

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC**

MAUREM NABAES FERRARI SODER

**ANÁLISE GEOMECÂNICA DO SOLO ATRAVÉS DE COMPARATIVO DOS
ENSAIOS DE DMT CONVENCIONAL E DMT MEDUSA**

**JOINVILLE, SC
2020**

MAUREM NABAES FERRARI SODER

**ANÁLISE GEOMECÂNICA DO SOLO ATRAVÉS DE COMPARATIVO DOS
ENSAIOS DE DMT CONVENCIONAL E DMT MEDUSA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, como requisito parcial para obtenção de Título de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade do Estado de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Odebrecht

JOINVILLE, SC
2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Soder, Maurem Nabaes Ferrari
Análise geomecânica do solo através de comparativo dos
ensaios de dmt convencional e dmt medusa / Maurem Nabaes
Ferrari Soder. -- 2020.
104 p.

Orientador: Edgar Odebrecht
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação , Joinville, 2020.

1. Dmt. 2. Dmt medusa. 3. Solos siltosos. 4. Drenagem parcial.
5. Solos intermediários. I. Odebrecht, Edgar . II. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação . III. Título.

Análise Geomecânica do Solo através de Comparativo dos Ensaios de DMT

Convencional e DMT Medusa

por

Maurem Nabaes Ferrari Soder

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL

Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:

ASSINADO DIGITALMENTE

Prof. Dr. Edgar Odebrecht
CCT/UDESC
(Orientador/Presidente)

VIA VIDEOCONFERÊNCIA

Profa. Dra. Helena Paula Nierwinski
UFSC

ASSINADO DIGITALMENTE

Profa. Dra. Adriana Goulart dos
Santos
CCT/UDESC

Joinville, SC, 11 de setembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial meus pais Edílio e Montserrat, que estiveram comigo desde o início de minha caminhada, e ao meu esposo Rodrigo e filhos Natália e Mateus, que me apoiaram e me incentivaram ao longo desses dois anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edgar Odebrecht, pelas horas destinadas em seus atendimentos, pela paciência e pela importância de seus ensinamentos ao longo da presente pesquisa.

Agradeço aos professores da UDESC pelos ensinamentos recebidos durante a pós-graduação e aos meus colegas, professores da Católica de Jaraguá do Sul, que de alguma forma me ajudaram, em especial a minha colega e amiga Carine Santos.

Ao Professor Fernando Schnaid (UFRGS) e *Studio Marchetti* (Itália) pela gentileza do fornecimento de dados extraídos do DMT para uso na presente pesquisa.

Aos colegas do mestrado que conheci e que de alguma forma me ajudaram para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos de longa data que estiveram presentes de alguma forma.

À Deus, pois sem ele, eu não estaria aqui.

RESUMO

A engenharia geotécnica busca entender o comportamento mecânico do solo por meio do uso de ensaios de campo e laboratório. Os métodos consagrados na geotecnia para o entendimento e a obtenção de parâmetros estão fundamentados em equipamentos, procedimentos e normativas estabelecidos mundialmente. Estes equipamentos e procedimentos estão estabelecidos em dois grupos de solos, os solos finos que geralmente apresentam uma resposta não drenada à solicitação de ensaio e de carregamento da obra e os solos granulares que usualmente apresentam uma resposta drenada. Entre estes dois grupos encontram-se os solos siltosos que evidenciam comportamento intermediário. Estes materiais são frequentemente encontrados na natureza e também predominam nos depósitos artificiais construídos pelo homem, formados pelos rejeitos e resíduos oriundos da indústria da mineração. Eles apresentam comportamento distinto aos métodos de interpretação tradicionais e podem conduzir a análises equivocadas. Além disso, apresentam grande suscetibilidade ao fenômeno de liquefação, que pode ocasionar rupturas e aumentar o impacto das mesmas fortalecendo a necessidade de pesquisas nesta área do conhecimento. O Dilatômetro de Marchetti (DMT), neste trabalho denominado de DMT Convencional, é um ensaio cujo procedimento está embasado em solos finos e granulares podendo apresentar problemas de interpretação em solos intermediários. Com o intuito de contornar esta deficiência, foi desenvolvido o DMT Medusa que permite o controle da velocidade de carregamento e o tempo de expansão da membrana do DMT. O presente trabalho visa desenvolver o conhecimento na interpretação dos solos com comportamento intermediário, executando-se ensaios comparativos entre DMT Convencional e DMT Medusa. Para tanto, foram realizados ensaios em solo silto arenoso e areno siltosa encontrados dos -12 m aos -19 m de profundidade no Campo Experimental de Araquari, localizado no norte do Estado de Santa Catarina, onde se dispõe de um completo banco de dados com vários resultados de campo e laboratório. Os resultados obtidos indicam desvios de interpretação no índice do material (I_D) que representa o comportamento mecânico do solo, juntamente com alterações nas tensões horizontais (K_D) e módulo de elasticidade (E_D). O ângulo de atrito (ϕ') também é impactado com este novo método, pois os resultados estavam superiores com o DMT Convencional, agindo contra a segurança. Como são vários desvios de interpretação, foi executada uma validação comparando os resultados do ângulo de atrito (ϕ') do DMT Medusa com a relação entre fator de capacidade de carga e o ângulo de atrito de pico (ϕ'_p) de Robertson e Campanella (1991) e foi verificado uma semelhança com este método consagrado no meio geotécnico. Com base nestes resultados, busca-se estabelecer novos procedimentos de ensaios e de interpretação.

Palavras-chave: DMT. DMT Medusa. Solos intermediários. Drenagem parcial.

ABSTRACT

Geotechnical engineering seeks to make sense of the mechanical behavior of the soil through the use of field and laboratory tests. The methods established in geotechnics for understanding and obtaining parameters are based on equipment, procedures and regulations corrected worldwide. These equipments and procedures are included in two groups of soils, the fine soils that generally present an undrained response to the request for testing and loading of the work and the granular soils that usually present a drained response. Between these two groups are known the silty soils that show intermediate behavior. These materials are often found in nature and also predominate in artificial deposits built by man, formed by tailings and residues from the mining industry. They behave differently from traditional methods of interpretation and can lead to misconceptions. In addition, they are highly susceptible to the phenomenon of liquefaction, which can cause disruptions and increase the impact of strengthening the need for research in this area of knowledge. The Marchetti Dilatometer (DMT), in this work called Conventional DMT, is a procedure whose procedure is based on fine and granular soils, and may present problems of interpretation in intermediate soils. In order to overcome this deficiency, the DMT Medusa was developed, which allows the control of the loading speed and the expansion time of the DMT membrane. This work aims to develop knowledge in the interpretation of soils with intermediate behavior, to answer the comparative tests between DMT Conventional and DMT Medusa. To this end, tests were carried out on sandy silt and sandy silt found from -12 m to -19 m in depth at the Araquari Experimental Field, located in the north of the State of Santa Catarina, where a complete database with several field and laboratory results. The results obtained deviations of interpretation in the material index (I_D) that represents the mechanical behavior of the soil, together with changes in the horizontal stresses (K_D) and modulus of elasticity (E_D). The friction angle (ϕ') is also impacted with this new method, as the results were superior with the Conventional DMT, acting against safety. As there are several deviations in interpretation, a validation was performed comparing the results of the friction angle (ϕ') of DMT Medusa with the relationship between the load capacity factor and the peak friction angle ($(\phi'p)$) of Robertson and Campanella (1991) and a similarity was verified with this method enshrined in the geotechnical environment. Based on results, seek to establish new testing and interpretation procedures.

Keyword: DMT. Medusa DMT. Intermediate Soil. Partial Drainage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamento de ensaio DMT	20
Figura 2 – Lâmina do DMT.....	21
Figura 3 – Membrana do DMT.....	22
Figura 4 – Hastes da cravação	22
Figura 5 – Detalhe da ligação haste e lâmina	23
Figura 6 – Detalhe do cabo eletropneumático	24
Figura 7 – Gás armazenado em cilindro	24
Figura 8 – Unidade de controle do DMT	25
Figura 9 – Calibração da membrana do DMT	26
Figura 10 – Posicionamento da membrana	27
Figura 11 – Equipamentos de cravação	27
Figura 12 – Sequência de teste do DMT	28
Figura 13 – DMT Medusa.....	30
Figura 14 – Ábaco para a obtenção do ϕ' em função de $(qc/\sigma'vo)$ e K_o	38
Figura 15 – Obtenção do ϕ' em função de K_D	39
Figura 16 – Porcentagem de dissipação de poropressão <i>versus</i> tempo para distintos tipos de solo.	41
Figura 17 – Curva de drenagem empírica	43
Figura 18 – Dissipação normalizada nos tempos 15 s e 30 s do DMT <i>versus</i> fator velocidade utilizando o DMTU nos materiais pesquisados	45
Figura 19 – I_D <i>versus</i> fator velocidade Vt	45
Figura 20 – Relação entre fator de capacidade de carga $(qc/\sigma'vo)$ e o ϕ'	46
Figura 21 – Ábaco $(qc/\sigma'vo)$ - K_0 - ϕ' - K_D	47
Figura 22 – Perfil estratigráfico do Campo Experimental de Araquari.	49
Figura 23 – Interpretação do perfil estratigráfico	49
Figura 24 – Composição granulométrica de amostras coletadas dos -12,00 m aos -17,10 m de profundidade	50
Figura 25 – Ângulo de atrito - Campo Experimental de Araquari	53
Figura 26 – Fluxograma da pesquisa	54
Figura 27 – Localização do Campo Experimental de Araquari - SC	56
Figura 28 – Croqui de locação dos pontos de sondagem	57

Figura 29 – Demonstrativo de leitura gráfica dos dados coletados do ensaio	59
Figura 30 – Gráfico de leituras do DMT Medusa em Araquari <i>Day 1</i> (solo de comportamento arenoso, com profundidade de -18 m)	62
Figura 31 – Gráfico de leituras do DMT Medusa em Araquari <i>Day 2</i> (solo de comportamento siltoso, com profundidade de -15,80 m)	62
Figura 32 – Análise do I_D , K_D , E_D e ϕ' do <i>Day 1</i> do DMT Medusa	65
Figura 33 – Análise do I_D , K_D , E_D e ϕ' do <i>Day 2</i> do DMT Medusa.	65
Figura 34 – Análise do I_D , K_D , E_D e ϕ' do Ponto 1 do DMT Convencional	68
Figura 35 – Análise do I_D , K_D , E_D e ϕ' do Ponto 3 do DMT Convencional	69
Figura 36 – Relação ($qt/\sigma'vo$) versus K_D para a areia de Ticino – Itália	70
Figura 37 – Comparativo entre os parâmetros I_D , K_D , E_D e ϕ' entre DMT Convencional PONTO 1 e DMT Medusa <i>Day 1</i>	74
Figura 38 – Comparativo entre os parâmetros I_D , K_D , E_D e ϕ' entre DMT Convencional PONTO 3 e DMT Medusa <i>Day 2</i>	75
Figura 39 – Resultados de ϕ' obtidos do DMT Medusa e DMT Convencional.....	76
Figura 40 – Relação ($qt/\sigma'vo$) versus K_D para o Campo Experimental de Araquari – DMT Convencional.....	77
Figura 41 – Relação ($qt/\sigma'vo$) versus K_D para o Campo Experimental de Araquari – DMT Medusa.....	78
Figura 42 – Relação ($qt/\sigma'vo$) / K_D versus I_D	79
Figura 43 – Relação entre fator de capacidade de carga ($qc/\sigma'vo$) e o ϕ' do DMT Convencional e DMT Medusa	80
Figura 44 – Detalhamento da relação entre fator de capacidade de carga ($qc/\sigma'vo$) e o ϕ' do DMT Convencional e DMT Medusa.....	80
Figura 45 – Ângulos de atrito obtidos com o DMT (Convencional e Medusa) e obtidos em laboratório	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos solos segundo seu comportamento	19
Quadro 2 – Sequência das etapas da obtenção de parâmetros.....	32
Quadro 3 – Estudos realizados para o desenvolvimento de correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos, através do ensaio DMT.....	36
Quadro 4 – Leituras de pressão do DMT Convencional.....	58
Quadro 5 – Leituras de pressão do DMT Medusa.....	60
Quadro 6 – Resultados de leituras de pressão no DMT Medusa (<i>Araquari Day 1</i>)	63
Quadro 7 – Resultados de leituras de pressão no DMT Medusa (<i>Araquari Day 2</i>)	64
Quadro 8 – Resultados de leituras de pressão no DMT Convencional (Ponto 1)	66
Quadro 9 – Resultados de leituras de pressão no DMT Convencional (Ponto 3)	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos solos baseado no parâmetro intermediário I_D	34
Tabela 2 – Valores típicos de $\phi'cs$	51
Tabela 3 – Ângulo de atrito a partir de ensaios de cisalhamento de laboratório.....	52
Tabela 4 – Resumo dos resultados da relação de $(qt/\sigma'vo)$ versus K_D para distintos solos...	70

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Cm	Centímetros
Cm/s	Centímetros por segundo
CPT	<i>Cone penetration test</i>
CPTu	<i>Piezocene penetration test</i>
DMT	Dilatômetro de Marchetti
EUROCODE	<i>European Committee for Standardization: Geotechnical Design</i>
IRTP	<i>International Reference Test Procedure</i>
ISSMGE	<i>International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering</i>
kN	Quilo newton
kPa	Quilo pascal
M	Metros
MB	Método de Ensaio Brasileiro
Mm	Milímetros
NA	Normalmente Adensada
NBR	Norma Brasileira
OCR	Razão de sobreadensamento
SBPM	Ensaios Pressiométricos
SBT	<i>Soil Behavior Type</i>
SC	Santa Catarina
SPT	<i>Standard penetration test</i>
TC	<i>Technical Committees</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcento
γ	Peso específico
ΔA	Primeira leitura de calibração no manômetro
ΔB	Segunda leitura de calibração no manômetro
σ'_{v0}	Tensão vertical efetiva
σ_{v0}	Tensão vertical total
ψ	Ângulo de dilatância
ϕ'	Ângulo de atrito interno do solo
ϕ'_{cs}	Ângulo de atrito no estado crítico
ϕ'_{p}	Ângulo de atrito de pico
A	Primeira leitura do ensaio DMT
B	Segunda leitura do ensaio DMT
B_q	Parâmetro de poropressão
C	Leitura opcional
c'	Coesão efetiva
c_h	Coeficiente de adensamento horizontal
c_v	Coeficiente de adensamento
d	Diâmetro da palheta do vane <i>test</i>
d	Diâmetro da sonda
D_r	Densidade relativa
E_D	Módulo dilatométrico
F_r	Razão de atrito normalizada
f_s	Resistência do atrito do CPT
I_D	Índice do material
I_r	Índice de rigidez do solo
I_{crw}	Comportamento do solo proposto por Robertson e Wride
k	Coeficiente de permeabilidade
K_D	Índice de tensão horizontal
K_h	Coeficiente de permeabilidade
K_o	Coeficiente de empuxo horizontal
M	Módulo edométrico

P_o	Correção da primeira leitura do ensaio
P_1	Correção da segunda leitura do ensaio
P_2	Correção da terceira leitura do ensaio
P_{max}	Pressão máxima atingida
q_c	Resistência de ponta do cone
q_D	Resistência a penetração da lâmina do DMT
q_t	Resistência real mobilizada
Q_t	Resistência normalizada na ponta do cone
R_f	Razão de atrito
S_u	Resistência não drenada
T_0	Tempo de início
T	Fator tempo
t_0	Tempo inicial do ensaio DMT
t_{15}	Tempo de 15 s após início do ensaio DMT
t_{30}	Tempo de 30 s após início do ensaio DMT
t_{50}	Tempo que ocorre 50% de dissipação do excesso de poropressão
t_{ini}	Tempo inicial de expansão da membrana do DMT
t_{int}	Tempo intermediário de expansão da membrana do DMT
t_{final}	Tempo final de expansão da membrana do DMT
U	Grau de drenagem
u	Poropressão hidrostática
u_1	Poropressão da face da ponta cônica
u_2	Poropressão entre a luva e a ponta cônica
u_3	Poropressão posterior à luva
u_0	Poropressão hidrostática inicial
u_{max}	Poropressão máxima
V_1	Torque na ruptura do vane <i>test</i> medido na condição drenada
V_0	Torque na ruptura em condições não drenadas
V	Torque na ruptura em condições intermediárias
V	Fator velocidade
v	Velocidade de penetração da sonda
Z_M	Leitura de desvio de zero do manômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivos Gerais	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	ENSAIOS DE CAMPO	17
2.1.1	Ensaio do Piezocone.....	17
2.1.2	Dilatômetro de Marchetti (DMT Convencional)	19
2.1.2.1	Equipamento	20
2.1.2.2	Procedimentos	25
2.1.2.2.1	Calibração da Membrana	25
2.1.2.2.2	Início do ensaio DMT Convencional	27
2.1.3	Dilatômetro de Marchetti (DMT Medusa)	29
2.1.3.1	Equipamento	29
2.1.3.2	Procedimento.....	30
2.2	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE DMT	31
2.2.1	Leituras de calibração	32
2.2.2	Leituras do ensaio.....	33
2.2.3	Correção das leituras.....	33
2.2.4	Parâmetros intermediários I_D , K_D e E_D	33
2.2.4.1	Índice de Material (I_D)	34
2.2.4.2	Tensão Horizontal (K_D)	34
2.2.4.3	Módulo Dilatométrico (E_D).....	35
2.2.5	Parâmetros Derivados	36
2.2.5.1	Ângulo de Atrito (ϕ').....	37
2.3	AVALIAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE DRENAGEM PARCIAL	39
2.4	RELAÇÃO ($qt/\sigma'vo$) VERSUS K_D	46
3	PERFIL ESTRATIGRÁFICO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE ARAQUARI - SC.....	48
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DO CPTu	48
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DA CURVA GRANULOMÉTRICA	50
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DO ÂNGULO DE ATRITO (ϕ')....	50
4	METODOLOGIA DE PESQUISA	54
4.1	CAMPO EXPERIMENTAL DE ARAQUARI - SC	55

4.2	CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS	56
4.2.1	Procedimentos de leituras dos ensaios	58
4.3	DADOS ADICIONAIS DA PESQUISA	60
5	RESULTADOS.....	61
5.1	RESULTADOS DE DMT MEDUSA	61
5.2	RESULTADOS DE DMT CONVENCIONAL.....	66
5.3	RESULTADOS DA RELAÇÃO ($qt/\sigma'vo$) VERSUS KD	69
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	72
6.1	ANÁLISE DOS PARÂMETROS INTERMEDIÁRIOS DO SOLO (I_D , K_D e E_D) E PARÂMETRO DERIVADO (ϕ').....	72
6.2	DISCUSSÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO PARÂMETRO DERIVADO (ϕ').....	76
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS.....	86
	APÊNDICES	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O mundo tem experimentado um intenso crescimento industrial e econômico, onde a indústria da mineração tem tido grande participação, sendo no Brasil a principal protagonista nacional de suporte econômico e financeiro. Ao longo dos anos e mais fortemente nos últimos anos, o número de acidentes com este setor tem afetado a economia, além de gerar impactos ambientais irreparáveis e consideráveis perdas de vidas humanas (COSTA FILHO, 2006).

Estes acidentes têm ocorrido principalmente nos reservatórios destinados a conter o resíduo sólido e líquido, decorrente do processo de extração e beneficiamento do minério, que devido ao forte crescimento, ganharam proporções gigantescas. Estes reservatórios são geralmente executados através de diques e barragens de arranque iniciais, seguindo de sucessivos alteamentos, gerando grandes depósitos de materiais saturados, em adensamento, e com baixa resistência ao cisalhamento. Devido ao volume de resíduo gerado e depositado, ele próprio passa a ser elemento importante no sistema de contenção e as suas próprias características geotécnicas desempenham papel importante na estabilidade destes reservatórios (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

A engenharia geotécnica busca entender o comportamento mecânico destes materiais com auxílio do uso de ensaios de campo e laboratório. Os métodos consagrados para o entendimento e a obtenção de parâmetros estão fundamentados em equipamentos, procedimentos e normativas estabelecidos mundialmente e embasados em grande experiência técnica. Estes equipamentos e procedimentos foram desenvolvidos ao longo de décadas e estão apoiados em dois grandes grupos de solos, os solos finos ou argilosos que geralmente apresentam uma resposta não drenada à solicitação de ensaio e de carregamento da obra (e são analisados em termos de tensões totais) e os solos granulares ou arenosos que geralmente apresentam uma resposta drenada (análise em termos de tensões efetivas), conforme afirmam Schnaid e Odebrecht (2012), Schnaid (2009) e Robertson (2006).

Contudo, os resíduos de mineração formados pela desintegração mecânica da rocha com ou sem associação de processos químicos geram material com tamanho de partícula intermediário ao das areias e das argilas. Estes materiais apresentam comportamento distinto ao das areias e argilas, amplamente estudados no meio técnico, e podem conduzir a interpretações equivocadas devido à sua condição comportamental mecânica de permeabilidade intermediária. Além disso, estes materiais apresentam grande potencial de

desencadeamento de um processo de liquefação aumentando a possibilidade de ruptura e com consequência os impactos ambientais, fortalecendo a necessidade de pesquisas nesta área de conhecimento. Pesquisas no sentido de compreender o comportamento mecânico e de rejeitos de mineração têm sido desenvolvidas por Jefferries e Been (2006); Robertson (2010) entre muitos outros a nível internacional e Sosnoski (2016); Klahold (2013), Nierwinski (2013 e 2019), Schnaid (2005 e 2009) entre outros a nível nacional. Estas pesquisas são fortemente embasadas em ensaios de campo, que buscam mudanças nas velocidades de carregamento impostas pelo ensaio, e com isso procuram entender o comportamento destes solos de comportamento intermediário e propiciar a obtenção de parâmetros geotécnicos consistentes.

O Dilatômetro de Marchetti (DMT), neste trabalho denominado de DMT Convencional, é um ensaio de campo com equipamento, procedimento e interpretação consagrado no meio técnico como demonstram a *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)* TC16 (2001), a *American Society for Testing and Materials (ASTM)* D 6635 (2001) e o *European Committee for Standardization: Geotechnical Design* (EUROCODE 7, 1997 atualizado em 2007). O DMT Convencional que tem seu procedimento embasado em solos finos e granulares pode apresentar respostas de interpretação equivocada em solos de comportamento intermediário e conduzir a erros em projetos geotécnicos.

Com o intuito de contornar esta limitação no entendimento dos resultados de ensaios de campo, foi desenvolvido o DMT Medusa que permite o controle da solicitação do ensaio, dada pela expansão da membrana, com o tempo. Ou seja, o controle da velocidade de aplicação do carregamento. Esta nova geração do DMT permite que a expansão da membrana que carrega o solo seja efetuada de forma controlada e registros dos valores de pressão sejam coletados ao longo do tempo. O DMT Medusa encontra-se em fase de testes e aperfeiçoamento no atual momento, conforme afirma Marchetti (2018).

O presente trabalho visa comparar resultados de ensaios em solos com comportamento intermediário, executando-se análises seguindo procedimentos normatizados de ensaio e interpretação (DMT Convencional) e comparando-se com procedimentos de ensaios e interpretação distintos (DMT Medusa). Estes ensaios foram realizados em solo silto arenoso e areno siltoso encontrados dos -12 m aos -19 m de profundidade no Campo Experimental de Araquari, localizado no norte do Estado de Santa Catarina. Com base nos resultados desta pesquisa buscou-se observar o comportamento geomecânico de solos com drenagem intermediária através do comparativo de procedimentos do DMT Convencional com o DMT Medusa. Estas análises de resultados interpretados, com os novos procedimentos estabelecidos, foram comparadas com os resultados obtidos através da interpretação do piezocone e de ensaios

executados em laboratório por Lavalle (2017) e consolidados por Sestren, Schnaid e Odebrecht (2020), com o mesmo material do Campo Experimental.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o comportamento geomecânico de solos com comportamento intermediário através de procedimentos de ensaios e de interpretação de resultados com o uso do Dilatômetro de Marchetti Medusa e comparar com procedimentos e interpretação de resultados do Dilatômetro de Marchetti Convencional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os resultados dos ensaios com o Dilatômetro de Marchetti Convencional e o Dilatômetro de Marchetti Medusa efetuados no campo experimental de Araquari;
- Identificar e comparar os resultados de comportamento mecânico intermediário dos solos perante aos distintos ensaios;
- Determinar os parâmetros intermediários I_D (índice de material), K_D (tensão horizontal) e E_D (módulo dilatométrico) com ambos os equipamentos e avaliar a influência nos resultados;
- Analisar o impacto e as implicações na estimativa do ϕ' (ângulo de atrito interno dos solos) em solos com comportamento intermediário, obtidos com o Dilatômetro de Marchetti Convencional e com o Dilatômetro de Marchetti Medusa;
- Propor considerações na interpretação de ensaios em solos com comportamento mecânico intermediário que auxiliem na prática geotécnica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os projetos geotécnicos de qualquer natureza são executados com base em ensaios de campo e em laboratório, cujos resultados permitem a obtenção do perfil geotécnico e a estimativa das propriedades mecânicas do subsolo. O conhecimento destas propriedades mecânicas do solo, principalmente no que se refere aos parâmetros de resistência e de drenagem, são imprescindíveis para a execução de um projeto geotécnico seguro e econômico. A obtenção destes parâmetros é feita a partir de campanhas de investigação geotécnicas de campo combinadas com a execução de ensaios de laboratório em amostras obtidas em campo (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

Schnaid e Odebrecht (2012) afirmam que as investigações de campo têm como principal característica a rapidez e economia de tempo e recursos financeiros na obtenção de uma grande quantidade de informações. Contudo, as condições de contorno nos ensaios de campo não podem ser totalmente controladas o que introduz dúvidas e incertezas quanto a interpretação dos resultados.

Os ensaios realizados em solos arenosos e argilosos são geralmente realizados sob condições drenadas e não drenadas, respectivamente. Associa-se ao conhecimento destas condições de realização dos ensaios uma experiência acumulada no meio técnico, o que torna a interpretação dos resultados nestes solos segura e assertiva. Contudo, a aplicação destes conceitos para solos que apresentam comportamento intermediário, ou seja, drenagem parcial durante a solicitação do ensaio ou do carregamento, não pode mais ser realizada (KLAHOLD, 2013; SCHNAID, 2005; SCHNAID *et al.*, 2016;).

