

INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Câmpus Anápolis

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE**

**APLICABILIDADE DO DMT NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS
DE MACIÇOS COMPACTADOS**

LUIZ GUSTAVO BALIZA RAMOS

ORIENTADORA: Prof. D.Sc. ANGELA CUSTÓDIA GUIMARÃES QUEIROZ

PUBLICAÇÃO:

**ANÁPOLIS
2021**

LUIZ GUSTAVO BALIZA RAMOS

**APLICABILIDADE DO DMT NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS
DE MACIÇOS COMPACTADOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Civil da Mobilidade do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás –
Câmpus Anápolis.

Orientadora: Prof. D.Sc. Angela Custódia
Guimarães Queiroz

**ANÁPOLIS
2021**

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

RAMOS, Luiz Gustavo Baliza

R175a Aplicabilidade do DMT na estimativa de parâmetros geotécnicos de maciços compactados / Luiz Gustavo Baliza Ramos – Anápolis: IFG, 2021.
71 p. : il. color.

Orientadora: Prof. Dra. Angela Custódia Guimarães Queiroz.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás: Câmpus Anápolis – Engenharia Civil da Mobilidade, 2021.

1. Aterro compactado. 2. Compactação dos solos. 3. Dilatômetro de Marchetti. 4. Investigação geotécnica. I. QUEIROZ, Angela Custódia Guimarães orien. II. Título.

CDD 624.1



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

ATA Nº 02/ 2021

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

Aos 02 dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte um, às 19 horas, por meio de webconferência utilizando a plataforma Google Meet (<https://meet.google.com/mwf-zvny-xdd>), foi realizada a sessão pública de apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Graduando **Luiz Gustavo Baliza Ramos** (matrícula 20181060130280) do curso de Engenharia Civil da Mobilidade. A banca foi composta pelos seguintes membros: Angela Custódia Guimarães Queiroz, Maria Tâmara de Moraes Guimarães Silva e Camilla Rodrigues Borges, sob a presidência da primeira. O trabalho de conclusão de curso tem como título “**Aplicabilidade do DMT na estimativa de parâmetros geotécnicos de maciços compactados**”, da área de Geotecnia, sob orientação da Profa. Angela Custódia Guimarães Queiroz. Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso 2, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 9,7 (nove vírgula sete).

Encerra-se a presente sessão às 20 horas e 20 minutos. Eu, Prof. Angela Custódia Guimarães Queiroz, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca e pelo graduando.

(assinado eletronicamente)

Profa. Angela Custódia Guimarães Queiroz

Profa. Maria Tâmara de Moraes G. Silva

Prof. Camilla Rodrigues Borges

Luiz Gustavo Baliza Ramos

(Graduando)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria Tamara de Moraes Guimaraes Silva, CHEFE - CD4 - ANA-DAA**, em 03/08/2021 20:27:25.
- **Camilla Rodrigues Borges, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 03/08/2021 13:23:05.
- **Angela Custodia Guimaraes Queiroz, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 03/08/2021 13:14:40.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 186190

Código de Autenticação: a76a15c13c



Avenida Pedro Ludovico, s/ nº, Remy Cury, ANÁPOLIS / GO, CEP 75131-457
(62) 3703-3373 (ramal: 3373)



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis, Goiás, 06/09/2021
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

LUIZ GUSTAVO BALIZA RAMOS

**APLICABILIDADE DO DMT NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS
DE MACIÇOS COMPACTADOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Civil da Mobilidade do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás –
Câmpus Anápolis.
Orientadora: Prof. D.Sc. Angela Custódia
Guimarães Queiroz

APROVADO EM ____/____/____

ANGELA CUSTÓDIA GUIMARÃES QUEIROZ, D.Sc. (IFG) (ORIENTADORA)

MARIA TÂMARA DE MORAES GUIMARÃES SILVA, D.Sc. (IFG) (EXAMINADORA
INTERNA)

CAMILA BORGES RODRIGUES, D.Sc. (IFG CÂMPUS LUZIANIA) (EXAMINADORA
EXTERNA)

**ANÁPOLIS
2021**

AGRADECIMENTOS

Durante a trajetória da graduação, vários foram aqueles que me ajudaram de diferentes formas e todos estarão em meu coração, porém uso esse espaço para citar e homenagear minha mãe Ana Cristina, que cumpriu sua missão em vida antes que eu pudesse concluir esta etapa.

RESUMO

A compactação dos solos é um processo que se inicia através de uma simulação em laboratório para que seja devidamente planejada com intuito de que sejam obtidos os melhores resultados em campo. Essa técnica permite a densificação do solo e redução de sua permeabilidade. No processo, é comum que se utilizem de jazidas de outras regiões, ocasionando comportamentos diferentes nas camadas compactadas. Devido a essa diferença de comportamento faz-se necessário o aprimoramento do controle tecnológico da compactação em campo, que usualmente é feita considerando apenas as variáveis Δh e GC (desvio de umidade ótima e grau de compactação, respectivamente). Como solução para resultados mais precisos sobre o comportamento do maciço, esta pesquisa trouxe o ensaio Dilatômetro de Marchetti, conhecido como DMT. Os resultados obtidos com o DMT são correlacionados com outros parâmetros geotécnicos obtidos em laboratório para que se tenha uma representação mais fiel do aterro compactado. Todavia, apenas o uso do DMT ainda não é o ideal para a última forma de controle tecnológico de um solo compactado, visto que as correlações são empíricas, o que sinaliza a necessidade da utilização de ferramentas de investigação geotécnica complementares para uma análise final ótima, já que determinados parâmetros obtidos pelas correlações não são por si só conclusivos devido as variâncias apresentadas devido a limitações do equipamento.

Palavras-chave: Aterro Compactado, Dilatômetro de Marchetti, Investigação geotécnica.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Primeira leitura realizada no aparelho Dilatômetro de Marchetti
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
CUSat – Adensado Não – Drenado Saturado
B – Segunda leitura realizada no aparelho Dilatômetro de Marchetti
C – Leitura opcional no aparelho Dilatômetro de Marchetti
CPT – Ensaio de penetração de Cone
DMT – Dilatômetro de Marchetti
E – Módulo de Young
Ed – Módulo Dilatométrico
e – Índice de vazios
F – Fator de correção
GC – Grau de Compactação
h – Umidade da amostra na determinação do peso específico dos sólidos
Ia – Índice de atividade de argilas
Id – Índice de Material
Ip – Índice de plasticidade
Kd – Índice de tensão horizontal
M – Módulo Oedométrico
M1 - Massa do solo úmido
M2 - Massa do picnômetro + solo + água na temperatura do ensaio
M3 - Massa do picnômetro cheio de água
n – Porosidade
OCR – Razão de sobreadensamento
P0 – Leitura A corrigida
P1 – Leitura B corrigida
P2 – Leitura C corrigida
SPT – Sondagem a Percussão Simples
Sr – Grau de saturação
u0 – Poro pressão inicial
wl – Limite de liquidez

w_p – Limite de Plasticidade

z_m - Pressão lida quando o equipamento está na pressão atmosférica

Δh -Desvio de umidade ótima

ΔA – Pressão de gás relativa a leitura A

ΔB – Pressão de gás relativa a leitura B

Δp – Diferença entre as pressões corrigidas

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução nos estágios de compactação.	17
Figura 2.2 – Curvas de compactação de diversos tipos de solos.....	17
Figura 2.5 – Curvas para diferentes energias de compactação.	18
Figura 2.6 – Estrutura de solos compactados	19
Figura 2.7 – Compressibilidade de solos compactados.	20
Figura 2.8 – Resistência ao cisalhamento em função da umidade.	20
Figura 2.10 – Método de Pacheco (esquerda) e Casagrande (direita).....	23
Figura 2.11 – Esquema de ensaio triaxial.	25
Figura 2.12 – Esquema de ensaio triaxial.	26
Figura 2.13 – Equipamentos DMT.....	27
Figura 2.14 – Funcionamento da membrana	28
Figura 2.15 – OCR em função de K_d	33
Figura 2.16 – Ábaco proposto por Campanella e Robertson (1991) para avaliação de K_D através de ϕ e K_0 em areias não cimentadas.	35
Figura 2.17 – Gráfico para classificação e peso específico em função de I_d e E_d (adaptada de Marchetti e Crapps, 1981, por Vieira 1994).....	36
Figura 3.1 – Localização da área estudada.	39
Figura 3.2 – Peso específico dos sólidos	41
Figura 3.3 – Ensaio do limite de liquidez	42
Figura 3.4 – Ensaio do limite de plasticidade	42
Figura 3.5 – Ensaio de compactação	44
Figura 3.6 – Ensaio Oedométrico.....	45
Figura 3.7 – Ensaio DMT e Caixa de controle DMT	46
Figura 4.1 – Leituras do dilatômetro.....	47
Figura 4.2 – Índices Dilatométricos	48
Figura 4.3 – Índices físicos.....	49
Figura 4.4 – Curvas Granulométricas 0 a 0,5 m.....	50
Figura 4.5 – Curvas Granulométricas 0,5 a 1 m.....	50
Figura 4.6 – Curvas Granulométricas 1 a 1,3 m.....	51
Figura 4.7 – Curvas Granulométricas 1,3 a 2 m.....	51
Figura 4.8 – Curvas Granulométricas 2 a 2,3 m.....	52

Figura 4.9 – Curvas Granulométricas 2,3 a 3 m.....	52
Figura 4.10 – Curvas Granulométricas 3 a 3,5 m.....	53
Figura 4.11 – Índices de consistência e granulometria	54
Figura 4.12 – Curva de compactação 0 a 0,5 m.....	55
Figura 4.13 – Curva de compactação 0,5 a 1 m.....	56
Figura 4.14 – Curva de compactação 1 a 1,3 m.....	56
Figura 4.15 – Curva de compactação 1,3 a 2 m.....	57
Figura 4.16 – Curva de compactação 2 a 2,3 m.....	57
Figura 4.17 – Curva de compactação 2,3 a 3 m.....	58
Figura 4.18 – Curva de compactação 3 a 3,5 m.....	58
Figura 4.19 – Ângulo de atrito estimado por DMT e obtido por triaxial.....	60
Figura 4.20 – Curvas Tensão-Deformação 1,0 m.	61
Figura 4.21 – Curvas Tensão-Deformação 2,0 m.	61
Figura 4.22 – Curvas Tensão-Deformação 3,0 m.	62
Figura 4.23 – Módulo de Young estimado por DMT e obtido por laboratório.	64
Figura 4.25 – Curvas de Adensamento Bloco 2 e 3.	65
Figura 4.26 – OCR estimada por DMT e obtida por ensaios.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2	Equipamentos de compactação.	21
Tabela 2.2	Valores do fator de correção F.....	32
Tabela 2.1	Classificação de solos em função de I_d	36
Tabela 2.3	Referências de estudo	37
Tabela 2.3	Referências de estudo	48
Tabela 4.2	Caracterização Geotécnica e Índices de Consistência	53
Tabela 4.3	Caracterização Geotécnica e Índices de Consistência	54
Tabela 4.4	Parâmetros de compactação e Índices Físicos. Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4.5	Resultados de ensaio triaxial CUSat.....	59
Tabela 4.6	Módulo de Young para profundidade 1,0 m.	62
Tabela 4.7	Módulo de Young para profundidade 2,0 m.	62
Tabela 4.8	Módulo de Young para profundidade 3,0 m.	63
Tabela 4.9	Média do Módulo de Young. Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4.10	K_0 para 1,0 m..... Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4.11	K_0 para 2,0 m..... Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4.12	K_0 para 3,0 m..... Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4.14	Parâmetros da compressão edométrica.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Compactação dos Solos	16
2.2	Comportamento dos solos compactados	19
2.3	Compactação em campo	21
2.4	Parâmetros Geotécnicos	22
2.4.1	Módulo de Young.....	22
2.4.2	Razão de sobre-adensamento (OCR)	23
2.4.3	Ensaio triaxial e parâmetros	24
2.4.4	Ângulo de Atrito	25
2.5	Dilatômetro de Marchetti.....	26
2.5.1	Equipamentos e etapas do ensaio.....	27
2.5.2	Correção das leituras e índices dilatométricos	29
2.5.2.1	Módulo dilatométrico.....	30
2.5.2.2	Índice de material	31
2.5.2.3	Índice de tensão horizontal.....	31
2.5.3	Estimativa de parâmetros geotécnicos	32
2.5.3.1	Módulo De Young	32
2.5.3.2	Razão de pré-adensamento em Argilas	32
2.5.3.3	OCR em areias	33
2.5.3.4	Ângulo de atrito.....	34
2.5.3.5	Classificação do material.....	35
2.5.4	DMT em pesquisas.....	37
2.5.4.1	Uso do DMT na avaliação de maciços compactados	37
2.5.4.2	Ensaio DMT na caracterização e estimativa de recalques de fundações superficiais em solo tropical arenoso.....	38
2.5.4.3	Ensaio Dilatométricos: DMT em solos de Santa Catarina: Estudo comparativo com CPT e SPT	38

2.5.4.4	Influência da Sucção nos Resultados dos Ensaios de Dilatômetro de Marchetti (DMT) em um Solo Residual Compactado.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Local analisado.....	39
3.2	Ensaios de Laboratório.....	39
3.2.1	Caracterização Geotécnica	40
3.2.1.1	Umidade	40
3.2.1.2	Peso específico aparente	40
3.2.1.3	Peso específico dos sólidos	40
3.2.1.4	Índices de consistência w_l , w_p e I_p	41
3.2.1.5	Índices físicos	43
3.2.2	Granulometria.....	43
3.2.3	Compactação.....	43
3.2.4	Ensaios Oedométricos.....	44
3.2.5	Ensaios Triaxiais.....	45
3.2.5.1	Ensaio de compressão Triaxial Adensado e Não - Drenado (CU).....	46
3.3	Ensaios DMT	46
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.1	DMT	47
4.2	Caracterização Geotécnica.....	48
4.3	Compactação	55
4.4	Ensaio de Compressão Triaxial.....	59
4.5	Ensaio de Adensamento	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material que é modificado ao longo dos tempos devido a mudanças climáticas e fenômenos de sedimentação e transporte, que desencadeiam alterações físicas e químicas neste (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2011). Esse processo, possibilita que para um mesmo local, diferentes camadas possuam comportamentos diametralmente opostos devido sua estrutura físico química. Ao ser feita a análise das características do solo são utilizados procedimentos já validados por instituições que têm como objeto de estudo o solo (GUSMÃO FILHO, 2002).

Devido a tais diferenças, determinados usos do solo requerem modificações em suas propriedades através de técnicas específicas. A compactação é uma maneira de alterar o solo aumentando a resistência desse, fazendo com que, através de aplicação de energia mecânica, o solo adquira características físicas desejáveis.

Contudo para realizar tal operação, é necessário muitas vezes o empréstimo de jazidas oriundas de outras áreas, o que resulta em uma heterogeneidade do material final compactado, no que tange os comportamentos diferentes de materiais que outrora estavam submetidos a diferentes condições climáticas e alterações de paisagem (FERNANDES, 2016).

Quando se trata da compactação de aterros, para a avaliação de campo, são analisados apenas o grau de compactação e o desvio de umidade ótima para análise de comportamento e desempenho do material. Para a compactação de aterros tal heterogeneidade gera uma necessidade de conhecimento detalhado dos parâmetros geotécnicos do solo, já que o controle tecnológico de compactação é limitado ao analisar-se apenas dois parâmetros, não levando a uma análise satisfatória de seu comportamento (QUEIROZ, 2008).

Devido a essa variabilidade de condições que o aterro estará sujeito, a necessidade de um estudo que possa detalhar seu estado se faz necessário. O ensaio Dilatômetro de Marchetti, devido sua facilidade de execução torna-se uma alternativa interessante a fim de que seja estudada a sua aplicabilidade para estimativa de parâmetros de tais aterros.

1.1 Objetivos

Analisar a aplicabilidade do ensaio DMT na previsão de parâmetros geotécnicos com objetivo de aprimorar o controle tecnológico de um aterro compactado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa fornecer uma visão sobre o ensaio DMT, desde seu objetivo inicial e suas etapas de execução além dos resultados possíveis de serem obtidos com sua execução. Os parâmetros e equações são apresentados para que fiquem claras as correlações com os resultados advindos do ensaio.

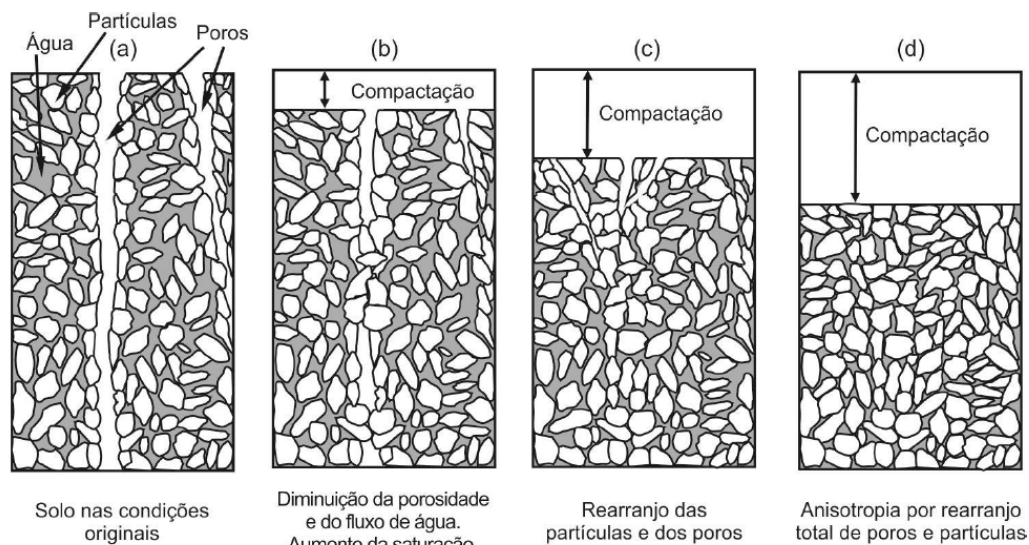
Também é feita uma introdução sobre compactação com objetivo de compreender como cada tipo de solo e como os parâmetros físicos envolvidos nesse processo afetam as propriedades da área em estudo.

2.1 Compactação dos Solos

A compactação de um solo é a sua densificação por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais possam ser empregados (CAPUTO, 1988).

Com os fenômenos de transporte dos solos através da sedimentação e intemperismos o solo se torna um material heterogêneo com diferentes propriedades e comportamentos em seu interior. Com objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do material, é feita a compactação já que esta aumenta sua densidade e reduz seu índice de vazios (PINTO, 2006). Na figura 2.1 podemos ver a mudança na estrutura de compactação através de seus estágios.

