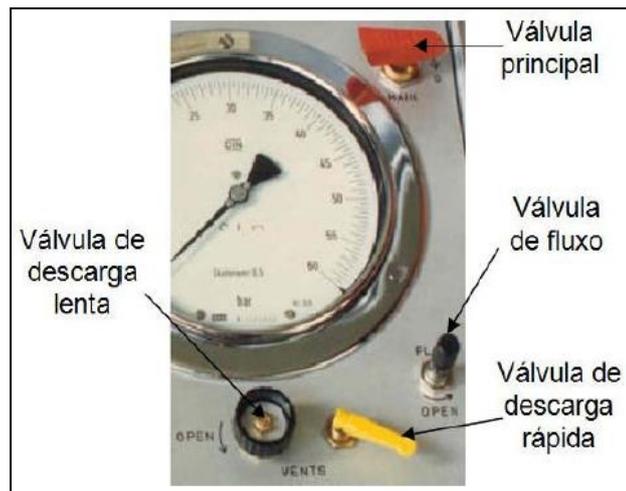
Figura 33 - Botão de teste do circuito



Fonte: Felizardo (2008)

O passo seguinte é a calibração com a obtenção dos parâmetros ΔA e ΔB . Com a válvula da fonte de pressão fechada, coloca-se o regulador de pressão dessa a zero. A válvula principal e as de descarga devem estar fechadas, enquanto a de regulação de fluxo deve estar aberta. Regula-se a pressão de saída da fonte de pressão, para um valor próximo de 3 Mpa. Se for necessário, esse valor pode vir a ser aumentado durante o ensaio. (FIG. 34). Nesse momento já se pode abrir a válvula da fonte de pressão e a válvula principal da unidade de controle, que permanecerá aberta durante todo o ensaio. (FELIZARDO, 2008).

Figura 34 - Esquema de válvulas



Fonte: Felizardo (2008)

Uma válvula micrométrica possibilita o incremento gradual de pressões no interior da lâmina, forçando o diafragma a se deslocar horizontalmente no interior do solo. A pressão de gás é registrada manualmente nos diferentes estágios de ensaio. No primeiro estágio de deslocamento, a membrana desloca-se da lâmina, ativando um circuito elétrico que interrompe um sinal acústico na unidade de controle.

Para a deflexão de 1,1 mm o circuito elétrico é reativado, restabelecendo-se o sinal acústico. Nesses momentos registram-se as leituras das pressões correspondentes. (SCHNAID, 2000).

Há ainda o cabo-terra (FIG. 35) que faz a ligação elétrica entre as varas de cravação e a unidade de controle, permitindo o retorno à unidade de controle do sinal elétrico enviado a lâmina através do cabo P-E. (FELIZARDO, 2008).

Figura 35 - Cabo-terra



Fonte: Felizardo (2008)

De modo a fazer expandir a membrana de aço flexível, recorre-se a um depósito de gás pressurizado com regulador de pressão e respectivas válvulas de controle. (FIG. 36).

Figura 36 - Depósito de gás



Fonte: Felizardo (2008)

Ambos os tubos são conduzidos pelo interior das varas utilizadas na cravação da lâmina. (FIG. 37). O número de varas necessárias vai depender da profundidade final de ensaio. (FELIZARDO, 2008).

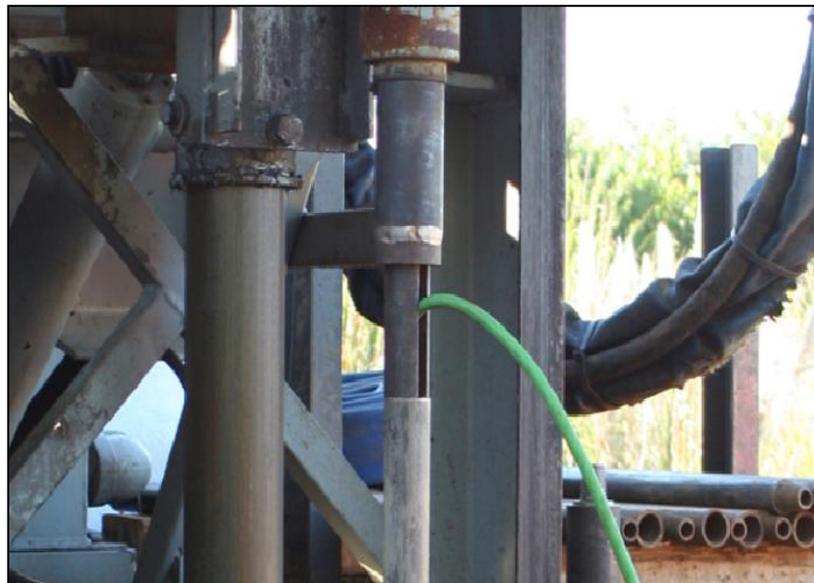
Figura 37 - Varas de cravação



Fonte: Felizardo (2008)