Associa-se o comportamento mecânico dos solos intermediários aos grandes depósitos de rejeito de mineração construídos pelo homem. Estes depósitos, edificados em forma de barragens, apresentam este tipo de solo onde os procedimentos dos ensaios convencionais e normatizados podem levar a erros grosseiros de interpretação dos resultados de ensaios de campo. A velocidade de execução do ensaio, assim como o conhecimento da condição de drenagem passam a ser elementos importantes no entendimento do comportamento destes materiais (SCHNAID, ODEBRECHT e SOSNOSKI, 2016; SCHNAID e ODEBRECHT, 2015).

Neste capítulo está apresentada uma breve revisão bibliográfica do ensaio de CPT (*Cone Penetration Test*), que foi utilizado para caracterizar o perfil geotécnico do local da realização dos ensaios, analisados na presente pesquisa. Apresenta-se o ensaio do DMT Convencional e do DMT Medusa, principal tema da presente pesquisa, e ainda uma discussão do

comportamento de solos com drenagem parcial e a caracterização do Campo Experimental de Araquari em Santa Catarina (SC). Para atender um dos objetivos da presente pesquisa apresenta-se também uma breve discussão da determinação do ângulo de atrito dos solos com comportamento mecânico intermediário.

2.1 ENSAIOS DE CAMPO

2.1.1 - Ensaio do Piezocone

Os ensaios de cone e piezocone, representados pela sigla CPT (*Cone Penetration Test*) e CPTu (*Piezocone Penetration Test*) são internacionalmente conhecidos para a caracterização estratigráfica e estimativa de parâmetros geotécnicos dos solos ao longo da profundidade. O equipamento foi desenvolvido na Holanda, em 1932, e passou por grandes avanços tecnológicos ao longo do tempo. Estes avanços constaram da introdução de duas células de carga que permitem o registro da tensão de ruptura do solo na ponta do cone (q_c) e do atrito lateral da luva (f_s). Em 1970, o equipamento recebeu um transdutor de pressão que permitiu o registro da pressão da água (u) induzida pela inserção do cone no solo. Uma pedra porosa serve de interface entre o solo e o transdutor de pressão (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). Distintas posições são permitidas para esta pedra porosa: face da ponta cônica e denominada de posição (u_1), base do cone posicionada entre a luva e a ponta cônica (u_2) e posterior à luva (u_3). Dentre estas posições para o elemento poroso consagrou-se mundialmente a posição (u_2) como referência.

O ensaio é normalizado no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 12069 (1991), Solo - Ensaio de penetração de cone *in situ* (CPT) - Método de Ensaio, também conhecida como ABNT MB3 406, a qual define diretrizes sobre a dimensão do equipamento, procedimento do ensaio e interpretação. Normativas e procedimentos internacionais regulamentam o ensaio destacando-se a *International Reference Test Procedure IRTP* (1988), a ASTM (D 3441 - 1979 atualizada em 1986) e o Eurocode (2007).

De acordo com ABNT MB3 406 (1991), o ensaio CPT consiste basicamente em cravar uma ponteira cônica (60° de ápice) no terreno à uma velocidade constante de 20 mm/s, com variação de ± 5 mm/s. A seção transversal do cone geralmente é de 10 cm^2 , podendo atingir 15 cm^2 para equipamentos mais robustos e 5 cm^2 para condições especiais (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

O equipamento utilizado para a cravação é constituído por um sistema mecânico hidráulico que pode ser alimentado por um motor à combustão ou elétrico.

Conforme Schnaid e Odebrecht (2012), o CPTu permite o registro de três medidas independentes: resistência de ponta, resistência de atrito e poropressão da base do cone, ou seja, q_c , f_s e u_2 , respectivamente ao longo da profundidade em intervalos geralmente de 2 em 2 cm.

Em função da geometria do corpo do piezocone, o valor de q_c deve ser corrigido em função do efeito de áreas desiguais de contato do solo com o equipamento. Após esta correção (Equação 1), o valor de q_c passa a ser denominado de q_t .

$$q_t = q_c + (1 - a) u_2 \quad (1)$$

Onde:

q_t é a resistência real mobilizada no ensaio, em kPa;

q_c é a resistência de ponta no ensaio, em kPa;

a é um fator de correção relativo à padronização do ensaio obtido através de procedimento de calibração;

u_2 é a poropressão da base do cone, em kPa.

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), a partir das medidas do ensaio é possível calcular os parâmetros derivados, que são a razão de atrito (R_f) e o parâmetro de poropressão B_q , definidos pelas Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \quad (2)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad (3)$$

Onde:

f_s é a resistência de atrito lateral, em kPa;

u_0 é a pressão hidrostática no ponto em função de nível do lençol freático, em kPa;

σ_{vo} é a tensão vertical total no ponto, em kPa.

Devido ao fato de não haver coleta de amostras no ensaio de cone e piezocone para a identificação e classificação das distintas camadas do subsolo, diversos autores propuseram formas de classificação em forma de ábacos. O procedimento é feito de maneira indireta através da observação de comportamento definidos pela sigla SBT (*Soil Behavior Type*) (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). Uma das mais utilizadas no meio técnico é a proposta de Robertson e

Wride (1998) para cálculo do $I_{c,RW}$ (índice de classificação do solo) o qual identifica em qual comportamento mecânico o solo está classificado, Equação 4, com auxílio das Equações 5 e 6. Esta proposta tornou-se mais atrativa, pois pode ser facilmente implementada em planilhas de cálculo.

$$I_{c,RW} = \sqrt{(3,47 - \log Q_t)^2 + (1,22 + \log F_r)^2} \quad ((4)$$

Onde:

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma'_{v0})}{\sigma'_{v0}} \quad ((5)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma'_{v0})} \quad ((6)$$

Onde:

Q_t é a resistência normalizada na ponta do cone;

F_r é a razão de atrito normalizada;

σ'_{v0} é a tensão vertical efetiva, em kPa.

A partir dos valores de $I_{c,rw}$ calculados para cada conjunto de dados (cada profundidade), pode-se obter o tipo de comportamento do solo, com base no Quadro 1.

Quadro 1- Classificação dos solos segundo seu comportamento

Classificação dos solos segundo seu comportamento	$I_{c,RW}$
Solos finos sensitivos	N.A.
Turfas – Solos orgânicos	>3,06
Argilas – argilas e argilas siltosas	2,95 – 3,60
Misturas de argilas e siltes à siltes argilosos	2,60 – 2,95
Misturas de areias – siltes arenosos e areias siltosas	2,05 – 2,60
Areias – areias limpas e areia siltosas	1,31 – 2,05
Pedregulhos e areias densas	< 1,31

Fonte: Robertson e Wride, 1998. Tradução nossa.

2.1.2 Dilatômetro de Marchetti (DMT Convencional)

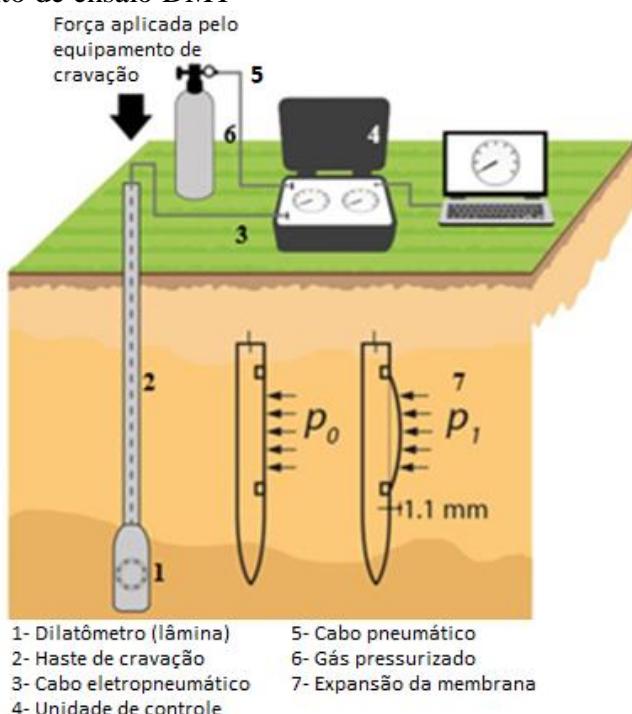
O Ensaio Dilatométrico foi concebido em 1975, pelo Engenheiro Silvano Marchetti, Professor da Universidade de L'Aquila na Itália, desenvolvido a princípio para investigar o desempenho do solo, com enfoque no Módulo de Elasticidade, cujos desafios envolviam estacas carregadas lateralmente (MARCHETTI, 1975). O ensaio não possui normatização

específica no Brasil, fazendo-se então seguir as diretrizes definidas pelas normas internacionais: ASTM D 6635 (2001) e Eurocode 7 (2007), e pelo Comitê Técnico ISSMGE TC16 (2001). De acordo com Belloli (2018), após o ano de 1975, os estudos científicos sobre o DMT Convencional foram ampliados, afastando-se de ser apenas um ensaio de análise de módulo, passando a ser fundamentado em uma série de correlações e parâmetros empíricos publicadas em 1980, para determinar o comportamento mecânico e geotécnico do solo.

2.1.2.1 Equipamento

De acordo com Marchetti (1975), o equipamento de ensaio de DMT Convencional possui uma vista geral da estrutura do equipamento, composto por uma caixa de controle, onde estão localizados os manômetros, as válvulas de controle de pressão, as conexões para abastecimento da pressão de gás e cabos elétricos e a conexão com a lâmina, conforme Figura 1.

Figura 1 – Equipamento de ensaio DMT



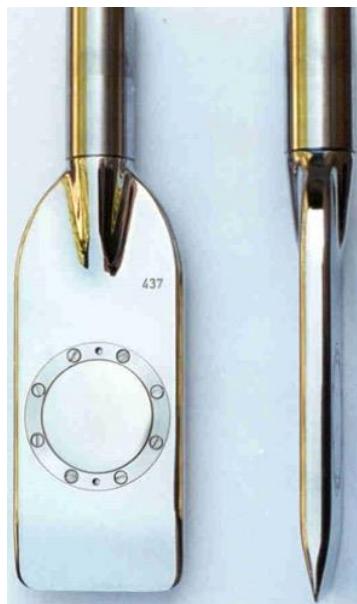
Fonte: Studio Marchetti, 2019. Adaptado.

De acordo com Eurocode 7 (2007), o DMT é composto pelos seguintes componentes:

a) Lâmina

A lâmina é o componente que será inserido no solo, cujos detalhes são mostrados na Figura 2. A lâmina é composta por uma placa de aço inoxidável com 95 mm de largura, 220 mm de altura e 15 mm de espessura, contendo uma membrana metálica circular fina expansível de 60 mm de diâmetro montada em uma das faces, conforme descrito por Marchetti (1980). De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), devido ao seu material ser geralmente em aço especial (liga de ferro-carbono com elementos de adição de níquel, cromo, manganês, tungstênio, molibdênio, vanádio, silício, cobalto e alumínio), a lâmina suporta receber cargas superiores a 250 kN, permitindo a realização de ensaios em solos de maior resistência.

Figura 2– Lâmina do DMT



Fonte: *Studio Marchetti, 2019.*

b) Membranas:

Conforme Belloli (2018), a membrana é circular, fina e flexível, geralmente de aço inoxidável, fixada em seu perímetro com oito parafusos, conforme indica a Figura 3.

Figura 3 – Membrana do DMT



Fonte: *Studio Marchetti*, 2019.

De acordo com Marchetti (1980), as membranas mais usadas são as membranas rígidas de 0,25 mm de espessura (alta resistência à tração), que possuem pouco risco de ruptura. Membranas com 0,20 mm de espessura (alta resistência à tração também) estão disponíveis, e algumas vezes são escolhidas por alguns pesquisadores na investigação de solos moles. Membranas com 0,30 mm de espessura também estão disponíveis e são geralmente usadas em areias muito abrasivas, densas e angulares.

c) Hastes de cravação:

Belloli (2018) comenta que as hastes de cravação transferem a carga do componente de cravação impulsionando a lâmina contra o solo. As hastes são as mesmas manuseadas nos demais ensaios geotécnicos como o cone e o piezocone, conforme Figura 4.

Figura 4 – Hastes da cravação



Fonte: *Studio Marchetti*, 2019.

De acordo com Marchetti e Monaco (2001), as hastes são conectadas às lâminas e ao dispositivo de cravação transferindo os esforços reativos. As hastes possuem diâmetro de 36 mm, existindo hastes mais resistentes com diâmetros de 44 mm à 55 mm, contemplando roscas macho/fêmea nas extremidades, de acordo com o detalhe na Figura 5.

Figura 5 – Detalhe da ligação haste e lâmina



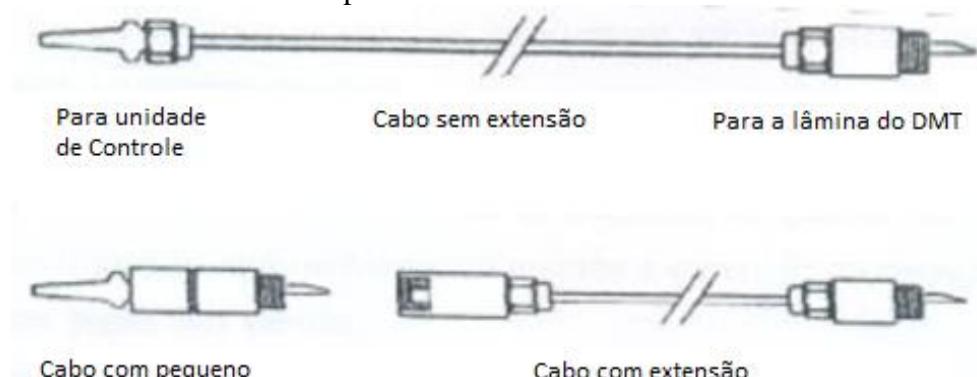
Fonte: Marchetti e Monaco (2001).

d) Cabo eletropneumático:

Fornece corrente elétrica entre o sistema de haste e o sistema de cravação, através de pilhas ou baterias. Os tubos eletropneumáticos (fio condutor dentro de uma mangueira de *nylon*) passam pelo interior das hastes de cravação e fornece pressão contínua e corrente elétrica para realização do ensaio (MARCHETTI *et al.*, 2001).

A Figura 6 apresenta detalhes do cabo eletropneumático.

Figura 6 – Detalhe do cabo eletropneumático



Fonte: Marchetti *et al.*, 2001.

e) Cilindro de gás:

Schnaid e Odebrecht (2012) afirmam que ar comprimido e o nitrogênio gasoso são os gases mais utilizados por serem atóxicos, não inflamáveis e não explosivos. A Figura 7 mostra o gás, em detalhe, armazenado em um cilindro.

Figura 7– Gás armazenado em cilindro



Fonte: Studio Marchetti, 2019.

f) Unidade de controle:

Contempla dois manômetros, calibrados em *bars* ($1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$); o primeiro fornece leitura de 0 a 10 *bars*, para maior precisão em pressões baixas; e o segundo, leituras de

0 a 70 bars (MARCHETTI, 1980). O conjunto que compõe o equipamento DMT Convencional é acompanhado de conectores, calibradores, cabos, chaves, peças sobressalentes etc., conforme Figura 8.

Figura 8 – Unidade de controle do DMT



Fonte: Studio Marchetti, 2019.

2.1.2.2 Procedimentos

Antes de iniciar a leitura do ensaio de DMT Convencional, de acordo com Sosnoski (2016), devido à rigidez da membrana e possíveis imprecisões do sistema de medição, a calibração da membrana é importante e fundamental para uma correta aquisição dos valores de pressões durante as fases de expansão e contração da membrana.

2.1.2.2.1 Calibração da Membrana

De acordo com a Eurocode 7 (2007), todos os dispositivos de conexão e medição de controle do dilatômetro devem ser verificados e calibrados periodicamente com um instrumento de referência adequado para garantir que eles forneçam medições confiáveis e precisas.

Segundo a ASTM D 6635 (2001), estando a lâmina acionada na superfície (pressão atmosférica), e associada ao elemento de controle, com a assistência de uma seringa, a qual simula a pressurização do sistema, é colocado inicialmente o máximo de pressão negativa,

pxando o êmbolo, reproduzindo a pressão que o solo desempenha sobre a membrana durante a cravação, conforme Figura 9. Com este procedimento, possibilita-se o contato entre a membrana e disco sensitivo, e por consequência, o fechamento do circuito elétrico.

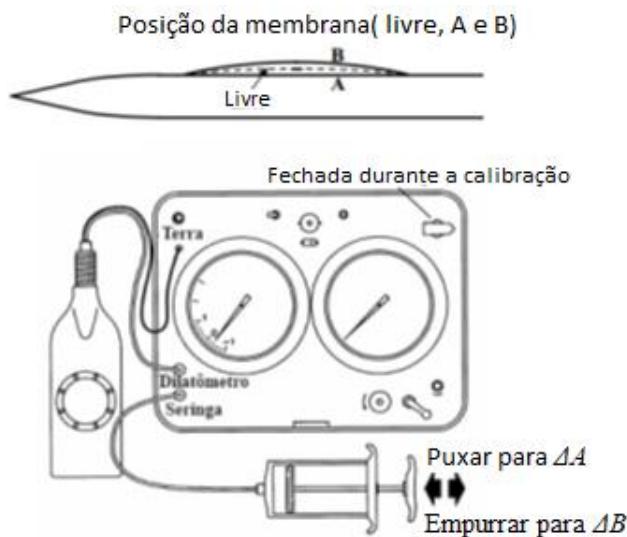
Figura 9 – Calibração da membrana do DMT



Fonte: Belloli, 2018.

A leitura definida no manômetro é chamada de ΔA . Em seguida, a este procedimento, é aplicado a uma pressão positiva, empurrando o êmbolo da seringa, até o momento da membrana se expandir a 1,10 mm, fechando dessa forma o contato do circuito elétrico, adquirindo a leitura ΔB . As leituras ΔA e ΔB são correções fundamentais às leituras de A e B , devido à influência da rigidez da membrana durante sua expansão, conforme Figura 10. Na calibração ao término do ensaio, a diferença entre ΔA e ΔB não deve ser maior que 25 kPa, caso contrário, o ensaio deverá ser descartado (BELLOLI, 2018).

Figura 10 – Posicionamento da membrana

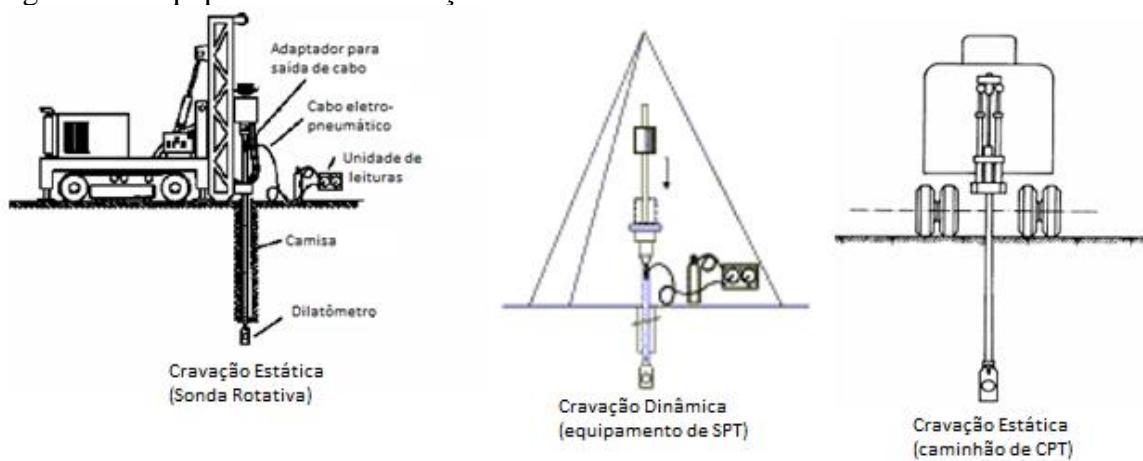


Fonte: Marchetti e Monaco, 2001. Adaptado.

2.1.2.2.2 Início do ensaio DMT Convencional

A escolha do equipamento e da haste para o procedimento dependerá do tipo de DMT. Para o caso do DMT Convencional, a cravação pode ser dinâmica ou estática. Para executar a cravação dinâmica utiliza-se o mesmo equipamento de sondagem à percussão SPT (*Standard Penetration Test*), já para a cravação estática pode-se empurrar a lâmina com o equipamento de penetração ao cone CPT, ou sonda rotativa (GOMES, 2007), conforme Figura 11.

Figura 11– Equipamentos de cravação



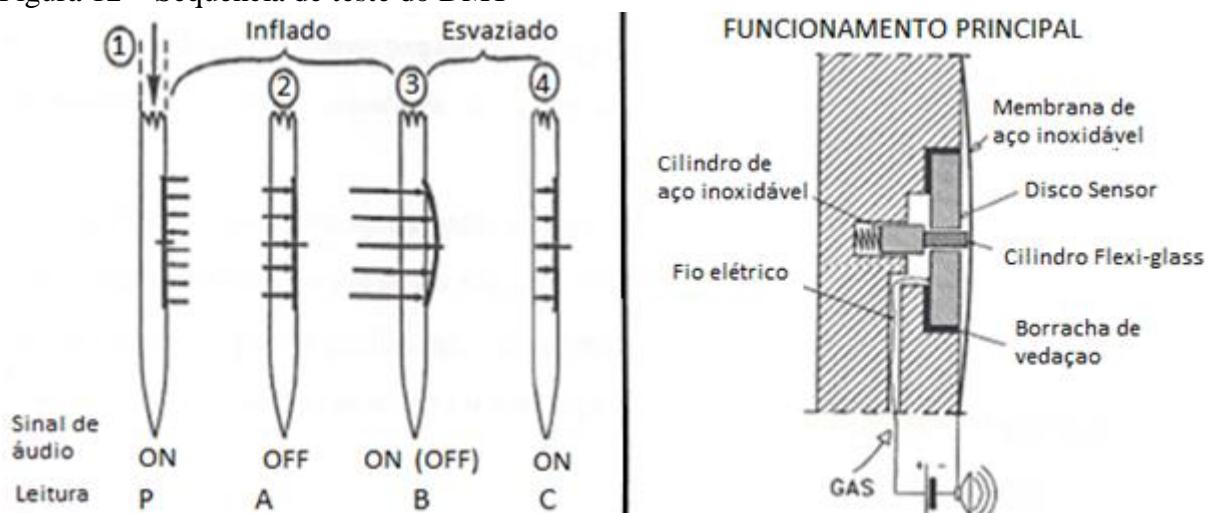
Fonte: Gomes, 2007.

O ensaio baseia-se na cravação da lâmina, com velocidade de descida dependente do tipo de equipamento de cravação, sendo que a cada 20 cm a cravação é paralisada para a expansão da membrana, abrindo manualmente a válvula de controle de fluxo de gás (nitrogênio,

oxigênio ou ar comprimido). No decorrer desse tempo, ouve-se um alarme sonoro vindo da unidade de controle, conforme afirmam Schnaid e Odebrecht (2012).

O funcionamento do equipamento (Figura 12) inicia-se na posição 1 quando a lâmina atinge 20 cm de profundidade de cravação, cuja condição de contato inicial do solo com a membrana seja equivalente à tensão horizontal que o solo exerce sobre a lâmina do DMT durante a execução do ensaio, devido a pressão gerada pelo solo contra o instrumento do DMT Convencional. Para a posição 2, o operador aciona manualmente o manômetro, introduzindo pressão de ar, vindo do reservatório em direção ao cabo eletropneumático, quando o sinal sonoro é ligado. Essa pressão faz com que a membrana expanda em relação ao disco sensor à uma distância de 0,05 mm, executando desta forma a primeira leitura (leitura A). O sinal sonoro é desligado, pois não há contato entre a membrana e o sensor e o circuito é interrompido. Para a posição 3, o cilindro de aço inoxidável da membrana exerce contato com o disco sensor reativando o sinal, e ocorre novamente introdução de pressão de ar no equipamento, expandindo a membrana à uma distância de 1,10mm do disco sensor, executando assim a segunda leitura, ou seja, a leitura B (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). A leitura da pressão B deve ser obtida de 15 a 30 segundos após o início do fluxo de gás, ou seja, após a leitura A. Para a posição 4, leitura C, a leitura é opcional e afere uma possível poropressão quando o sistema é despressurizado.

Figura 12 – Sequência de teste do DMT



Fonte: Marchetti, 1980. Adaptado.

A partir do momento em que a membrana é completamente despressurizada, o equipamento pode avançar a penetração no solo para que o ensaio seja executado a uma nova profundidade.

As vantagens do DMT Convencional são a facilidade do procedimento e manutenção e a boa repetibilidade dos resultados. Porém, a membrana é vulnerável a danos, principalmente quando o ensaio acontece em solos granulares ou pedregulhos (CAMPANELLA e ROBERTSON, 1991).

2.1.3 Dilatômetro de Marchetti (DMT Medusa)

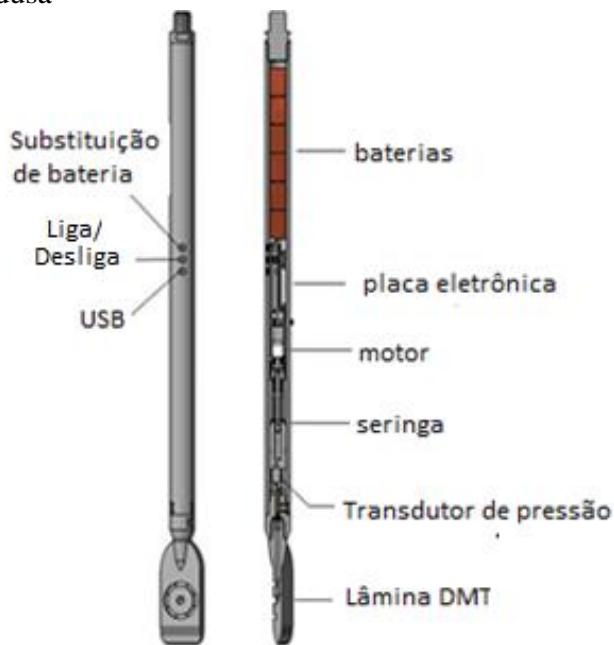
O DMT Medusa é um equipamento desenvolvido na Itália, em 2016, ainda em adaptação, fase de testes e estudos iniciais, diferenciando-se do equipamento tradicional em relação à realização continuada das leituras de pressões enquanto ocorre a expansão da membrana da posição *A* para a posição *B*. Assim como o DMT Convencional, o DMT Medusa não possui normatização no Brasil (MARCHETTI, 2018).