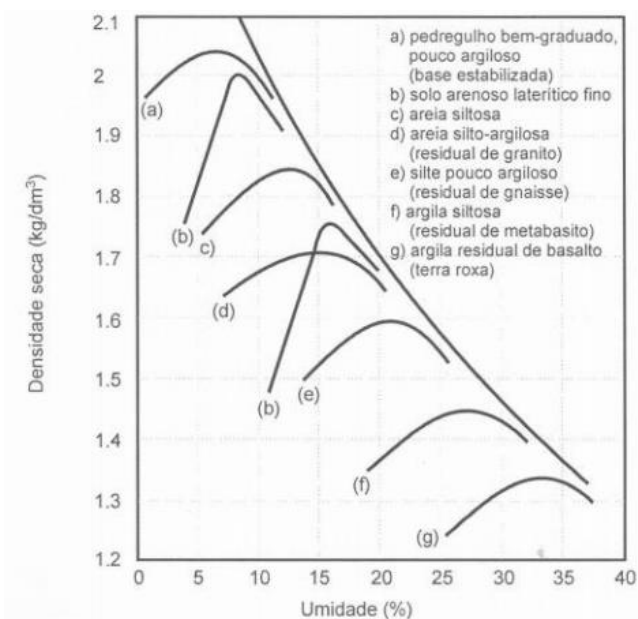
Figura 2.1 – Evolução nos estágios de compactação.



Fonte: Horn (2003)

Para análise da compactação de um solo devem ser observados os seguintes fatores: natureza do solo, teor de umidade, energia de compactação e processo de compactação (MASSAD, 2010). Quanto a natureza e umidade podemos observar na Figura 2.2 como ela altera para os diferentes tipos de solo:

Figura 2.2 – Curvas de compactação de diversos tipos de solos



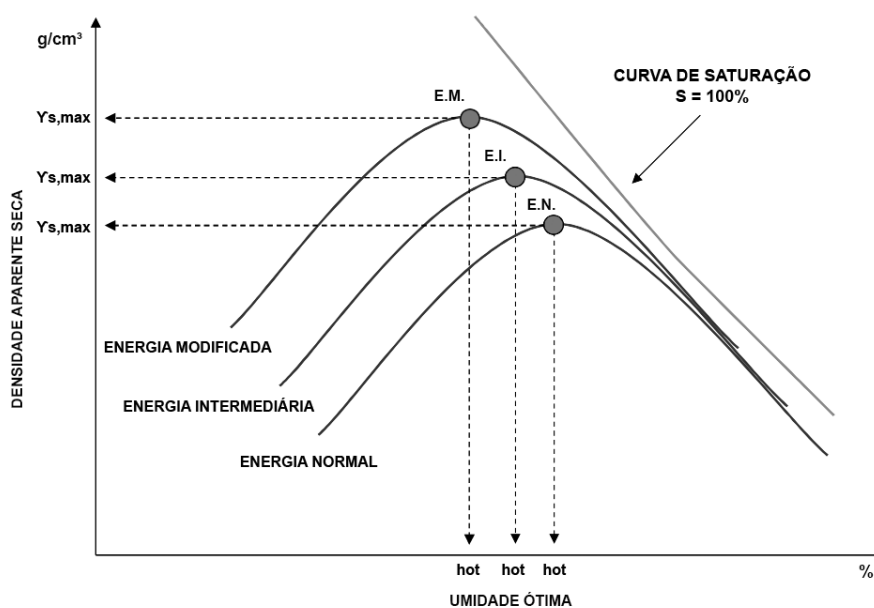
Fonte: Souza Pinto (2006)

As curvas apresentam um pico que representa a maior densidade possível, ou seja, o melhor grau de compactação possível para aquele tipo de solo. Acima deste teor de umidade as partículas ficam envoltas por água não respondendo mais a perturbação mecânica aplicada pois ocorre uma espécie de efeito ricochete nos golpes devido ao excesso de água. Quanto a energia de compactação, existem três tipos de energias referenciadas pelo ensaio: normal, intermediária e modificada (FERNANDES, 2016).

O ensaio denominado Ensaio Normal de Compactação é realizado com base na norma ABNT NBR 7182/2016.

Com diferentes energias aplicadas, curvas diferentes serão obtidas para um mesmo tipo de solo:

Figura 2.5 – Curvas para diferentes energias de compactação.



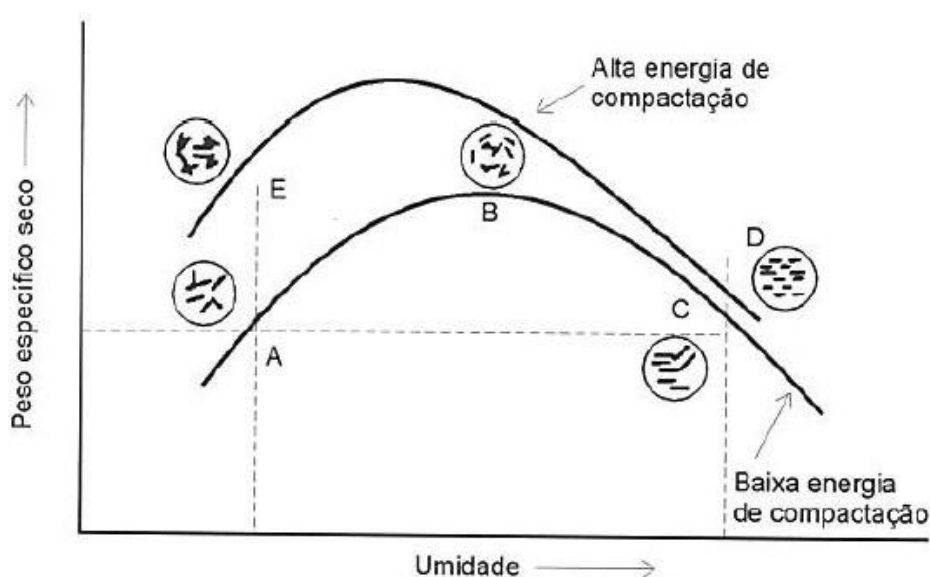
Fonte: NBR 7182 (1986)

É possível observar que existe um deslocamento para a esquerda na curva de compactação quanto maior é a energia aplicada no processo. Isso nos leva a concluir que para uma energia maior um peso específico seco maior é atingido com um menor teor de umidade (FERNANDES, 2016).

2.2 Comportamento dos solos compactados

É possível, através de uma análise da estrutura do solo compactado, fazer uma relação de sua estrutura com a permeabilidade. Graficamente, podemos ver na figura 2.6:

Figura 2.6 – Estrutura de solos compactados



Fonte: Lambe (1958) citado por Pinto (2006)

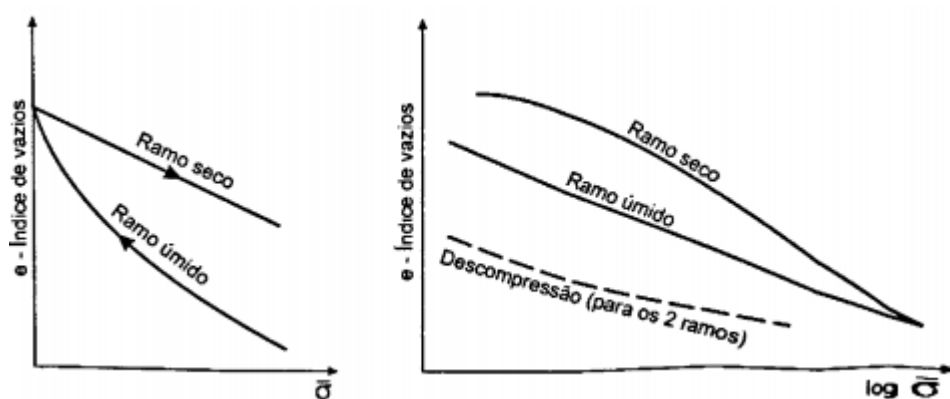
Para uma mesma umidade, a permeabilidade é inversamente proporcional ao grau de compactação do solo. Isso por que a estrutura contém um menor índice de vazios. Com a fixação da densidade, o aumento no teor de umidade causa diminuição da permeabilidade ainda que nessas condições o índice de vazios permanece constante (DAS, SOBAHN 2014).

Ao analisarmos a Figura 2.6 podemos encontrar uma explicação para isto: com o aumento da umidade a estrutura do solo tende a ser dispersa o que dificulta a percolação da água que outrora facilitada devido a estrutura com umidades menores apresentar-se floculada, estrutura essa que possui um grande índice de vazios. Essa análise nos mostra que a permeabilidade é melhor no ponto ótimo ou acima deste, no ramo úmido (MASSAD, 2010).

Ainda de acordo com Massad (2010), outra característica do solo compactado para levarmos em consideração é a sua compressibilidade. Essa característica se relaciona de maneira inversamente proporcional com a densidade e diretamente

proporcional com a umidade, como é possível ver na figura 2.7. Tanto a estrutura como tensão de sucção atuante no material proporcionam a menor compressibilidade deste.

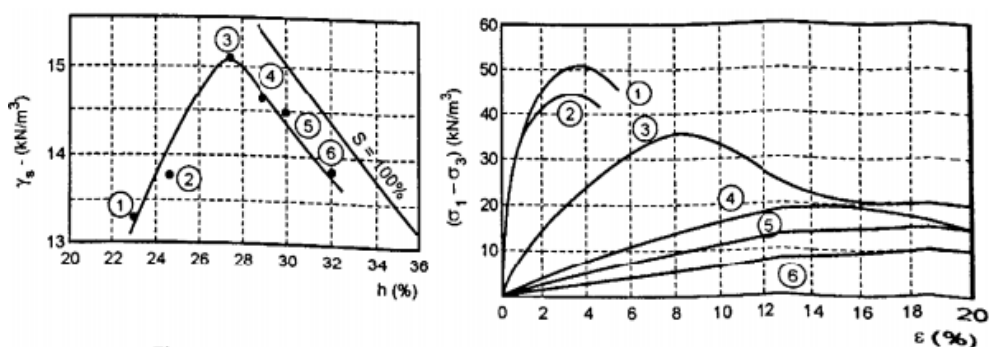
Figura 2.7 – Compressibilidade de solos compactados.



Fonte: Lambe e Whitman (1969)

Outro fator a ser analisado é a resistência ao cisalhamento. Na Figura 2.8 observamos que para o ramo úmido os máximos de resistência são menores apresentando ruptura plástica para pontos do ramo seco a ruptura é do tipo frágil, porém com uma resistência muito superior. Na figura 2.8 podemos observar esse comportamento graficamente.

Figura 2.8 – Resistência ao cisalhamento em função da umidade.



Fonte: Lambe e Whitman (1969)

2.3 Compactação em campo

Primeiro deve-se definir a área de empréstimo analisando fatores logísticos, quantidade necessária e tipo de solo a ser utilizado. Solos saturados e com matéria orgânica em excesso são indesejáveis. No que tange o espalhamento do solo, este deve ser feito levando em consideração o tipo de equipamento que será utilizado, para haja compatibilização da camada espalhada com este (FERNANDES, 2016).

De acordo com a NBR 7182/2016 é preciso também homogeneizar a umidade e quando necessário ser feito o destorroamento do solo.

Massad (2010), sugere equipamentos para cada tipo de solo, porém ressalta que são apenas indicações, devendo assim serem feitas análises mais profundas e correlações mais precisas em relação aos parâmetros para cada caso particular. Em barragens de terra, cuja responsabilidade é grande, são feitos até mesmo aterros experimentais afim de se obter a melhor análise possível. A tabela 2.2 apresenta uma sugestão para equipamentos de compactação:

Tabela 2.2 – Equipamentos de compactação.

Tipo	Solo	Modo de Compactar	Parâmetros dos equipamentos			
			e (cm)	N	v (km/h)	p ou P
Rolo pé de carneiro	Argila ou silte	De baixo para cima	20 a 25	8 a 10	≤4	2000 a 3000 kPa
Rolo pneumático	Silte, areia com finos	De cima para baixo	30 a 40	4 a 6	4 a 6	500 a 700 kPa
Rolo vibratório	Material granular	Vibração	60 a 100	2 a 4	≥ 8	50 a 100 kN

Legenda: e = Espessura da camada de solo solto

N = Número de passadas do rolo compactador
v = Velocidade do rolo compactador

p = Pressão na pata ou no pneu
P = Peso do rolo vibratório

Fonte: Massad (2010)

O controle da compactação é guiado pela especificação do desvio de umidade em relação a umidade ótima e o grau de compactação que é a razão entre a densidade seca a ser atingida em campo e a densidade seca máxima:

$$\Delta h = h_{\text{campo}} - h_{\text{ot}} \quad (2.2)$$

$$GC = \frac{\lambda_{\text{scampo}}}{\lambda_{\text{smáx}}} \quad (2.3)$$

Massad (2010), estabelece os seguintes limites para as equações 2.2 e 2.3:

$$95\% \leq GC \leq 103\%$$

$$-2\% \leq \Delta h \leq +1\%$$

Esses limites podem variar de acordo com a obra e o projetista. Segundo Mello (1975), existem três maneiras de se especificar compactação: pelo produto final; pelo método construtivo; e pelo produto final com indicações do método misto (MASSAD, 2010).

Quando pensamos na especificação pelo produto final, deve-se atentar ao conceito da obra na visão do projetista.

Já na análise a partir do método construtivo é vista sob todo o processo desde o equipamento a ser empregado até os limites físicos do aterro.

No método misto, tanto a visão do projetista, quanto do empreiteiro se mesclam com intuito de atingir a melhor versão possível para a execução.

2.4 Parâmetros Geotécnicos

O intuito da pesquisa é a correlação entre resultados do DMT com parâmetros geotécnicos. Para isso, será feita nesta seção uma revisão sobre os parâmetros que serão trabalhados ao longo deste estudo.

2.4.1 Módulo de Young

O módulo de Young, também conhecido como módulo de elasticidade, é uma relação entre a deformação elástica longitudinal do material (HIBBELER, 2009). A relação matemática é:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

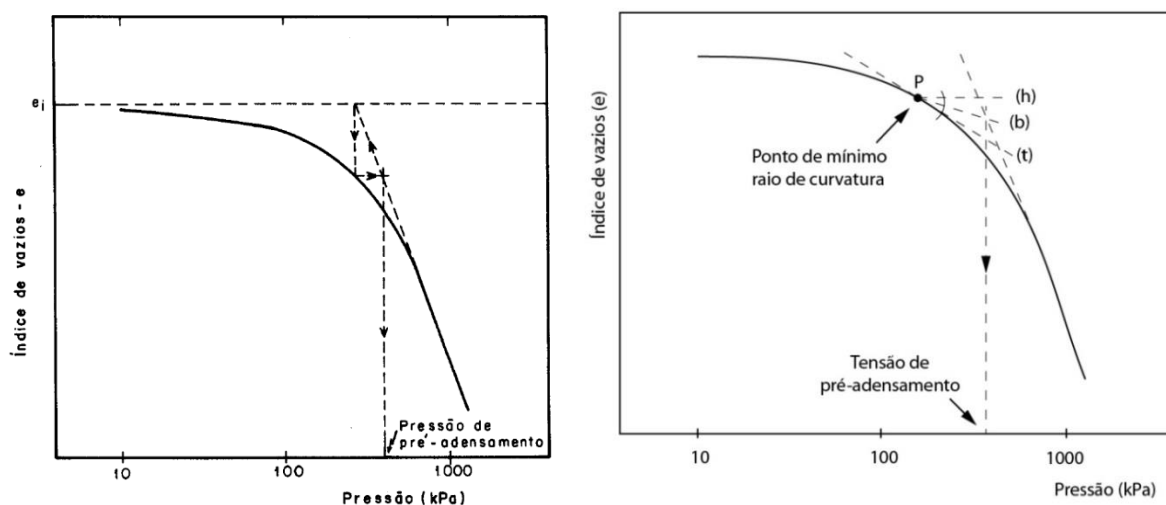
Onde E é o módulo de Young, σ é a tensão aplicada no material e ε sua deformação específica, que é a razão entre a variação do comprimento do material sobre seu comprimento inicial, resultando em uma grandeza adimensional (JOHNSTON, 2015).

2.4.2 Razão de sobre-adensamento (OCR)

Devemos encarar o solo como um material que possui memória. Devido a processos de intemperismos, o solo sofre alterações que alteram as tensões devido ao seu peso próprio (MASSAD, 2010). Segundo Terzaghi (1948), o solo é sobreadensado se em algum momento este foi submetido a uma tensão maior que a tensão existente no presente.

Para dedução da OCR, é necessário a realização do ensaio edométrico, pois a partir da curva obtida pelo ensaio é possível, através de dois métodos diferentes a obtenção da tensão de pré-adensamento. Ambos são métodos gráficos e são demonstrados na figura 2.10.

Figura 2.10 – Método de Pacheco (esquerda) e Casagrande (direita).



Fonte: Google.

O método de Pacheco consiste em prolongar a reta virgem até a reta horizontal correspondente ao índice de vazios da amostra. A partir disso, projeta – se este ponto na curva e a partir dessa projeção traça-se uma reta horizontal. Esta intersecção é a tensão de pré-adensamento. Já o método de Casagrande consiste em traçar uma reta horizontal a partir do ponto de curvatura mínimo e um prolongamento da reta virgem. Após isso, traça-se a tangente ao ponto de curvatura para obtenção do ângulo cuja intersecção da bissetriz com o prolongamento da reta virgem será a tensão de pré adensamento (PINTO, 2006).

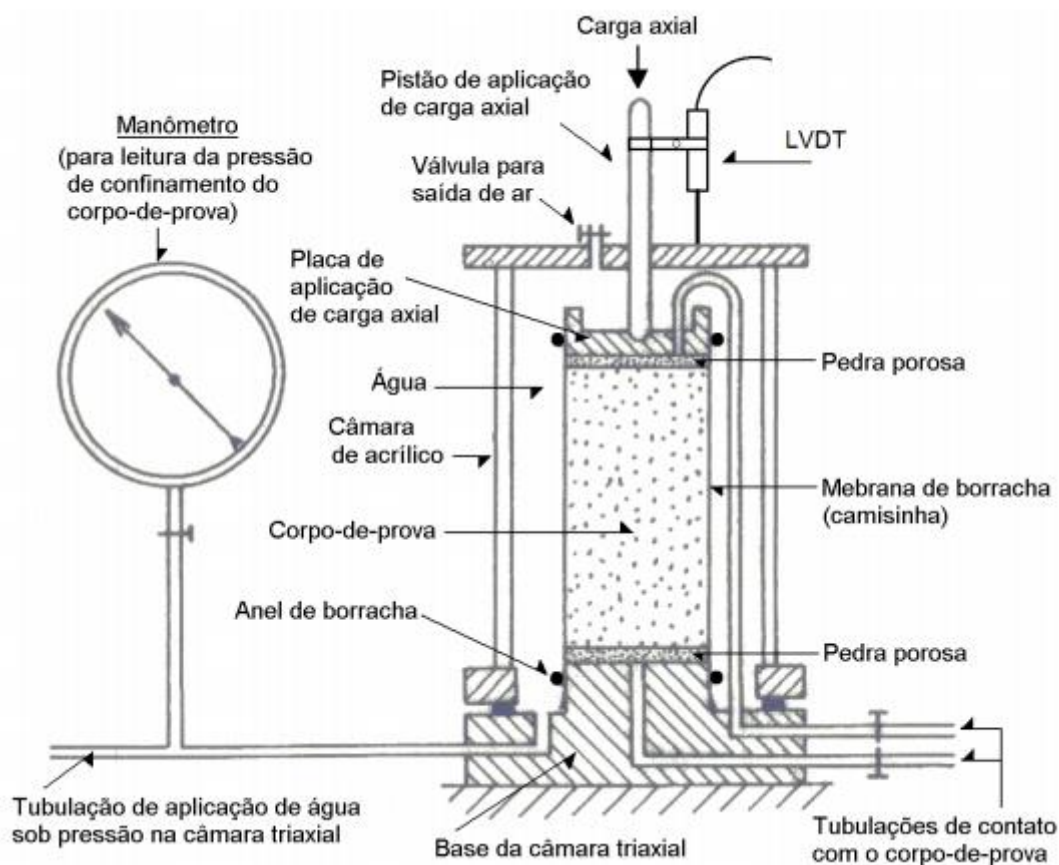
Encontrada a tensão de pré-adensamento, basta que seja feita a divisão entre esta e a tensão presente para que seja encontrada a OCR.