Essas varas são unidas à lâmina e presas ao equipamento de cravação, sendo necessário um adaptador. (FIG. 38).

Figura 38 - Adaptador



Fonte: Felizardo (2008)

Um teste dilatométrico consiste em empurrar uma lâmina plana situada no fim de uma série de hastes. (FIG. 39). Uma vez que se determina a profundidade do ensaio, uma membrana de aço circular localizado em um lado da lâmina é expandida horizontalmente no solo. A pressão é gravada em momentos específicos durante o teste. A lâmina é então avançada para o próximo teste de profundidade. (MARCHETTI, 1980).

Figura 39 - Penetração da lâmina no solo



Fonte: Marchetti et al. (2001)

Segundo Briaud e Miran (1992) as expressões utilizadas para a correção das leituras são:

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

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

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

Onde:

P_0 = pressão corrigida correspondente ao deslocamento de 0,05 mm da membrana;

P_1 = pressão corrigida correspondente ao deslocamento de 1,10 mm da membrana;

P_2 = pressão corrigida correspondente ao retorno da membrana à posição 0,05 mm de deslocamento;

A = pressão necessária para um deslocamento da membrana em relação à lâmina de aço de 0,05 mm;

B = pressão necessária para provocar na membrana um deslocamento radial de 1,10 mm;

C = despressurização necessária para provocar na membrana um retorno à posição 0,05 mm;

ΔA = pressão de gás relativa à leitura A, em calibração ao ar; valor obtido graças à aplicação de vácuo, mas anotado como positivo (correção de rigidez da membrana);

ΔB = pressão de gás relativa à leitura B, em calibração ao ar (correção de rigidez da membrana);

Z_m = desvio zero do manômetro.

Após as correções, considera-se que a pressão P_0 correlaciona-se à tensão horizontal *in situ*; a diferença entre P_1 e P_0 é associada ao módulo de *YOUNG* e, finalmente, a pressão P_2 é relacionada ao excesso de poro-pressão gerado pela cravação da lâmina dilatométrica. (SCHNAID, 2000).

De acordo com Marchetti (1975), a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios deve ser feita utilizando a Teoria da Elasticidade, o uso da teoria é justificado já que as deformações são mantidas em um nível baixo. O plano vertical de simetria permite que se estude o problema como uma membrana atuando no semiespaço infinito sendo desprezada a rigidez da placa. (ROJAS-REYES, 2012).

Segundo Marchetti (1975) procede à interpretação dos dados obtidos utilizando a Teoria da Elasticidade. Para tal, considera-se que a membrana atua num semiespaço infinito, sendo desprezada a rigidez da placa e é suposto deslocamento nulo na superfície do semiespaço e carregamento uniforme da membrana contra o terreno. (VIEIRA, 1994).

O deslocamento do centro da membrana, S, em direção ao terreno é dado pela Equação 5. (MARCHETTI, 1975).

$$S = \Delta P \cdot D \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \frac{2}{\pi} \quad (5)$$

A equação supracitada foi interpretada por Schnaid (2000), pela equação 6.

$$S_0 = \frac{2D(P_1 - P_0)}{\pi} * \frac{(1 - v^2)}{E} \quad (6)$$

Sendo:

S_0 = deslocamento do centro da membrana em direção ao terreno

D = diâmetro da membrana

E = módulo de deformabilidade do solo

V = coeficiente de *Poisson* do solo

As perturbações induzidas pela cravação do equipamento no terreno têm influência nos valores das pressões A, B e C e, portanto, na magnitude dos parâmetros geotécnicos estimados. As principais fontes de erro estão relacionadas ao modo de penetração da lâmina, desvio de verticalidade e tempo de espera entre a cravação e a expansão da membrana.