2.1.3.1 Equipamento

O DMT Medusa possui uma sonda autossuficiente sem fio (transdutor de pressão) capaz de realizar de modo autônomo testes de dilatômetro, conforme Figura 13. Um sistema eletrônico é alimentado com uma bateria recarregável, a qual ativa uma seringa motorizada, controlada pelo transdutor de pressão, que expande hidráulicamente a membrana, permitindo o controle volumétrico e as leituras de pressão ao longo do tempo, durante a expansão da membrana. A pressão alcançada é de até 250 *bars*, contra 70 *bars* do equipamento convencional, conforme afirma Marchetti (2018). A lâmina tem as mesmas dimensões do dilatômetro de placa plana padrão original, conforme menciona a ASTM D 6635 (2001-atualizada em 2015).

De acordo com Marchetti (2018), para funcionamento, um interruptor elétrico é necessário para acionar o DMT Medusa e para definir o horário de início ($T_0 = 0$). Uma porta USB (*Universal Serial Bus*) é usada para programar o período do ciclo da medusa, para sincronizar o computador com o tempo de origem T_0 , e baixar os dados no fim do teste. O equipamento DMT Medusa é importante devido a autonomia do seu funcionamento e pode atingir até 200 m, como por exemplo, em investigações geotécnicas no fundo do mar, onde o cabo deverá suprir a altura da água do oceano adicionado com a profundidade de cravação do solo.

Figura 13 – DMT Medusa



Fonte: Marchetti, 2018. Adaptado.

2.1.3.2 Procedimento

De acordo com a *European Commission* (2019) e Marchetti (2018), após penetrar no solo, a cravação da lâmina é pausada a cada 20 cm de profundidade para executar as leituras de pressão internas do solo. Essas leituras são efetuadas continuamente durante todo o tempo que ocorre a expansão e contração da membrana, situação diferenciada em relação ao DMT Convencional onde são feitas apenas duas leituras pausadas, a primeira no início e a segunda no final da expansão da membrana.

Conforme afirmam Marchetti *et al.*, (2019), o funcionamento do equipamento do DMT Medusa é semelhante ao DMT Convencional ao que se refere ao procedimento de expansão da membrana e efetuar as leituras *A* e *B* nas posições de 0,05 mm e 1,10 mm de afastamento da membrana em relação à lâmina. A diferença principal é que no DMT Medusa a expansão não é mais controlada manualmente pelo operador e sim pelo sistema eletrônico que aciona uma seringa que pressuriza a membrana, promovendo a sua expansão de forma controlada com o tempo. Adicionalmente, o sistema permite a leitura contínua da pressão de injeção e a variação volumétrica da membrana, que se expande com o tempo. Este procedimento permite que a lâmina seja inserida no solo com a membrana já na posição 2 (Figura 12). Este fato permite a leitura contínua de expansão da membrana durante a passagem do tempo, que são diferenças básicas entre o DMT Convencional e o Medusa.

O DMT Medusa foi concebido inicialmente para a execução de ensaios em ambientes marítimos à grandes profundidades onde o cabo que controla o sistema passa a ser um problema operacional. Assim o DMT Medusa pode operar de uma forma totalmente autônoma (sem cabo) em ciclos de expansão da membrana com o respectivo registro das leituras nas posições 2 e 3 (Figura 12). Geralmente, nesta condição de trabalho, o tempo definido para cada ciclo é de 1 minuto. Este tempo é suficiente para cravar a lâmina para a próxima posição de ensaio e realizar as leituras *A* e *B*. Decorrido este tempo, avança-se com a lâmina para a próxima posição de ensaio e um novo ciclo se inicia. Os ciclos são repetidos de tempos em tempos em um conjunto correspondente ao total de ensaios (profundidades) desejados (MARCHETTI *et al.*, 2019). Neste procedimento de ensaio totalmente autônomo há que se ter um perfeito sincronismo entre a cravação da sonda e o tempo de cada ciclo.

Marchetti *et al.*, 2019 afirmam que os registros das leituras de cada ciclo são posteriormente, quando a sonda é resgatada para a superfície, transferidos a um computador por meio de uma porta *USB*. Na operação autônoma o procedimento de expansão da membrana é sempre efetuado de forma repetida em ciclos de tempo previamente definidos antes da inserção no solo. Os valores obtidos são armazenados internamente na sonda em um cartão de memória.

Adicionalmente, o DMT Medusa pode ser operado de forma não autônoma. Neste sistema um cabo faz a comunicação dos dados entre a sonda e um microcomputador no qual o operador tem um total controle sobre o ensaio, além de visualizar em tempo real os resultados de cada leitura. Permite também o registro contínuo das leituras com o tempo e manter, desta forma, a membrana na posição de leitura *A*, para acompanhar uma eventual dissipação do excesso de poropressão gerado pela cravação da lâmina. Os ensaios realizados no Campo Experimental de Araquari foram executados com este sistema não autônomo.

O procedimento do DMT Medusa segue as recomendações da ASTM D 6635 (2015), Eurocode 7 (2007) e ISSMGE TC 16 (2001), ou seja, mesmas normatizações do DMT Convencional.

2.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE DMT

Para a estimativa dos parâmetros geotécnicos de DMT, as leituras *A* e *B* são efetuadas geralmente a cada 20 cm de profundidade. Leituras de calibração iniciais são realizadas antes do início de cada ensaio e são destinadas para correção dos valores de *A* e *B*. No sistema do DMT Convencional, analógico, efetua-se também uma leitura de desvio de zero denominada de Z_M . Nos sistemas modernos do DMT Medusa esta leitura não é mais necessária, pois o

transdutor de pressão adota a leitura inicial como sendo a leitura zero. De posse destas leituras de calibração e das leituras A e B calcula-se as pressões P_0 e P_1 . São com estes valores de P_0 e P_1 , que são determinados os valores dos parâmetros intermediários e os parâmetros derivados. No Quadro 2, a sequência das etapas de obtenção e cálculo de parâmetros é indicada por Schnaid e Odebrecht (2012). Apresenta-se na sequência desta revisão este procedimento de forma mais detalhada.

Quadro 2 – Sequência das etapas da obtenção de parâmetros

Etapa	Parâmetro	Descrição
a) Leituras de calibração	ΔA	Primeira leitura de calibração
	ΔB	Segunda leitura de calibração
	Z_M	Leitura de desvio de zero do manômetro
b) Leituras do ensaio	A	Primeira leitura do ensaio
	B	Segunda leitura do ensaio
	C	Leitura opcional
c) Correção das leituras	P_o	Correção da primeira leitura do ensaio
	P_1	Correção da segunda leitura do ensaio
d) Determinação dos parâmetros intermediários	I_D	Índice do material
	K_D	Índice de tensão horizontal
	E_D	Módulo dilatométrico
e) Cálculo de parâmetros derivados	OCR	Razão de sobreadensamento
	S_U	Resistência não drenada
	ϕ'	Ângulo de atrito interno do solo
	C_h	Coeficiente de adensamento horizontal
	K_h	Coeficiente de permeabilidade
	γ	Peso específico
	M	Módulo edométrico
	K_o	Coeficiente de empuxo horizontal

Fonte: Schnaid e Odebrecht, 2012. Adaptado.

2.2.1 Leituras de calibração

As leituras de calibração ΔA e ΔB , mencionadas no item 2.1.2.2.1, são as primeiras leituras de pressão obtidas antes do início dos ensaios, cujos valores de pressão lidos estabelecem a relação entre o instrumento de referência (calibração) e a leitura de pressão do ensaio (MARCHETTI e MONACO, 2001).

2.2.2 Leituras do ensaio

Conforme o item 2.1.2.2.1, as leituras A e B são extraídas durante a expansão e deslocamento da membrana (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). A leitura C é opcional, uma vez que o equipamento está despressurizado, seja ele DMT Convencional ou DMT Medusa.

2.2.3 Correção das leituras

As pressões A , B e C , provenientes das leituras dos ensaios, devem ser corrigidas devido as calibrações ΔA e ΔB , originando as pressões corrigidas P_0 , P_1 e P_2 respectivamente, compreendidas com as Equações 7, 8 e 9.

$$P_0 = 1,05 (A - Z_M + \Delta A) - 0,05 (B - Z_M - \Delta B) \quad (7)$$

$$P_1 = (B - Z_M - \Delta B) \quad (8)$$

$$P_2 = (C - Z_M + \Delta A) \quad (9)$$

Onde:

Z_M = desvio de zero do manômetro analógico, em kPa.

Para o DMT Medusa, P_0 é calculado de forma distinta, devido ao fato já mencionado de que a membrana não contrai em direção ao disco sensor, ocasionado pela tensão horizontal do solo. Como desta forma, no DMT Medusa, a expansão da membrana inicia há uma distância de 0,05 mm, a Equação 10 mostra a obtenção de P_0 para o ensaio.

$$P_0 = (A - Z_M + \Delta A) \quad (10)$$

Para as demais pressões, P_1 e P_2 , o cálculo de obtenção no DMT Medusa é igual ao DMT Convencional.

Baseado nas principais leituras do DMT (P_0 e P_1), Marchetti (1980) definiu três parâmetros intermediários do solo, sendo eles I_D , K_D e E_D .

2.2.4 Parâmetros intermediários I_D , K_D e E_D

Através dos parâmetros intermediários, obtém-se os indicadores do solo para classificação e estimativa de comportamento mecânico.

2.2.4.1 Índice de Material (I_D)

O parâmetro I_D , denominado de Índice do Material, fornece um informativo do tipo de solo, servindo como referência na escolha das demais correlações empíricas do ensaio. O I_D é calculado através da Equação 11:

$$I_D = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0} \quad (11)$$

Onde:

u_0 é a poropressão hidrostática, em kPa.

Segundo Marchetti (1980), a classificação dos solos, de acordo com o comportamento mecânico e o parâmetro I_D , pode ser identificada de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 – Classificação dos solos baseado no parâmetro intermediário I_D

TIPO DE SOLO	I_D
Argila muito mole/trufa	< 0,10
Argila	0,10 a 0,35
Argila Siltosa	0,35 a 0,60
Silte Argiloso	0,60 a 0,90
Silte	0,90 a 1,20
Silte Arenoso	1,20 a 1,80
Areia Siltosa	1,80 a 3,30
Areia	> 3,30

Fonte: Marchetti, 1980.

O I_D não reflete o resultado direto de uma análise granulométrica do solo e sim a resposta de comportamento do solo à solicitação imposta pelo processo de expansão da membrana contra o solo.

2.2.4.2 Tensão Horizontal (K_D)

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), o K_D é definido de forma análoga ao coeficiente de empuxo ao repouso (K_0), sendo calculado através da Equação 12.

$$K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (12)$$

Onde:

σ'_{v0} é a tensão vertical efetiva, em kPa.

Teoricamente, de acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), o parâmetro K_D deveria ser o índice que representa os parâmetros do solo que são influenciados pelo coeficiente de empuxo no repouso K_0 , que é representativo do solo antes da inserção da lâmina no solo. Os parâmetros geotécnicos que são derivados deste valor são a tensão de pré-adensamento, densidade do solo e resistência drenada e não drenada do solo. Contudo, como o solo experimenta uma mudança de tensões em decorrência da inserção da lâmina, este parâmetro K_D deve ser corrigido.

Marchetti *et al.*, (2001) afirmam que em argilas normalmente adensadas (NA), K_D denota valores constantes com a profundidade e próximos à 2 (1,8 a 2,3). Em solos pré-adensados, K_D apresenta valores próximos a 3 ou superiores, diminuindo com a profundidade. Além disso, o perfil de comportamento de K_D é similar ao da Razão de Sobreadensamento (OCR), contribuindo para o entendimento sobre o depósito do solo e seu histórico de tensões.

2.2.4.3 Módulo Dilatométrico (E_D)

O E_D , é baseado na diferença entre o P_0 e P_I , obtida ao longo de um aumento relativamente pequeno do deslocamento da membrana e, é o início para avaliação do comportamento de compressibilidade, determinando, desta forma, características de deformabilidade do solo. De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), assume-se que o solo ao redor da lâmina do dilatômetro é constituído por duas superfícies elásticas, tendo a lâmina como plano de simetria, cuja expansão da membrana pode ser moldada como uma carga flexível de uma área de seção transversal circular.

O módulo dilatométrico E_D é definido conforme Equação 13, sendo drenado em areias, não drenado em argilas e parcialmente drenado em solos com permeabilidade intermediária.

$$E_D = 34,7 (P_I - P_0) \quad (13)$$

Desde Marchetti (1980), muitos outros estudos foram realizados, sendo elaboradas uma série de distintas correlações, empíricas e semi-empíricas, conforme o Quadro 3. Neste quadro verifica-se que a compreensão do ensaio é realizada diferentemente entre o comportamento drenado e não drenado do solo. Ocorre apenas uma restrição que está no módulo de

deformabilidade, interpretado da mesma forma para ambos os casos, aplicando os parâmetros intermediários apenas como indicadores do coeficiente de correlação.

Quadro 3 – Estudos realizados para o desenvolvimento de correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos, através do ensaio DMT.

Parâmetros Geotécnicos	Parâmetros Intermediários (DMT)	Referências
S_u (Argilas)	$f(I_D, K_D)$	Marchetti (1980)
ϕ' (Areias)	$f(I_D, K_D, \text{força de cravação})$	Marchetti (1975), Schmertmann (1982)
K_o (Argilas)	$f(I_D, K_D)$	Marchetti (1980), Lunne <i>et al.</i> , (1990)
K_o (Areias)	$f(K_D, \text{força de cravação})$	Schmertmann (1982)
OCR (Argilas)	$f(I_D, K_D)$	Marchetti (1980), Powel e Uglow (1988), Lunne, Lucasse e Red (1989)
OCR (Areias)	$f(K_D, \text{força de cravação})$	Baldi <i>et al.</i> , (1988)
Módulos (E e M)	$f(I_D, E_D, K_D)$	Marchetti (1980), Baldi <i>et al.</i> , (1988), Roberston, Campanella e Gillespie (1988)

Fonte: Lutenegger, 1988. Adaptado.

A partir destes três parâmetros intermediários é possível a estimativa de parâmetros derivados que estão apresentados na sequência.

2.2.5 Parâmetros Derivados

Conforme o Quadro 2 apresentado no item 2.2, há diversos parâmetros derivados, como por exemplo, OCR, S_u , ϕ' , entre outros. Atendendo a um dos objetivos deste trabalho, que é a avaliação do impacto do procedimento executivo do ensaio sobre o ϕ' em solos de comportamento mecânico intermediário, discorre-se na sequência desta fundamentação teórica somente a estimativa deste parâmetro geotécnico.

2.2.5.1 Ângulo de Atrito (ϕ')

De acordo com Marchetti (1997), a determinação de ϕ' a partir do ensaio do DMT pode ser executada com base em dois métodos distintos disponíveis na literatura.

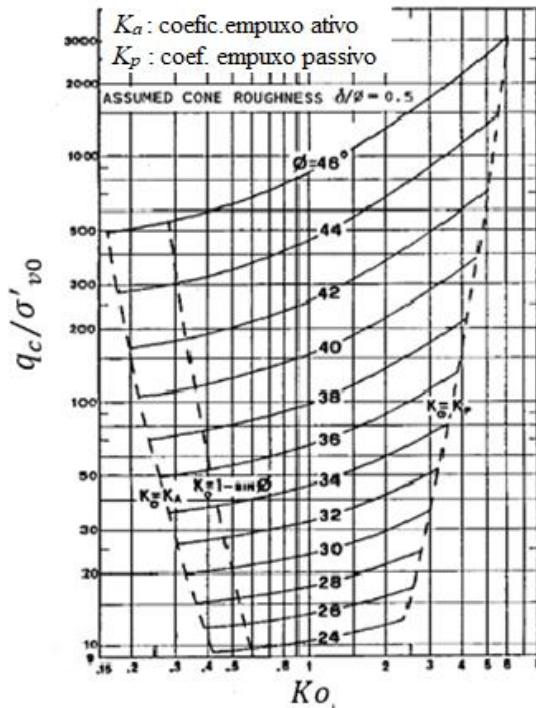
No primeiro método, o ϕ' é expresso em função de duas variáveis (K_D e K_0) o que implica no conhecimento de duas expressões para resolver o sistema de equações. A primeira equação do sistema é empírica e foi obtida a partir de resultados em câmara de calibração em areias do *Po River*, região do norte da Itália. Nesta equação, proposta por Schmertmann (1982), K_D é expresso em função de K_0 e ϕ' , ou seja, $\phi' = f(K_D, K_0)$.

A segunda equação do sistema foi a proposta pela teoria desenvolvida por Durgunoglu e Mitchell (1975) onde ϕ' é expresso em função da resistência de ponta do cone q_c e de K_0 , sendo $\phi' = f(q_c, K_0)$, conforme afirma Marchetti (1997).

Com estas duas expressões resolve-se o sistema de equações a partir de um processo iterativo e determina-se simultaneamente um par de valores de ϕ' e K_0 . Neste método Schmertmann (1982) afirma que no lugar de q_c pode ser utilizado o valor da resistência à penetração da lâmina do DMT (q_D).

Posteriormente, com o intuito de evitar o processo iterativo na determinação do ϕ' , Marchetti (1985) representou graficamente em forma de ábaco a solução do sistema de equações, conforme Figura 14.

Figura 14 – Ábaco para a obtenção do ϕ' em função de (q_c/σ'_{v0}) e K_0



Fonte: Marchetti, 1985. Adaptado.

O segundo método disponível na literatura para estimar o valor do ϕ' de areias foi proposto por Marchetti (1997), onde ϕ' é obtido a partir de uma única expressão, função de K_D , representada na Equação 14.

$$\phi' = 28 + 17,6 \cdot \log(K_D) - 2,1 \cdot \log^2(K_D) \quad (14)$$

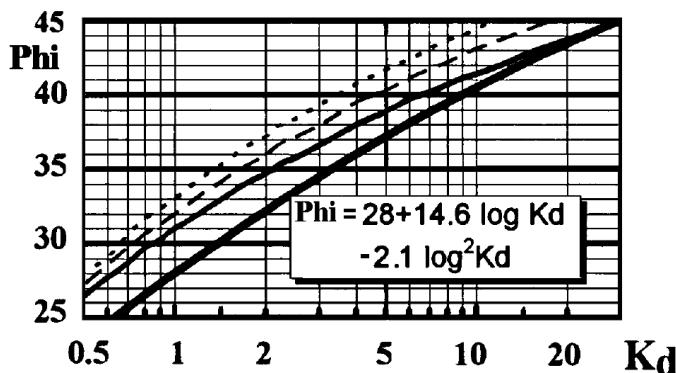
Esta expressão foi derivada de uma observação efetuada por Campanella e Robertson (1991) onde a relação de $(q_c/\sigma'_{v0})/K_D$ é igual a 33 (esta relação é discutida posteriormente no item 2.4). Substituindo o valor (q_c/σ'_{v0}) por $33 \cdot K_D$ na Figura 14 e assumindo distintos valores de K_0 , Marchetti (1997) observou que ϕ' é pouco sensível ao valor de k_0 , como pode ser verificada na Figura 15.

As três curvas superiores da Figura 15 (linhas pontilhadas; tracejada e contínua) foram obtidas considerando $K = K_{0,nc} = 1 - \sin\phi$ (linha pontilhada) adotado como limite inferior de K ; $K = 1$ (linha tracejada) adotado como limite intermediário e $K = \sqrt{K_p}$ (linha contínua) adotado como limite extremo superior do coeficiente de empuxo k . Para estes limites os valores de ϕ' variam pouco, cerca de 3 graus, para as distintas considerações de K (MARCHETTI, 1997).

Marchetti (1997) ainda comparou os valores do ϕ' estimado com base neste segundo método com ensaios pressiométricos realizados em campo por Campanella e Robertson (1991). Nesta comparação observa-se que o ϕ' , estimado por este segundo método, descreve com precisão o perfil estratigráfico de ϕ' , contudo destaca que, em sendo o banco de dados que deu origem a uma das equações do sistema acima descrito obtido em câmara de calibração, pode sobre estimar o valor de ϕ' . A sobre estimação do valor de ϕ' deve-se ao fato dos ensaios serem em câmara de calibração e não apresentarem qualquer tipo de cimentação ou envelhecimento.

Com base nestas considerações e na forma simplificada desta segunda alternativa de estimativa do ϕ' , Marchetti (1997) propôs a curva inferior da Figura 15 (linha grossa), com uma redução mais pronunciada de ϕ' para valores baixos de K_d e se aproximando do limite inferior para valores altos de K_d . O mesmo autor reforça que, mesmo sendo os valores de ϕ' estimativas aproximadas, são de grande valor à prática da engenharia. A Equação 17 é representada pela linha grossa na Figura 15.

Figura 15 – Obtenção do ϕ' em função de K_d



Fonte: Marchetti, 1997.

2.3 AVALIAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE DRENAGEM PARCIAL

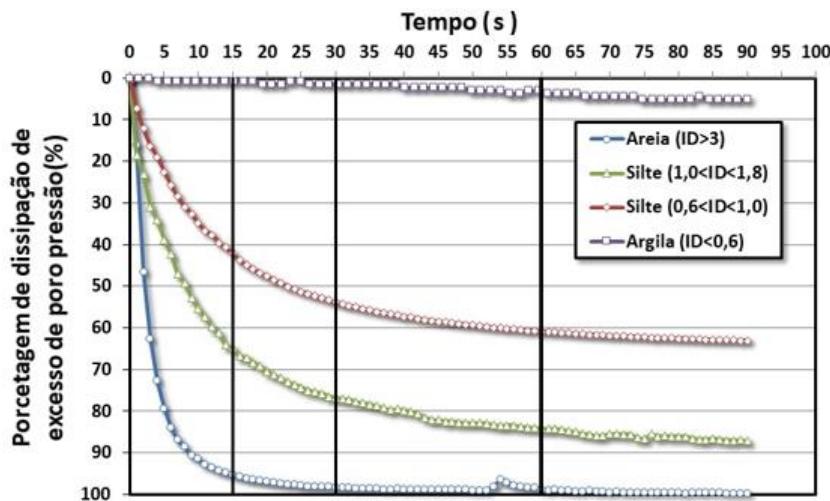
As metodologias e interpretação de ensaios de campo presentes na literatura foram fundamentadas em condições não drenadas ou totalmente drenadas. Ensaios realizados em solos de baixa permeabilidade ou solos argilosos, em geral apresentam uma resposta não drenada às solicitações e a interpretação destes resultados é efetuada com base em tensões totais. Já os solos permeáveis ou solos arenosos, apresentam uma resposta drenada e as análises são feitas em termos de tensões efetivas, conforme definido por Lambe e Whitman, 1979.

Os solos que apresentam composição granulométrica entre areias e argilas poderão apresentar resposta parcialmente drenada mediante a velocidade de carregamento padrão dos ensaios de campo. Este comportamento de drenagem parcial é função da permeabilidade do solo que pode ser representado tanto através de coeficiente de permeabilidade (k) como através do coeficiente de adensamento (c_v). Esta drenagem parcial implica na alteração do estado de tensões ao redor da sonda, seja do piezocone ou palheta, ou expansão da membrana do DMT. Como este estado de tensões não pode ser quantificado, a avaliação das propriedades geotécnicas, a partir das metodologias existentes, se torna imprecisa (SCHNAID, 2005).

A Figura 16 ilustra a variação percentual do excesso de poropressão no entorno de uma lâmina do DMT Convencional instrumentada com um transdutor de poropressão (SCHNAID e ODEBRECHT, 2015). Como a tensão efetiva ($\sigma' = \sigma - u$) ou total ($\sigma = \sigma' + u$) é diretamente proporcional ao valor da poropressão (u), variações em u implicam alterações no valor da tensão quando das leituras dos valores de A e B . Para solos argilosos ($I_D < 0,6$) a dissipação do excesso de poropressão gerada devido a inserção da lâmina do DMT é praticamente nula e o estado de tensões não varia entre as leituras A e B típicas do ensaio do DMT. O mesmo acontece para os solos arenosos, os quais drenam rapidamente ($I_D > 3$). Já para solos siltosos ($0,6 < I_D < 1,8$) observa-se uma variação da poropressão o que resulta na variação das tensões. Como não se tem controle ou medida deste valor de tensões durante o ensaio, normalmente realizado nas leituras A e B , as mesmas são fortemente influenciadas pelas características de drenagem do solo ensaiado. Consequentemente, os parâmetros geotécnicos obtidos com base em procedimentos consagrados no meio técnico para solos arenosos e argilosos são inadequados para solos com drenagem parcial.

Nos solos residuais e nos rejeitos de mineração, que se enquadram nos solos intermediários, a avaliação da condição de drenagem é um fator fundamental para a estimativa cautelosa de parâmetros geotécnicos (SCHNAID e ODEBRECHT, 2015; RANDOLPH e HOPE, 2004; SCHNAID, LEHANE e FAHEY, 2004).

Figura 16 – Porcentagem de dissipação de poropressão *versus* tempo para distintos tipos de solo.



Fonte: Schnaid e Odebrecht, 2015. Tradução nossa.

Analizando a Figura 16, conclui-se que para grandes intervalos de tempo (tempo > 100 seg) decorridos após a inserção da lâmina, a variação percentual do excesso de poropressão é praticamente nula para os solos intermediários ($0,6 < ID < 1,8$). Como a variação das poropressões são nulas, as leituras *e A* e *B* não são mais afetadas.

Com base nestas informações, a variável tempo no item drenagem é fator fundamental na realização dos ensaios de campo. Como o tempo está inversamente ligado à velocidade de cravação do piezocone ou de rotação da palheta do vane *test*, a velocidade de ensaio passa a ter papel fundamental na interpretação dos ensaios.

Pesquisas ao longo dos anos vêm sendo desenvolvidas para avaliar as condições de drenagem durante a realização de ensaios em diferentes solos. Estas pesquisas têm sido realizadas especialmente em ensaios de campo, (BLIGHT, 1968; BEDIN, 2006; RANDOLPH e HOPE, 2004; SCHNAID, BEDIN e COSTA FILHO, 2010; SOSNOSKI, 2016; KLAHOLD, 2013; dentre outros) realizados com diferentes velocidades.

Estas pesquisas buscam estabelecer limites para os quais os ensaios possam ser interpretados adequadamente. Blight (1968) foi um dos pioneiros e propôs um método para pré-selecionar a duração do ensaio de palheta (através da velocidade de rotação da palheta), a fim de permitir a correta interpretação dos resultados. O autor propôs uma equação fundamentada em um fator tempo adimensional (T) representada pela Equação 15.

$$T = \frac{c_v \cdot t}{d^2} \quad (15)$$

Onde:

c_v é o coeficiente de adensamento, considerando as características de drenagem do solo, em cm^2/s ;

t é o tempo de ensaio até atingir o torque máximo (ruptura) do solo, em s;

d é o diâmetro da palheta que afeta o volume do solo no ensaio, em cm.