2.4.3 Ensaio triaxial e parâmetros

O ensaio triaxial é realizado com objetivo de obter parâmetros geotécnicos. Nesta pesquisa, sendo o parâmetro de interesse a ser obtido o ângulo atrito.

Na Figura 2.11 podemos ver o esquema do ensaio. O ensaio é realizado ao colocar o corpo de prova na câmara de confinamento, sendo este envolvido por uma membrana de borracha. O corpo de prova então é submetido a uma pressão externa exercida por fluido sendo água ou glicerina e também é aplicada uma tensão axial para que a ruptura do corpo de prova seja atingida (DAS, 2014).

Figura 2.11 – Esquema de ensaio triaxial.

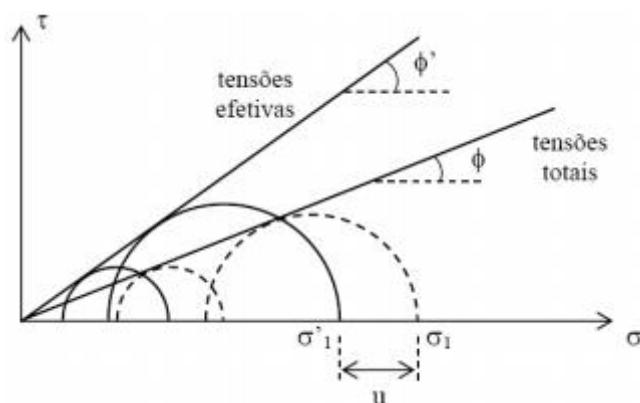


A leitura indicada no manômetro é chamada de tensão desviadora. Isso porque o corpo de prova está submetido a tensão axial, da célula de compressão e também a tensão de confinamento, exercida pela fluido na câmara. Essa tensão de desvio é o diâmetro do círculo de Mohr, utilizado para análise de parâmetros geotécnicos. Para cada tensão confinante, um círculo diferente é obtido, sendo possível então traçar uma reta que tangencia os círculos. A tangente deste círculo será o ângulo de atrito do solo analisado.

2.4.4 Ângulo de Atrito

O ângulo de atrito é um dado que estima as características de resistência de contato entre as partículas de solo. É possível estimar o ângulo de atrito através do ensaio de compressão triaxial, sendo este a tangente comum dos círculos obtidos através do ensaio, como visto na figura 2.12.

Figura 2.12 – Esquema de ensaio triaxial.



Fonte: Das (2007).

2.5 Dilatômetro de Marchetti

O dilatômetro de Marchetti foi proposto por Silvano Marchetti, na Universidade de L'Áquila em 1975. Inicialmente a proposição deste ensaio tinha como objeto a obtenção dos valores do módulo de elasticidade do solo E relacionado ao comportamento de estacas cravadas que sofriam ação de esforços horizontais, porém foi vislumbrado pelo professor Silvano Marchetti a correlação entre vários parâmetros geotécnicos (KRUEGER, 2008).

As normatizações referentes aos ensaios são da ASTM que em 1986 padronizou o ensaio e posteriormente na Europa, em 1995, também foi criada uma padronização para o DMT (CEN/TC 250/SC). No Brasil, de acordo com Schnaid (2000) não há normalização específica para o ensaio. Existem revisões além da norma citada para o DMT: Marchetti (1980, 1997); Schmertmann (1986); Lutenneger (1998); Lunne, Lacasse e Rad (1989); Coutinho, Bello e Pereira (2006); Giacheti et al. (2006b); Cruz, Devincenzi e Viana da Fonseca e Mayne (2006a) (SCHNAID, 2012).

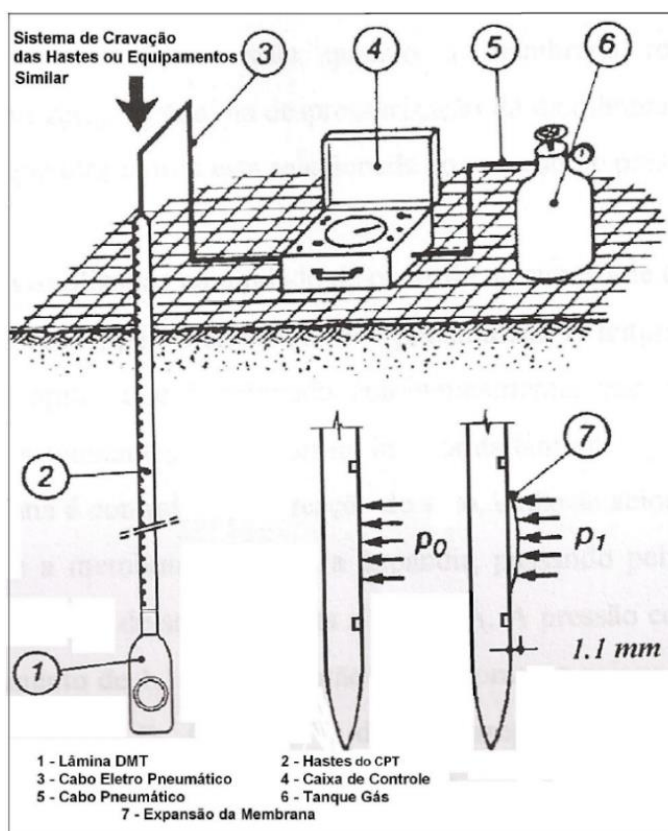
Em 2016 foi desenvolvido na Itália, no Studio Marchetti o DMT Medusa. O DMT Medusa registra de maneira contínua a leitura de pressão ao passo que a membrana se expande, diferente da leitura tradicional que é aferida apenas nas posições A e B (NABAES, 2020).

2.5.1 Equipamentos e etapas do ensaio

Na figura 2.13 podemos ver o esquema do ensaio e seus equipamentos. Os equipamentos são:

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

Figura 2.13 – Equipamentos DMT.

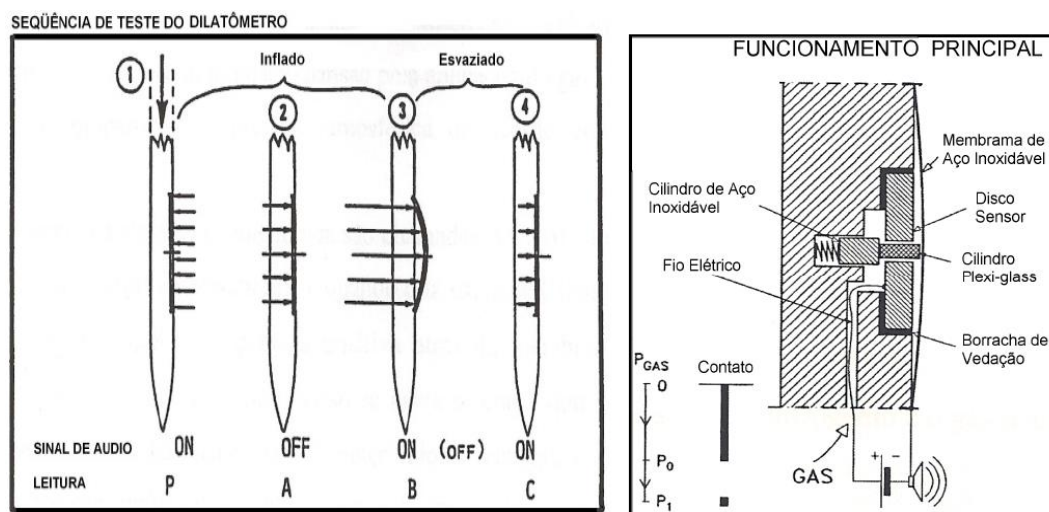


Fonte: Marchetti (1980).

A lâmina DMT é constituída por aço inoxidável de 230 a 240 mm e possui uma membrana metálica circular de 60 mm de diâmetro montada em uma das faces. O fornecimento de energia se dá pelo cabo eletro pneumático que também controla a

pressão do gás. Um fio atravessa internamente a lâmina e segue até a parte traseira da membrana, onde existe um rebaixo na lâmina para acomodação do disco sensor (KRUEGER, 2008). A Figura 2.13 nos mostra as etapas de funcionamento da membrana.

Figura 2.14 – Funcionamento da membrana



Fonte: Marchetti (1980).

O ensaio consiste na cravação da lâmina, avançando-a até a profundidade desejada. Atingida a profundidade, são realizadas as leituras das pressões A e B, que permitem o cálculo de parâmetros geotécnicos.

No primeiro estágio o contato da membrana com o espaçador do disco sensor a uma distância de 0,05 mm confere a condição de ligado para o sinal. No segundo estágio o sinal é dado desligado pois não há contato e o circuito é interrompido. Na terceira condição, com o sinal ligado devido ao contato com o disco sensor reativando o sinal e com a extremidade do cilindro distando 1,1 mm do disco sensor (KRUEGER, 2008).

Com relação a velocidade da inserção da lâmina existem divergências nas literaturas de referência do ensaio. No state of the art. Schmertmann (1986) as velocidades recomendadas diferem-se para solos diferentes: 1 a 10 cm/s para areias enquanto para siltes e argilas velocidades de 1 a 3 cm/s. Já Lacasse & Lunne (1988) recomendam 2 cm/s para todos os tipos de solo. Outra referência é também a ASTM D 6635 – 01 presume uma velocidade 1 a 3 cm/s.

Após a cravação é aberta de maneira gradual a válvula de controle de fluxo que permite a expansão horizontal da membrana fornecendo a pressão P_a , que quando corrigida se torna p_0 . A pressão P_a corresponde a um deslocamento de 0,05 mm da membrana. Com a válvula aberta e a membrana ainda em movimento horizontal é feita a segunda leitura, logo que a membrana atinja o deslocamento de 1,1 mm. Essa leitura é P_b , feita de 15 a 30 segundos após P_a , que corrigida se torna p_1 . Como opção pode-se realizar uma leitura P_c onde ventila-se a pressão até a interrupção do sinal de P_b e em seguida despressurizando lentamente até a reativação do sinal, quando a membrana retorna ao deslocamento de 0,05 mm. Corrige-se então P_c para obter-se p_2 (SCHNAID, 2000).

A sequência desde ensaio até obtenção de parâmetros geotécnicos, em ordem, é:

1. Realização do ensaio DMT e leitura das pressões P_a e P_b .
2. Correção das leituras P_a e P_b para p_0 e p_1 .
3. Obtenção de Índices Dilatométricos.
4. Estimativa de parâmetros geotécnicos através de correlações de índices dilatométricos.

2.5.2 Correção das leituras e índices dilatométricos

Para as correções das pressões, as fórmulas segundo Briaud e Miran (1992) são:

$$p_0 = A - zm + \Delta A \quad (2.5)$$

$$p_1 = B - zm - \Delta B \quad (2.6)$$

$$p_2 = C - Z - \Delta A \quad (2.7)$$

As variáveis são:

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 = pressão lida quando o equipamento está na pressão atmosférica;

Com os valores p_0 e p_1 é possível determinar parâmetros geotécnicos. Sendo $\Delta p = p_1 - p_0$, u_0 a poro pressão hidrostática antes da cravação da lâmina no solo, σ'_v a tensão vertical efetiva:

2.5.2.1 Módulo dilatométrico

Sendo E_d o módulo dilatométrico e Δp a diferença entre pressões p_0 e p_1 :

$$E_d = 38,2 \Delta p \quad (2.8)$$

Considerando a teoria da elasticidade (GRAVESEN, 1960) e considerando a lâmina como plano de simetria a expansão da membrana pode ser considerada como carregamento flexível de uma área circular. A limitação desse índice se dá devido as dimensões da membrana que permitem a movimentação de solo apenas no entorno da membrana. Esse índice é utilizável apenas em conjunto de I_d e K_d devido a este não possuir memória de tensões.

2.5.2.2 Índice de material

Sendo I_d o índice de material, Δp novamente a diferença de pressões p_0 e p_1 e u_0 a poro pressão inicial:

$$I_d = \frac{\Delta p}{p_0 - u_0} \quad (2.9)$$

O Índice de material está relacionado as dimensões e a rigidez do material. Para solos usuais (areia e argila) ele proporciona uma descrição razoável do solo (KRUEGER, 2008):

Argilas $0,1 < I_d < 0,6$

Silte $0,6 < I_d < 1,8$

Areias $< 1,8$

Percebe-se que por serem mais deformáveis as argilas apresentam um I_d menor, o que mostra a relação entre este parâmetro e a rigidez já que pela característica mencionada anteriormente a diferença de pressão para os deslocamentos necessários da membrana será menor do que para solos mais rígidos.

2.5.2.3 Índice de tensão horizontal

Sendo K_d o índice de tensão horizontal, u_0 novamente a poro pressão inicial e σ'_v a tensão vertical efetiva:

$$K_d = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_v} \quad (2.10)$$

Este índice está relacionado a propriedades como densidade relativa e o potencial de liquefação em areias, o coeficiente de pressão lateral de terra, módulo tangente a compressão confinada M e a coesão não drenada em argilas S_u .

2.5.3 Estimativa de parâmetros geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos estimados pelo DMT são correlações empíricas, sendo necessário aplicar correções para obter-se tais parâmetros.

2.5.3.1 Módulo De Young

Tal qual o módulo oedométrico o módulo de Young também é obtido através da multiplicação de um fator de correção F pelo módulo dilatométrico E_d (KRUEGER, 2008):

$$E = F \times E_d \quad (2.11)$$

O valor de F é obtido na tabela 2.2, sendo este função do tipo de solo e do módulo secante inicial ou secante a 25%:

Tabela 2.2 – Valores do fator de correção F

Tipo de Solo	Módulo	F	Referência
Coesivo	E_i	10	Robertson et al. (1989)
Areia	E_i	2	Robertson et al. (1989)
Areia	E_{25}	1	Campanella et al. (1985)
Areia NA	E_{25}	0,85	Baldi et al. (1986)
Areia PA	E_{25}	3,5	Baldi et al. (1986)

Fonte: Robertson (1989) e Baldi (1986)

2.5.3.2 Razão de pré-adensamento em Argilas

Restringindo os tipos de solo para argilas não cimentadas e com a faixa de valores $0,2 < I_d < 2$ (MARCHETTI, 1980).

$$OCR = (0,5 \times K_d)^{1,56} \quad (2.12)$$

Marchetti & Crapps (1981) reformularam a equação desenvolvendo outras 3 para a mesma faixa de valores de 2.14:

$$I_d < 1,2 \quad OCR = (0,5 \times K_d)^{1,56} \quad (2.13)$$

$$I_d > 2 \quad OCR = (0,67 \times K_d)^{1,91} \quad (2.14)$$

$$1,2 < I_d < 2 \quad OCR = (m \times K_d)^n \quad (2.15)$$

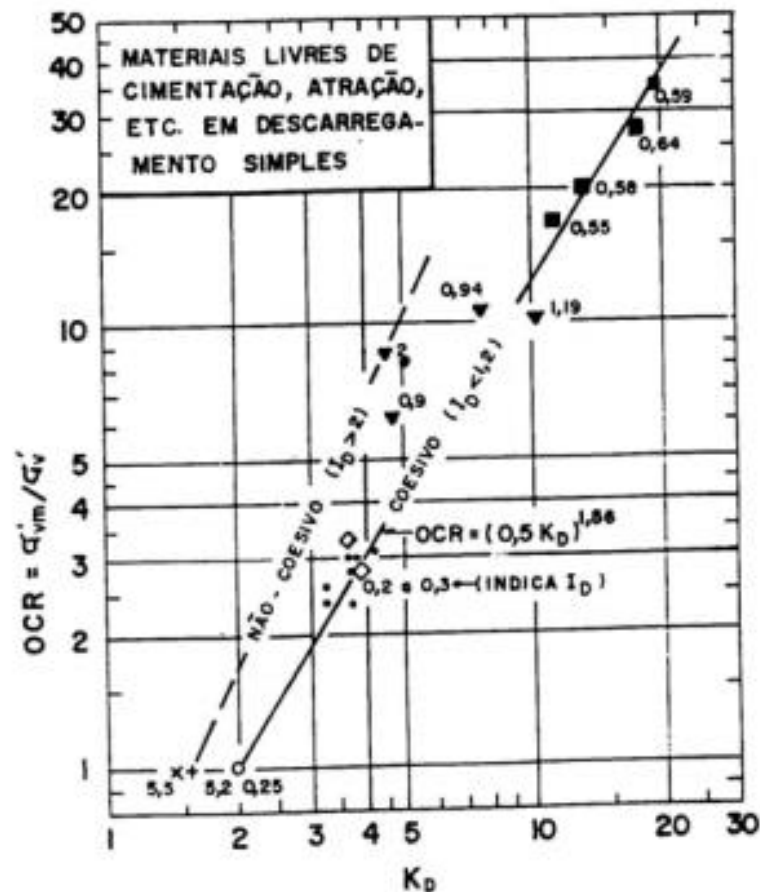
Com m sendo:

$$M = 0,5 + 0,17 \times P \quad (2.16)$$

$$N = 1,56 + 0,35 \times P \quad (2.17)$$

$$P = \frac{I_d - 1,2}{0,8} \quad (2.18)$$

Figura 2.15 – OCR em função de K_d



Fonte: Vieira (1994)

2.5.3.3 OCR em areias

Mensurar OCR em areias é mais difícil do que em argilas. Nas argilas a OCR está relacionada com remoção de tensões verticais enquanto nas areias é fruto de

uma complexa história de carregamentos, incluindo cimentação (KRUEGER, 2008). O método para OCR em areias sugerido por Schmertmann (1988) que correlaciona o coeficiente de tensão lateral K_o e do ângulo de atrito assimétrico Φ'_{ax} , que são obtidos pelo DMT.

$$OCR = \left(\frac{K_o}{1 - \sin \Phi'_{ax}} \right)^{\left(\frac{1}{0,8 \sin \Phi'_{ax}} \right)} \quad (2.19)$$

2.5.3.4 Ângulo de atrito

A extração deste parâmetro pelo ensaio dilatométrico é limitada. Em Marchetti & Crapps (1981) foi proposta uma equação correlacionando ângulo de atrito com dois índices dilatométricos (I_d e E_d) válida apenas para $I_d > 1,2$.

$$\Phi' = 25 + 0,19 \times \sqrt{I_d \times R_c - 100} \quad (2.20)$$

Sendo:

$$R_c = \frac{500 + (R - 500)}{1 + ((R - 500)/1500)} \text{ para } R > 500 \text{ e } \sigma'_v < 50 \text{ kPa} \quad (2.21)$$