Estudos experimentais e numéricos evidenciaram zonas de descarregamento do solo adjacente à membrana. (CLARKE; WROTH, 1988; DAVIDSON; BOGHRAT, 1983; FINNO, 1993; SCHMIDT, 1992). Efeitos de dissipação de poro-pressões após a cravação da membrana foram identificados por Campanella e Robertson (1983). Os estudos sugerem que os instrumentos tipo lâmina, com dispositivo de medição localizado nas faces, são em geral adequados à estimativa de parâmetros geotécnicos, já que não há restrições significativas quanto a sua interpretação. Entretanto, há que se reconhecer o caráter eminentemente empírico dos métodos de interpretação do ensaio, por não ser possível, por ora, reproduzir analítica ou numericamente o campo de tensões e deformações gerado ao redor da membrana dilatométrica. As correlações consagradas na prática internacional, de natureza estatística, devem ser validadas localmente. (SCHNAID, 2000).

Segundo Marchetti (1980), foram definidos três índices básicos na interpretação do ensaio, depois de obtidas as pressões P_0 , P_1 e P_2 . Por meio das diferenças entre as pressões P_0 e P_1 , pode-se determinar o módulo dilatométrico (E_D), tendo como solução matemática a expressão:

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

Assim, o módulo E_D drenado em areias, não drenado em argilas e parcialmente drenado em solos argilo arenosos.

Definiu-se também o índice de material (I_D), que é a razão entre $(P_1 - P_0)$ e a pressão horizontal efetiva $(P_0 - u_0)$, tendo como solução matemática a expressão:

$$I_D = (P_1 - P_0) / (P_0 - u_0) \quad (8)$$

Esse índice é utilizado para indicar o tipo de solo que se está penetrando. É importante colocar que o índice de material I_D fornece o comportamento mecânico da massa de solo que está sendo penetrada pela lâmina dilatométrica e não analisa granulometricamente o solo atravessado. Esse detalhe é importante, pois nesse ensaio não se retiram amostras do solo para análise táctil visual e, portanto não é possível definir, por exemplo, se uma argila está se comportando como um silte e vice-versa. Frisa-se então, que a classificação do tipo de solo atravessado é realizada por meio de seu comportamento mecânico.

O terceiro e último parâmetro fornecido pelo ensaio dilatométrico é o índice de tensão horizontal (K_D), que é definido de forma análoga ao coeficiente de empuxo no repouso K_0 .

Conforme relata Schnaid (2000), o aumento de K_D é proporcional à tensão horizontal *in situ*, porém é também sensível a outras propriedades do solo; a razão de sobre adensamento OCR, idade do depósito e grau de cimentação afetam as medidas de K_D .

Como solução matemática tem-se:

$$K_D = (P_0 - u_0) / \sigma'_v \quad (9)$$

Onde:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu$$

σ_v = tensão vertical total, calculada a partir de $\sigma_v = (\gamma \times z) + u$

γ = peso específico da camada

z = profundidade da camada

u = tensão neutra, definida por $u = \gamma_w \times z_u$, onde

γ_w é o peso específico da água e z_u é a altura da coluna de água.

Os ensaios “DMT” permitem as obtenções diretas, de três parâmetros, classificados na descrição apresentada por Silvano Marchetti como “intermediários”. Uma vez que representam as bases, para as correlações que indicam as estimativas dos demais parâmetros, de interesse da engenharia geotécnica. Esses parâmetros, denominados “intermediários”, representam a grande potencialidade do ensaio e pode-se dizer, foram concebidos, por Silvano Marchetti, como fruto de muita observação, muita análise e cuidadosa interpretação de resultados. A importância desses parâmetros é tão grande, que a rigor, deveriam ser classificados como “parâmetros fundamentais”, pois fornecem todo o balizamento para a interpretação dos resultados dos ensaios.

Através do índice dilatométrico (I_D) identificamos o comportamento granulométrico do solo: argilas, siltes, areias. É utilizado para indicar o tipo de solo que se está inserindo a lâmina e fornecer o comportamento mecânico da massa de solo que está sendo penetrada, entendendo que não obtemos através deste índice a análise granulométrica do solo atravessado.