O fator tempo é relacionado com o grau de drenagem U (Equação 16) obtidos através de ensaios a diferentes velocidades de rotação da palheta.

$$U = \frac{V - V_0}{V_1 - V_0} \quad (16)$$

Onde:

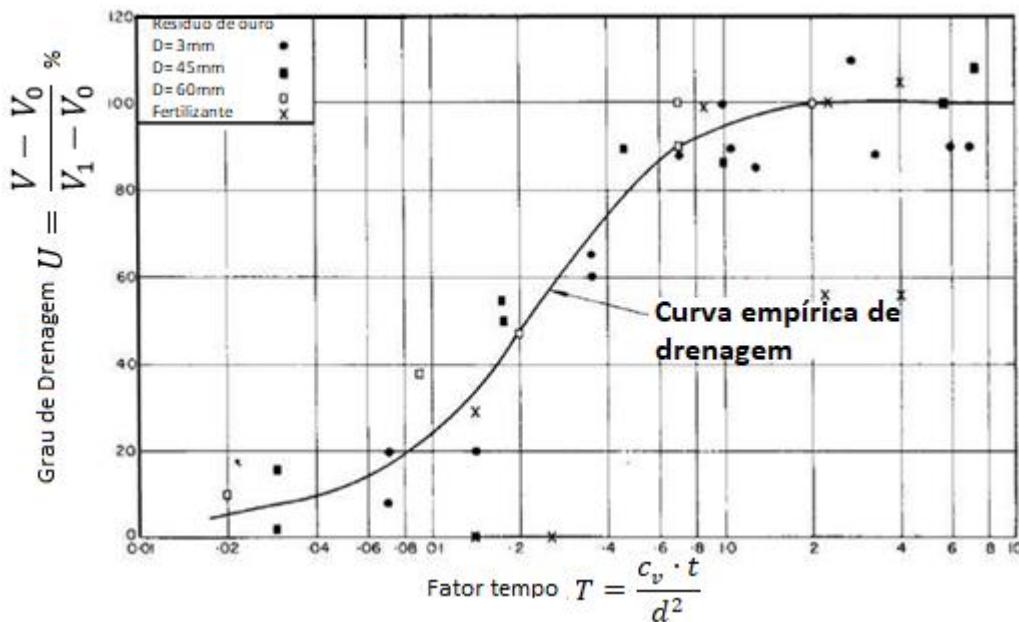
V_1 é o torque na ruptura medido na condição drenada (ensaços lentos), atribuído ao grau de drenagem unitário, em N.m;

V_0 é o torque na ruptura em condições não drenadas (ensaços rápidos), atribuído ao grau de drenagem zero, em N.m;

V é o torque na ruptura em condições intermediárias, em N.m.

Os resultados de Blight (1968), *apud* Klahold 2013 (Figura 17) foram obtidos para resíduos de comportamento intermediário entre a areia e a argila, oriundos da mineração de ouro e fertilizantes. Estes resultados sugerem que o valor do torque na ruptura aumente para ensaios realizados de forma lenta. Para valores de fator tempo (T) maiores de 2, o ensaio apresenta drenagem total ($U=100\%$) e para fatores de tempo inferiores a 0,02, grau de drenagem nulo.

Figura 17 – Curva de drenagem empírica



Fonte: Blight, 1968 *apud* Klahold, 2013

Esta metodologia foi adotada por diversos autores como Finnie e Randolph (1994), Randolph e Hope (2004); Schnaid, Lehane e Fahey, (2004); Bedin (2006); Klahold (2013), entre outros. No lugar do fator tempo (T) proposto por Blight (1968), foi adotado um fator velocidade adimensional (V) para ensaios de piezocone, representada pela Equação 17.

$$V = \frac{v \cdot d}{c_v} \quad (17)$$

Onde:

v é a velocidade de penetração, em cm/s;

d é o diâmetro da sonda, em cm;

c_v é o coeficiente de adensamento, em cm^2/s .

Sosnoski (2016) propôs uma modificação para a velocidade adimensional (V) da Equação 17, já que a mesma se refere ao coeficiente de drenagem vertical – adensamento – (c_v) e não a coeficiente de drenagem radial – adensamento horizontal – (c_h), normalmente obtido nos ensaios de piezocone. Nesta modificação a velocidade adimensional passou a ser denominada de Fator Velocidade (V_t). Sosnoski (2016) utilizou no lugar de c_h o valor de t_{50} que corresponde ao tempo necessário para que ocorra 50% da dissipação, conforme Equação 18.

$$V_t = \frac{v \cdot t_{50}}{d\sqrt{I_r}} \quad (18)$$

Onde:

v é a velocidade de penetração da sonda, em (mm/s);

t_{50} é o tempo necessário para que ocorra 50% de dissipação do excesso de poropressão (s);

d é o diâmetro da sonda, em (mm);

I_r é o índice de rigidez do solo (valor adimensional).

Para o valor da porcentagem de adensamento (U), Sosnoski (2016) manteve a expressão adotada por DeJong e Randolph (2012), proposta por Wroth (1984), conforme Equação 19.

$$U = \frac{\Delta u}{\Delta u_{max}} = \frac{(u_i - u_0)}{(u_{max} - u_0)} \quad (19)$$

Onde:

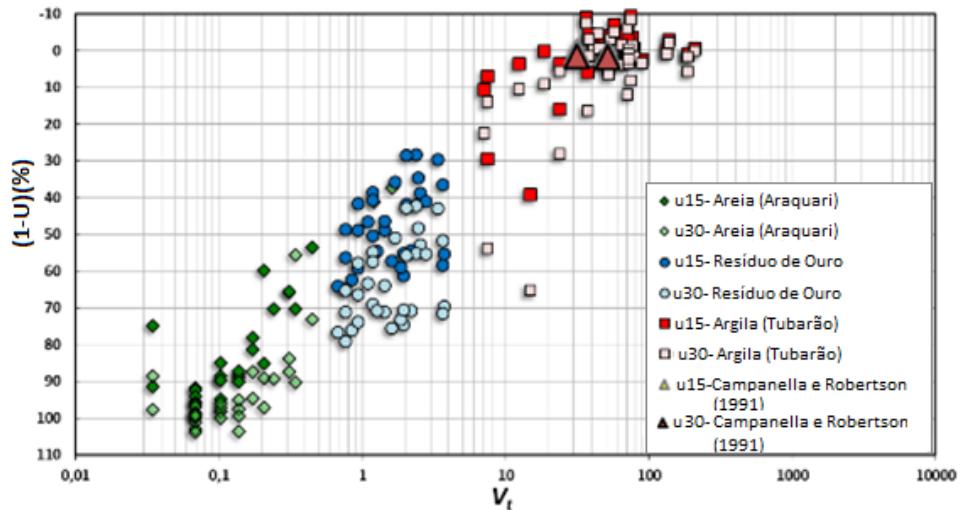
u_i é a poropressão, em (kPa);

u_0 é a poropressão de equilíbrio, em (kPa);

u_{max} é a máxima poropressão gerada na penetração da sonda, em kPa.

Com base nesta abordagem, Sosnoski (2016) estudou três solos distintos, a saber: argila de Tubarão/SC (material pouco permeável); resíduo de ouro (material com permeabilidade intermediária) e areia de Araquari - SC (material permeável). A Figura 18 apresenta estes resultados que, por conveniência do autor, a porcentagem de adensamento adimensional U foi expressa em $(1-U)$.

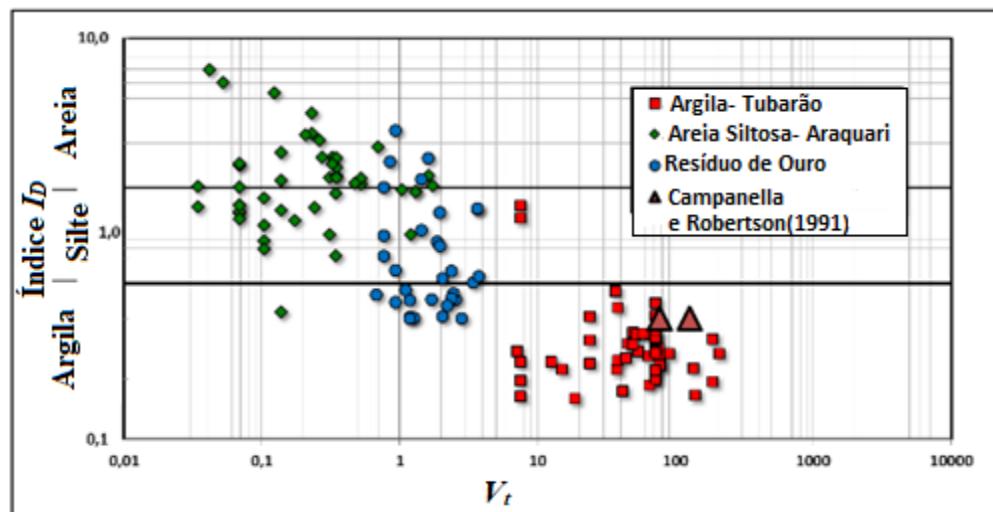
Figura 18 – Dissipação normalizada nos tempos 15 s e 30 s do DMT versus fator velocidade utilizando o DMTU nos materiais pesquisados



Fonte: Sosnoski (2016).

Adicionalmente Sosnoski (2016) apresentou os mesmos resultados em um outro espaço, I_D versus V_t , (Figura 19). Pode-se observar que em ambos os espaços das Figura 18 e Figura 19, o solo do campo experimental de Araquari, apesar de ser definido como permeável, possui vários pontos que apresentam drenagem parcial (losangos verdes).

Figura 19 – I_D versus fator velocideade V_t .

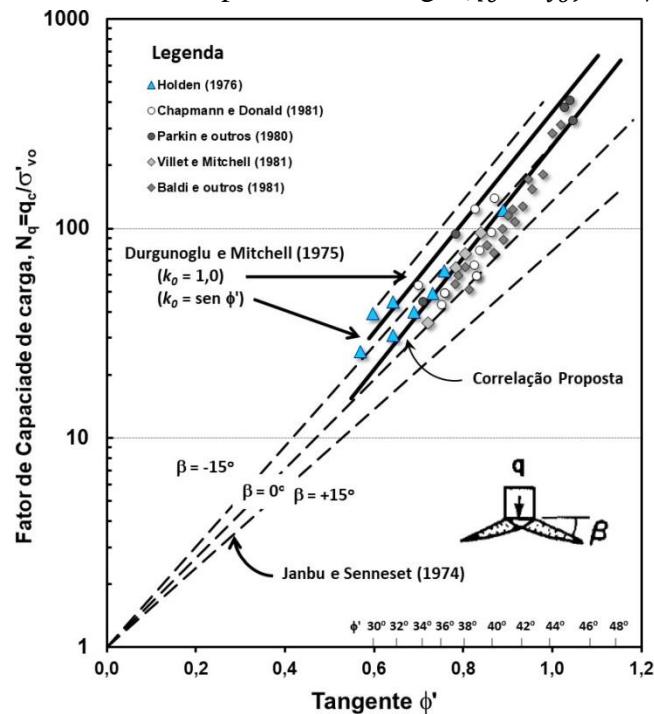


Fonte: Sosnoski (2016).

2.4 RELAÇÃO (q_t/σ'_{vo}) VERSUS K_D

A estimativa do ϕ' do solo na prática da engenharia com o uso do piezocone é efetuada a partir de correlações empíricas, obtidas em câmara de calibração (Schmertmann, 1982), métodos analíticos fundamentados em teoria de capacidade de carga (JANBU E SENNESET, 1974; DURGUNOGLU E MITCHELL, 1975) e correlações empíricas obtidas em interpretação de ensaio de campo (CHAPMAN E DONALD, 1981; BALDI *et al.*, 1982; HOLDEN, 1976 ; VEISMANIS, 1974; PARKIN *et al.*, 1980; VILLET E MITCHELL, 1981). Estas estimativas estão resumidas no gráfico proposto por Robertson e Campanella (1983) e apresentado na Figura 20. Esta proposta de estimativa do ϕ' é de consenso no meio técnico e servirá para validar o mesmo nesta dissertação.

Figura 20 – Relação entre fator de capacidade de carga (q_c/σ'_{vo}) e o ϕ'

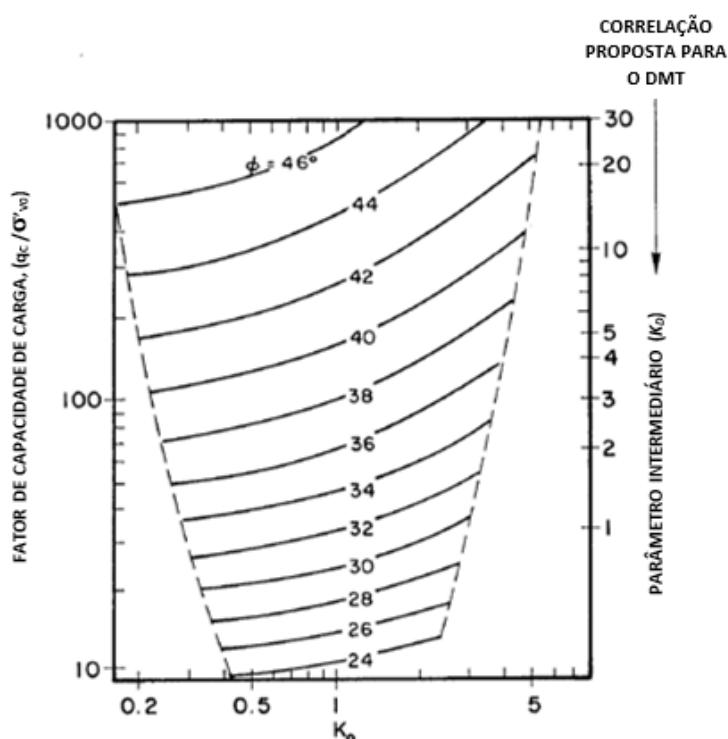


Fonte: Robertson e Campanella, 1983.

Posteriormente Campanella e Robertson (1991) ao estudarem o ensaio dilatométrico propuseram o gráfico apresentado na Figura 21 desenvolvido a partir da teoria de Durgunoglu e Michell (1975). Neste gráfico correlacionam o fator de capacidade de carga (q_c/σ'_{vo}) com o parâmetro intermediário (K_D) obtido no ensaio dilatométrico e, assim, permitiram a transposição do conhecimento na determinação do ϕ' , estabelecido para o ensaio CPT, para o DMT.

Esta transposição do conhecimento na determinação do ϕ' se dá pela razão fator de capacidade de carga pelo índice de tensão horizontal ($(q_c/\sigma'_{vo})/K_D$). Esta razão vale 33 conforme proposto por Campanella e Robertson (1991), quando divide-se a escala máxima de 1000 do fator de capacidade de carga (q_c/σ'_{vo}) por 30 (valor máximo da escala de K_D). Contudo, este valor foi determinado em câmara de calibração para areias limpas e pode ser questionado quanto ao uso em outros tipos de solos. Uma pesquisa sobre esta razão é efetuada neste trabalho e apresentada posteriormente.

Figura 21 – Ábaco (q_c/σ'_{vo})- K_0 - ϕ' - K_D



Fonte: Campanella e Robertson, 1991. Tradução nossa

3 PERFIL ESTRATIGRÁFICO DO CAMPO EXPERIMENTAL DE ARAQUARI - SC

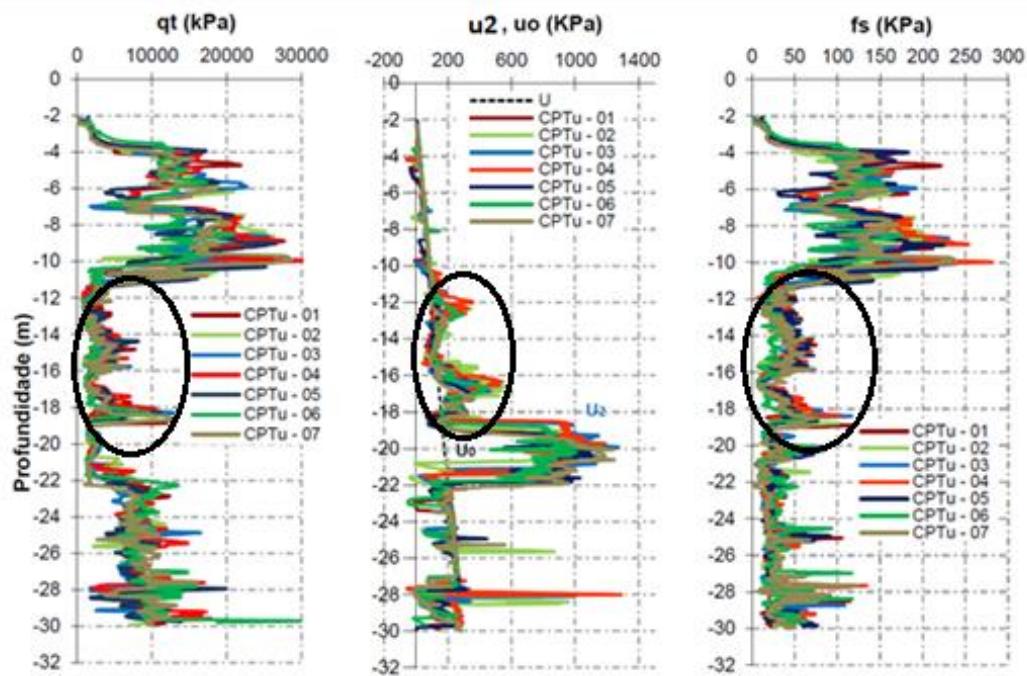
No presente capítulo apresenta-se a caracterização geotécnica do solo do Campo Experimental de Araquari com vista a estabelecer elementos necessários à discussão e análise dos resultados da presente pesquisa. A caracterização é efetuada a partir da interpretação de ensaio de campo e ensaios de laboratório com amostras coletadas durante a escavação das estacas executadas no campo experimental. Com estas interpretações é possível adicioná-las às análises de resultados extraídos em campo pelos métodos do DMT Convencional e DMT Medusa, com ênfase em solos de drenagem parcial, e utilizá-las para ampliação no banco de dados, com informações de solos com comportamento intermediário para a presente pesquisa.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DO CPTu

O perfil estratigráfico do campo experimental de Araquari, representado na Figura 22, foi formado por um conjunto de sete sondagens CPTu's, elaborado por Nienov (2016). O perfil apresenta superficialmente uma camada de areia limpa com cerca de 11 m de espessura. Segundo dos -11 m aos -19 m, região circulada, encontra-se uma camada de areia siltosa ou silte arenoso com comportamento mecânico intermediário. Imediatamente abaixo desta camada de solo, encontra-se uma camada de argila que vai dos -19 m aos -23 m de profundidade, seguindo uma camada de areia até o final da sondagem.

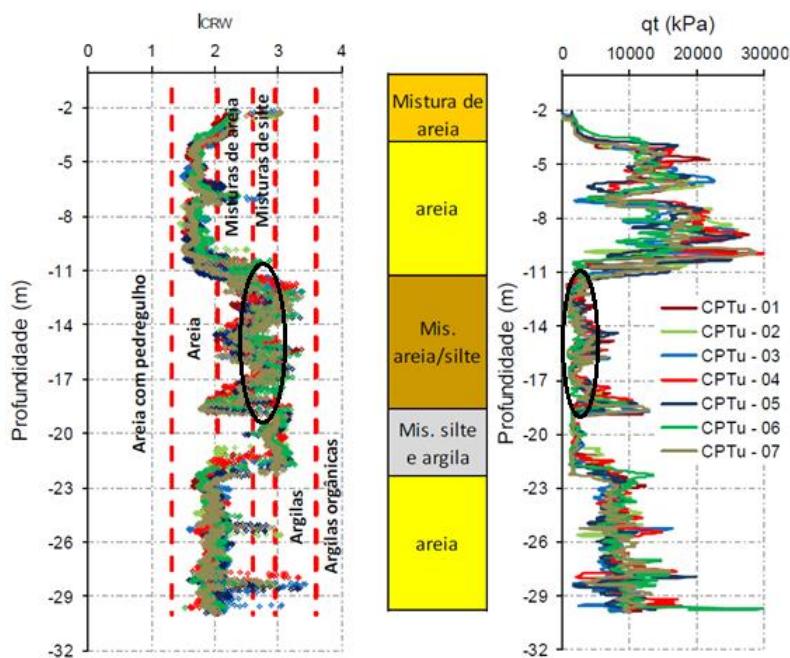
Observa-se na Figura 22 a variação da resistência de ponta corrigida do piezocone (q_t), a variação da poropressão (u) e a resistência de atrito lateral (f_s) em função da profundidade. Nas profundidades de -15 m aos -18 m, na cravação do piezocone, percebeu-se a geração de um leve excesso de poropressão típico de solos siltosos que apresentam comportamento intermediário. Para o melhor entendimento do perfil estratigráfico associa-se a Figura 22 com a Figura 23, que apresenta a interpretação do perfil, através do I_{crw} , com base no comportamento do solo proposto por Robertson e Wride (1998). Percebe-se na região circulada da Figura 23 a presença de solos com comportamento descrito pelo I_{crw} , como misturas de areias e misturas de siltes. Estas misturas são típicas de solos que apresentam comportamento intermediário, na mesma profundidade do que analisado na Figura 22.

Figura 22 – Perfil estratigráfico do Campo Experimental de Araquari. (Onde: q_t é a resistência de ponta do CPTu; u_2 é a poropressão gerada durante a cravação do CPTu; u_0 é a poropressão hidrostática, f_s é a resistência de atrito do CPTu)



Fonte: Nienov, 2016.

Figura 23 – Interpretação do perfil estratigráfico



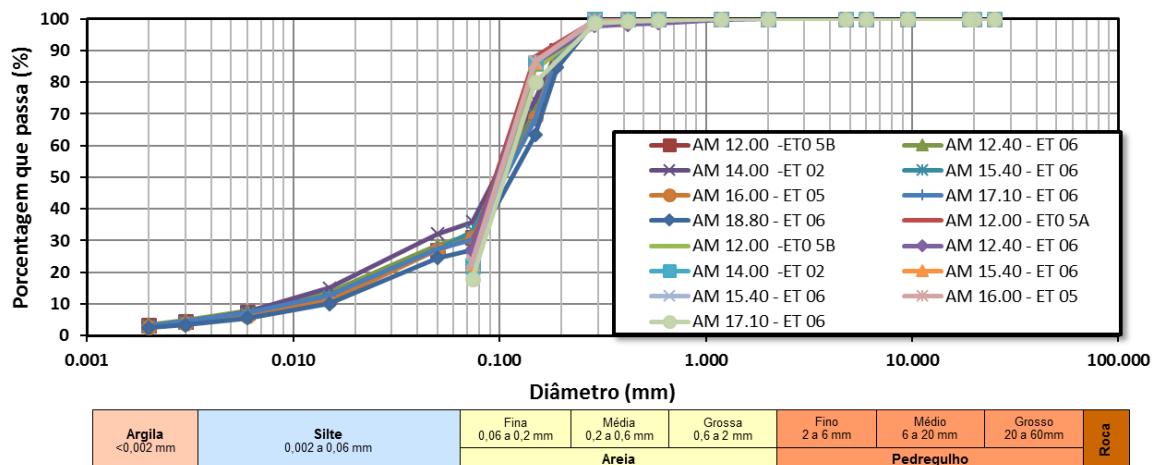
Fonte: Nienov, 2016.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DA CURVA GRANULOMÉTRICA

Os ensaios de laboratório que caracterizaram o material do Campo Experimental de Araquari – SC auxiliaram a definir o comportamento mecânico dos materiais da região. Para isso, segundo Lavalle (2017), foram coletadas 23 amostras de diferentes profundidades, durante a escavação das estacas. Um dos ensaios realizados foi o de granulometria por peneiramento e sedimentação, realizado de acordo com a NBR (Norma Brasileira) 7181 (2018).

A Figura 24 apresenta as curvas granulométricas do solo coletado de -12 m à -17,10 m, cuja profundidade apresenta solos com comportamento intermediário, objetivo de estudo da realização da presente pesquisa. Observa-se que as amostras coletadas e ensaiadas nestas profundidades apresentam cerca de 30% de solo com granulometria menor ou igual à fração silte.

Figura 24 – Composição granulométrica de amostras coletadas dos -12,00 m aos -17,10 m de profundidade



Fonte: Lavalle, 2017.

No perfil geotécnico elaborado por Lavalle (2017) percebe-se a presença de siltes entre as profundidades de -10 m à -17 m. Este solo quando caracterizado granulometricamente apresenta porções de areia média (3%), areia fina (25%), siltes (6%) e argilas (3%), classificando-o como areia fina siltosa. Conforme proposto por Robertson e Wride (1998), através do I_{crw} , essa mistura de silte e areia apresenta comportamento de solos intermediários.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DO ÂNGULO DE ATRITO (ϕ')

Objetivando a caracterização dos parâmetros geotécnicos do Campo Experimental de Araquari, uma série de ensaios *in situ* e de laboratório foram efetuados conforme já reportado. Dentre estes ensaios um dos parâmetros de interesse desta dissertação é o ϕ' interno do solo. Este item visa apresentar algumas contribuições já efetuadas por vários autores no que se refere especificamente a este parâmetro, tendo em vista a análise dos resultados do ensaio do DMT Convencional e do DMT Medusa, efetuada posteriormente nesta dissertação.

O ϕ' dos solos granulares é influenciado por uma série de fatores, tais como a forma do grão, a densidade relativa, a mineralogia do grão, índice de vazios, tamanho médio do grão, tipo de carregamento entre outros. Adicionalmente, o ϕ' varia também em função do nível de tensão e de deformação a que foi submetido (PINTO, 2006). Amostras de solos granulares cisalhadas a grandes deformações ou a grandes tensões confinantes atingem uma condição de ruptura à variação volumétrica constante. O ϕ' para esta condição de variação de deformação a volume constante é denominado de ângulo de atrito no estado crítico (ϕ'_{cs}). Este ϕ' é função direta da mineralogia do grão da areia (BOLTON, 1986). O ângulo de atrito extra, valor acima ϕ'_{cs} , denominado ângulo de atrito de pico (ϕ'_p), é encontrado nos solos granulares e seus valores estão relacionados à sua densidade relativa, ao nível médio da tensão confinante, forma do grão, entre outros fatores já citados. Bolton (1986) define o ϕ'_p composto por duas parcelas: $\phi'_p = \phi'_{cs} + \psi$; onde ψ é o ângulo de dilatância. A Tabela 2 apresenta alguns valores típicos ϕ'_{cs} de diferentes areias. Observa-se que estes valores não variam muito e estão próximos de 31 a 32 graus.