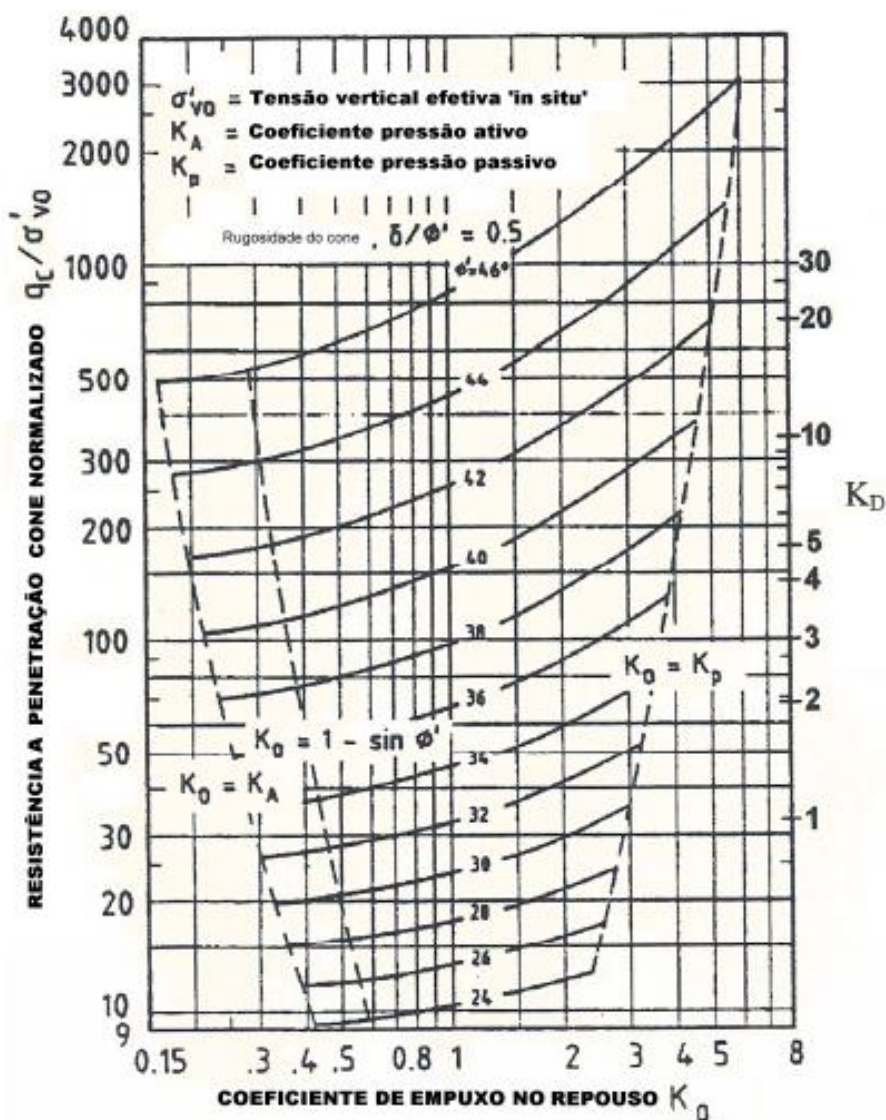
$$R_c = R \text{ se } R < 500 \text{ e } \sigma'_v > 50 \text{ kPa} \quad (2.22)$$

$$R = \frac{E_d}{\sigma'_v} \quad (2.23)$$

Um outro método proposto por Marchetti (1997) sendo autoria dele mesmo utiliza o ábaco modificado por Campanella & Robertson (1991), apresentando a equação:

$$\Phi = 28 + 14,6 \times \log K_d - 2,1 \log^2 K_d \quad (2.24)$$

Figura 2.16 – Ábaco proposto por Campanella e Robertson (1991) para avaliação de K_D através de ϕ e K_0 em areias não cimentadas.



Fonte: Campanella e Robertson (1991)

2.5.3.5 Classificação do material

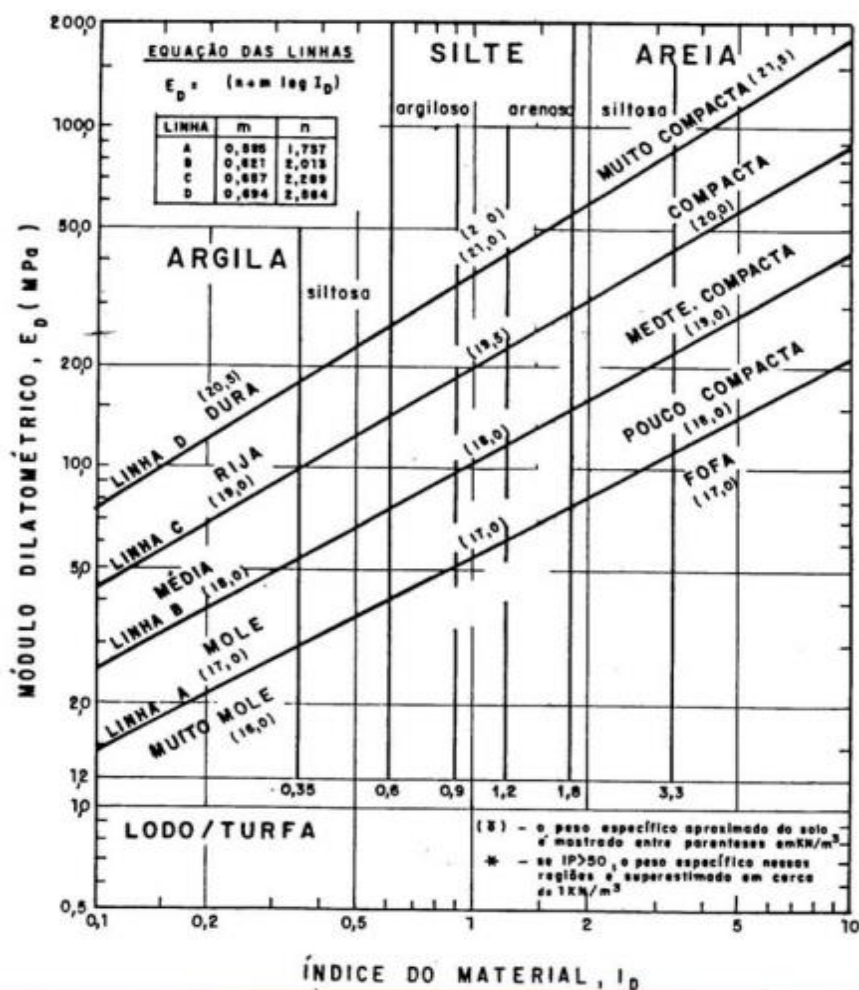
Uma classificação de solos com base no I_d foi proposta por Marchetti (1980). Vieira (1994) propôs a Tabela 2.1 baseada em I_d :

Tabela 2.1 – Classificação de solos em função de I_d

Turfa ou argilas sensíveis	Argilas		Silte			Areia	
		siltosa	argiloso		arenoso	siltosa	
I_d	0,1	0,35	0,6	0,9	1,2	1,8	3,3

Fonte: Marchetti 1980

Com base na Tabela 2.1, Marchetti & Crapps (1981) complementaram a classificação através de um ábaco que contempla também o peso específico do material.

Figura 2.17 – Gráfico para classificação e peso específico em função de I_d e E_d (adaptada de Marchetti e Crapps, 1981, por Vieira 1994).

Fonte: Marchetti (1980).

2.5.4 DMT em pesquisas

Para realização deste trabalho, outras fontes de estudo que tinham o DMT como centro, foram estudadas com intuito de adquirir uma visão mais abrangente sobre o ensaio e suas possibilidades. Na tabela 2.3, são apresentados trabalhos que motivaram a realização deste trabalho.

Tabela 2.3 – Referências de estudo

Título	Ano	Autor	Publicação
Uso do DMT na avaliação de maciços compactados	2008	Ângela Custódia Guimarães Queiroz	UnB
Ensaio DMT na caracterização e estimativa de recalques de fundações superficiais em solo tropical arenoso	2016	Breno Padovezi Rocha, Heraldo Luiz Giacheti	COMBRAMSE G
Ensaio Dilatométricos – DMT em solos de Santa Catarina: Estudo comparativo com CPT e SPT	2008	Fábio Krueger da Silva	UFSC
Influência da Sucção nos Resultados dos Ensaio de Dilatômetro de Marchetti (DMT) em um Solo Residual Compactado	2018	Cândida Bernardi, Orlando Martini de Oliveira, Murilo da Silva Espíndola, Gabriel Bellina Nunes, Rafael Reis Higashi	COMBRAMSE G

Fonte: Autor.

2.5.4.1 Uso do DMT na avaliação de maciços compactados

Este estudo se trata de uma dissertação de mestrado, aonde foram feitas correlações dos índices dilatométricos com parâmetros geotécnicos obtidos em laboratório. O local estudado foi a barragem João Leite, localizada em Goiânia – GO. A pesquisa ressalta a importância de uma continuidade para a avaliação proposta, visto que muitas correlações são empíricas.

2.5.4.2 Ensaio DMT na caracterização e estimativa de recalques de fundações superficiais em solo tropical arenoso

Nesta pesquisa foi utilizado o módulo dilatométrico, que é obtido de maneira indireta, para a estimativa de recalque. Além do módulo dilatométrico, o índice de material e o coeficiente de tensão horizontal também são utilizados como fatores de correção para este cálculo. O estudo além de mostrar mais uma possibilidade para a utilização do DMT, conclui a necessidade da análise de sucção dos solos em campo.

2.5.4.3 Ensaios Dilatométricos: DMT em solos de Santa Catarina: Estudo comparativo com CPT e SPT

Para o estudo realizado por Fábio Krueger da Silva, foi feita uma comparação entre parâmetros geotécnicos obtidos por dois ensaios diferentes: o CPT e o DMT. O estudo conclui a necessidade de pesquisas para o uso do DMT, já que este é um ensaio que não é usual no Brasil justamente por falta de referências tanto normativas quanto bibliográficas.

2.5.4.4 Influência da Sucção nos Resultados dos Ensaios de Dilatômetro de Marchetti (DMT) em um Solo Residual Compactado

Este estudo atesta a capacidade do DMT em analisar a influência da sucção dos solos, através de comparações para diferentes situações, aonde em um ensaio o solo estava saturado e o outro estava submetido a pressão da sucção.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção visa a descrição dos ensaios realizados para a aquisição dos dados a serem analisados neste estudo. Estes foram oriundos de outra pesquisa, na qual os dados não foram publicados. A campanha teve início em 19 de junho de 2007, aonde foi fruto de uma parceria entre a Universidade de Brasília, em seu programa de pós graduação em Geotecnia, e pela empresa Furnas Centrais Elétricas AS.

3.1 Local analisado

O aterro compactado utilizado como local de estudo localiza-se em um terreno da distribuidora Megafort, próximo ao anel viário de Goiânia, como vemos na figura 3.1

Figura 3.1 – Localização da área estudada.



Fonte: Google Maps

Além do ensaio DMT, foi aberto um poço para a coleta de amostras deformadas e indeformadas que foram utilizadas para os ensaios de laboratório.

3.2 Ensaios de Laboratório

O poço do qual foram retiradas as amostras para os ensaios, possuía 3,5 m de profundidade e diâmetro de 1,10 m. O material coletado consistia em amostras deformadas nas seguintes profundidades: 0 a 0,5 m; 0,5 a 1,0 m; 1 a 1,3 m; 1,3 a 2 m; 2 a 2,3 m; 2,3 a 3 m; 3 a 3,5 m. As duas primeiras coletas foram feitas devido a heterogeneidade de suas camadas.

Os ensaios de laboratório referentes aos dados necessários para a análise proposta são: caracterização geotécnica, compactação, adensamento oedométrico, triaxial.

3.2.1 Caracterização Geotécnica

3.2.1.1 Umidade

Para este ensaio foi utilizada como referência a NBR 6457/1986, efetuando a média de 3 determinações.

3.2.1.2 Peso específico aparente

O peso específico aparente foi calculado com base na norma NBR 2887/1988, sendo o material utilizado os pequenos blocos coletados a cada 20 cm. As incógnitas γ_d , γ_h , h são: peso específico seco, peso específico natural e teor de umidade da amostra em porcentagem.

$$\gamma_d = \gamma_h \times \frac{100}{100 + h} \quad (3.1)$$

3.2.1.3 Peso específico dos sólidos

O peso específico dos sólidos é calculado com base na NBR 6508/1984. As variáveis m_1 , m_2 , m_3 e h são, respectivamente: massa do solo úmido, massa do picnômetro + solo + água na temperatura do ensaio, massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência na temperatura do ensaio e umidade inicial da amostra. Na figura 3.2 vemos o esquema de realização do ensaio:

Figura 3.2 – Peso específico dos sólidos



Fonte: Furnas / UNB (2007)

$$\gamma_d = \frac{m_1 \times 100 / (100 + h)}{\left[m_1 \times \frac{100}{100 + h} \right] + m_3 - m_2} \quad (3.2)$$

3.2.1.4 Índices de consistência w_l , w_p e I_p

Os índices de consistência w_l e w_p , que são limites de liquidez e plasticidade respectivamente, são obtidos através do procedimento descrito pelas normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984. Por fim, o índice de plasticidade I_p se dá pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Nas figuras 3.3 e 3.4 é possível ver como se dá a realização do ensaio:

Figura 3.3 – Ensaio do limite de liquidez



Fonte: Furnas / UNB (2007)

Figura 3.4 – Ensaio do limite de plasticidade



Fonte: Furnas / UNB (2007)

3.2.1.5 Índices físicos

Com os resultados obtidos dos ensaios de laboratório foi possível determinar os seguintes índices físicos: Índice de atividade (I_a), índice de vazios (e), porosidade (n) e grau de saturação (S_r).

Onde I_p é o índice de plasticidade e $\% < 2 \mu m$ é a fração de argila do solo na equação 3.3. Para o índice de vazios γ_s é o peso específico dos grãos e γ_d é o peso específico seco. Já para o grau de saturação γ_s é o peso específico, γ_w é o peso específico da água e w é a umidade da amostra em porcentagem.

$$I_a = \frac{I_p}{\% < 2 \mu m} \quad (3.3)$$

$$e = (\gamma_s / \gamma_d) - 1 \quad (3.4)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (3.5)$$

$$S_r = \frac{\gamma_s * w}{e * \gamma_w} \quad (3.6)$$

3.2.2 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a norma NBR 7181/1984, sendo feitos peneiramento e sedimentação. Na pesquisa utilizada como referência deste trabalho, foram realizados dois ensaios de sedimentação, um com água destilada e outro com defloculante.

3.2.3 Compactação

O ensaio de compactação possui duas etapas: a coleta da amostra para ensaio e o ensaio de fato. A coleta é descrita pela norma NBR 6457/1986, desde a secagem até a umidade higroscópica.

Já o ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182/1986, sendo as amostras coletadas a cada metro, sem reuso de material e adotando a energia Proctor Normal. Na figura 3.5 vemos a execução dos golpes durante o ensaio de compactação:

Figura 3.5 – Ensaio de compactação



Fonte: Furnas / UNB (2007)

3.2.4 Ensaios Oedométricos

Os ensaios oedométricos foram realizados com a finalidade de se mensurar a razão de sobre adensamento OCR. Para os ensaios foram utilizados corpos de prova moldados a partir das amostras indeformadas com dimensões de 10 cm e 30 cm, para diâmetro e altura, respectivamente.

Figura 3.6 – Ensaio Oedométrico



Fonte: Furnas / UNB (2007)

Para o ciclo de carregamento foram realizados os seguintes estágios de tensão, em kPa: 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600. Já para o descarregamento foram realizados: 1600, 800, 200, 50 e 12.5.

Com o gráfico traçado obtemos os parâmetros necessários para o cálculo de M , que são o índice de vazios inicial e o coeficiente de compressibilidade:

$$\alpha_v = \frac{de}{d\sigma} \quad (3.8)$$

$$m_v = \frac{\alpha_v}{1 + e_0} \quad (3.9)$$

$$M = \frac{1}{m_v} \quad (3.10)$$

3.2.5 Ensaios Triaxiais

Os ensaios triaxiais realizados seguiram os preceitos da American Society for Testing and Materials. Os ensaios tinham como finalidade obter-se os parâmetros de

coesão (argilas), ângulo de atrito (areias) e módulo de deformabilidade para condições natural e saturada.

Os corpos de prova utilizados foram moldados a partir das amostras indeformadas coletadas nas profundidades 1, 2 e 3 m. As amostras possuíam as seguintes dimensões: 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

3.2.5.1 Ensaio de compressão Triaxial Adensado e Não - Drenado (CU)

Neste ensaio, os corpos de prova utilizados estavam em condição de umidade natural e saturada e adensados e foram rompidos em condição não drenada.

3.3 Ensaaios DMT

Para o cálculo dos parâmetros geotécnicos do solo estudado, foram feitos 4 ensaios dilatométricos (DMT), atingindo uma profundidade média de 4 m, que era a altura do aterro compactado em estudo. Em sua execução, foram seguidos os preceitos do manual Flat Dilatometer Manual, de Marchetti e Crapps (1981). Na figura 3.7 vemos a caixa de controle e a realização do ensaio DMT.

Figura 3.7 – Ensaio DMT e Caixa de controle DMT



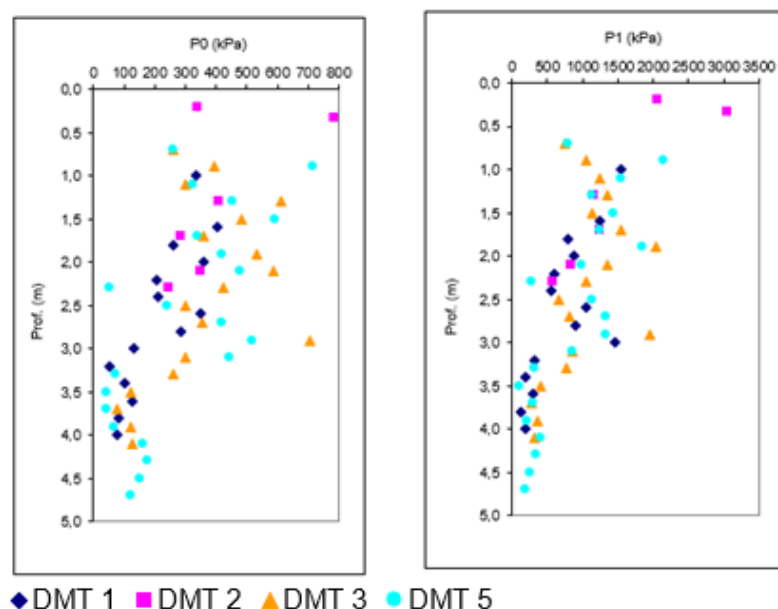
Fonte: Furnas / UNB (2007)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 DMT

A figura 4.1 apresenta os resultados corrigidos das leituras P_a e P_b , que são P_0 e P_1 . O DMT 4 apresentou impossibilidade de obtenção de resultados devido a quantidade de pedregulhos no local do furo. É observada uma tendência de decréscimo de pressões com aumento da profundidade, isso devido ao material das camadas superiores ser compactado, portanto apresentando maior rigidez.

Figura 4.1 – Leituras do dilatômetro.