O módulo dilatométrico (E_D) é a quantificação da deformabilidade do solo causada por uma superfície circular, a membrana, aplicando um acréscimo de pressão que é a diferença entre $P_1 - P_0$. Quanto maior o valor de “ E_D ”, menos compressível é o solo.

O índice de tensão horizontal (K_D) obtido a partir da leitura do início da expansão da membrana contra o terreno (P_0) e do conhecimento da coluna hidrostática em campo (u_0), apoiado na observação do nível da água, por uma sondagem à percussão (SPT). No QUADRO 1 estão apresentados esses três parâmetros. (PENNA, 2011).

Quadro 1 - Parâmetros intermediários

QUADRO RESUMO DOS PARÂMETROS INTERMEDIÁRIOS			
PARÂMETRO	SÍMBOLO	EXPRESSÃO	SIGNIFICADO
Índice do material	I_d	$I_d = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - \mu_0}$	Identificação do comportamento granulométrico do solo (argilas, siltes e areias)
Módulo dilatométrico	E_d	$E_d = 34,7 \cdot (P_1 - P_0) \text{ Kgf/cm}^2$	Quantificação da compressibilidade do solo
Índice de tensão horizontal	K_d	$K_d = \frac{P_0 - \mu_0}{\sigma'_{v0}}$	Avaliação do histórico de tensões já aplicadas ao solo

Fonte: Penna (2011)

Com os parâmetros até aqui descritos, pode-se ainda por meio de várias correlações serem obtidos: K_0 , OCR, a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) e o ângulo de atrito interno do solo θ . Essas correlações fornecem uma visão de abordagens já existentes na literatura internacional e sua validação a condições brasileiras. As maiores referências são para solos sedimentares e em outros materiais a experiência ainda é pequena. Portanto é preciso que sejam executados ensaios na área a ser estudada e definam-se as correlações próprias para cada local, criando-se assim um banco de dados para cada região. (BORGES, 1967).

5.1 Interpretação dos resultados

Marchetti (1980) estabeleceu um conjunto de correlações semiempíricas entre os índices dilatométricos e as principais propriedades de comportamento do solo: K_0 , OCR, módulo de deformabilidade, M ou E , e resistência ao cisalhamento do solo. Indicações quanto ao tipo de solo e densidade são também fornecidas. Um resumo das correlações existentes entre os índices dilatométricos e os parâmetros geotécnicos é apresentado no QUADRO 2, seguido de uma discussão criteriosa quanto aos métodos de interpretação. (SCHNAID, 2000).