Tabela 2 – Valores típicos de ϕ'_{cs}

Areia	$\phi'_{cs}(^{\circ})$	Forma do grão	D ₅₀ (mm)	G _s	e _{min}	e _{max}	Referência
Araquari	33	Angular	0,15	2,65	0,74	1,05	Lavalle(2017)
Hostun	32	Angular	0,35	2,65	0,63	1,01	Hele (1998)
Reid Beldord	32	Subangular	0,24	2,66	0,55	0,87	Collins (1992)
Toyoura	31	Subangular	0,17	2,65	0,60	0,98	Ishihara (1993)
Ticino	32	Subangular	0,58	2,67	0,58	0,93	Bellotti (1996)
Karlsruhe	30	Subarredondados	0,25	2,65	0,23	0,84	Herle (1998)
Kogyuk	30	Subarredondados	0,35	2,65	0,53	0,86	Been e Jefferies (1985)
Monterrey	32	Subarredondados	0,37	2,65	0,56	0,85	Been e Jefferies (1987)
Osório	31	Arredondados	0,2	2,65	0,60	0,87	Consoli (2016)
Ottawa	29	Arredondados	0,7	2,63	0,39	0,68	Sadrekarimi (2011)

Fonte: Lavalle, 2017. Adaptado.

A Tabela 3 resume os valores dos ângulos de atrito obtidos em ensaios de cisalhamento efetuados com amostras reconstituídas em laboratório para as areias do Campo Experimental

de Araquari. Estas amostras deformadas foram coletadas no instante da escavação das estacas executadas no local e foram ensaiadas com a mesma densidade relativa (D_r) de campo obtidas a partir da interpretação do ensaio de Piezocone (LAVALLE, 2017). Na profundidade de -12 m aos -19 m está evidenciada a parcela do solo de importância da presente pesquisa.

Tabela 3 – Ângulo de atrito a partir de ensaios de cisalhamento de laboratório. (Onde: D_r CPTu = Densidade relativa estimada a partir da sondagem do piezocone; D_r Triaxial – Densidade relativa da amostra moldada e cisalhada na prensa do ensaio triaxial; c' = coesão efetiva.)

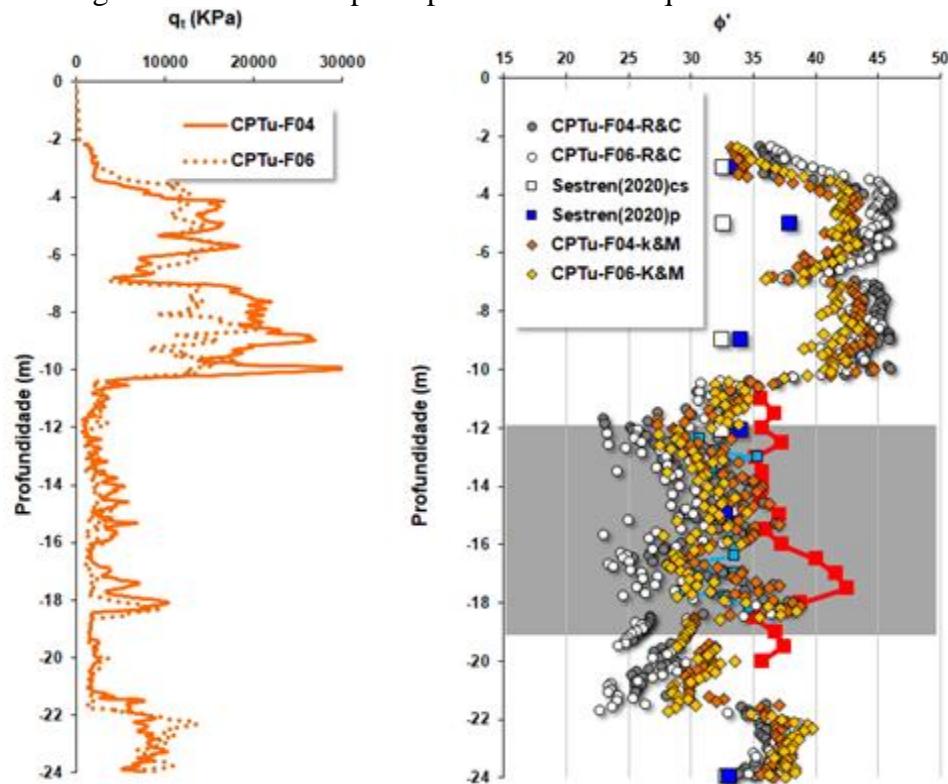
Prof. (m)	e_{min}	e_{max}	e_{nat}	G_s	$D_r(\%)$ CPTu	$D_r(\%)$ Triaxial	ϕ'_{p} (°)	ϕ'_{cz} (°)	c' (kPa)
3.1	0.785	0.900	0.850	2.5	42.1	40	33.7	32.6	0
5.0	0.400	0.650	0.450	2.7	81.4	80	38.0	32.6	0
6.0	0.860	0.970	0.890	2.7	70.7				
6.5	0.810	1.000	0.870	2.7	71.9				
8.0	0.750	1.010	0.810	2.7	76.0				
8.5	0.840	1.070	0.880	2.7	82.5				
9.0	0.840	1.020	0.870	2.7	62.6	60	34.0	32.5	3.0
10.0	0.830	1.010	0.890	2.7	66.3				
10.7	0.700	1.140	1.040	2.5	22.5				
12.1	0.767	1.110	1.037	2.5	21.7	20	34,0	32.5	6.5
14.0	1.080	1.430	1.360	2.5	22.0				
15.0	0.890	1.220	1.080	2.7	41.6	40	32.8	32.5	2.4
16.0	0.970	1.290	1.170	2.7	37.8				
17.1	0.800	1.510	1.240	2.7	37.4				
18.8	0.420	0.950	0.850	2.3	18.8				
19.0	0.510	1.480	1.290	2.3	19.6				
21.0	0.820	1.070	1.005	2.5	24.9				
22.5	0.710	0.910	0.850	2.6	30.9				
24.0	0.570	0.800	0.740	2.6	32.2	30	33.1	32.9	16.1

Fonte: Sestren, Schnaid e Odebrecht, 2020.

A estimativa do ϕ'_p também foi efetuada por Nienov (2016) a partir de correlações empírica obtidas na literatura tanto para o SPT, como para o CPTu. A Figura 25, a partir dos dados de Nienov (2016), apresenta somente valores de ϕ' obtidos para ensaios de piezocone (CPTu-F04 e CPTu-F06) com as propostas empíricas de Kulhawy e Mayne (1990) e de Robertson e Campanella (1983), bem como os valores de ensaio de laboratório apresentados

por Sestren, Schnaid e Odebrecht (2020), Tabela 3. Destaca-se na Figura 25 a faixa hachurada de principal interesse desta pesquisa, que se encontra entre os -12 m aos -19 m de profundidade.

Figura 25 – Ângulo de atrito - Campo Experimental de Araquari

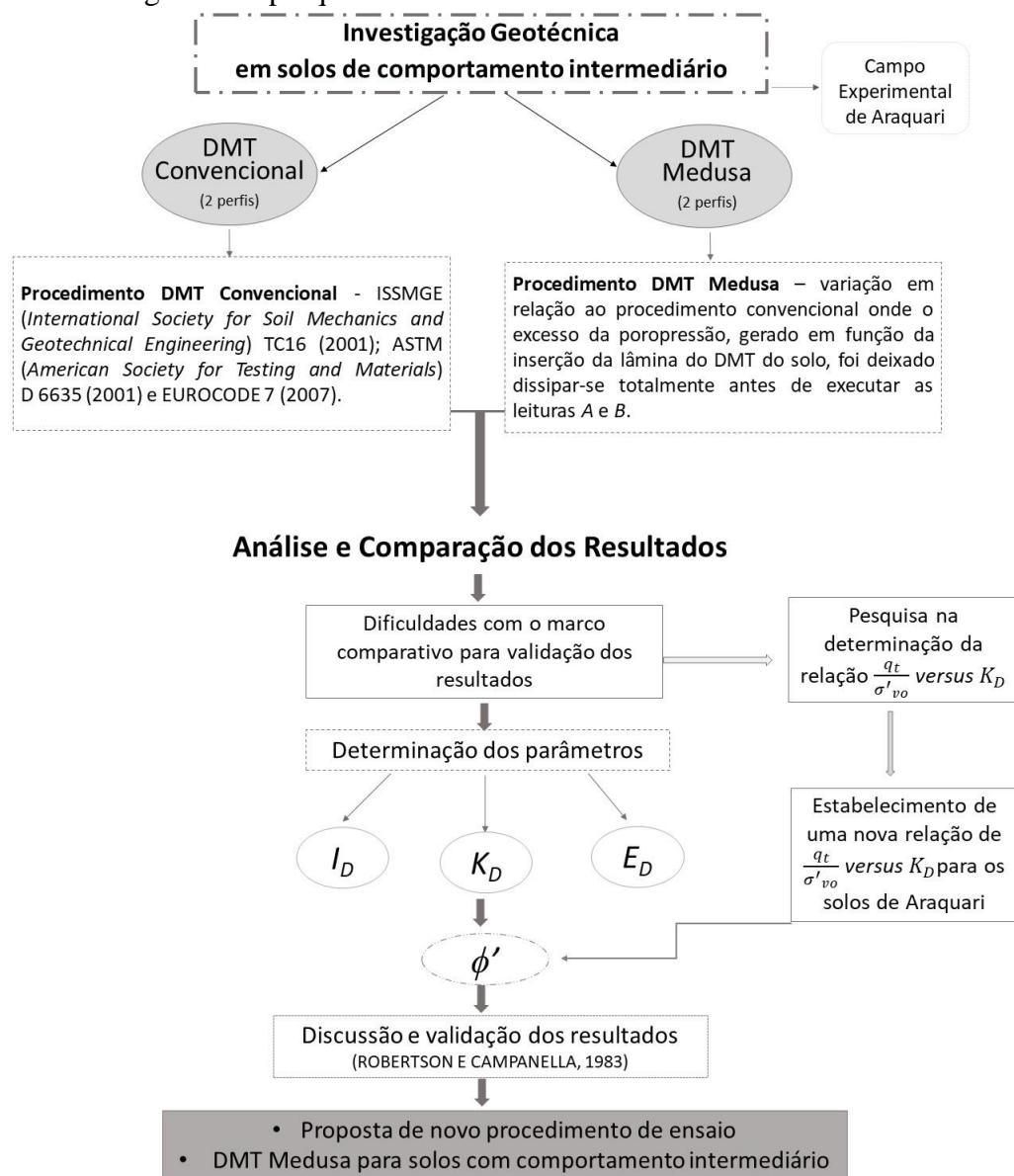


Fonte: Nienov, 2016 e Sestren, Schnaid e Odebrecht, 2020. Adaptado.

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para facilitar a leitura e o entendimento das etapas desenvolvidas nesta pesquisa elaborou-se o fluxograma da Figura 26. Neste fluxograma são apresentadas cada uma das etapas na sequência que foi desenvolvida a pesquisa, assim como os desdobramentos que ocorreram ao longo da análise dos resultados, finalizando com uma nova proposta de procedimento de ensaio e uma recomendação de utilização para o DMT Medusa.

Figura 26 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: A autora, 2020.

A metodologia de pesquisa inicialmente projetada em verificar o impacto na obtenção de parâmetros intermediários e derivados por meio de comparativos no procedimento executivo do DMT Convencional com o DMT Medusa, em solos de comportamento intermediário, levou a desdobramentos. Estes desdobramentos direcionaram a pesquisa a focar no parâmetro derivado do ϕ' e, com isso, buscar uma melhor contribuição deste trabalho na prática da engenharia. Para validar as observações efetuadas nesta interpretação do ϕ' e substanciar a análise e discussão dos resultados, foi necessária a busca de um maior número de informações de ensaios, realizados em outros locais, onde se dispunha de ensaios de DMT Convencional e Piezocone, lado a lado. Assim a metodologia inicialmente projetada para a pesquisa foi ampliada e está apresentada ao final deste capítulo.

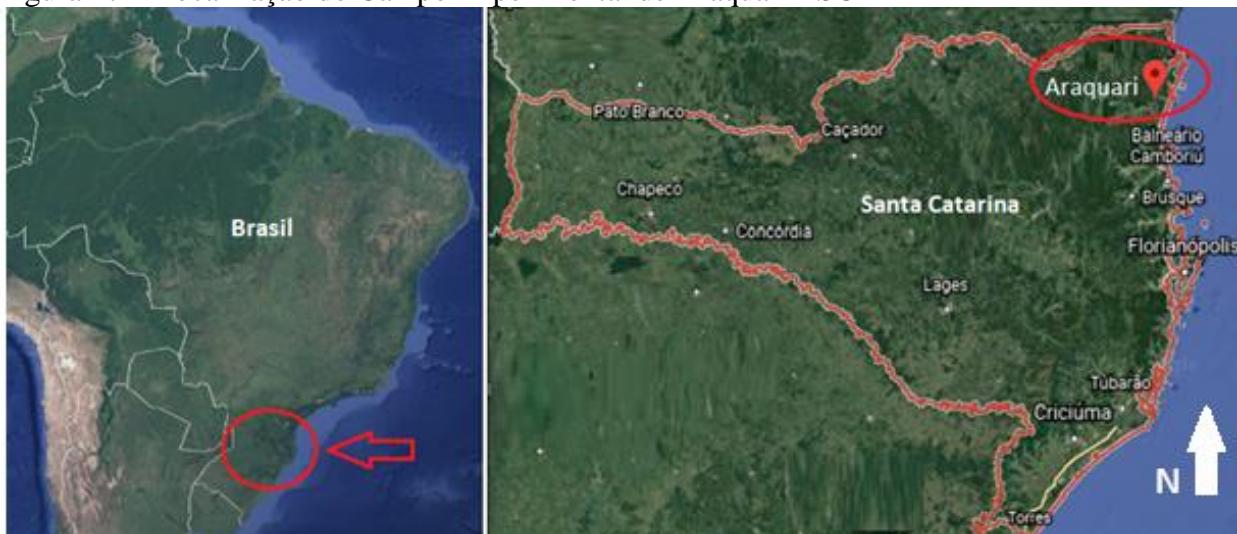
Em 2014 iniciou-se a caracterização do Campo Experimental de Araquari, realizada para estudo do comportamento das fundações das estacas, com intuito de investigar o contato entre solo e estaca, que se desenvolvem ao longo do fuste e na base, no decorrer do carregamento. Desde então a região fornece amplo banco de dados com informações do comportamento mecânico extraídos através dos ensaios, ao longo do perfil estratigráfico do local. De acordo com o *site* do Campo Experimental de Araquari (2019), os ensaios lá executados foram SPT, CPT e o DMT, bem como testes de laboratório em amostras reconstituídas. Os resultados de análise do perfil mostram a existência de solos arenosos, com exceção de uma camada de areia siltosa ou silte arenoso, entre -12 m e -19 m, com comportamento mecânico intermediário. Devido a esta particularidade, escolheu-se este local para fins investigativos, uma vez que, o objetivo deste trabalho é a análise geomecânica deste tipo de comportamento de solo.

4.1 CAMPO EXPERIMENTAL DE ARAQUARI - SC

O Campo Experimental de Araquari está localizado no norte do estado de Santa Catarina, no município de Araquari, cerca de 1200 m afastado da margem direita da BR 101 (sentido norte) entre as localidades denominadas de Coqueiros e Rainha. Este campo experimental tem sido fonte de estudo de vários pesquisadores, cujos trabalhos são de identificação do comportamento de solos arenosos (LAVALLE, 2017 e BROCHERO, 2014).

A Figura 27 apresenta a localização geográfica do Campo Experimental de Araquari – SC.

Figura 27 – Localização do Campo Experimental de Araquari - SC



Fonte: Google Earth, 2020. Adaptado.

Brochero (2014) menciona que os solos encontrados no campo experimental exibem comportamento predominante de solos não coesivos, tais como areia limpa a areia siltosa, siltes arenosos a areias siltosas, sem cimentação e envelhecimento. Os solos que constituem o depósito retratam rápida dissipação da poropressão gerada nos ensaios de piezocone, permitindo assim a aferição dos parâmetros que configuram o comportamento mecânico dos solos.

Em função do objetivo da pesquisa, que é a realização de ensaios com o DMT Medusa em solos com drenagem parcial, e questões de logísticas e de custo, escolheu-se as profundidades de -11 m e -19 m do Campo Experimental de Araquari para a realização dos ensaios. Nestas profundidades, os solos apresentam frações siltosas e geração de poropressão quando da cravação do piezocone, dados estes que potencializam o uso desta camada para o estudo.

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS

A partir da campanha inicial de investigação geotécnica em 2014, a realização do DMT Convencional foi efetivada neste período. Para tal ensaio foram executadas quatro verticais, denominadas Ponto 1, Ponto 2, Ponto 3 e Ponto 4, com profundidades de -27,50 m, -4,40 m, -27,80 m e -4,20 m respectivamente.

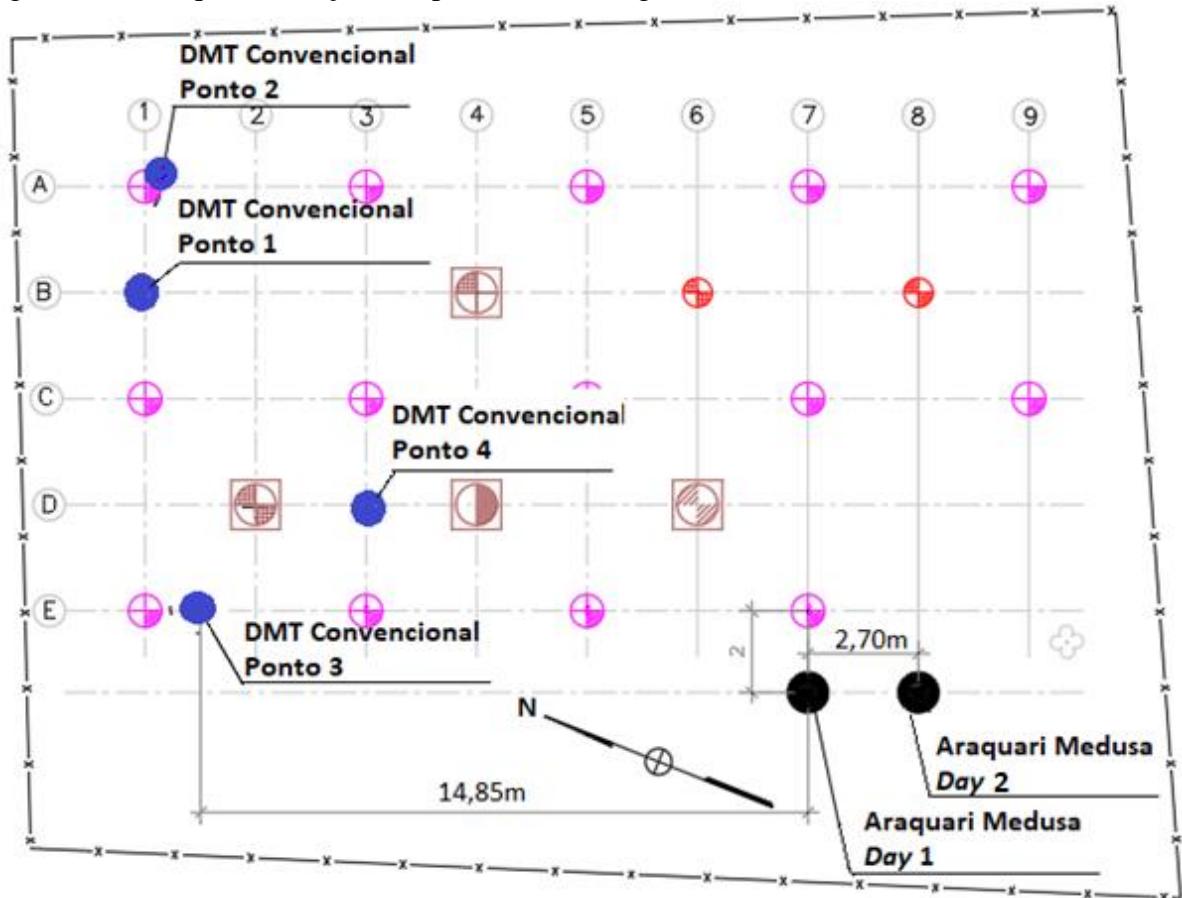
Para o DMT Medusa, o ensaio ocorreu, em 2018, no qual foram realizadas duas verticais com ensaios do equipamento, denominada Araquari Day 1 e Araquari Day 2, com profundidades de -19,6 m e -14,6 m, respectivamente.

Como haverá um comparativo de resultados na presente pesquisa entre o procedimento de ensaio do DMT Convencional e do DMT Medusa, optou-se por somente utilizar o Ponto 1 e Ponto 3 do DMT Convencional, uma vez que estes atingem as mesmas profundidades de interesse da presente pesquisa pelo DMT Medusa.

Para ambos ensaios executados, foram seguidos os procedimentos normativos da ASTM D 6635 (2001) e Eurocode 7 (2007).

Na Figura 28 é mostrado um croqui de locação dos pontos que tiveram seus resultados comparados de acordo com os objetivos deste trabalho.

Figura 28 – Croqui de locação dos pontos de sondagem



Fonte: A autora, 2020.

Observa-se na figura que as duas verticais do DMT Medusa estão próximas uma da outra, cerca de 2,70 m, e afastadas de 14,85 m do DMT Convencional 3. Este afastamento se fez necessário em decorrência da área já possuir outras estacas de teste executadas impossibilitando uma maior aproximação entre os pontos.

4.2.1 Procedimentos de leituras dos ensaios

Para o ensaio de DMT Convencional, a leitura *A* (pressão obtida no início da expansão da membrana) e leitura *B* (pressão obtida no final da expansão da membrana), conforme mencionado por Schnaid e Odebrecht (2012) no capítulo 2 da Revisão Bibliográfica, são executadas a cada - 20 cm de profundidade.

Como o equipamento é convencional, ele somente indica as pressões de leituras *A* e *B* a cada profundidade de ensaio. Ele não permite exibir a variação das pressões ao longo do tempo durante a expansão da membrana, como no caso do DMT Medusa. Assim, os registros das informações no DMT Convencional são somente a cada profundidade as leituras de *A* e *B* registradas em forma de planilha, conforme sugerido no Quadro 4.

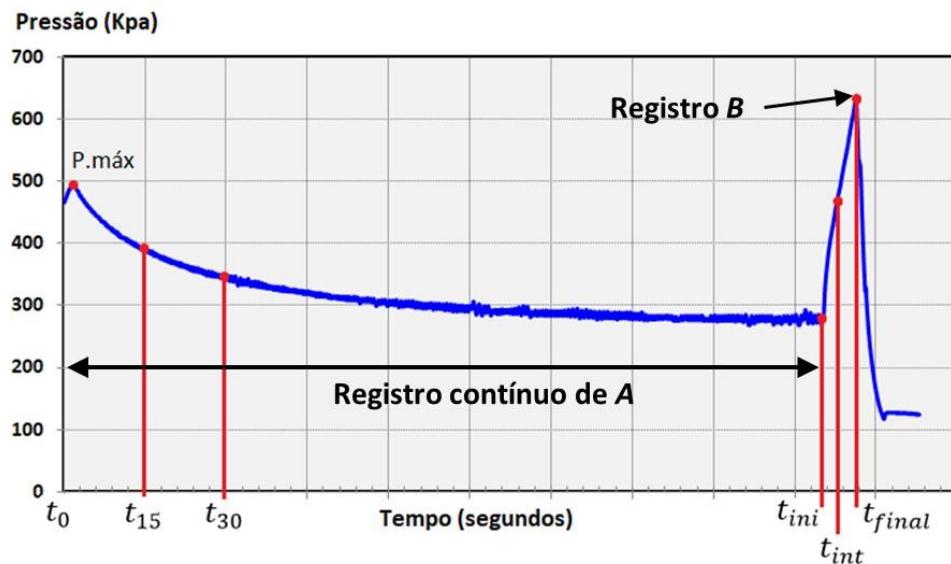
Quadro 4 – Leituras de pressão do DMT Convencional

Z (m)	A (kPa)	B (kPa)

Fonte: A autora, 2020.

O DMT Medusa, conforme visto no capítulo 2 da Revisão Bibliográfica, além de permitir as leituras *A* e *B*, permite também a leitura contínua, ao longo do tempo, da pressão necessária para manter a membrana na posição *A* (Registro contínuo da *A*) e o registro também ao longo do tempo para expandi-la para a posição *B* (Figura 29).

Figura 29 – Demonstrativo de leitura gráfica dos dados coletados do ensaio



Fonte: A autora, 2020.

A Figura 29 apresenta no eixo das abscissas o tempo de execução do ensaio e no eixo da ordenada o valor da pressão, em kPa, obtida com o DMT Medusa, que possui um registro contínuo do valor da pressão ao longo do tempo de expansão da membrana. Para a estimativa dos parâmetros geotécnicos, conforme apresentado na revisão bibliográfica, o ensaio do DMT Convencional utiliza somente duas variáveis, ou seja, dois valores de pressão denominados de leituras *A* e *B*. Assim é necessário definir qual o valor de *A* e de *B* que será adotado na interpretação dos ensaios. O valor de *B* é incontestável, pois refere-se ao término da expansão da membrana nomeada na Figura 1 de t_{final} . Já *A* poderia assumir distintos valores a depender do tempo considerado. Assim optou-se na presente pesquisa, por selecionar valores diferenciados de pressão para *A* em tempos específicos, como t_0 (tempo inicial como sendo o instante em que a lâmina pára de ser inserida no solo), t_{15} (15 segundos após o início do ensaio) e t_{30} (30 segundos após o início do ensaio). Adicionalmente, efetuou-se o registro da pressão máxima atingida para a posição *A* (P_{max}) e um valor de pressão intermediário entre t_{ini} (tempo de início da expansão da membrana), e t_{final} (tempo de finalização da expansão da membrana), denominado de t_{int} (tempo intermediário da expansão da membrana). Estes valores são utilizados para efetuar a comparação de distintas condições do ensaio quando da interpretação dos resultados e discussão.

Os valores de t_{15} e t_{30} foram selecionados por serem estes os tempos em que são efetuadas as leituras *A* e *B* do DMT Convencional (MARCHETTI *et al.*, 2001) objetivando comparações entre os procedimentos.

No Quadro 5 está representando a forma de como as informações de leituras serão preenchidas após extração dos resultados do gráfico, representados pela Figura 29.

Quadro 5 – Leituras de pressão do DMT Medusa

Profundidade (m)	t_0 (kPa)	P_{max} (kPa)	t_{15} (kPa)	t_{30} (kPa)	t_{ini} (s)	Pressão para t_{ini} (kPa)	t_{int} (s)	Pressão para t_{int} (kPa)	t_{final} (s)	Pressão para t_{final} (kPa)

Fonte: A autora, 2020.