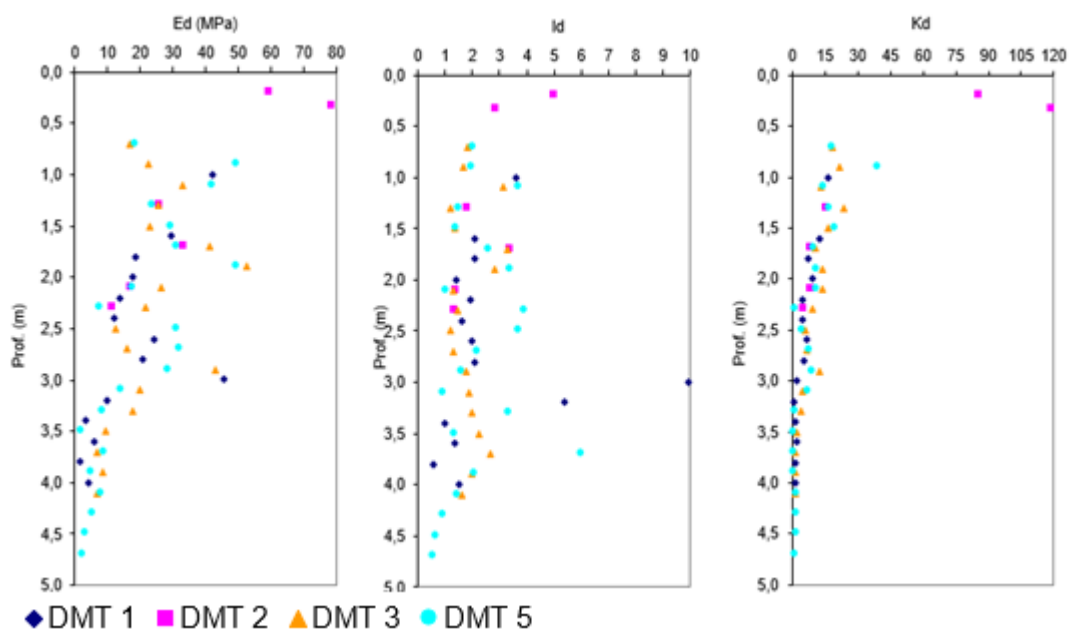


Fonte: Furnas / UNB (2007)

Os Índices dilatométricos também apresentam decréscimo de valores com o aumento da profundidade já que estes dependem dos valores das pressões lidas durante o DMT, como visto na figura 4.2.

É possível observar também que dentre os três índices dilatométricos, aquele cuja dispersão de valores se apresentou menor foi relativo ao índice de tensão horizontal. Isso pode ser explicado devido a este parâmetro depender apenas de p_0 , cuja leitura sempre apresentou menor variação de valores quando comparada a p_1 .

Figura 4.2 – Índices Dilatométricos



Fonte: Furnas / UNB (2007)

4.2 Caracterização Geotécnica

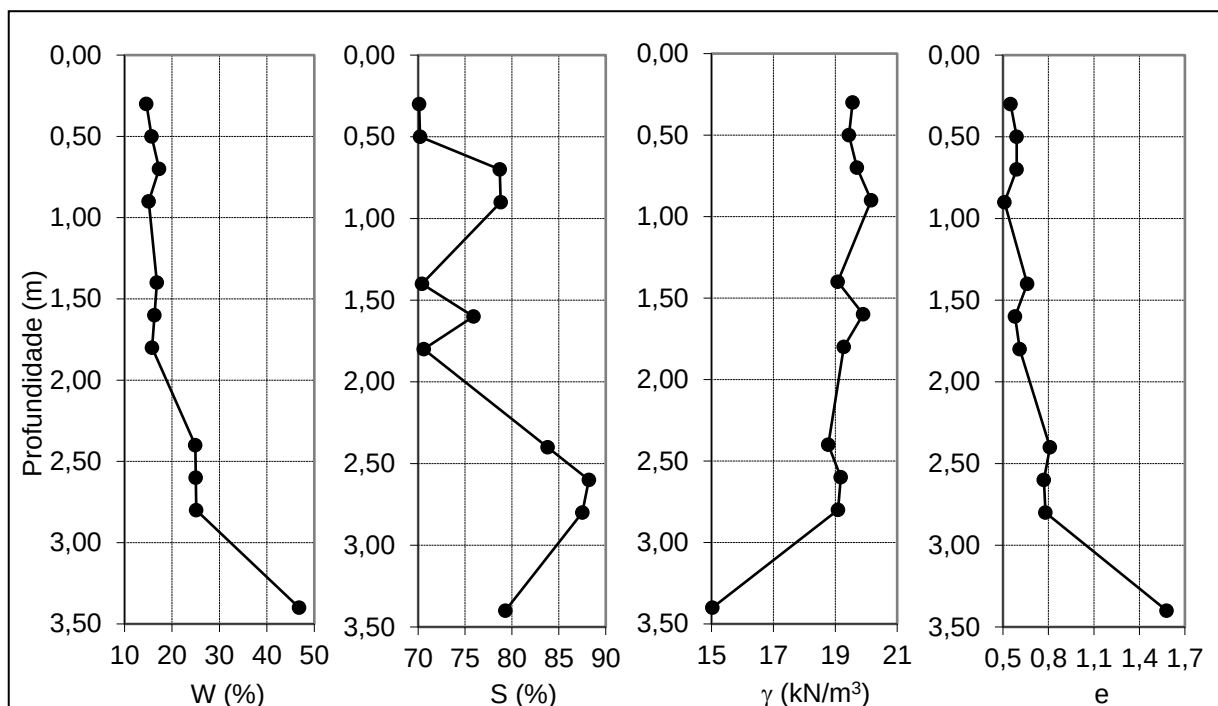
Os índices físicos obtidos em laboratório são apresentados na Tabela 4.1, para as diferentes profundidades. A figura 4.3 resume graficamente os índices físicos de umidade, saturação, peso específico natural e índice de vazios.

Tabela 4.1 – Índices físicos

Profundidade	γ (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	e	n (%)	Sr (%)
0,3	19,6	14,6	17,0	26,4	0,6	35,5	70,1
0,5	19,4	15,7	16,6	26,4	0,6	37,1	70,2
0,7	19,7	17,3	16,9	26,8	0,6	37,1	78,7
0,9	20,2	15,1	17,7	26,8	0,5	34,0	78,8
1,4	19,1	16,8	16,6	27,5	0,7	39,6	70,4
1,6	19,9	16,3	17,1	27,1	0,6	36,8	75,9
1,8	19,3	15,8	16,9	27,1	0,6	37,7	70,6
2,4	18,8	24,9	15,1	27,3	0,8	44,7	83,8
2,6	19,2	25,0	15,3	27,1	0,8	43,5	88,2
2,8	19,1	25,1	15,3	27,1	0,8	43,8	87,5
3,4	15,0	46,8	10,4	26,8	1,6	61,3	79,3

Fonte: Furnas / UNB (2007)

Figura 4.3 – Índices físicos



Fonte: Furnas / UNB (2007)

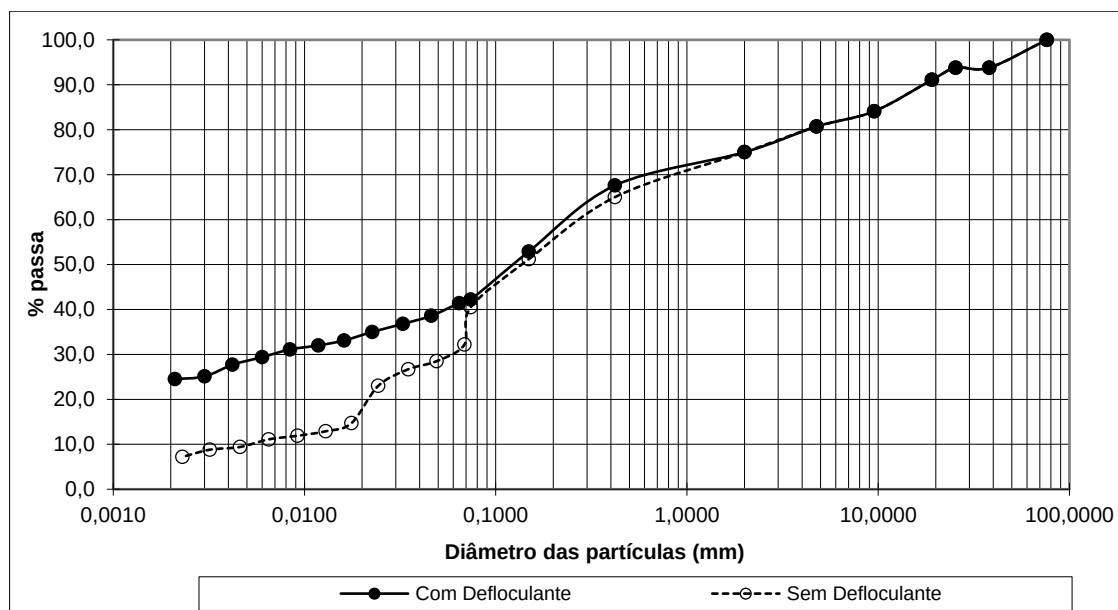
Analisando os valores da tabela 4.1, nota-se que a umidade permanece, até a profundidade de 2,4 em uma faixa de 14,6 até 17,3. Abaixo desta, seu percentual aumenta, ainda mantendo homogeneidade até a profundidade de 2,8 m. Em relação ao peso específico seco γ_d , seu único ponto de destoamento se encontra na profundidade 3,4 aonde atinge o valor de 10,4 kN/m³. Não apenas para esse parâmetro, como também para o restante, esta profundidade foi ponto de inflexão para os valores obtidos de todos os índices geotécnicos. Outro ponto em comum para alteração brusca de valores é na profundidade 1,8 m para umidade, porosidade e saturação.

O peso específico natural γ sofre variação significativa apenas na profundidade 3,5 m, sendo que para as profundidades restantes este valor fica muito próximo de 19 kN/m³.

A análise granulométrica foi feita com e sem defloculante, sendo possível perceber a tendência de agregação do material através da acentuação das curvas.

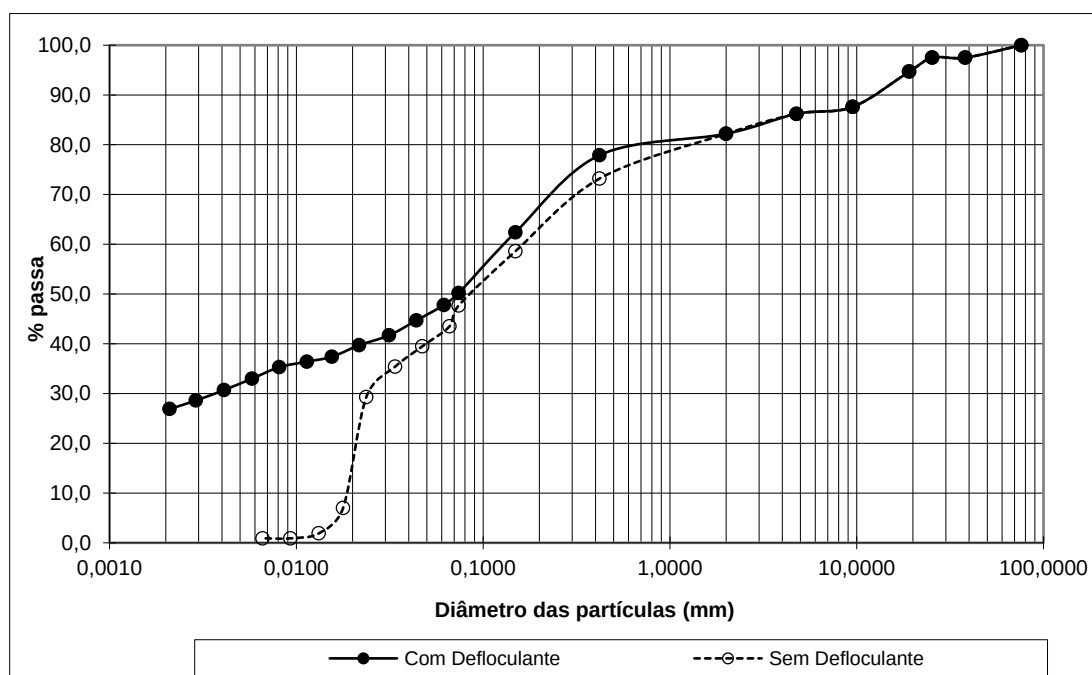
De acordo com Pinto (2006), quanto mais a curva granulométrica se aproxima do formato “S”, mais bem graduado é o solo. Esse formato “S” é observado em todas as curvas, apresentadas nas figuras de 4.4 até 4.10.

Figura 4.4 – Curvas Granulométricas 0 a 0,5 m



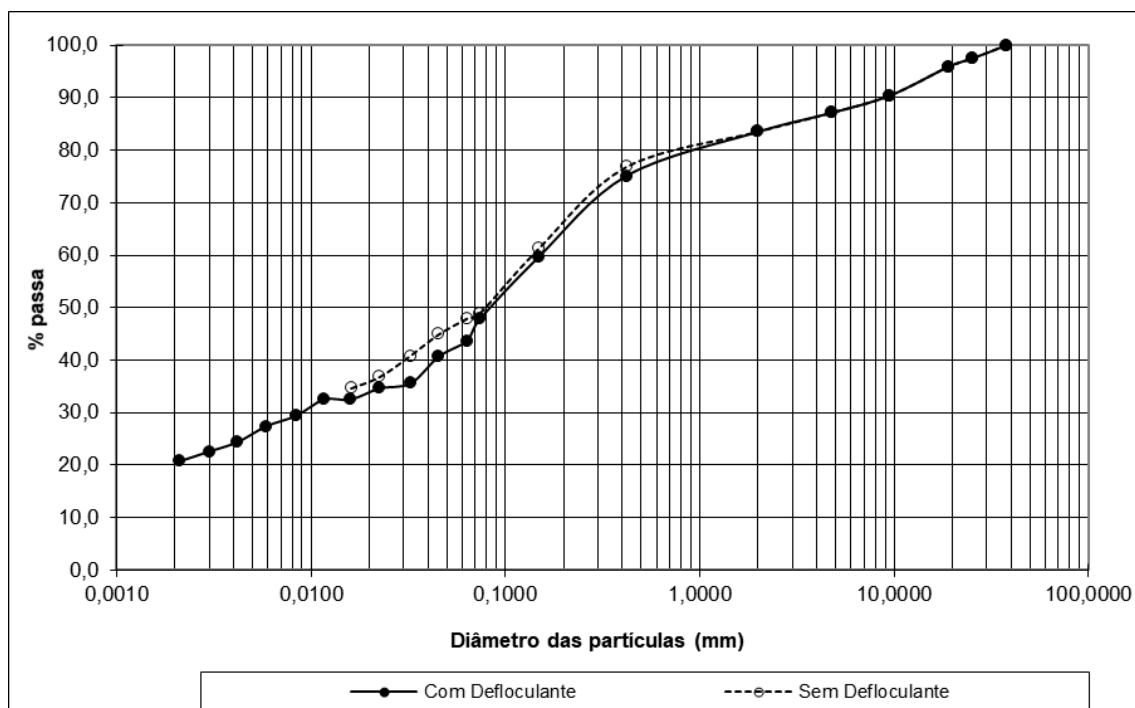
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.5 – Curvas Granulométricas 0,5 a 1 m



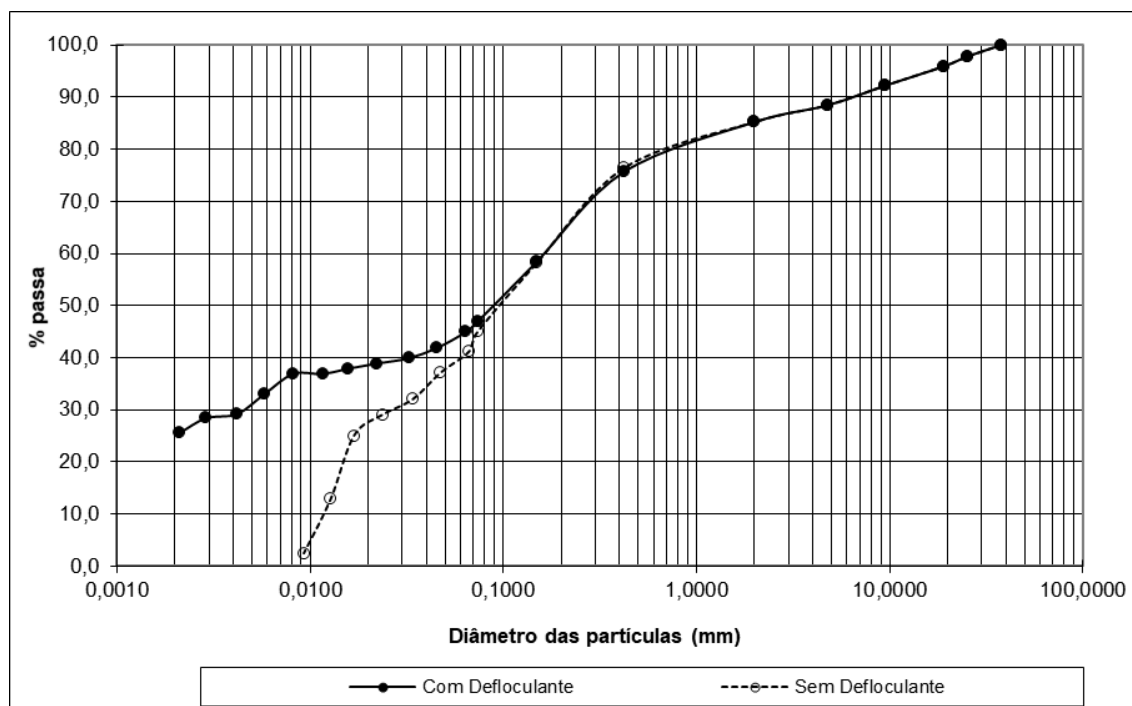
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.6 – Curvas Granulométricas 1 a 1,3 m



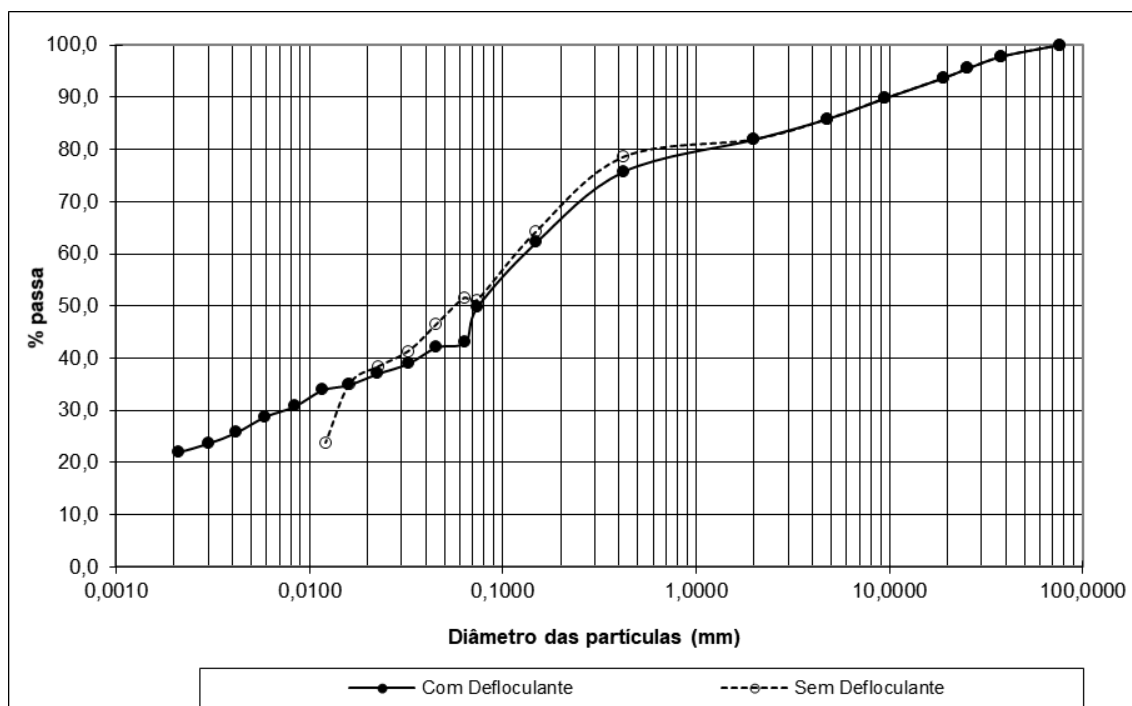
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.7 – Curvas Granulométricas 1,3 a 2 m