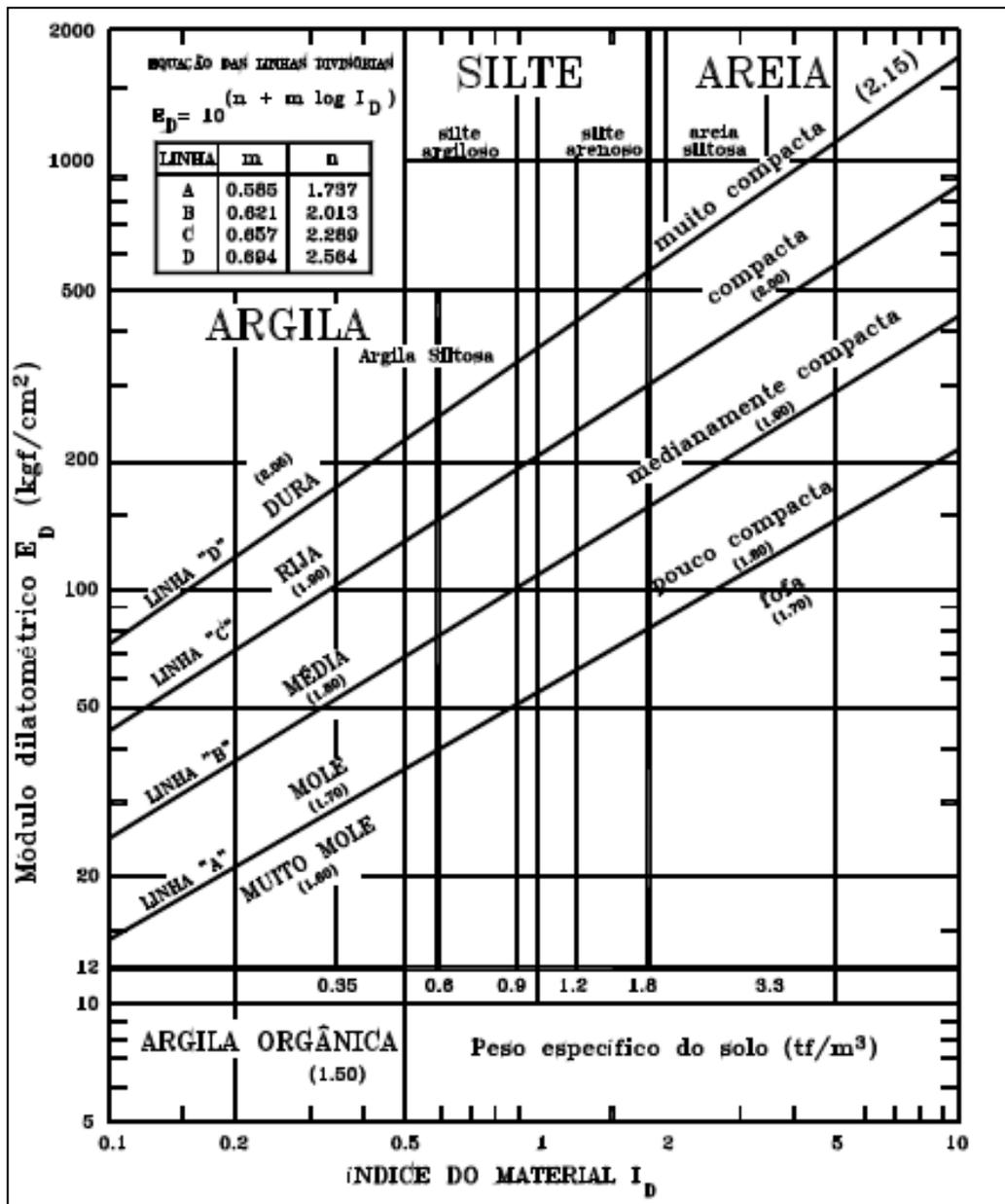
Quadro 2 - Correlações existentes entre índices dilatométricos e parâmetros geotécnicos

PROPRIEDADES	VARIÁVEIS	FORMULAÇÃO	REFERÊNCIA
K_0 (areias)	$f(K_d, \varnothing') = f(A, \sigma'_v, u_0, q_d)$	Empírica	Marchetti (1980)
K_0 (argilas)	$f(K_d) = f(A, \sigma'_v, u_0)$	Semi-empírica	Jamiolkowski et al. (1985)
\varnothing' (areia)	$f(K_0, \sigma'_v, P) = f(A, \sigma'_v, u_0, q_d)$	Teórica	Jamiolkowski et al. (1985) e Marchetti (1980)
S_u (Argila SA)	$f(K_d, \sigma'_v) = f(A, \sigma'_v, u_0)$	Empírica	Marchetti (1980)
S_u (Argila NA)	$f(p_0) = f(A, u_0)$	Empírica	Marchetti (1980)
$M = 1/m_v$	$f(E_d, I_d) = f(A, B, U_0)$	Semi-empírica	Marchetti (1980)
p_c' (areias)	$f(K_d, \varnothing') = f(A, \sigma'_v, u_0, q_d)$	Semi-empírica	Jamiolkowski et al. (1985)
p_c' (argila)	$f(K_d) = f(A, \sigma'_v, u_0)$	Empírica	Marchetti (1980)
E_{25} (areia)	$f(E_d) = f(A, B)$	Semi-empírica	Jamiolkowski et al. (1985)
E (argila)	$f(m, v) = f(A, B, u_0, v)$	Semi-empírica	Marchetti (1980)

Fonte: Penna (2011)

A partir dos resultados obtidos em diferentes solos, determinou-se que o índice do material I_D , é controlado pelo tamanho dos grãos do solo, é pouco afetado por OCR e independe das condições de drenagem. (LACASSE; LUNNE, 1988; LUTENEGGER, 1988; MARCHETTI, 1980; SCHMERTMANN, 1982). Com base nessas evidências, (MARCHETTI, 1981) produziu o gráfico função das medidas de I_D e E_D , que serve de indicativo do tipo de solo. (FIG. 40). (SCHNAID, 2000).