4.3 DADOS ADICIONAIS DA PESQUISA

Conforme descrito anteriormente no início deste capítulo, desdobramentos na presente pesquisa foram necessários para a interpretação e validação das análises dos resultados do DMT Convencional e DMT Medusa realizados no Campo Experimental de Araquari. Para atender estes desdobramentos, a metodologia desta pesquisa acrescentou a busca de ensaios de campo de DMT Convencional e de piezocone executados paralelamente próximos em distintos locais.

Alguns destes dados foram cedidos pelo *Studio Marchetti* e pela *Geoforma Engenharia Ltda*. Para cada par de sondagem assim executadas (DMT Convencional e Piezocone) foram elaboradas planilhas com valores de I_D e K_D obtidas com o ensaio do DMT Convencional e, q_t e σ'_{v0} , obtidos no piezocone em função da profundidade. Estas resoluções estão apresentadas no Capítulo de resultados e discutidos no Capítulo de análise dos resultados.

5 RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados das leituras dos ensaios de DMT Medusa e DMT Convencional executados no Campo Experimental de Araquari - SC. Adicionalmente, conforme descrito no capítulo de metodologia, apresentam-se resultados de ensaios de DMT Convencional e de piezocone executados lado a lado em distintos locais com objetivo de fortalecer e fundamentar a discussão e análise dos resultados desta pesquisa.

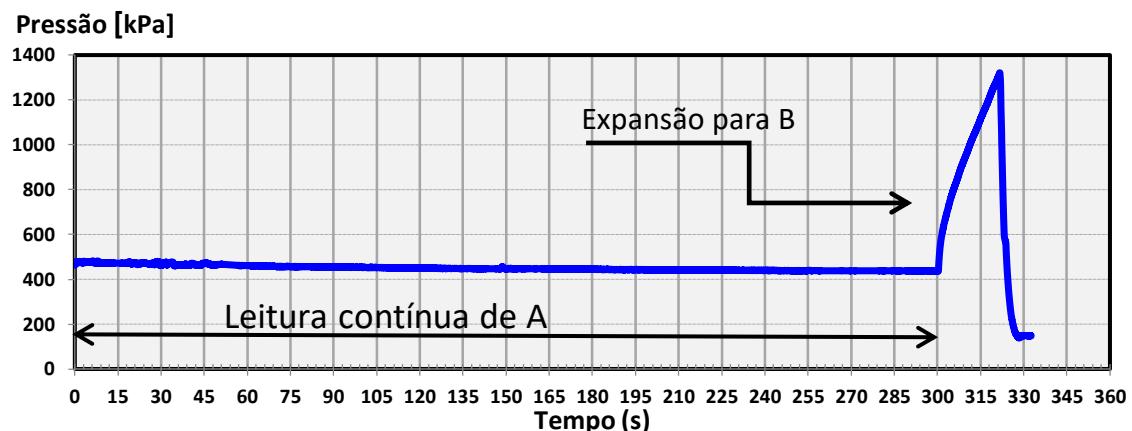
5.1 RESULTADOS DE DMT MEDUSA

Inicia-se a apresentação dos resultados com dois exemplos distintos de comportamento do solo obtidos com o DMT Medusa. O primeiro refere-se a um ensaio realizado a -18,00 m de profundidade, Figura 30. O segundo refere-se a um ensaio realizado a -15,80 m, Figura 31. Ambos resultados são apresentados contendo no eixo das abscissas o tempo e no eixo das ordenadas o valor da pressão registrada. Cada ensaio é composto por dois momentos onde, inicialmente, tem-se o registro contínuo da pressão com a membrana na posição A (leitura contínua de A), passando para o segundo momento, onde tem-se a expansão da membrana da posição A para a posição B (expansão para B).

Nestes dois casos pode-se observar comportamentos distintos do solo. Na Figura 30, durante a leitura contínua de A, não há variação do valor da pressão. Neste caso não há excesso de poropressão gerado devido à cravação da lâmina, ou se houve, foi muito rapidamente dissipado durante o processo de cravação do equipamento. Este comportamento é típico de um solo permeável, comportamento drenado. Já a Figura 31, durante a leitura contínua de A observa-se uma queda no valor da pressão gerada pela inserção da lâmina ao longo do tempo. Neste caso, o processo de dissipação foi mais lento que o resultado apresentado na Figura 30 indicando um material menos permeável, contudo não tão impermeável a ponto de não haver dissipaçāo no intervalo de tempo de 130 s. Este comportamento é típico de um solo com drenagem parcial, solo de comportamento intermediário.

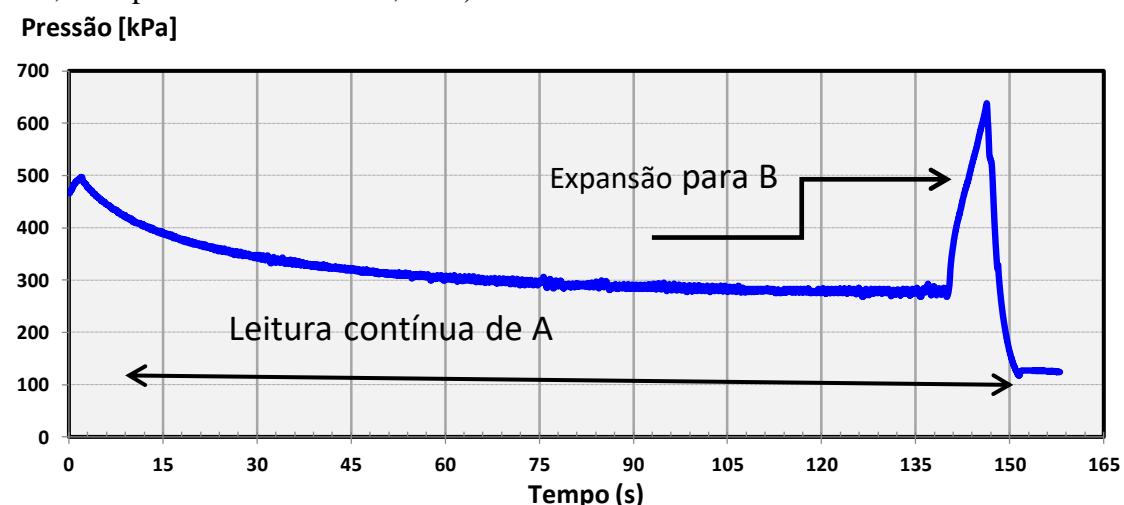
Para identificar adequadamente o comportamento mecânico dos solos, os ensaios do DMT Medusa foram geralmente conduzidos desta forma, ou seja, após a inserção da lâmina a membrana foi mantida na posição A até a estabilização das leituras de A para posterior expansão para B. Assim busca-se identificar o comportamento dos solos.

Figura 30 – Gráfico de leituras do DMT Medusa em Araquari *Day 1* (solo de comportamento arenoso, com profundidade de -18m)



Fonte: A autora, 2020.

Figura 31 – Gráfico de leituras do DMT Medusa em Araquari *Day 2* (solo de comportamento siltoso, com profundidade de -15,80 m)



Fonte: A autora, 2020.

Conforme demonstrado, o perfil do subsolo do Campo Experimental de Araquari é composto por uma camada superior de areia que vai da superfície até cerca de -12 m, passando para um solo silto arenoso e/ou areia siltosa dos -12 m aos -19 m, conforme perfil estratigráfico demonstrado no Capítulo 3. Com a finalidade do entendimento de solos com comportamento intermediário, os ensaios executados se concentraram dos -12 m aos -19 m de profundidade.

A campanha de ensaios de campo foi realizada em dois dias, sendo que em cada dia foi executado um furo para realização do ensaio. No primeiro dia, na campanha denominada de Araquari *Day 1*, foram realizados ensaios de -0,20m a -6,40m de profundidade, seguindo de -12,20 m a -19,60 m (Quadro 6). No segundo dia, na campanha denominada de Araquari *Day 2*, foram realizados somente ensaios dos -12,20 m a -19,60 m (Quadro 7). Como não havia

interesse em se analisar os solos puramente arenosos e, também, devido a problemas operacionais de inserção da lâmina na camada de areia resistente (de -6,40 m a -12,00 m) um pré-furo foi executado para ultrapassar esta camada. Nas profundidades onde P_{max} não possuem valores, é porque em t_0 já ocorreu um valor de P_{max} , e onde t_{30} também não possui valores é porque a expansão da membrana já ocorreu, ou seja, o t_{ini} é menor que t_{30} .

Quadro 6 – Resultados de leituras de pressão no DMT Medusa (Araquari Day 1) (Continua)

Profundidade (m)	t_0 (Kpa)	P_{max} (Kpa)	t_{15} (Kpa)	t_{30} (Kpa)	t_{ini} (s)	Pressão para t_{ini} (Kpa)	t_{int} (s)	Pressão para t_{int} (Kpa)	t_{final} (s)	Pressão para t_{final} (Kpa)
- 0,20	30	-	14	-	16	22	20	238	23	414
- 0,40	160	-	159	-	17	217	27	849	39	1283
- 0,60	188	-	151	-	16	165	56	719	92	951
- 0,80	107	-	105	-	16	133	19	580	23	881
- 1,00	110	-	27	-	17	42	27	468	38	718
- 1,20	127	147	-	-	15	130	40	523	64	774
- 1,40	192	-	177	-	15	193	19	581	23	851
- 1,80	104	113	-	-	15	115	40	518	66	808
- 6,40	318	327	326	-	26	893	25	886	36	1251
- 12,20	285	-	247	229	98	243	100	487	105	756
- 12,40	254	-	239	234	100	227	109	486	119	678
- 12,60	255	306	323	334	100	336	123	754	147	1012
- 12,80	432	470	388	363	100	325	102	598	106	871
- 13,00	238	-	231	233	35	235	44	533	53	735
- 13,40	407	436	385	377	100	370	103	751	107	1098
- 13,80	367	-	405	402	100	393	109	847	120	1175
- 14,00	408	-	287	291	60	298	83	782	110	1125
- 14,20	405	-	311	321	100	321	103	730	107	1074
- 14,40	352	-	328	327	100	326	110	772	121	1082
- 14,60	427	472	386	387	122	357	144	743	169	1034
- 14,80	577	-	531	531	100	527	103	1173	108	1712
- 15,00	651	-	545	551	100	522	108	1198	120	1622
- 15,20	550	-	453	440	100	429	102	769	106	1077
- 15,40	398	400	290	282	100	275	108	467	117	618
- 15,60	394	-	312	301	100	298	124	596	147	804
- 15,80	467	497	389	341	140	276	142	445	146	620
- 16,00	501	-	375	331	100	283	109	484	119	660
- 16,20	484	-	328	285	100	249	120	399	139	524
- 16,40	417	-	316	312	100	303	103	584	107	842
- 16,60	414	508	414	-	15	415	26	823	36	1120
- 17,00	463	480	392	386	60	387	69	768	81	1101
- 17,20	491	581	539	529	30	535	40	1146	52	1607

Quadro 6 – Resultados de leituras de pressão no DMT Medusa (Araquari Day 1) (Conclusão)

Profundidade (m)	t_0 (Kpa)	P.max (Kpa)	t_{15} (Kpa)	t_{30} (Kpa)	t_{ini} (s)	Pressão para t_{ini} (Kpa)	t_{int} (s)	Pressão para t_{int} (Kpa)	t_{final} (s)	Pressão para t_{final} (Kpa)
- 17,40	513	-	451	-	16	465	25	825	37	1121
- 17,60	469	494	404	393	30	393	39	758	51	1090
- 17,80	424	511	482	485	30	504	46	1291	54	1589
- 18,00	509	713	606	607	18	643	30	1305	41	1749
- 18,20	468	842	710	686	30	719	41	1399	54	1920
- 18,40	971	-	870	841	60	810	67	983	75	1079
- 18,60	968	-	913	-	15	918	23	1078	32	1192
- 18,80	173	925	913	892	30	907	38	1049	47	1150
- 19,00	787	986	936	911	60	887	69	1056	76	1125
- 19,40	808	1022	972	957	30	900	307	1104	316	1205
- 19,60	888	-	862	-	15	864	17	994	20	1080

Fonte: A autora, 2020.

Quadro 7 – Resultados de leituras de pressão no DMT Medusa (Araquari Day 2)

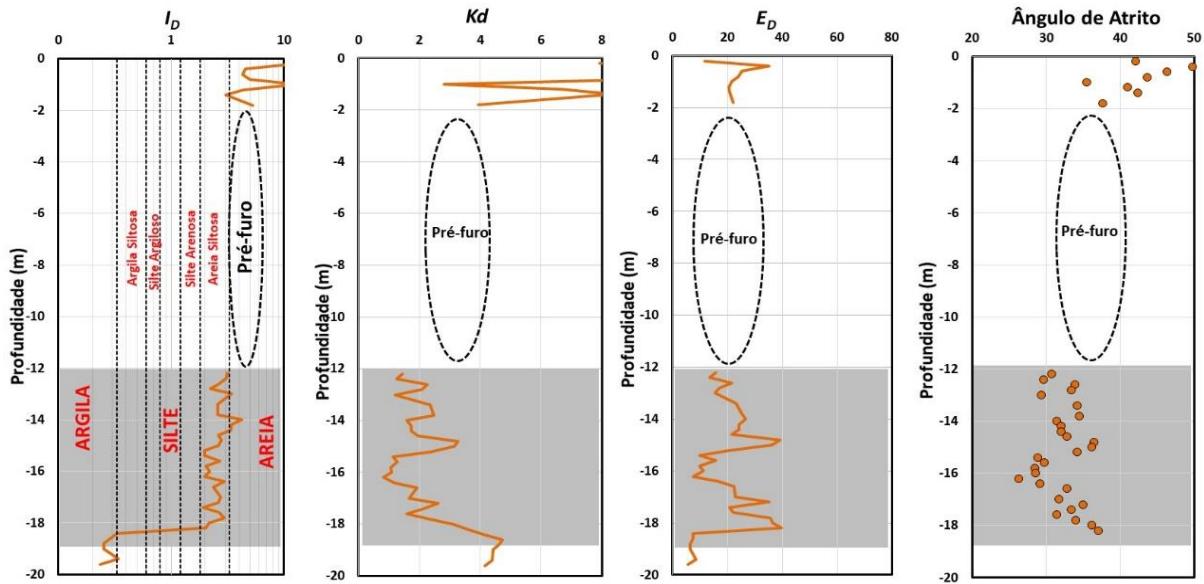
Profundidade (m)	t_0 (Kpa)	P.max (Kpa)	t_{15} (Kpa)	t_{30} (Kpa)	t_{ini} (s)	Pressão para t_{ini} (Kpa)	t_{int} (s)	Pressão para t_{int} (Kpa)	t_{final} (s)	Pressão para t_{final} (Kpa)
- 12,60	431	-	287	265	102	239	110	448	121	633
- 12,80	403	456	341	321	100	303	109	649	123	793
- 13,00	364	503	463	451	100	434	109	763	118	991
- 13,20	365	-	264	259	100	269	110	641	121	913
- 13,40	327	370	332	326	100	311	110	706	121	991
- 13,60	419	-	350	335	100	337	109	667	118	848
- 13,80	357	-	336	328	100	331	111	823	122	1124
- 16,40	477	-	430	431	100	446	111	885	121	1184
- 16,60	463	-	339	329	100	328	110	667	100	824
- 16,80	451	-	364	357	100	356	111	718	121	953
- 17,00	473	-	458	456	100	459	110	1052	122	1462
- 17,20	498	-	377	364	100	359	110	705	119	962
- 17,60	505	511	349	337	100	330	103	598	107	882
- 17,80	472	-	472	465	300	446	308	907	321	1307
- 18,20	920	-	800	754	300	557	306	800	316	950
- 18,40	969	-	902	886	300	823	307	1014	314	1131
- 18,60	888	950	907	887	300	805	302	961	305	1084

Fonte: A autora, 2020.

As Figuras 32 e 33 apresentam os resultados do DMT Medusa Day 1 e Day 2, seguindo o procedimento de se deixar dissipar o excesso de poropressão. Ambas sondagens tiveram pré-furo pelo mesmo motivo já citado, acrescidos do interesse de se pesquisar somente os solos siltosos que estão entre -12 m e -19 m de profundidade, encontrados na região hachurada de cinza. Adicionalmente um intervalo no perfil Day 2 não foi ensaiado (de -13,80 m aos -16,40

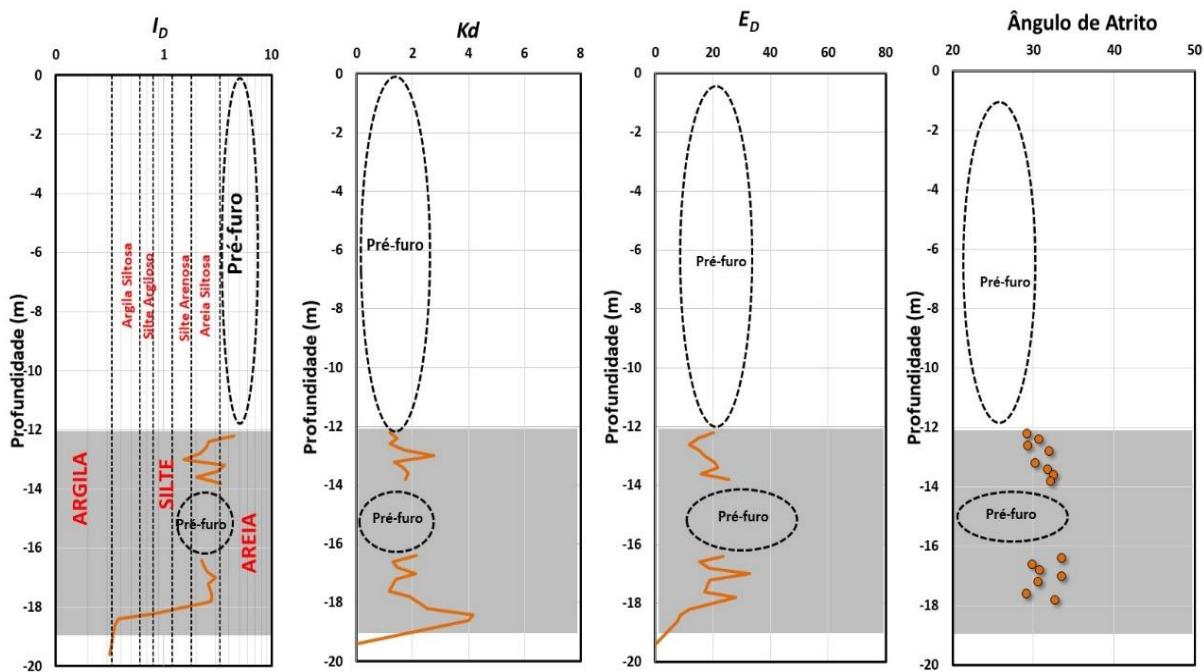
m) em decorrência da limitação de tempo e da expectativa de se encontrar solos de comportamento de maior predominância de solo intermediário com base nas análises efetuadas nas Figuras 22 e 23, da Revisão Bibliográfica, do Perfil do Campo Experimental de Araquari.

Figura 32 – Análise I_D , K_D , E_D e ϕ' do Day 1 do DMT Medusa



Fonte: A autora, 2020.

Figura 33 – Análise do I_D , K_D , E_D e ϕ' do Day 2 do DMT Medusa.



Fonte: A autora, 2020.

5.2 RESULTADOS DE DMT CONVENCIONAL

Os Quadros 8 e 9 apresentam os resultados de dois pontos do ensaio do DMT Convencional executadas anteriormente, na campanha de 2014, no Campo Experimental de Araquari. O Quadro 8 apresentam os resultados do ensaio denominado Ponto 1 que possui ensaios de -0,40 m a -7,40 m seguindo de -11,00 m aos -29,00 m. O Quadro 9 apresenta os resultados do ensaio denominado de Ponto 3 com resultados de ensaios de -0,60 m a -4,40 m e de -11,20 m aos -27,80 m. O intervalo sem leituras entre as profundidades -7,40 m a -11,00 m e de -4,40 m a -12,20 m nos Pontos 1 e 3, respectivamente decorre de problemas operacionais. Nesta região devido à elevada resistência do solo, o sistema de ancoragem que promove a reação para a inserção da lâmina no solo não foi suficiente sendo necessária a execução de um pré-furo para ultrapassar este trecho. Ambos os furos foram executados no dia 30 de maio de 2014.

Quadro 8 – Resultados de leituras de pressão no DMT Convencional (Ponto 1) (Continua)

Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	Z (m)	A (kPa)	B (kPa)
-0,40	278	638	-12,40	381	571	-20,80	981	1262
-0,60	279	540	-12,60	308	547	-21,00	866	1158
-0,80	88	445	-12,80	416	782	-21,20	909	1058
-1,00	87	397	-13,00	410	1040	-21,40	885	1186
-1,20	104	441	-13,20	426	906	-21,60	719	934
-1,40	162	417	-13,40	484	937	-21,80	463	957
-1,60	275	529	-13,60	490	909	-22,00	656	1443
-1,80	160	527	-13,80	445	994	-22,20	684	1292
-2,00	246	596	-14,00	445	961	-22,40	663	1301
-2,20	216	508	-14,20	496	1152	-22,60	627	1331
-2,40	240	666	-14,40	505	1251	-22,80	691	1290
-2,60	302	742	-14,60	617	1234	-23,00	732	1266
-2,80	267	758	-14,80	684	1624	-23,20	669	1296
-3,00	298	831	-15,00	581	1300	-23,40	722	1454
-3,20	285	785	-15,20	467	996	-23,60	632	1279
-3,40	491	1292	-15,40	481	1334	-23,80	704	1378
-3,60	695	1930	-15,60	480	1122	-24,00	558	1261
-3,80	534	2293	-15,80	445	757	-24,20	762	1509
-4,00	947	2743	-16,00	454	1002	-24,40	662	1345
-4,20	553	1882	-16,20	476	1000	-24,60	570	1215
-4,40	949	2611	-16,40	589	792	-24,80	837	1824
-4,60	999	2692	-16,60	521	737	-25,00	485	1194
-4,80	1015	2630	-16,80	499	680	-25,20	702	1418
-5,00	1056	1270	-17,00	456	1021	-25,40	788	1502
-5,20	671	2016	-17,20	491	964	-25,60	684	1337
-5,40	1076	2542	-17,40	461	913	-25,80	655	1214

Quadro 8 – Resultados de leituras de pressão no DMT Convencional (Ponto 1) (Conclusão)

Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	Z (m)	A (kPa)	B (kPa)
-5,60	1051	2651	-17,60	415	1027	-26,00	469	972
-5,80	1350	3314	-17,80	484	937	-26,20	528	972
-6,00	995	2706	-18,00	490	1514	-26,40	540	1081
-6,20	686	1845	-18,20	813	1994	-26,60	756	1304
-6,40	893	2242	-18,40	849	1744	-26,80	542	1021
-6,60	833	2053	-18,60	764	1531	-27,00	641	1104
-6,80	1099	2756	-18,80	998	1322	-27,20	739	1639
-7,00	709	1959	-19,00	962	1316	-27,40	793	1534
-7,20	567	2295	-19,20	928	1286	-27,60	856	1538
-7,40	1376	3444	-19,40	993	1252	-27,80	624	1319
-11,20	281	749	-19,60	1123	1511	-28,00	645	1339
-11,40	356	788	-19,80	1111	1495	-28,20	590	1329
-11,60	272	581	-20,00	1153	1620	-28,40	588	1300
-11,80	338	657	-20,20	1208	1717	-28,60	846	1752
-12,00	366	759	-20,40	1137	1637	-28,80	746	1669
-12,20	389	556	-20,60	933	1121	-29,00	768	2134

Fonte: A autora, 2020.