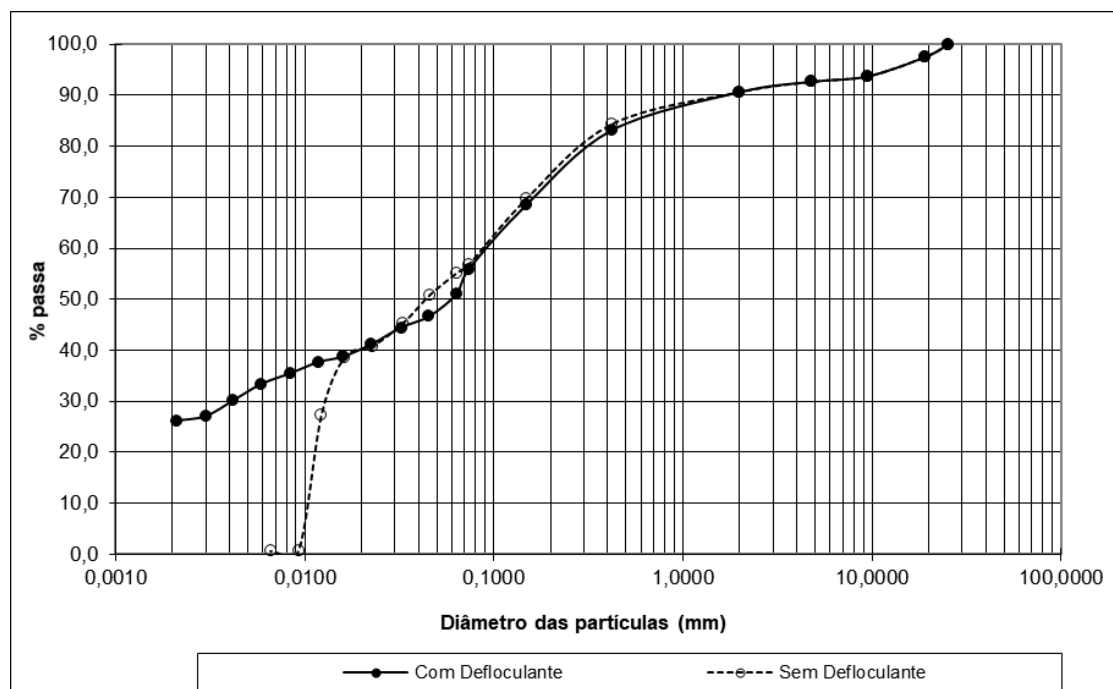
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.8 – Curvas Granulométricas 2 a 2,3 m



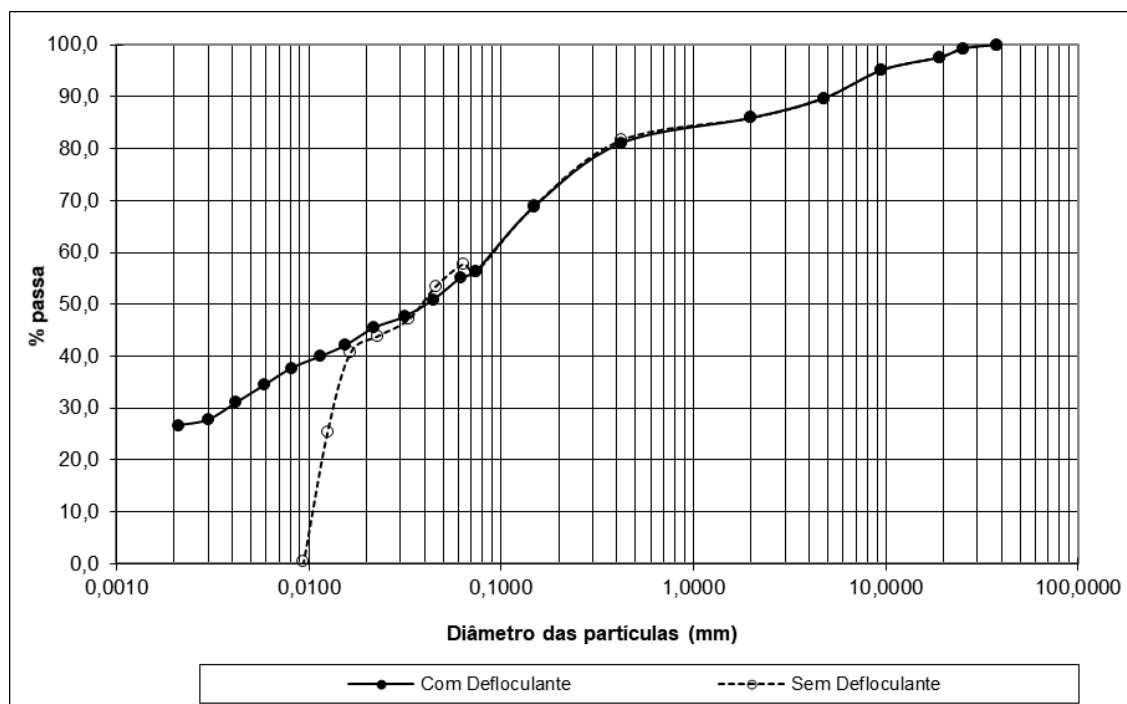
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.9 – Curvas Granulométricas 2,3 a 3 m



Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.10 – Curvas Granulométricas 3 a 3,5 m



Fonte: Furnas/UnB (2007)

Os índices de consistência, junto com o resumo numérico das curvas granulométricas são apresentados abaixo na tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Composição granulométrica e Índices de Consistência

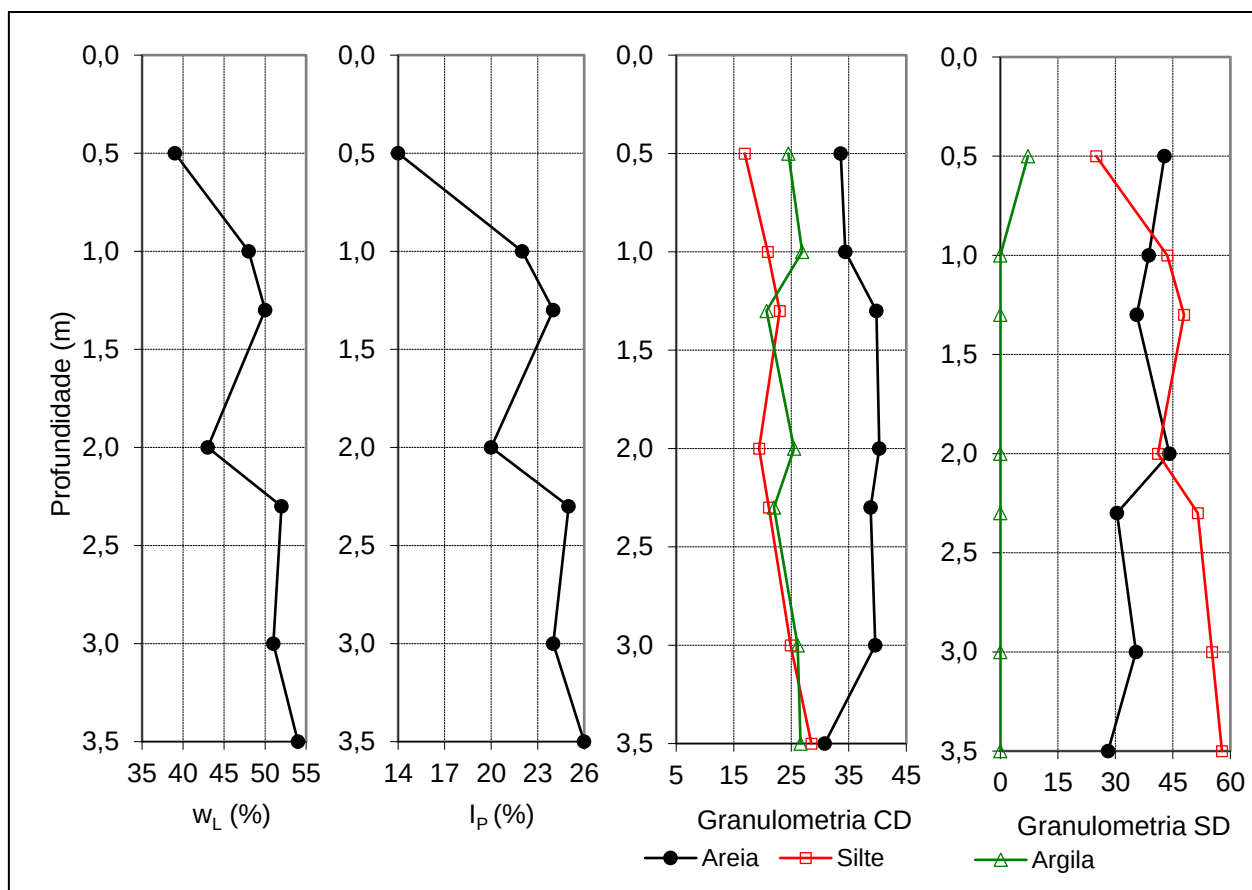
Parâmetros e classificação	Profundidade						
	0,5	1,0	1,3	2,0	2,3	3,0	3,5
Pedregulho com defloculante	25,0	17,8	16,5	14,8	18,1	9,4	14,1
Areia com defloculante	33,6	34,4	39,8	40,3	38,8	39,6	30,8
Silte com defloculante	16,9	20,9	23,0	19,4	21,1	24,9	28,5
Argila com defloculante	24,5	26,9	20,7	25,5	22,0	26,1	26,6
Pedregulho sem defloculante	25,0	17,8	16,5	14,8	18,1	9,4	14,1
Areia sem defloculante	42,8	38,7	35,6	44,1	30,4	35,4	28,1
Silte sem defloculante	25,0	43,5	47,9	41,1	51,5	55,2	57,8
Argila sem defloculante	7,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
w_L (%)	39	48	50	43	52	51	54
w_P (%)	25	26	26	23	27	27	28
I_P (%)	14	22	24	20	25	24	26
I_a	0,57	0,82	1,16	0,78	1,14	0,92	0,98

Fonte: Furnas/UnB (2007)

Os valores de I_a são referentes ao Índice de atividade de argilas, apresentando variação de 0,75 a 1,25 que segundo Pinto (2006) é um valor que caracteriza o

comportamento da Argila presente como normal. Visualmente os índices de consistência são mostrados na figura 4.11:

Figura 4.11 – Índices de consistência e granulometria



Fonte: Furnas/UnB (2007)

A classificação para as diferentes profundidades, pelo método SUCS, é apresentado na tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Classificação SUCS

Profundidade (m)	Classificação SUCS
0,5	SC (areia argilosa)
1	CL (argila de baixa compressibilidade)
1,5	SC (areia argilosa)
2	SC (areia argilosa)
2,5	SC (areia argilosa)
3	CH (argila de alta compressibilidade)
3,5	CH (argila de alta compressibilidade)

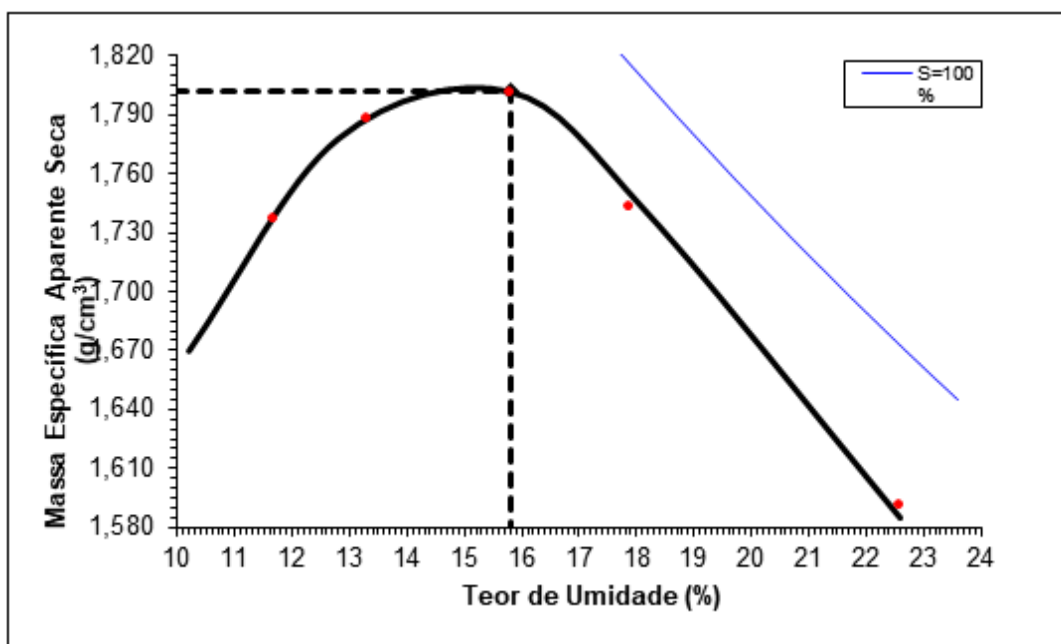
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Em relação ao Índice de material é possível observar que a maior faixa de valores se concentra entre 0,6 e 1,8 o que de acordo com Marchetti (1981) enquadra seu comportamento como silte. Apesar de não ser uma ferramenta precisa para análise granulométrica de fato, o DMT é uma ferramenta eficaz para análise do comportamento do maciço analisado, uma vez que a rigidez do material é a característica que governa o ensaio.

4.3 Compactação

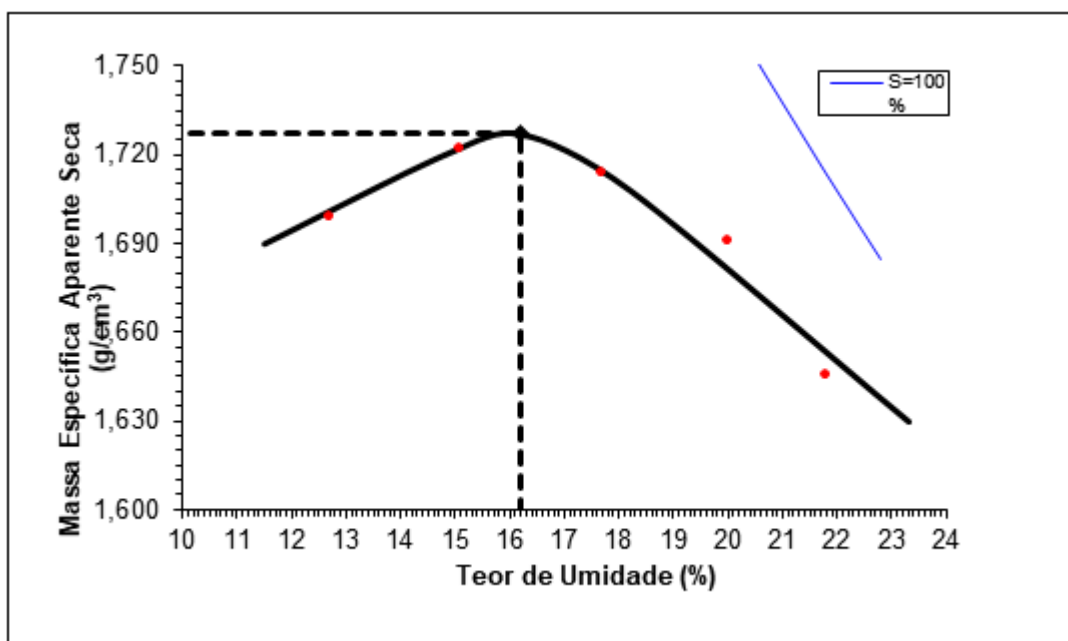
As curvas de compactação obtidas podem ser vistas abaixo nas figuras de 4.12 a 4.18:

Figura 4.12 – Curva de compactação 0 a 0,5 m.



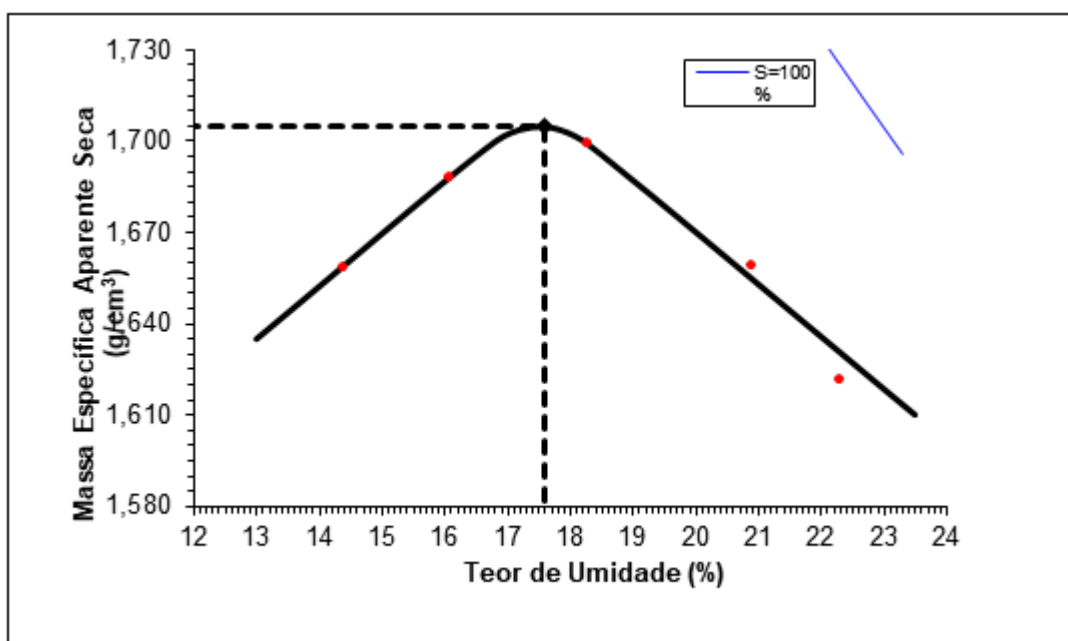
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.13 – Curva de compactação 0,5 a 1 m.