Gráfico 1, tipos de solo



Fonte: Schnaid (2000)

5.2 Aplicações

As principais aplicações desse ensaio estão relacionadas aos seguintes problemas geotécnicos: previsão de recalque de fundação de edifício, aterro, tanque, piso, etc.; avaliação do módulo de deformabilidade edométrica (de adensamento) dos solos; avaliação da resistência de argilas saturadas, solicitadas em condições não drenadas (rápidas); identificação estratigráfica do subsolo; controle tecnológico da compactação de aterros; detecção de superfícies de escorregamento em taludes instáveis; avaliação das curvas “ $p \times y$ ” para análise de estaca sujeita a esforço transversal; identificação da potencialidade de liquefação de massas arenosas; análise da capacidade de carga de fundação; avaliação do coeficiente de adensamento (C_v) e de permeabilidade (K) de solos argilosos; avaliação do ângulo de atrito da resistência drenada (lenta), de massas arenosas; avaliação do histórico de tensões e do coeficiente de empuxo em repouso, de solos argilosos; obtenção de parâmetro de reação do subleito, para o apoio de pisos industriais; obtenção do coeficiente de recalque horizontal do terreno, para o projeto de parede diafragma atirantada; obtenção de parâmetro para análises por elementos finitos e pelo programa *Plaxis^R*. (PENNA, 2011).

5.3 Vantagens e desvantagens

Marchetti (1975) destacou as seguintes vantagens do ensaio: não necessita de furo prévio, eliminando-se parte da dispersão devida ao amolgamento, resultados do ensaio não dependem do operador, ensaio econômico e rápido, apresenta alta repetibilidade e podem ser realizados ensaios *offshore* sem furo prévio.

Segundo Rojas-Reyes (2012) algumas das principais vantagens do ensaio dilatométrico são: simplicidade de operação e manutenção; repetibilidade de resultados, não sendo influenciável pelo operador; dados aproximadamente contínuos.

As principais limitações consideradas por Rojas-Reyes (2012) são: a membrana e lâmina metálica são susceptíveis a danificação, especialmente na penetração de areias densas ou solos com pedregulhos; é necessário de uma força de reação muito alta em solos densos (maior que o CPT); não é possível medir a poro pressão diretamente; em relação com outros ensaios de campo a experiência é muito limitada, por exemplo, com o SPT e CPT.

Pesquisas realizadas na UBC (*The University of British Columbia*) têm demonstrado que as correlações do DMT apresentam uma boa indicação do tipo de solo e valores razoáveis de S_u , K_0 e OCR para argilas médias, não cimentadas e não sensitivas. (JAMILOKOWSKI et al., 1985, LUTENEGGER, 1988). Alguns resultados iniciais da interpretação de dados de DMT na argila porosa de Brasília foram apresentados por Ortigão, Cunha e Alves (1995) e demonstraram que esse ensaio é muito promissor para esse tipo de solo, em função da facilidade de operação, razoável precisão dos resultados, em comparação com valores do CPTU, e principalmente a economia pelo baixo custo de execução e alta produtividade. (ROJAS-REYES, 2012).

Jardim e Cunha (1998) realizaram uma ampla campanha de ensaios no campo experimental da UnB (Universidade de Brasília) entre eles alguns DMT, concluindo que a previsão do comportamento de estacas submetidas ao carregamento horizontais apresentou resultados razoáveis quando se utilizaram as metodologias provenientes das curvas “P - y”, com isso, pode ser considerado como um bom ensaio para a previsão do comportamento de estacas carregadas lateralmente. (ROJAS-REYES, 2012).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O interesse por este tema levou-se às pesquisas que forneceram um ótimo aprendizado.

Descobriu-se que a cada pesquisa aprendia-se sobre as aplicabilidades do dilatômetro, suas funções, sua importância e conseguiu-se entender que todos os ensaios de campo apresentam limitações.

O mesmo acontece com o ensaio dilatométrico que possui inúmeras vantagens, mas apresenta também desvantagens, e, não pode ser aplicado a todos os problemas geotécnicos.

Observou-se que as suas limitações relacionam-se à presença de materiais que oferecem resistência à penetração da lâmina dilatométrica, como pedregulhos e matações, o que causa danos à placa ou à membrana.

Espera-se que aos alunos interessados em seguir a área de Geotecnia, conheçam o aparelho, executem ensaios e descubram o quanto ele é relevante.