Quadro 9 – Resultados de leituras de pressão no DMT Convencional (Ponto 3) (Continua)

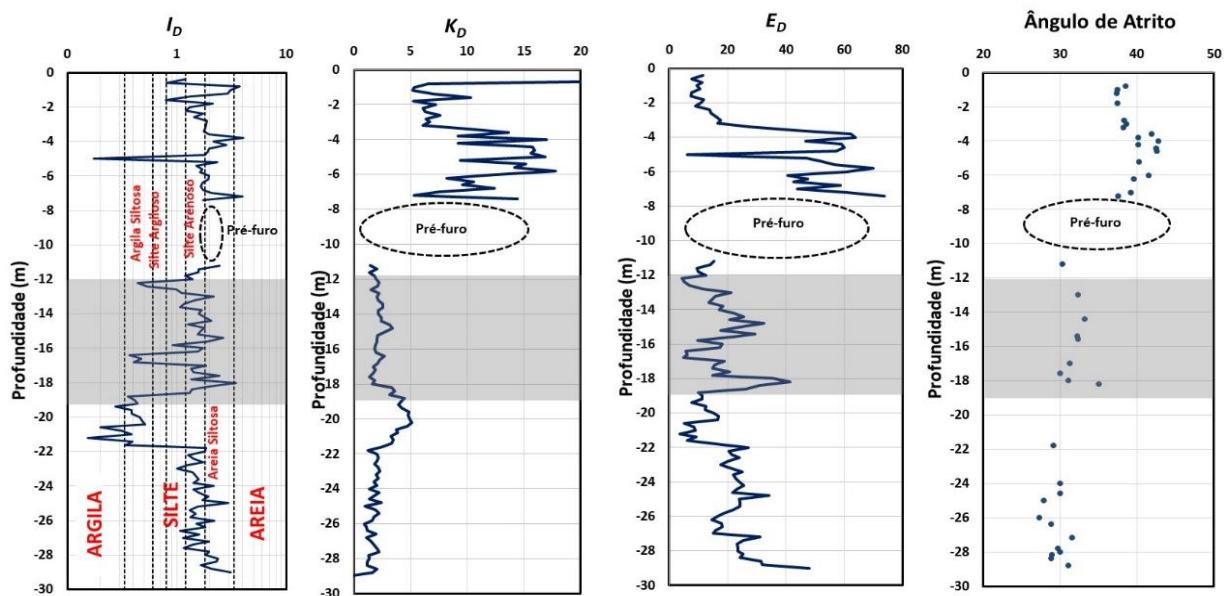
Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	Z (m)	A (kPa)	B (kPa)
-0,60	32	271	-14,20	384	789	-21,20	911	1059
-0,80	135	450	-14,40	517	897	-21,40	998	1207
-1,00	95	310	-14,60	567	1175	-21,60	882	1115
-1,20	106	351	-14,80	534	1136	-21,80	1019	1397
-1,40	116	360	-15,00	669	1716	-22,00	882	1288
-1,60	95	356	-15,20	579	1212	-22,20	662	1621
-1,80	133	416	-15,40	524	1148	-22,40	997	2188
-2,00	128	518	-15,60	500	1020	-22,60	940	1893
-2,20	184	530	-15,80	524	719	-22,80	836	1763
-2,40	131	492	-16,00	518	939	-23,00	660	1465
-2,60	153	555	-16,20	462	829	-23,20	533	1234
-2,80	164	659	-16,40	540	662	-23,40	733	1494
-3,00	174	722	-16,60	510	708	-23,60	658	1463
-3,20	228	684	-16,80	469	723	-23,80	850	1530
-3,40	193	581	-17,00	417	762	-24,00	755	1588
-3,60	262	842	-17,20	421	840	-24,20	680	1689
-3,80	526	2341	-17,40	396	853	-24,40	761	1650
-4,00	727	2343	-17,60	563	1457	-24,60	774	1553
-4,20	907	2452	-17,80	506	965	-24,80	628	1626
-4,40	447	1688	-18,00	796	2168	-25,00	718	1689
-11,20	292	848	-18,20	790	2302	-25,20	736	1506
-11,40	376	928	-18,40	785	1779	-25,40	665	1363
-11,60	427	916	-18,60	734	1713	-25,60	779	1506
-11,80	335	695	-18,80	890	1295	-25,80	765	1513

Quadro 9 – Resultados de leituras de pressão no DMT Convencional (Ponto 3) (Conclusão)

Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	Z (m)	A (kPa)	B (kPa)
-12,00	335	670	-19,00	1001	1350	-26,00	719	1577
-12,20	341	461	-19,20	979	1282	-26,20	665	1297
-12,40	382	664	-19,40	879	1169	-26,40	665	1319
-12,60	435	609	-19,60	758	1094	-26,60	676	1248
-12,80	377	742	-19,80	1136	1936	-26,80	648	1308
-13,00	398	674	-20,00	1114	1427	-27,00	802	1641
-13,20	382	920	-20,20	1254	1761	-27,20	697	1225
-13,40	345	827	-20,40	1453	2082	-27,40	686	1685
-13,60	499	760	-20,60	1184	1632	-27,60	702	1366
-13,80	495	891	-20,80	1016	1209	-27,80	758	1506
-14,00	510	1054	-21,00	937	1145			

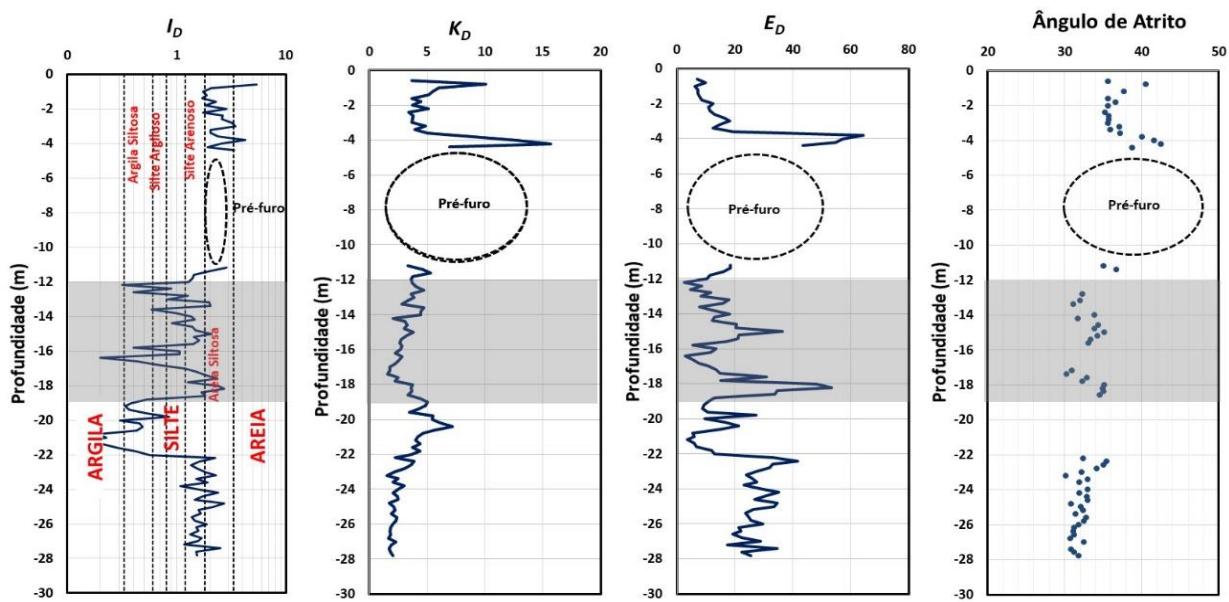
Fonte: A autora, 2020.

As Figuras 34 e 35 apresentam de forma gráfica os resultados do ensaio DMT Convencional denominado de Ponto 1 e Ponto 3, respectivamente. Nestes gráficos são apresentados os parâmetros intermediários I_D , K_D e E_D , obtidos com as equações apresentadas no item 2.2.4, no Capítulo 2, da revisão bibliográfica. Estes resultados foram obtidos a partir dos valores dos Quadros 8 e 9 apresentados. O parâmetro derivado ϕ' , também é apresentado nas Figuras 34 e 35, obtido com base na equação proposta por Marchetti (1997), encontrada no item 2.2.5, no Capítulo 2, da revisão bibliográfica.

Figura 34 – Análise do I_D , K_D , E_D e ϕ' do Ponto 1 do DMT Convencional

Fonte: A autora, 2020.

Figura 35 – Análise do I_D , K_D , E_D e ϕ' do Ponto 3 do DMT Convencional



Fonte: A autora, 2020.

Ambos ensaios atingiram profundidades semelhantes. Nas profundidades de -12 m a -19 m, região hachurada em cor cinza nas Figuras 34 e 35, a classificação do solo quanto ao seu comportamento indica solos siltosos (siltos, siltes argilosos e siltes arenosos). Estes solos se enquadram na faixa de solos com comportamento parcialmente drenado. Esta classificação está seguindo os limites estabelecidos pela Tabela 1 do item 2.2.4, do Capítulo 2, na revisão bibliográfica.

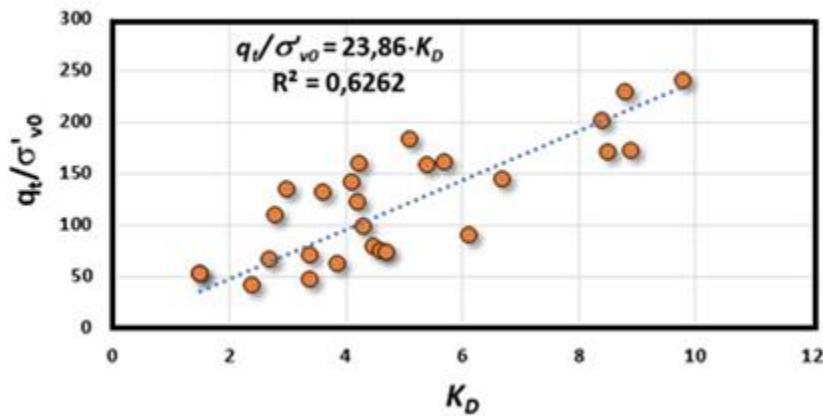
5.3 RESULTADOS DA RELAÇÃO (q_t/σ'_{vo}) VERSUS K_D

Apresenta-se na sequência deste item os resultados da pesquisa realizada em dados de sondagem de DMT Convencional e CPTu executados no Campo Experimental de Araquari, paralelamente próximos, que foram gentilmente cedidos pelo Studio Marchetti e pela empresa Geoforma Engenharia Ltda. Os dados foram planilhados por regiões contendo as informações dos valores de I_D e K_D , obtidos com o ensaio do DMT Convencional e q_t e σ'_{vo} , obtidos no piezocone, em função da profundidade. Como os valores de q_t são obtidos de 2 em 2 cm e os dados de leituras do DMT Convencional de 20 em 20 cm, o valor de q_t considerado corresponde ao valor médio de 5 cm acima e 5 cm abaixo da mesma cota do valor de I_D e K_D .

Com estes valores determinou-se a relação (q_t/σ'_{vo}) e plotou-se contra o valor correspondente de K_D para cada conjunto de pontos de cada região. A Figura 36, é um exemplo deste gráfico obtido para um local de solo arenoso denominado de Ticino, região localizada ao

sul da Itália, cujos dados foram fornecidos pelo *Studio Marchetti*. Neste gráfico da Figura 36 os valores de K_D são plotados no eixo das abscissas e o valor de (q_t/σ'_{vo}) no eixo das ordenadas, objetivando a determinação da relação $((q_c/\sigma'_{vo})/K_D)$, que neste caso resulta em 23,86. Este mesmo gráfico e esta mesma relação foram obtidos para mais dez distintos locais pesquisados, conforme demonstrado na Tabela 4.

Figura 36 – Relação (q_t/σ'_{vo}) versus K_D para a areia de Ticino – Itália
Região de Ticino - Itália



Fonte: A autora, 2020.

Os gráficos obtidos para cada local dos perfis analisados estão apresentados no Apêndice 1 e os valores resumidos na Tabela 4. Para cada perfil apresenta-se o resultado da razão $(q_c/\sigma'_{vo})/K_D$, o valor médio de I_D , o desvio padrão de I_D e o coeficiente de regressão linear da relação, R^2 , que verifica a qualidade de ajuste entre os pontos da razão $(q_c/\sigma'_{vo})/K_D$.

Tabela 4 – Resumo dos resultados da relação de (q_t/σ'_{vo}) versus K_D para distintos solos (Continua)

Perfil	$(q_t/\sigma'_{v0})/K_D$	Média I_D	Desv. Pad I_D	R^2
Araquari DMT conv	4,33	0,35	0,09	-2,97
Araquari silte convencional	12,09	1,50	0,64	0,79
Araquari silte medusa	15,48	3,04	1,48	0,70
Araquari superior DMT conv	14,87	1,75	0,60	0,64
B. Camboriu 1	22,85	3,20	0,60	0,45
B. Camboriu 2	21,14	5,13	2,37	0,79
B. Camboriu 3	21,66	5,38	2,50	0,70
Campanella e Robertson 1991	33,00	5,00		
Capital Realty DMT 1	5,29	0,81	0,56	0,81
Capital Realty DMT 2	5,02	0,91	0,27	0,87
Capital Realty DMT 3	4,34	0,90	0,31	0,93

Tabela 4 – Resumo dos resultados da relação de (q_t/σ'_{vo}) versus K_D para distintos solos (Conclusão)

Perfil	$(q_t/\sigma'_{vo})/K_D$	Média I_D	Desv. Pad I_D	R^2
Capital Realty DMT 4	4,22	0,86	0,42	0,93
Hokksund	22,52	3,04	0,60	0,66
Rejeito de ferro	21,95	3,47	1,12	0,56
Ticino	23,86	1,98	0,45	0,62
Trapp DMT 1	7,43	0,98	0,64	0,61
Trapp DMT 2	5,80	0,65	0,50	0,49
Trapp DMT 3	7,08	1,10	0,52	0,26
Trapp DMT 4	3,50	0,66	0,15	0,72
Treporti	24,79	4,21	0,91	0,90
Tubarão Gelson DMT 1	1,63	0,35	0,09	-1,99
Tubarão Gelson DMT 2	2,83	0,24	0,08	-1,25
Tubarão Camp. Exp. 1	2,29	0,31	0,09	-0,92
Zelazny SDMT 3141 (180)	9,32	1,70	0,70	0,67
Zelazny SDMT 3141 (190)	9,59	1,70	0,70	0,67

Fonte: A autora, 2020.

O que percebe-se é que essa relação entre (q_t/σ'_{vo}) versus K_D apresenta grande variabilidade para solos argilosos, sendo duvidosa a sua aplicação, uma vez que o valor de R^2 apresenta resultado negativo, o que não se aceita neste coeficiente de regressão. Nos demais perfis, com solo de comportamento siltoso e arenoso, essa relação mostra-se aceitável

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No Campo Experimental de Araquari – SC foram analisados os resultados de dois ensaios de cada procedimento, tanto para o DMT Convencional quanto para o DMT Medusa. Conforme já visto no Capítulo 4 em metodologia da pesquisa, a análise comparativa dos ensaios executou-se entre o Ponto 1 e Ponto 3 do DMT Convencional, em relação aos pontos Araquari *Day 1* e Araquari *Day 2* do DMT Medusa, cujas profundidades de cravação ficaram mais semelhantes. As análises poderiam ter sido efetuadas entre qualquer ponto localizado no Campo Experimental de Araquari, pois teriam sido obtidas as mesmas respostas, conforme demonstrado pelos resultados dos pontos analisados neste capítulo. As análises da pesquisa baseiam-se nos parâmetros intermediários I_D , K_D e E_D , e em um dos parâmetros derivados de interesse desta pesquisa que é o ϕ' .

6.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS INTERMEDIÁRIOS DO SOLO (I_D , K_D e E_D) E PARÂMETRO DERIVADO (ϕ')

Inicia-se a análise dos resultados comparando-se os valores de I_D , K_D , E_D e o ϕ' do Ponto 1 com o ensaio *Day 1*. Estes resultados estão apresentados na Figura 37 onde estão plotados em escalas convenientes para destacar a região de interesse da pesquisa, que vai dos -12 m aos -19 m.

O procedimento adotado nos ensaios está descrito no Capítulo 4 de metodologia desta dissertação, contudo será revisado aqui para facilitar o entendimento do leitor. Em linha azul (Figura 37) estão plotados os resultados do DMT Convencional onde as leituras de *A* e *B* são efetuadas geralmente a 15 e 30 segundos, respectivamente, após o final da cravação da lâmina. Em linha laranja estão plotados os resultados obtidos com o DMT Medusa utilizando o procedimento em que se espera a dissipação total do excesso de poropressão gerado durante a inserção da lâmina no solo.

Para o melhor entendimento da explicação que segue, ainda na Figura 37, estão destacados dois pontos. O primeiro a ser comentado corresponde a -18,00 m de profundidade e refere-se a Figura 30, apresentado no Capítulo 4 em Resultados. Nesta profundidade as leituras contínuas de *A* ao longo do tempo permaneceram constantes indicando que não houve a geração de excesso de poropressão durante a cravação da lâmina ou, se houve, foi dissipada instantaneamente. Este comportamento é típico de solos permeáveis, ou seja, comportamento

totalmente drenado. Neste caso em particular, a leitura de A , independe do tempo, ou melhor, da dissipação do excesso de poropressão e o procedimento do DMT Convencional e do procedimento do DMT Medusa, adotado nesta pesquisa, conduzem ao mesmo resultado. Essa constatação pode ser verificada na Figura 37 onde os valores de I_D , K_D , E_D e ϕ' são praticamente os mesmos na profundidade de -18,00 m.

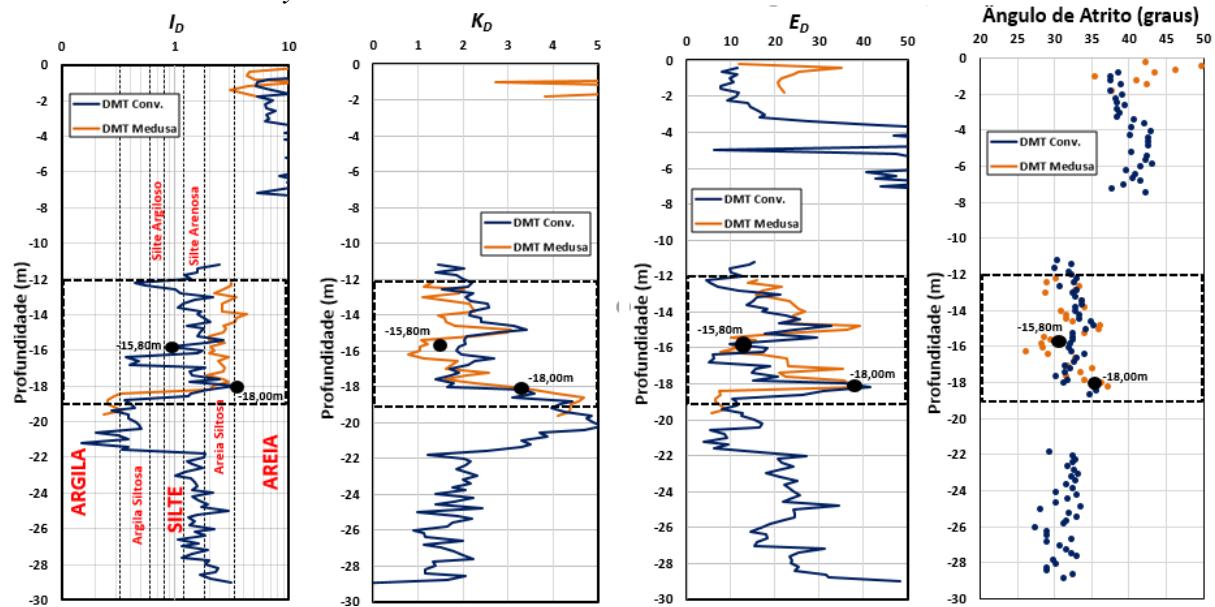
O segundo ponto a ser comentado corresponde a profundidade de -15,80 m e refere-se a Figura 37. Na Figura 31 do Capítulo 4, em resultados, observa-se que durante a leitura contínua de A tem-se uma redução do seu valor ao longo do tempo. Esta redução do valor está associada com a redução do excesso de poropressão, gerada durante a inserção da lâmina no solo. Como esta redução de excesso de poropressão não é instantânea, mas variável ao longo do tempo, tem-se a indicação de um comportamento de solo com drenagem parcial. A redução do valor de A implica na redução do valor de P_0 (Equação 10, Capítulo 2) que consequentemente implicam em valores distintos de I_D , K_D , E_D e ϕ' , como pode ser observado na profundidade referida de -15,80m na Figura 37 a depender o procedimento do ensaio (DMT Medusa e DMT Convencional).

Ainda para a Figura 37, o procedimento adotado no ensaio do DMT Medusa que efetua a leitura de A quando todo o excesso de poropressão foi dissipado implica em valores menores de A o que conduz a valores distintos de I_D em relação ao procedimento do DMT Convencional. O comportamento do solo passa de um solo silte argiloso e siltoso para um solo arenoso silto, conforme visualizado no parâmetro I_D . Com a redução da leitura de A tem-se a redução de P_0 e a consequente redução do parâmetro intermediário K_D (Equação 12, Capítulo 2) e de todos os parâmetros derivados que dependem de K_D , como por exemplo o ϕ' , apresenta uma diminuição de resultados (Equação 14, Capítulo 2).

Assim, quanto maior a diferenças de I_D obtida com o procedimento do DMT Convencional e do DMT Medusa, maior será o impacto nos valores do parâmetro derivados ϕ' .

O valor do parâmetro intermediário E_D apresenta um tênué aumento. Com a redução da leitura de A após dissipação da poropressão, tal resultado afetará na diferença entre P_0 e P_1 (Equação 13, Capítulo 2), aumentando desta forma os resultados do parâmetro E_D no DMT Medusa.

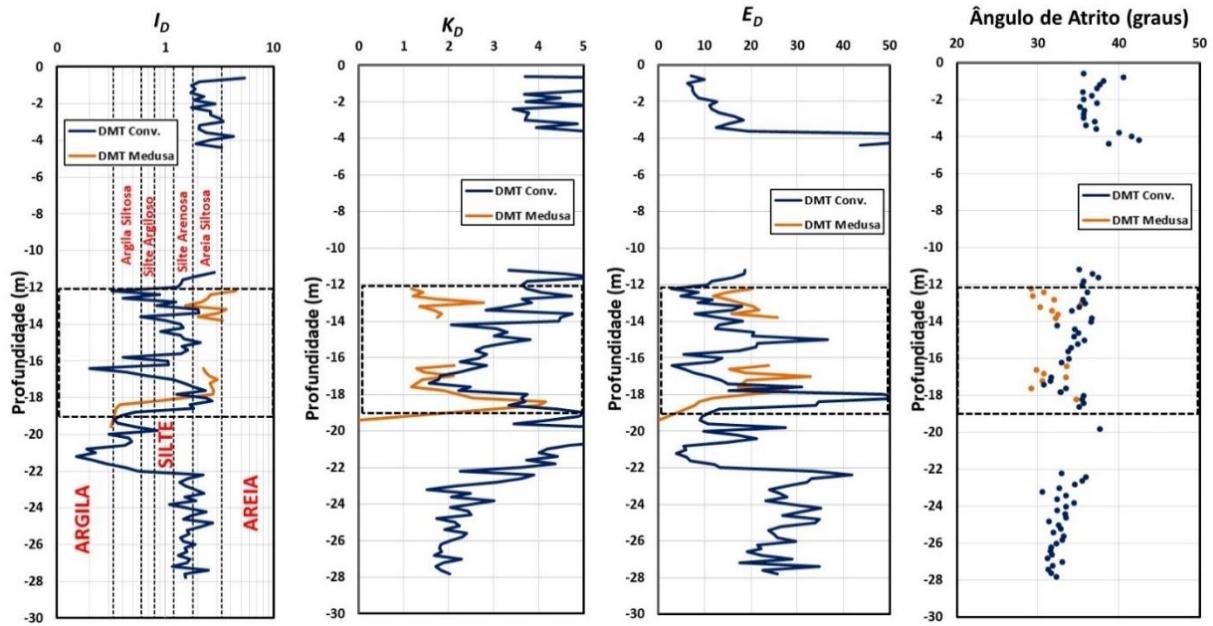
Figura 37 – Comparativo entre os parâmetros I_D , K_D , E_D e ϕ' entre DMT Convencional PONTO 1 e DMT Medusa Day 1



Fonte: A autora, 2020.

Na Figura 38 percebe-se a mesma resposta da Figura 37 onde solos de comportamento argilo siltoso passam a ter comportamento de areia siltosa, conforme demonstra o parâmetro I_D , e assim confirmam as observações apresentadas. Observa-se na Figura 38, nas profundidades de -12 m a -14 m, que o valor do ϕ' obtido com o procedimento do DMT Convencional conduz a valores de ϕ' com 4 graus maiores que se considerado o procedimento adotado nesta dissertação, com o uso do DMT Medusa, onde a leitura A somente é efetuada após a sua estabilização.

Figura 38 – Comparativo entre os parâmetros I_D , K_D , E_D e ϕ' entre DMT Convencional PONTO 3 e DMT Medusa Day 2

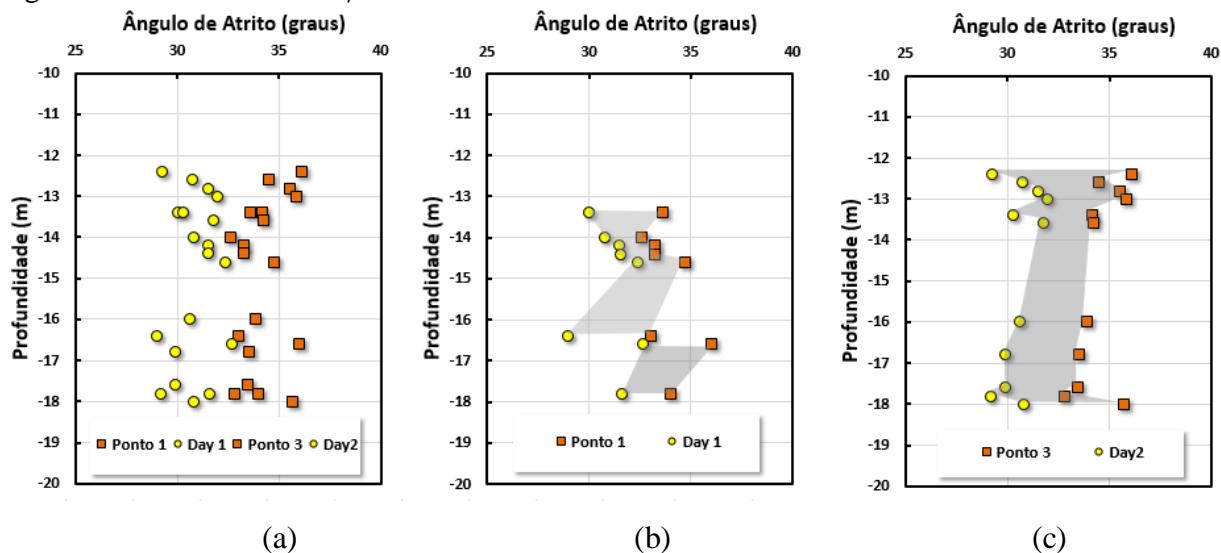


Fonte: A autora, 2020.

Observa-se dessa forma que, nas Figuras 37 e 38, ambas possuem variações dos parâmetros dependendo do tipo de procedimento executado de DMT, seja Convencional ou Medusa. Verifica-se também que os resultados com drenagem parcial são afetados pelo tipo de procedimento de DMT, já os resultados em materiais drenantes não demonstram significativas diferenças nos parâmetros.

Buscando-se um maior entendimento da influência do procedimento executivo do DMT em solos de comportamento intermediário elaborou-se a Figura 39, que apresenta em destaque somente os resultados de ϕ' na região com presença de solo de comportamento intermediário, que são as profundidades de -12 m aos -18 m. Na Figura 39 (a) são plotados conjuntamente os resultados obtidos das Figuras 37 e 38. Na Figura 39 (b) o grupo de resultados do Day 1 (DMT Medusa) com o Ponto 1 (DMT Convencional) e na Figura 39 (c) o grupo de resultados do Day 2 (DMT Medusa) com o Ponto 3 (DMT Convencional). Os valores plotados nestes gráficos são para as profundidades onde há nitidamente distanciamento entre valores de I_D , ou seja, onde a influência do comportamento intermediário é mais acentuada. Pontos com I_D próximos foram descartados do gráfico com o objetivo de salientar esta diferença.

Figura 39 – Resultados de ϕ' obtidos do DMT Medusa e DMT Convencional



Fonte: A autora, 2020.

Observa-se na Figura 39 (a) que há um nítido distanciamento entre os valores dos ângulos de atrito obtidos com base nos dois procedimentos. Valores mais baixos são verificados quando há a dissipação do excesso de poropressão (procedimento DMT Medusa) e mais altos quando não há a dissipação (procedimento DMT Convencional). Na Figura 39 (b) e (c) plotam os mesmos resultados, mas de forma separada *Day 1* com o Ponto 1 e *Day 2* com o Ponto 3. Nestas Figuras, é melhor representado o distanciamento entre os valores de ϕ' confirmando a influência do procedimento executivo dos ensaios no valor do mesmo.