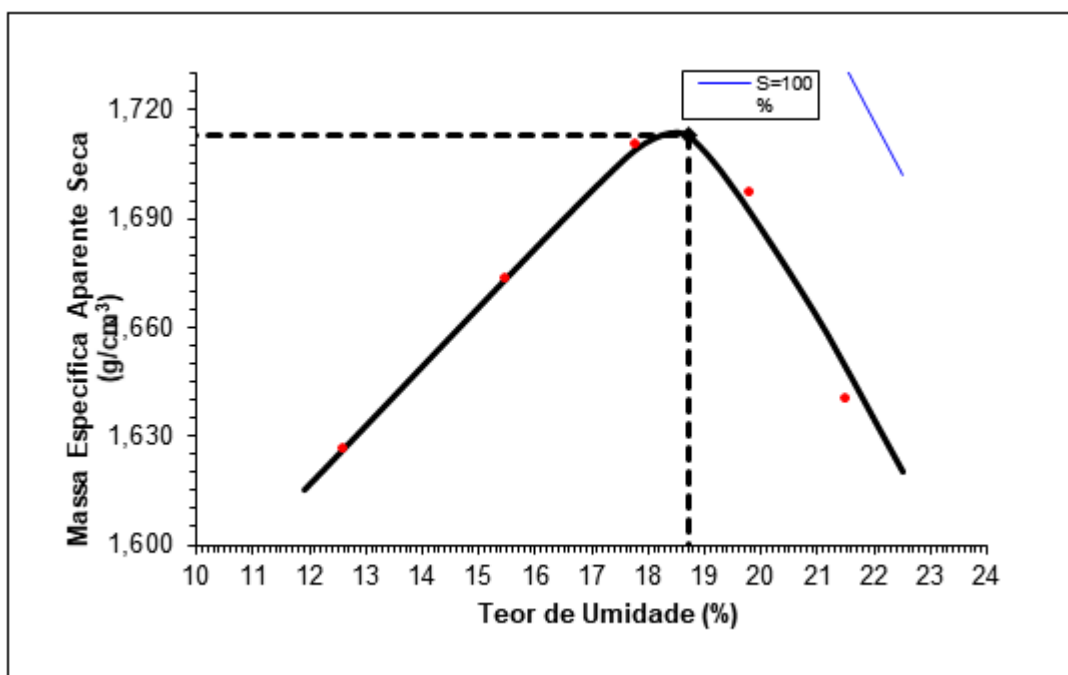
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.14 – Curva de compactação 1 a 1,3 m.



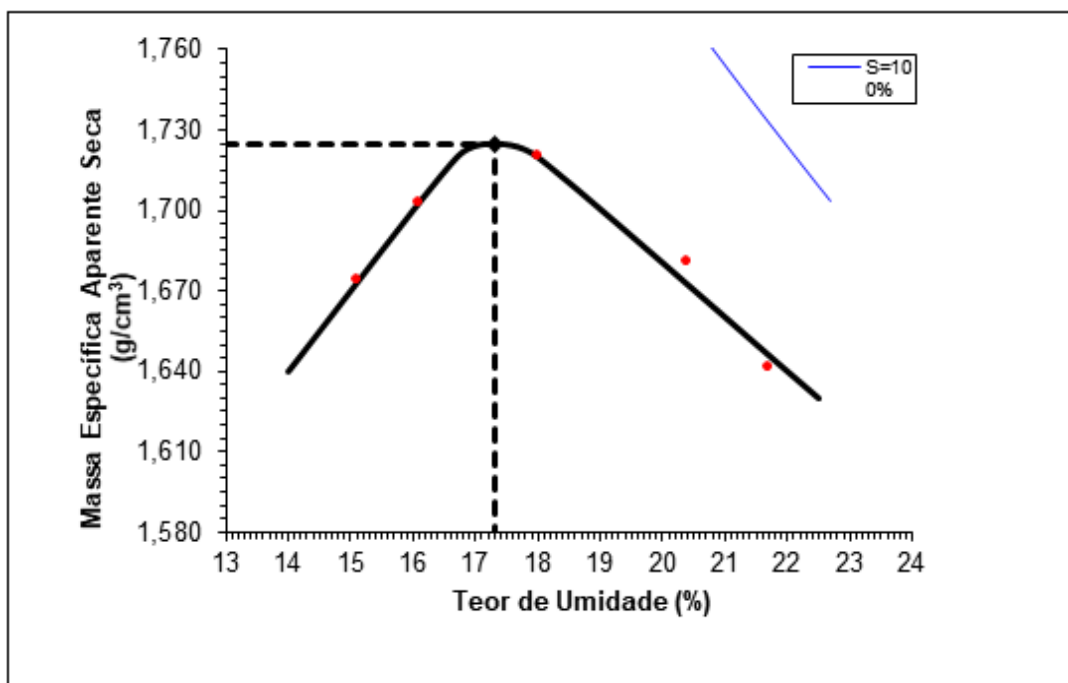
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.15 – Curva de compactação 1,3 a 2 m.



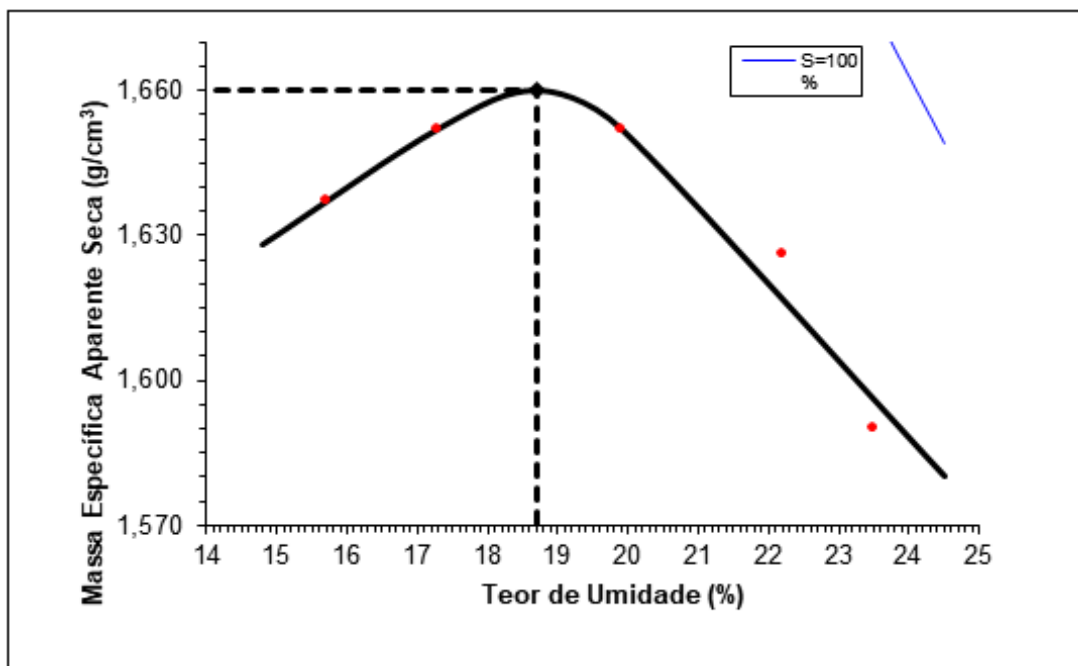
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.16 – Curva de compactação 2 a 2,3 m.



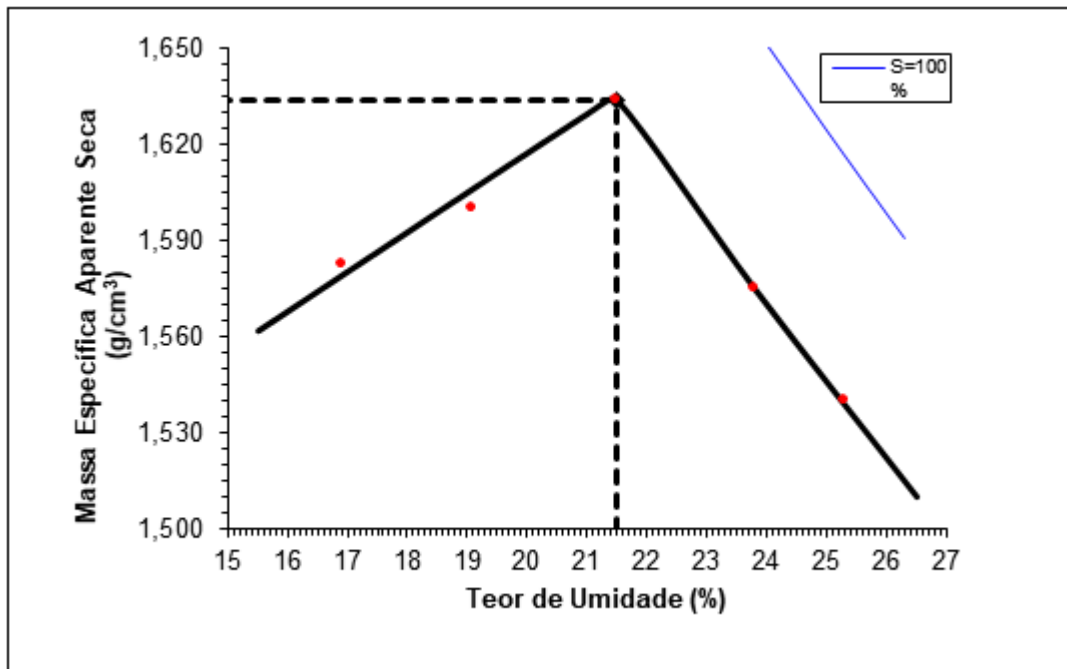
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.17 – Curva de compactação 2,3 a 3 m.



Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.18 – Curva de compactação 3 a 3,5 m.



Fonte: Furnas/UnB (2007)

É possível observar que as curvas apresentam diferenças apreciáveis em suas inclinações, mostrando uma característica heterogênea do aterro, sendo essa característica vista nas curvas de compactação uma validação dos resultados da

caracterização geotécnica. A partir das curvas foi feita a Tabela 4.4 como resumo dos parâmetros obtidos pela compactação e de índices físicos calculados a partir destes.

É possível observar que a partir da profundidade 2,40 os parâmetros de campo se distanciam de valores ideais, sendo a provável explicação que esta profundidade seja a do lençol freático.

Tabela 4.4 – Parâmetros de compactação

Prof. (m)	CAMPO		LABORATÓRIO		GC (%)	Δw (%)
	w (%)	γ_d (kN/m ³)	w_{ot} (%)	γ_d (kN/m ³)		
0,30	14,60	17,02	15,80	17,68	96,28	-1,20
0,50	15,70	16,59	15,80	17,68	93,84	-0,10
0,70	17,30	16,87	16,20	16,94	99,59	1,10
0,90	15,10	17,72	16,20	16,94	104,57	-1,10
1,40	16,80	16,61	17,60	16,73	99,30	-0,80
1,60	16,30	17,11	18,70	16,81	101,81	-2,40
1,80	15,80	16,85	18,70	16,81	100,29	-2,90
2,40	24,90	15,06	17,30	16,92	88,99	7,60
2,60	25,00	15,34	18,70	16,29	94,21	6,30
2,80	25,10	15,26	18,70	16,29	93,73	6,40
3,40	46,80	10,39	21,50	16,03	64,81	25,30

Fonte: Furnas/UnB (2007)

4.4 Ensaio de Compressão Triaxial

Os resultados na Tabela 4.5 referem-se ao ensaio de Compressão Não-Drenado Saturado (CUSat), tanto para tensões efetivas quanto para tensões totais:

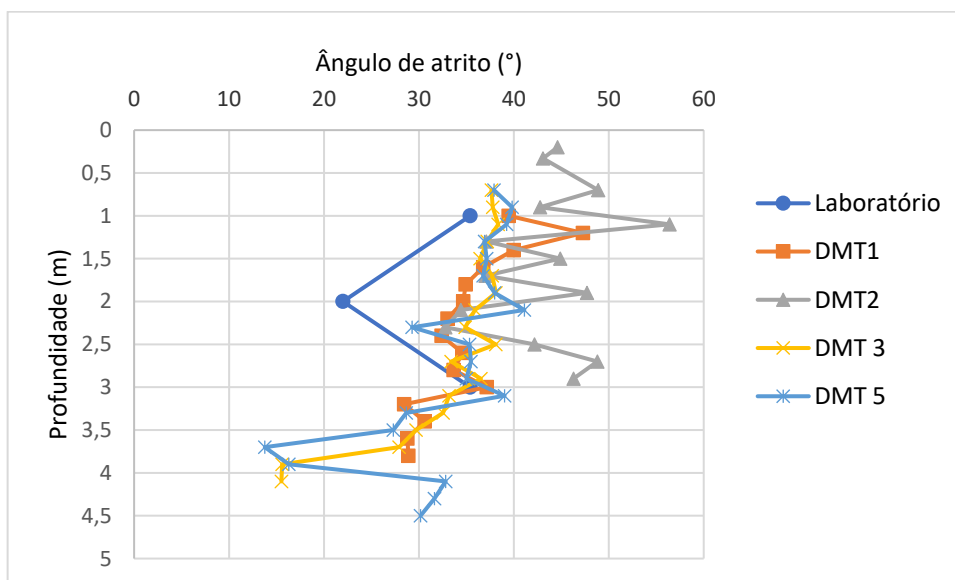
Tabela 4.5 – Resultados de ensaio triaxial CUSat

	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
Parâmetros Totais			
c	31	50	72
Φ	33,3	9,5°	12,7°
Parâmetros Efetivos			
c'	0	34	34
Φ'	35,4°	22°	35,4°

Fonte: Furnas/UnB (2007)

Na figura 4.19 podemos observar graficamente o comparativo de valores entre laboratório e estimativa através de parâmetros dilatométricos. Os cálculos para estimativa do ângulo de atrito foram feitos utilizando a equação 2.25 de Marchetti (1991). Com exceção para a profundidade de 2 metros, os valores são semelhantes na sua maior do perfil. Devido a proximidade de valores tanto de laboratório quanto de estimativas, mesmo para a região compactada, é possível observar que as equações apresentam ser uma ferramenta interessante para obtenção do ângulo de atrito.

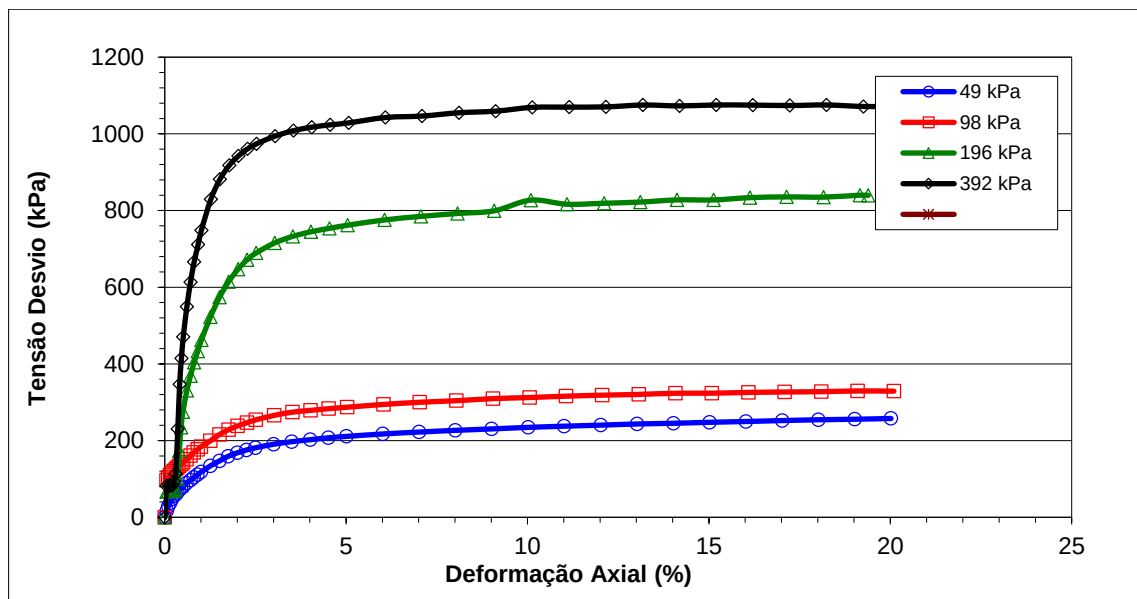
Figura 4.19 – Ângulo de atrito estimado por DMT e obtido por triaxial.



Fonte: Furnas/UnB (2007)

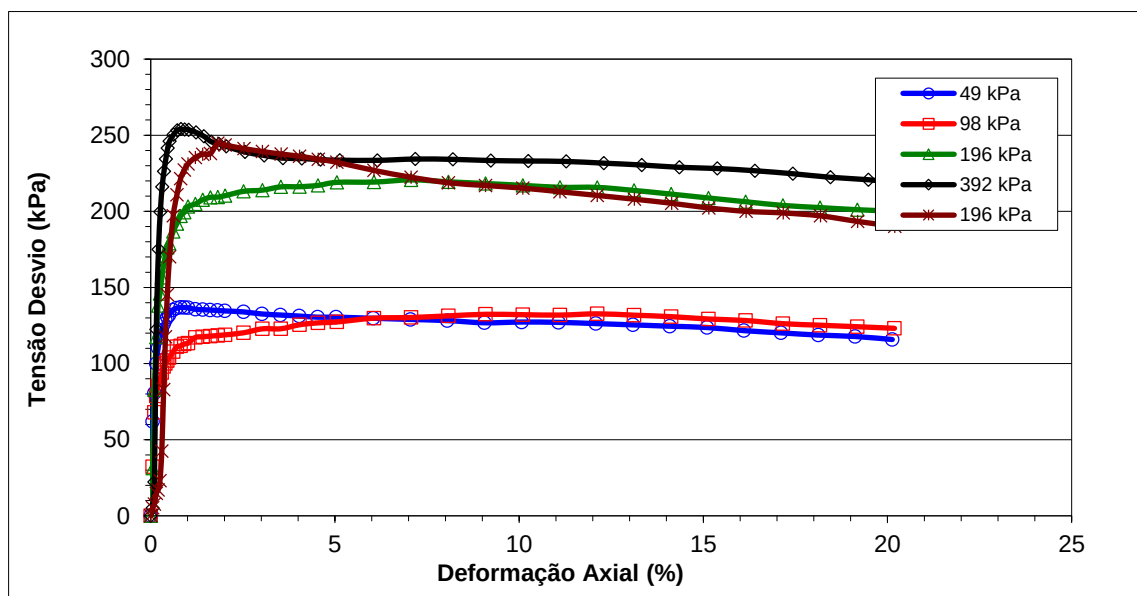
Com o ensaio de compressão triaxial, foi possível traçar curvas tensão-deformação para diferentes tensões de confinamento. As curvas obtidas são mostradas nas figuras de 4.20 a 4.22:

Figura 4.20 – Curvas Tensão-Deformação 1,0 m.