Quadro 3 – Exemplo de valores, ensaio dilatométrico

Item	Descrição				
1	Mobilização de equipamento e equipe	Un.	Qtd.	Preço Unit. (R\$)	Preço Total (R\$)
1.1	Mobilização de equipamento e equipe	(vb.)	1,0	5.000,00	5.000,00
		Total parcial			5.000,00
2	Ensaio Dilatométrico "DMT"	Un.	Qtd.	Preço Unit. (R\$)	Preço Total (R\$)
2.1	Taxa de instalação por furo	(unit.)	2,00	700,00	1.400,00
2.2	Ensaio de penetração	(m.)	30,00	240,00	7.200,00
2.3	Elaboração de relatório técnico	(unit.)	1,00	1.000,00	1.000,00
		Total parcial			9.600,00
3	Outros	Un.	Qtd.	Preço Unit. (R\$)	Preço Total (R\$)
3.1	Quebra de piso de concreto (não compreende recomposição)	(unit.)	0,00	600,00	0,00
3.2	Hora parada de equipamento e equipe	(hrs.)	0,00	650,00	0,00
		Total parcial			0,00
TOTAL GLOBAL ESTIMADO					14.600,00

Fonte: Penna (2014)

REFERÊNCIAS

- ANGELIM, R. R. **Desempenho de ensaios pressiométricos em aterro compactados de barragens de terra na estimativa de parâmetros geotécnicos.** 2011. 291f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- BORGES, P. R. **Estudos da parcela de resistência lateral em estacas escavadas.** 1967. 97f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1967.
- BRIAUD, J. L.; MIRAN, J. **The flat dilatometer test.** Washington: Department of Transportation/Federal Highway Administration, 1992.
- CAMPANELLA, R. G. et al. **Recent developments in In-Situ Testing of Soils.** 11th. San Francisco (USA): ICSMFE, 1985.
- CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K. Flat plate dilatometer testing: research e development. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE FLAT DILATOMETER, 1., 1987. **Annals...** Edmonton (CA): [s.n], 1987.
- CLARKE, B. G.; WROTH, C. P. Comparison between results from flat dilatometer and self-boring pressuremeter tests. In: CONFERENCE PENETRATION TESTING IN THE UK. 1988. **Proceedings...** Birmingham: [s.n], 1988. p. 295-298.
- DAVIDSON, J. L.; BOGHRAT, A. The flat dilatometer testing in Florida. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IN SITU OF SOIL AND ROCK, 2., 1983. **Proceedings...** Paris: [s.n], 1983.
- FELIZARDO, D. A. S. **Manual interativo de ensaios in situ para caracterização de maciços.** 2008. 160f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Geológica, Universidade de Aveiro, 2008.

FINNO, R. J. Analytical interpretation of dilatometer penetration trough saturated cohesive soils. **Geotechnique**, Paris, v. 43, n. 2, p. 241-254, 1993.

GOMES-BOEHL, P. E. **Dilatômetro de Marchetti (DMT): atualização da revisão bibliográfica**. Florianópolis: UFSC, 2005. Apostila.

GUIMARÃES, G. V. M. **A utilização do ensaio de dilatômetro para o dimensionamento de estacas rígidas carregadas transversalmente**. 2007. 243f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

JAMILOKOWSKI, M. et al. New correlations of penetration tests for design practice. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, 1., 1988. Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1988. v. 1, p. 263-296.

JARDIM, N. A.; CUNHA, R. P. Cálculo do coeficiente de reação horizontal da argila porosa de Brasília por retroanálise de provas de carga. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998. Brasília. **Anais...** Brasília: [s.n], 1998. p. 1631-1638.

LACASSE, S.; LUNNE, T. Calibration of dilatometer correlations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, 1., 1988. Florida. **Proceedings...** Florida: [s.n], 1988. p. 539-548.

LUNNE, T. et al. Correlation of dilatometer readings to lateral stress. In: ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 69., 1990. Washington. **Annals...** Washington: TRB, 1990.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. **Cone penetration testing in geotechnical practice**. Londres: Blackie Academic & Professional, 1997.

LUTENEGGER, A. J. Current status of the Marchetti dilatometer test. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, 1., 1988. Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1988. v. 1, p. 137-155.