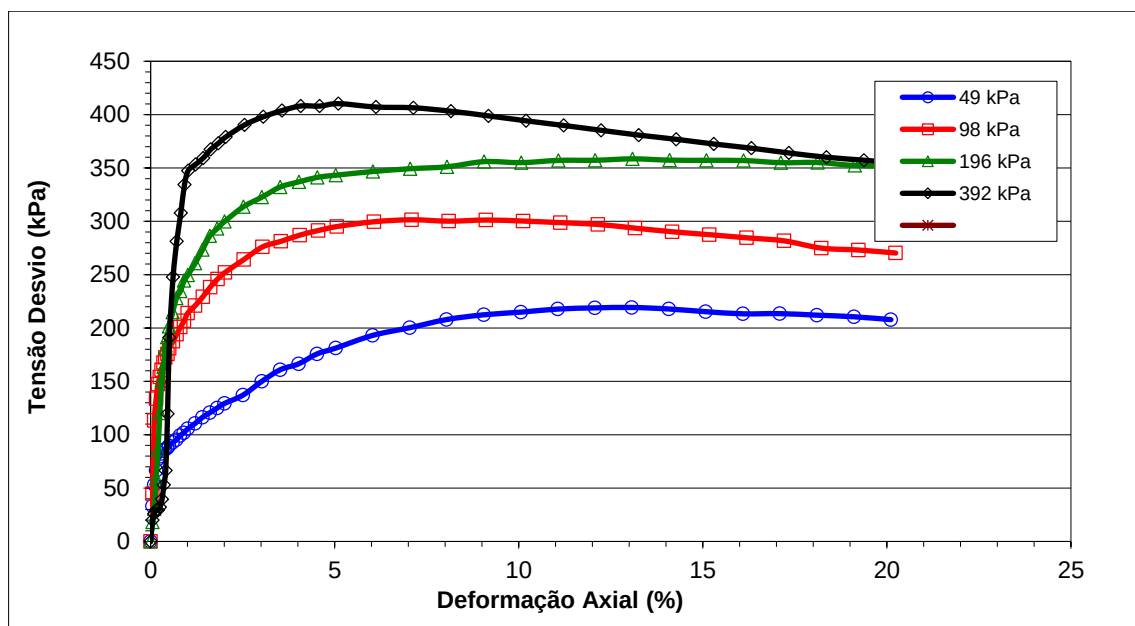
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.21 – Curvas Tensão-Deformação 2,0 m.



Fonte: Furnas/UnB (2007)

Figura 4.22 – Curvas Tensão-Deformação 3,0 m.



Fonte: Furnas/UnB (2007)

A partir das curvas acima, calculou-se então o módulo de Young para cada profundidade correspondente:

Tabela 4.6 – Módulo de Young para profundidade 1,0 m.

Bloco 1			
σ_3 (kPa)	Desvio de tensões (kPa)	Deformação ϵ	Módulo de Young (Mpa)
49	7,84	0,0015	5,23
98	32,22	0,0005	64,44
196	77,73	0,0046	16,90
392	126,73	0,0071	17,85

Fonte: Furnas/UnB (2007)

Tabela 4.7 – Módulo de Young para profundidade 2,0 m.

Bloco 2			
σ_3 (kPa)	Desvio de tensões (kPa)	Deformação ϵ	Módulo de Young (Mpa)
49	99,88	0,0015	66,59

Bloco 2			
σ_3 (kPa)	Desvio de tensões (kPa)	Deformação ϵ	Módulo de Young (Mpa)
98	78,67	0,0015	52,45
196	138,05	0,002	69,03
392	216,09	0,0031	69,71

Fonte: Furnas/UnB (2007)

Tabela 4.8 – Módulo de Young para profundidade 3,0 m.

Bloco 3			
σ_3 (kPa)	Desvio de tensões (kPa)	Deformação ϵ	Módulo de Young (Mpa)
49	53,19	0,001	53,19
98	133,75	0,0015	89,17
196	181,27	0,004	45,32
392	100,16	0,0061	16,42

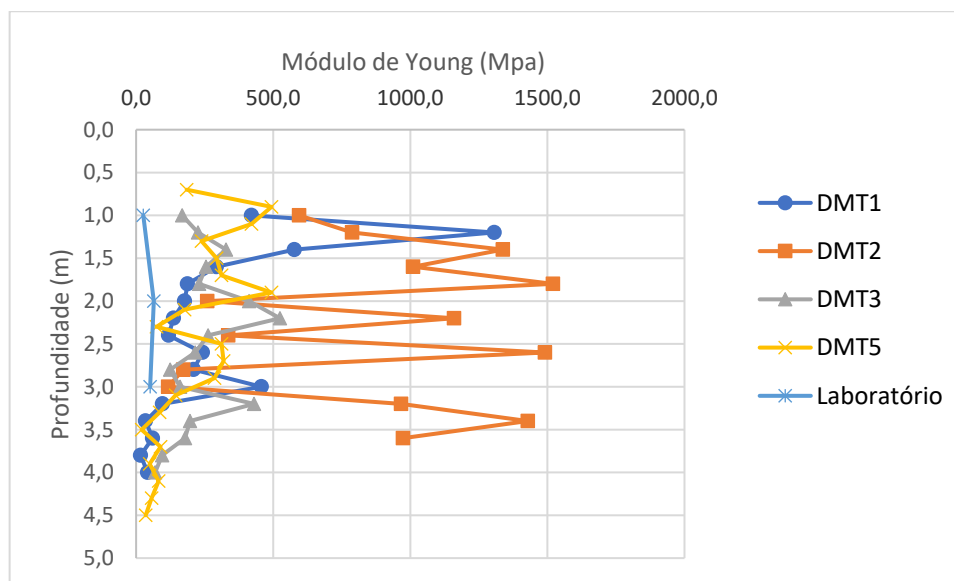
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Os valores escolhidos para comparação das estimativas foram a partir do cálculo das tensões verticais para as profundidades dos blocos referentes às amostras, sendo tais valores correspondentes as tensões verticais mais próximas para um dos desvios de tensão obtidos.

Na figura 4.23 podemos observar a comparação entre resultados de laboratório e estimativas pelo DMT. O parâmetro quando estimado, apresenta valores maiores que os de laboratório e no DMT 2 os valores destoam ainda mais. No caso deste, ao realizar o ensaio, em diversas profundidades a campainha para a leitura de pressão para a expansão de 1,1 mm não reativou, fato que pode ter ocorrido devido à granulometria do material ser composta de pedregulhos. Com isso a pressão pb foi superestimada e então acarretando em tais valores para o módulo de Young. O mesmo aconteceu para a leitura destoante do DMT 1.

A partir de camadas mais profundas, aonde o solo não mais encontrava-se compactado, é observada a tendência de valores mais próximas aos valores de laboratório.

Figura 4.23 – Módulo de Young estimado por DMT e obtido por laboratório.



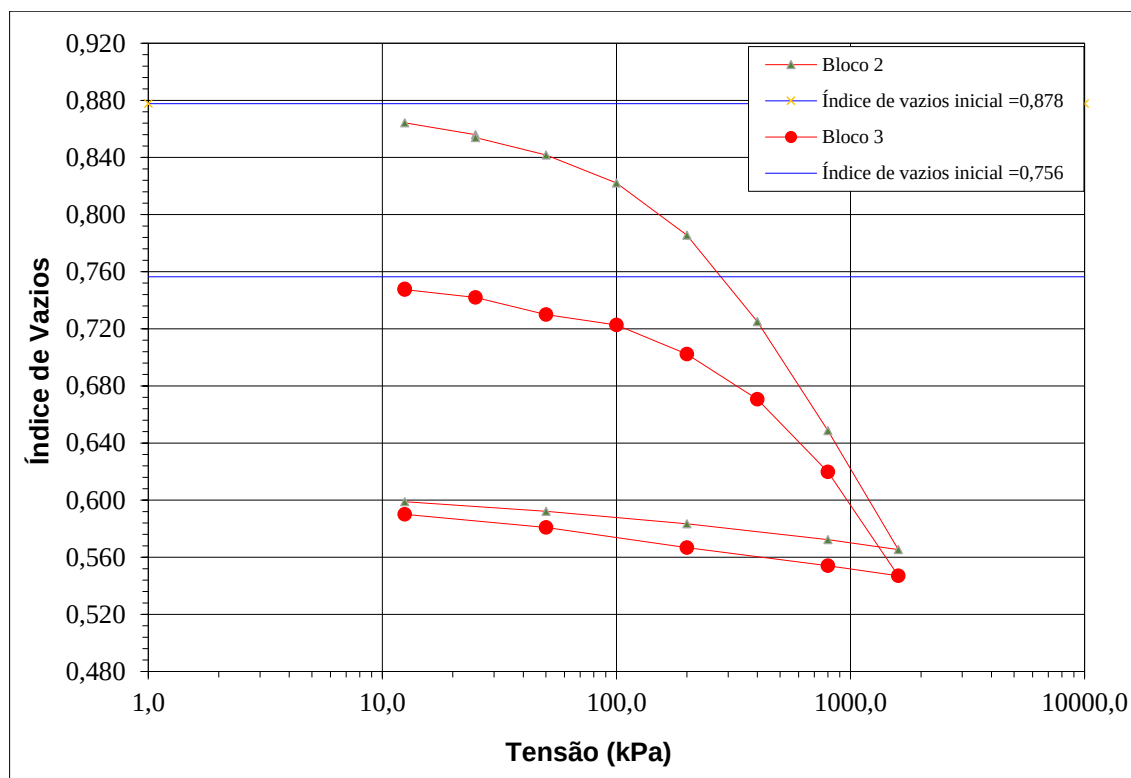
Fonte: Furnas/UnB (2007)

Segundo Queiroz (2008), isto ocorre devido a dificuldade de análise do módulo de Young, visto que este envolve diversas variáveis, tornando-o assim, complexo.

4.5 Ensaio de Adensamento

Com o ensaio de adensamento foi possível obter a OCR do solo, que resultou em valores altos de solo sobre adensado. Devido ao maciço estudado ser um solo compactado, as análises deste parâmetro tornam-se complexas, segundo Queiroz (2008). Uma hipótese levantada por Angelim (2011), é que a memória do solo seja alterada pelo processo de compactação, possibilitando diferenças apreciáveis para os valores dos parâmetros em uma situação anterior a compactação. A Figura 4.25 mostra os resultados de laboratório para os ensaios de adensamento.

Figura 4.25 – Curvas de Adensamento Bloco 2 e 3.



Fonte: Furnas/UnB (2007)

Tabela 4.14 – Parâmetros da compressão edométrica.

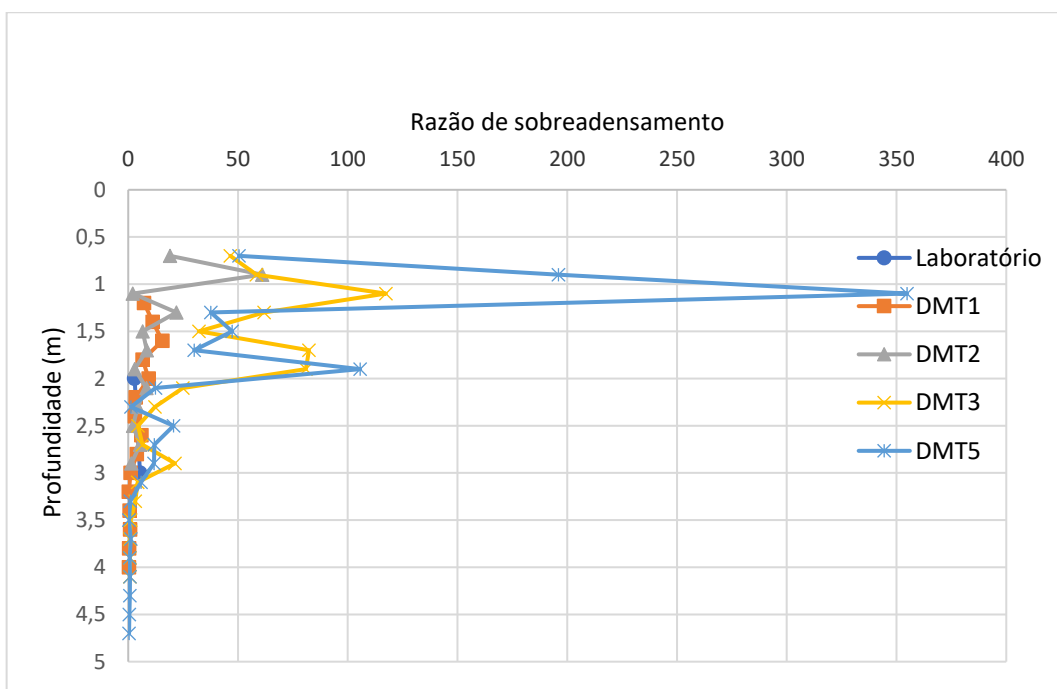
Parâmetros	Bloco 2	Bloco 3
Profundidade (m)	2	3
C_c	0,281	0,25
σ'_{Pa} (KPa)	210	365
σ'_0 (KPa)	44	50
OCR	4,77	7,3
Índice de vazios inicial	0,87	0,73
Índice de vazios final	0,56	0,55

Fonte: Furnas/UnB (2007)

A figura 4.26 traz a comparação gráfica da razão de sobre adensamento. Os valores das estimativas através do DMT são as médias das equações de Marchetti e Crapps (1981) e Lacasse e Lune (1988), 2.14 até 2.16. Para o DMT 2, os valores obtidos pela equação 2.15 foram extremamente elevados, não sendo então levados em consideração tanto pelo fato de não condizerem com a realidade, quanto por não ser possível uma comparação gráfica. Tal fato explica-se pelos valores obtidos do Índice de material, que condiciona a equação 2.15 com muita sensibilidade devido à sua forma matemática. Os valores obtidos mostram uma divergência grande nos

valores até a profundidade de 2,0 m que mostra necessária cautela na utilização do DMT para avaliação deste parâmetro em um solo compactado, visto que tal processo pode alterar a memória de tensões do solo. Para o DMT 5, na profundidade próxima a 1 m, a divergência se dá pelo fato do Índice de material ter se apresentado com um valor elevado.

Figura 4.26 – OCR estimada por DMT e obtida por ensaios.



Fonte: Furnas/UnB (2007)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação de maciços compactados através do DMT expôs a principal limitação desta ferramenta que é a presença de pedregulhos no maciço, tendo prejudicado em alguns pontos o estudo devido a valores destoantes.

Quanto ao Índice de material este apresentou classificação de silte, que é intermediária entre as classificações obtidas em laboratório, que foram areia e argila.

O ângulo de atrito apresentou resultados interessantes para as correlações, tendo sido o parâmetro estimado que mais se aproximou dos valores obtidos em laboratório, variando de 22 a 35,4° em laboratório e tendência de valores de 40°, com exceção do DMT 2 para os valores estimados.

O módulo de Young apresentou a maior discrepância de valores, muito graças a limitação do equipamento em solos pedregulhosos. Tal parâmetro já seria naturalmente superestimado devido ao estado do solo analisado, e somado aos pedregulhos existentes no solo, a consequência dessa limitação foi amplificada, visto que valores para o DMT 2 atingiram até mesmo pico de 1520 Mpa. Tal valor seria injustificável apenas pela rigidez do solo, sendo então fruto da impossibilidade de leitura correta em camadas com alto índice de pedregulhos.

Por fim, a razão de sobreadensamento também apresentou valores superestimados, sendo os valores obtidos pela equação 2.15 até mesmo excluída do DMT 2, com valores até mesmo na ordem de décima segunda potência. Este parâmetro, por ter mais de uma condição e mais de uma equação envolvida deve ser analisado a partir de qual equação mais se aproxima dos valores de laboratório.

A utilização de materiais diferentes ficou evidente nas curvas de compactação obtidas, mostrando a necessidade de um direcionamento para definição das áreas de empréstimo, já que tais diferenças entre os materiais causam alterações físicas e químicas no solo, dificultando a previsão de seu comportamento.

Um fator preponderante para falta de um resultado mais conclusivo, foi a ausência da análise da sucção atuante no material, visto que o aterro é um solo não saturado.

A análise a partir do DMT apresenta ser um bom indicativo do comportamento do solo, porém tal análise não deve se pautar apenas nos resultados numéricos sem uma investigação mais aprofundada do contexto e até mesmo aperfeiçoamento das correlações existentes na literatura, sendo necessários outros estudos de caso para

que a ferramenta evolua tanto no âmbito acadêmico, como também no sentido de torná-la eficaz o suficiente para ser aplicada no contexto de obras de barragens.

5.1 Sugestões para pesquisas Futuras

- Refinar as correlações, fazendo estudos com solos semelhantes para comparações e norteamiento das conclusões em torno dos resultados obtidos;
- Incluir a análise da sucção atuante no solo;
- Utilizar-se da versão mais atualizada do equipamento, o DMT Medusa;
- Não utilizar somente o DMT, mas também outras ferramentas de investigação do subsolo como CPT e SPT;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELIM, R. R. **Desempenho de Ensaios Pressiométricos em Aterros Compactados de Barragens de Terra na Estimativa de Parâmetros Geotécnicos**. 291 p. (Tese de Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12007: Solo – Ensaio de Adensamento Unidirecional**. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica**. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016a. 10 p.

BERNARDI, C. **ENSAIOS DILATOMÉTRICOS – INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DILATÔMETRO DE MARCHETTI (DMT) EM UM SOLO RESIDUAL COMPACTADO**. 11 p. (Artigo) – XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano COBRAMSEG 2018 – 28 de Agosto a 01 de Setembro, Salvador, Bahia.

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

CAMPANELLA, R.G & ROBERTSON, P.K. **Use and interpretation of a research and dilatometer**. Canadá. Geotechnical Journal, Vol. 28. 1991.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. Volume 1. 6ª edição**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1988.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução da 8ª edição norte-americana**. São Paulo: Engaje Learning, 2014

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos Solos. Volume 1: conceitos e princípios fundamentais.** Editora Oficina de Textos; 1ª edição, 2016.

GUSMÃO FILHO, Jaime De A. **Solos-Da Formação Geológica Ao Uso Na Engenharia.** Editora Universitária UFPE, 2002.

GRAVESEN, S. **Elastic Semi-Infinite Medium Bounded by a Rigid Wall with a Circular Hole.** Laboratoriet for Bygningsteknik, Danmarks Tekniske Højskole, Meddelelse n. 10, Copenhagen, 1960.

LACASSE, S. & LUNNE, T. **Calibration of Dilatometer Correlations, Proc. ISOPT-1,** Orlando, Flórida, 1: 539-548. 1988.

LAMBE; WHITMAN. **Soil Mechanics,** John Wiley & Sons, 1969.

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

MARCHETTI, S. **In Situ Tests by Flat Dilatometer. Journal of Geotechnical Engineering,** ASCE, 106(GT3): 299-321, 1980.

MARCHETTI, S. **The Flat Dilatometer: Design Applications. Third Geotechnical Engineering Conference,** Cairo University, Keynote Lecture, 26 p, 1997.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia.** 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos. 2010.

JOHNSTON, BEER. **Mecânica dos Materiais.** 7ª edição.

MOLINA JUNIOR, W.F. **Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas.** ESALQ/USP, Piracicaba, SP, 2017.

NABAES. **Análise geomecânica do solo através de comparativo dos ensaios de DMT convencional e DMT MEDUSA.** UDESC, Joinville, SC, 2020.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. **Comportamento de herbicidas no ambiente. In: Oliveira Júnior, R. S.; Constantin, J.; Inoue, M. H. Biologia e manejo de plantas daninhas.** Curitiba: Omnipax, 2011.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos. 2006.

QUEIROZ, A. C. G. **Uso do DMT na Avaliação de Maciços Compactados.** 96 p. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

R. C. HIBBELER. **Resistência dos Materiais**. 7ª edição. Pearson Universidades. 2009.

SCHMERTMANN, J.H. (1986). **Suggested Method for Performing the Flat Dilatometer Test**. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 9 (2): 93-101.

SCHNAID, F. (2000). **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 189 p.

SILVA, F. K. ENSAIOS DILATOMÉTRICOS – **DMT EM SOLOS DE SANTA CATARINA: ESTUDO COMPARATIVO COM CPT E SPT**. 269 p. (Tese de Pós - Graduação) – PPGEC/UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.