MARCHETTI, S. A new in situ test for the measurement of horizontal soil deformability. In: CONFERENCE ON IN SITU MEASUREMENTS OF SOIL PROPERTIES, 2., 1975. New York. **Proceedings...** New York: ASCE Specialty Conference, 1975. p. 255-259.

MARCHETTI, S. et al. The flat dilatometer test (DMT) in soil investigation: a report by the ISSMGE Committee TC16. In: INTERNATIONAL FLAT DILATOMETER CONFERENCE, 2., 2001. Washington. **Proceedings...** Washington: [s.n], 2001.

MARCHETTI, S. In situ tests by flat dilatometer. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 107, n. 3, p. 299-321, 1980.

MARCHETTI, S. In situ tests by flat dilatometer: clouse. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 107, n. 6, p. 832-837, 1981.

- MARCHETTI, S. The flat dilatometer: design applications. In: INTERNATIONAL GEOTECHNICAL ENGINEERING CONFERENCE, 3., 1997. **Proceedings...**Cairo: Cairo University, 1997.
- MATEUS, A. C. C. **Determinação dos erros de medição associados ao ensaio DMT.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) - Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2008.
- MEGIA, F. G. **Curso técnico de perforacion.** Madrid: ISSA, 2004.
- MITCHELL, J. K. Ground improvement evaluation by in-situ tests. In: SITU '86 ASCE: SPECIAL CONFERENCE ON "USE OF IN SITU TESTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 6., 1986. **Proceedings...** Blacksburg: Virginia Tech, 1986. p. 221.
- MONTEIRO, C. G. **Caracterização de um solo residual de gnaiss através de ensaios de dilatômetro e de laboratório.** 1999. 142f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- ORTIGÃO, J. A. R.; CUNHA, R. P.; ALVES, L. S. In Situ Test in Brasília Porous Clay. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa v. 33, n. 1, p. 189-198, 1995.
- PAULA, M. C. **Ensaos dilatométricos em um solo residual de gnaiss.** 1998. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- PENNA, A. S. D. **Ensaos com o dilatômetro de Marchetti (DMT).** São Paulo: Damasco Penna, 2011. Disponível em:< file:///C:/Users/Win7/Desktop/02%20Ano%202014%201/0000%20Ano%202013/Downloads /mais_informacoes_dmt2.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- QUEIROZ, A. C. G. **Uso do DMT na avaliação de maciços compactados.** 2008. 96f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- ROJAS-REYES, A. A. **Uso de ensaios dilatométricos para a simulação numérica de uma estrutura de contenção em solo do D.F.** 2012. 160f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- SÁNCHEZ, M.; NARANJO, E.; SERPA, H. **Especificaciones generales sobre la prueba de dilatometro plano de Marchetti (DMT).** Universidad de Sucre, Facultad de Ingenieria, Departamento de Ingenieria Civil, Sincelejo, 2002.
- SCHMERTMANN, J. H. A method for determining the friction angle in sands from the Marchetti dilatometer tests. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON PENETRATION TESTING, 2., 1982. Orlando. **Proceedings...** Orlando: [s.n], 1982. p. 577-587.
- SCHMERTMANN, J. H. **Guidelines for using the cpt, cptu and Marchetti dmt for geotechnical design.** Washington: Department of Transportation/Federal Highway Administration, 1988.

SCHMERTMANN, J. H. **Revised procedure for calculating K_0 and OCR from DMT's with $ID > 1.2$ and which incorporates the penetration measurement to permit calculating the plane strain friction angle.** DMT Workshop: Gainesville, 1983.

SCHMERTMANN, J. H. Suggested method for performing the flat dilatometer test. **Geotechnical Testing Journal**, v. 9, n. 2, p. 93-101, 1986.

SCHMIDT, C. A. B. **Uma análise de recalques pelo Método de Asoka Modificado com enfoques probabilísticos.** 1992. Dissertação (Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SILVA, F. K. **DMT em solos de Santa Catarina: estudo comparativo com CPT e SPT.** 2008. 154f. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.

SOARES, M. M. et al. Ensaio de dilatômetro em argila mole. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE SOLOS E ENGENHARIA FUNDAMENTAL, 7., 1986. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: [s.n], 1986, v. 2, p. 89-98.

VIEIRA, M. V. C. M. **Ensaio de dilatômetro na argila mole do Sarapuí.** 1994. 309f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.