6.2 DISCUSSÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO PARÂMETRO DERIVADO (ϕ')

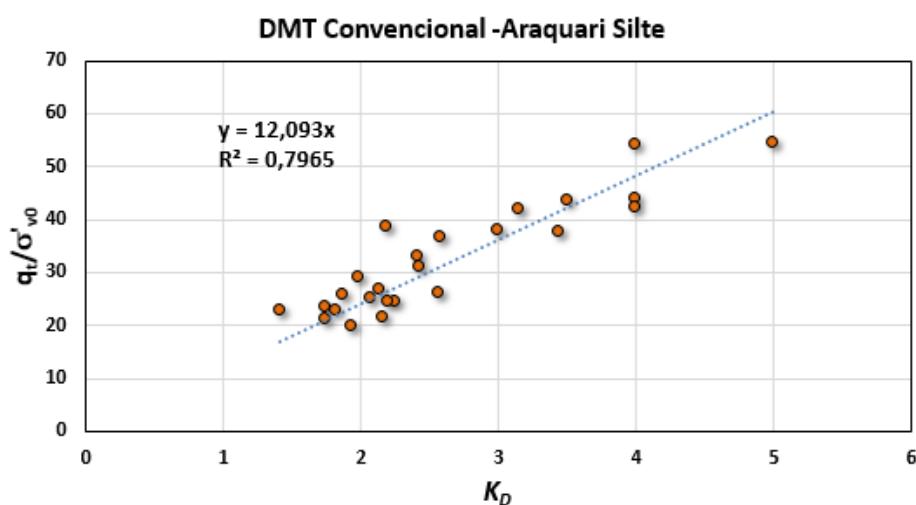
Com base no exposto das análises, verificou-se que o procedimento de ensaio afeta os resultados e, no caso particular de interesse desta pesquisa, interfere no valor do ϕ' . Imediatamente tem-se um novo questionamento: se de fato os valores de ϕ' obtidos com o procedimento de ensaio em que as leituras de *A* e *B* sejam realizadas somente após a total dissipação do excesso de poropressão (DMT Medusa) são ou não corretos. Ou seja, há que se validar esta premissa de procedimento de ensaio no cálculo de ϕ' .

A validação pode ser efetuada de distintas formas: comparando os valores calculados de ϕ' com os resultados obtidos em laboratório apresentados no Capítulo 2, na revisão bibliográfica, e/ou comparando os valores calculados com resultados de soluções de cálculo já estabelecidos e consagrados na prática da engenharia e mencionados no Capítulo 2.

Inicia-se a discussão deste procedimento de ensaio comparando os resultados com a literatura técnica deste trabalho. Contudo, a experiência acumulada na determinação de ϕ' está fundamentada em um outro ensaio de campo que é o CPT. Marchetti (1997) quando propôs o seu método (Equação 14, Capítulo 2 da revisão bibliográfica) utilizou-se também desta mesma metodologia. Buscou no conhecimento acumulado para o CPT, através das publicações de Durgunoglu e Michell (1975), Schmertmann (1988) e Robertson e Campanella (1983), no desenvolvimento da sua proposta de cálculo do ϕ' . Para tanto, Marchetti utilizou a proposta de Campanella e Robertson (1991), (Figura 21 – Capítulo 2), que permite a transposição de dados entre o DMT e o CPT. Esta proposta, conforme apresentada na Revisão Bibliográfica no item 2.4, relaciona parâmetros dos dois ensaios com base na razão do fator de capacidade de carga pelo índice de tensão horizontal ($(q_c/\sigma'_{v0})/K_D$). Na oportunidade Campanella e Robertson (1991) propuseram o valor de 33 e até presente momento é considerado como válido.

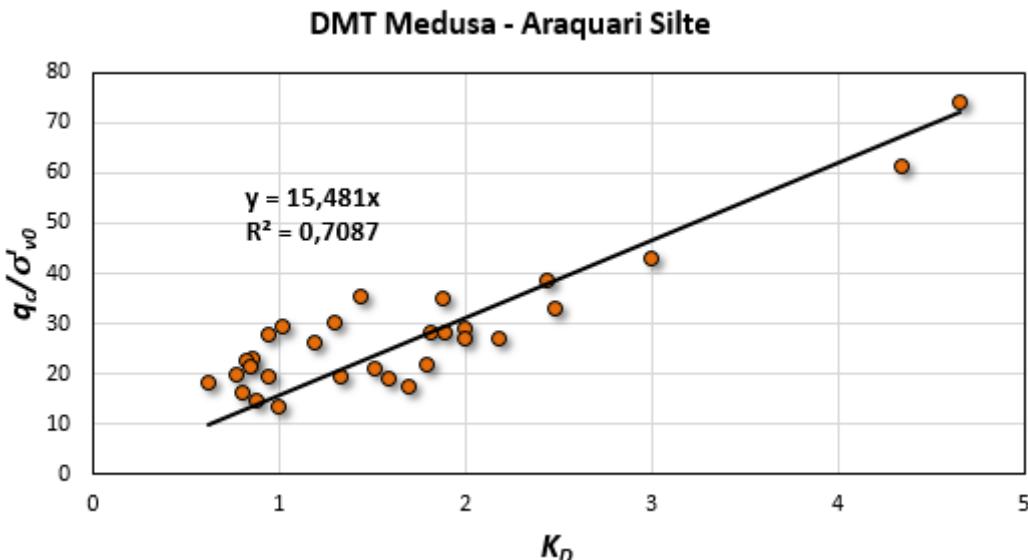
Para o caso do Campo Experimental de Araquari onde se dispõem de valores de CPT e DMT é possível verificar esta razão. As Figuras 40 e 41 apresentam esta razão para os valores de (q_t/σ'_{v0}) obtidos pelo CPT e para os valores de K_D , obtidos com o procedimento do DMT Convencional, Figura 40, e com o procedimento adotado nesta dissertação, DMT Medusa (Figura 41). Estas figuras referem-se à profundidade do presente estudo que segue dos -12 m aos -18 m.

Figura 40 – Relação (q_t/σ'_{v0}) versus K_D para o Campo Experimental de Araquari – DMT Convencional.



Fonte: A autora, 2020.

Figura 41 – Relação (q_t/σ'_{v0}) versus K_D para o Campo Experimental de Araquari – DMT Medusa

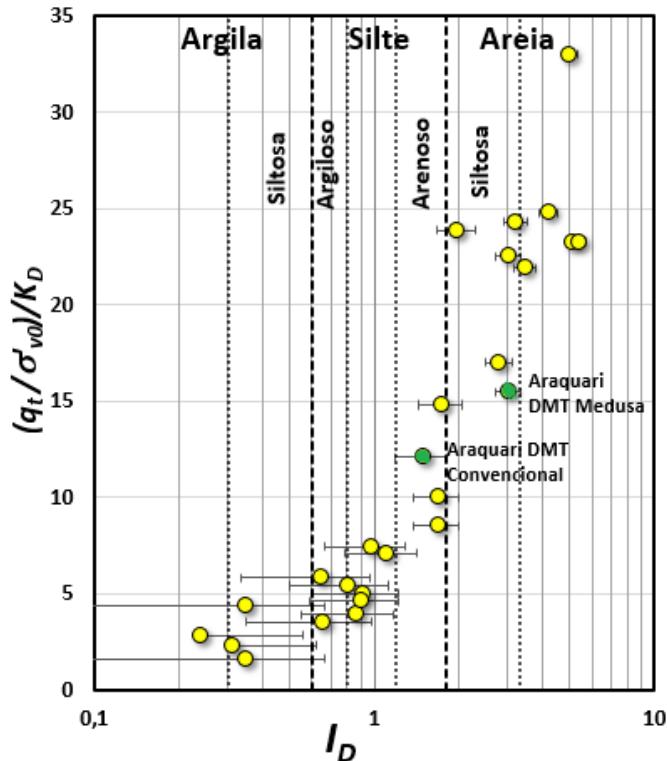


Fonte: A autora, 2020.

A elaboração destes gráficos das Figuras 40 e 41 resultou em valores da razão (q_t/σ'_{v0}) versus K_D totalmente distintos do proposto por Campanella e Robertson (1991). A partir desta constatação tem-se mais um entendimento desta dissertação em que o valor da razão (q_t/σ'_{v0}) versus K_D não é única conforme até então estabelecido e que ela depende do procedimento de ensaio em solos com drenagem parcial.

Este fato levou a um desdobramento desta pesquisa como já relatado no Capítulo 5 de resultados. Dados de ensaios de DMT Convencional e CPT executados lado a lado foram catalogados e formatados dando origem a Tabela 4 do Capítulo 5 desta pesquisa. Os resultados da Tabela 4 estão demonstrados na Figura 42. Os pontos em amarelo referem-se aos perfis dos solos da tabela mencionada e os pontos verdes relacionam-se aos perfis do solo do Campo Experimental de Araquari, com o procedimento do DMT Medusa e DMT convencional. Com todos os pontos dispostos na Figura 42, é possível visualizar a classificação destes solos quanto ao seu comportamento mecânico, definido por ID .

Figura 42 – Relação $(q_t/\sigma'_{v0}) / K_D$ versus I_D .

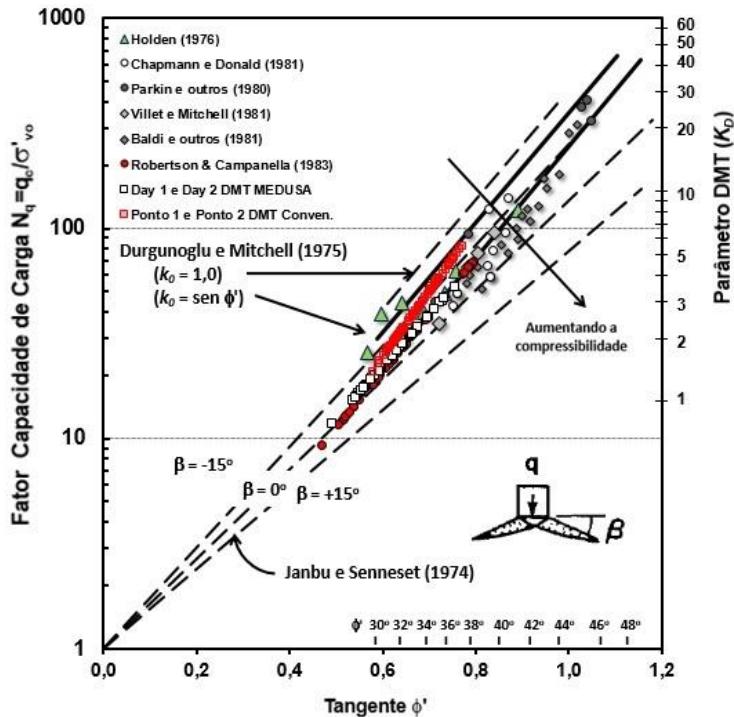


Fonte: A autora, 2020.

A Figura 42 permite mais algumas novas considerações. Conforme já revelado a razão $(q_t/\sigma'_{v0}) / K_D$ não é única e agora conclui-se que é dependente do índice de comportamento do solo (I_D), ou seja, depende do tipo de solo. O valor da razão para o solo do Campo Experimental de Araquari, dos -12 m aos -19 m de profundidade, para ensaios com o DMT Medusa seguindo o procedimento da estabilização da leitura de A é igual a 15,48 e do DMT Convencional é de 12,093.

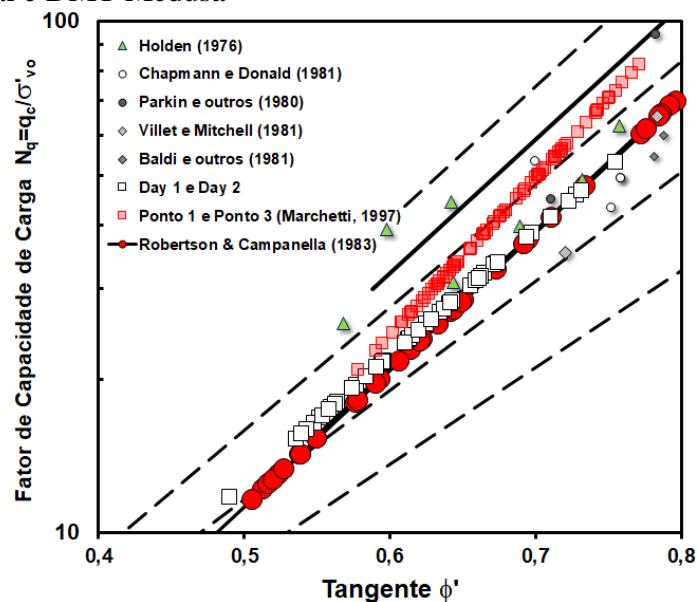
Com esse valor da razão de $(q_t/\sigma'_{v0}) / K_D$ igual a 15,48 é possível plotar os resultados dos ensaios de DMT Convencional e DMT Medusa no espaço proposto por Robertson e Campanella (1983), Figura 43. Nesta figura estão plotados os resultados de ϕ' no eixo das abcissas (tangente de ϕ') e de (q_t/σ'_{v0}) ou K_D no eixo das ordenadas. Para facilitar a visualização e entendimento da Figura 43 apresenta-se a Figura 44 que é um detalhamento da Figura 43.

Figura 43 – Relação entre fator de capacidade de carga (q_c/σ'_{vo}) e o ϕ' do DMT Convencional e DMT Medusa



Fonte: Robertson e Campanella, 1983. Adaptado.

Figura 44 – Detalhamento da relação entre fator de capacidade de carga (q_c/σ'_{vo}) e o ϕ' do DMT Convencional e DMT Medusa



Fonte: Robertson e Campanella, 1983. Adaptado.

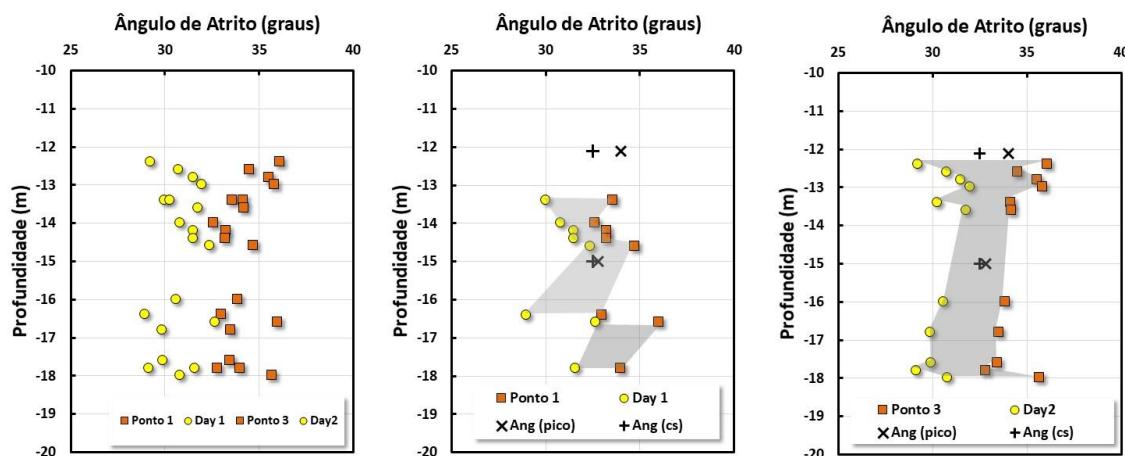
Nesta Figura 44 estão plotados o resultado da estimativa de ϕ' com base no CPT com a proposta de Robertson e Campanella (1983), identificado na legenda com círculos vermelhos; o ϕ' obtido com o DMT Convencional, descrito na legenda com quadrados vermelhos – Ponto

1 e Ponto 3) e o ϕ' seguindo o procedimento do DMT Medusa, identificado na legenda em quadrados brancos – Day 1 e Day 2).

A estimativa do ϕ' do solo utilizando-se o procedimento do DMT Medusa (quadrados brancos) coincide com a estimativa proposta por Robertson e Campanella (1991) com base no CPT (círculos vermelhos). Esta proximidade dos resultados de ambas estimativas corrobora na validação da metodologia onde dois procedimentos (CPT e DMT Medusa) conduzem a valores por sobre a mesma reta. As estimativas do ϕ' com o DMT Convencional elevam o seu valor, afastando-se desta forma dos resultados plotados propostos de Campanella e Robertson (1991). A esta validação cabe a análise se o procedimento proposto por Robertson e Campanella (1991) é válido para o solo siltoso com comportamento mecânico arenoso encontrado no Campo Experimental de Araquari. Somente pode-se concluir que os dois procedimentos conduzem a valores muito próximos sobre a mesma equação e de que o procedimento Convencional do DMT eleva o valor de ϕ' .

A Figura 45 apresenta a mesma Figura 39, porém com os resultados acrescidos dos ensaios de laboratório da profundidade de -12 m a -19 m apresentados no Capítulo 3, que caracteriza o perfil estratigráfico do Campo Experimental de Araquari, (Tabela 3). Em símbolos de ‘xis’ o ϕ_p e símbolos de ‘cruz’ o ϕ'_{cs} . Os valores dos ângulos obtidos em laboratório são ligeiramente inferiores aos obtido como o DMT Convencional e ligeiramente superiores aos obtidos com o procedimento adotado nesta dissertação como o uso do DMT Medusa.

Figura 45 – Ângulos de atrito obtidos com o DMT (Convencional e Medusa) e obtidos em laboratório



Fonte: A autora, 2020.

O que se pode inferir aqui é de que, novamente, o procedimento do DMT Convencional tem um aumento no valor do ϕ'_p e que os valores de laboratório se aproximam dos valores

obtidos com o DMT Medusa em alguns pontos. Esta erradicidade nos valores é esperada conforme discutido nesta pesquisa.

Contudo, pode-se inferir com esta discussão que o procedimento adotado no DMT Convencional sobre eleva os valores do ϕ' e que o procedimento em que a leitura de A é efetuada somente após a sua estabilização, DMT Medusa, é recomendado. A razão de $(q_t/\sigma'_{v0}) / K_D$ não é única e varia em função do tipo de comportamento do solo. Para o solo silto arenoso e silto argiloso do Campo Experimental de Araquari, usando o procedimento do DMT Medusa, em que a leitura de A somente é efetuada após a sua estabilização, vale 15,48.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O entendimento do comportamento dos solos assim como a determinação de parâmetros geotécnicos para a elaboração de projetos de engenharia através da realização de ensaio de campo sempre é um grande desafio. A resposta do solo a uma determinada solicitação é fortemente dependente da forma, intensidade e velocidade com que esta solicitação é aplicada. Diferentes tipos de solo reagem de forma distinta a uma mesma solicitação. Esta complexidade faz com que o entendimento do comportamento do solo perante a solicitação aplicada seja primordial no entendimento e na derivação de parâmetros geotécnicos coerentes.

Esta pesquisa apresenta os primeiros resultados de ensaios do DMT Medusa realizados no Brasil no Campo Experimental de Araquari, Santa Catarina. Estes ensaios seguiram procedimentos inovadores e distintos dos estabelecidos em normativas consagradas internacionalmente e aprovadas no meio técnico para o DMT Convencional. Demonstrou-se que utilizando este procedimento inovador, DMT Medusa, em que o excesso de poropressão gerado durante a inserção da lâmina no solo é deixado dissipar para então efetuar as leituras de A e B , mudanças significativas podem ser observadas no comportamento mecânico de solos parcialmente drenados. Segundo o mesmo procedimento do DMT Medusa, mudanças de comportamento não são observados para os solos arenosos e argilosos devido à variação de poropressão serem praticamente nulas em ambos os solos.

Esta conclusão reforça que solos de comportamento intermediário necessitam de metodologias de interpretação distintas das aplicadas para os solos de comportamento arenoso e argiloso.

Os ensaios com o Dilatômetro de Marchetti Convencional e o Dilatômetro de Marchetti Medusa no Campo Experimental de Araquari foram executados, espaçados em um intervalo de tempo de quatro anos entre eles (2014 e 2018, respectivamente). Como o Brasil não possui norma para o DMT Convencional, os ensaios foram executados seguindo os procedimentos normativos da ASTM D 6635 (2001) e/ou Eurocode 7 (2007). Já para o DMT Medusa os ensaios foram conduzidos de forma distinta aos normatizados visando justamente verificar a influência deste novo procedimento nos resultados.

Adotando-se o procedimento do DMT Medusa, de permitir a dissipação do excesso de poropressão gerado pela inserção da lâmina no solo, tem-se as seguintes conclusões:

- O procedimento de ensaio adotado nesta pesquisa afeta o resultado do ensaio DMT em solos de comportamento intermediário. Leituras de A que estão diretamente ligadas a P_0 e consequentemente todos os parâmetros intermediários

e derivados tem seus valores afetados. Parâmetros intermediários que só dependem da leitura de P_0 tem seu valor reduzido, como é o caso do parâmetro intermediário K_D . Parâmetros derivados que dependem de K_D , como é o caso do ϕ' , consequentemente também tem seus valores reduzidos;

- Parâmetros que dependem da diferença entre P_1 e P_0 tem seus valores aumentados já que se tem uma redução no valor de P_0 que não é diretamente correspondida no valor de P_1 . Este aumento decorrente da redução de P_0 conduz a um aumento do valor dos parâmetros intermediários I_D e E_D e de todos os parâmetros derivados destes.

Com base no acima descrito e observado experimentalmente nas leituras dos ensaios, tem-se as primeiras conclusões desta dissertação. O procedimento utilizado na realização do ensaio do DMT Medusa afeta o resultado do ensaio em solos com comportamento intermediário.

A segunda conclusão é uma consequência da primeira e indica que projetos realizados em solos com comportamento intermediário, que utilizaram como referência ensaios de DMT Convencional, conduzem a valores de ϕ' maiores do que realmente são e contra a segurança. Em uma análise geotécnica de estabilidade, ou em um projeto de contenção, este valor em excesso agirá em oposição a segurança pelo fato de estar demasiadamente dimensionado.

Para poder validar esta segunda conclusão, um desdobramento da presente pesquisa foi necessário e efetuado. Resultados de CPT e DMT realizados lado-a-lado e disponibilizados pelo Studio Marchetti e Geoforma Engenharia Ltda foram analisados e interpretados. Valores da razão de $(q_t/\sigma'_{vo})/K_D$ foram determinados para distintos solos. Estes valores levaram à conclusão de que o resultado desta razão não possui um único valor, conforme preconizado até então por Campanella e Robertson (1991), mas alteram-se quando dependem do tipo de comportamento do solo. Para o caso particular do solo de comportamento intermediário do Campo Experimental de Araquari esta razão vale 15,48.

Utilizando-se o valor da razão $(q_t/\sigma'_{vo})/K_D$ igual a 15,48 e o procedimento onde o excesso de poropressão gerado devido a inserção da lâmina no solo é dissipada antes da leitura de A , obteve-se valores de ϕ' e K_D coincidentes com a reta proposta por Robertson e Campanella (1983), cujo método é considerado consagrado no meio geotécnico, o que valida o procedimento executado.

No presente trabalho, um dos objetivos é determinar os parâmetros intermediários I_D , K_D e E_D com ambos os equipamentos e procedimentos e desta forma avaliar o impacto nos

resultados. Verificou-se na obtenção do parâmetro intermediário I_D que, a interpretação de resultados de ensaios em solos siltosos, ou seja, com drenagem parcial, deve ser efetuada com cautela, permitindo a dissipação da poropressão durante o ensaio para que a mesma não interfira na interpretação destes resultados.

O DMT Medusa, ao permitir leituras contínuas e controladas de A antes da expansão e leitura de B é a ferramenta indicada para qualquer tipo de comportamento de solo em especial para o solo de comportamento siltoso.

Conforme demostrado nesta dissertação o procedimento de ensaio adotado em uma investigação geotécnica é decisivo na adequada determinação dos parâmetros geotécnicos. No caso particular de solos com comportamento intermediário o procedimento efetuado nesta dissertação, utilizando o DMT Medusa, em que o excesso de poropressão gerado em decorrência da inserção da lâmina no solo é deixado dissipar antes de efetuar as leituras A e B é o mais indicado. Este procedimento foi validado de forma comparativa com outros métodos utilizados na prática da engenharia geotécnica.

Como sugestão para trabalhos futuros fica a aplicação do procedimento do ensaio adotado nesta dissertação em outras formações geológicas onde também se tem a presença de solos com comportamento intermediário e em especial em rejeitos de mineração. Recomenda-se também a avaliação do impacto deste procedimento nos demais parâmetros geotécnicos como na interpretação de resultados objetivando determinar a densidade relativa, peso específico do solo e histórico de tensões.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12069 (MB-3406):** Solo Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991. p. 11.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181:** Análise Granulométrica de Solos. São Paulo, 1918. p. 13.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D3441-86:** Standard Test Method for Deep Quasic-Static, Cone and Friction-Cone Penetration Tests of Soil. USA: 1986. p.8.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D6635-01:** Método de Teste Padrão para Realização do Dilatômetro de Placa Plana. USA, 2001. p. 15.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D6635-15:** Método de Teste Padrão para Realização do Dilatômetro de Placa Plana. USA, 2015. p. 16.

BALDI, G.; BELLOTI, R.; GHIONA, V.N.; JAMIOLKOWSKI, M.; PASQUALINI, E. Design parameters for sand from CPT. In: European symp. on penetration testing, ESOPT, 2. Amsterdam. **Proceeding.** Balkema Publ., v.2, p. 425-432, Rotterdam, 1982.

BEDIN, J. **Interpretação de Ensaios de Piezocone em Rejeitos De Bauxita.** 2006. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

BELLOLI, M. V. A. **Interpretação de ensaios DMT em solos com drenagem parcial.** 2018. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

BLIGHT, G.E. A note on field vane testing os silt soils. **Cadadian Geotechnical Journal.** v. 5, n. 3, p. 142-149, 1968.

BOLTON, M.D. The strenght and dilatancy os sands. **Géotechnique.** v. 36, n. 1, p. 65-78, 1986.

BROCHERO, J.L.R. **Caracterização Geotécnica do Campos Experimental da UFRGS em Areia.** 2014. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CAMPANELLA, R.G.; ROBERTSON, P.K. Use And Interpretation of a Research Dilatometer. **Canadian Geotechnical Journal.** v. 28, n. 1, p. 113-126, 1991.

CHAPMAN, G. A.; DONALD, I. B. Interpretation of static penetration test in sand. In: **International Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering.** 10th, 1981, Stockholm. Sweden. v. 2, 1981. p. 455-458.

COSTA FILHO, L. M. **Improving tailings dam safety:** critica; aspects of management, design, operation and closure. Bulletin, dez. 2006. 66 p.

DEJONG, J.T.; RANDOLPH, M.F. – Influence of Partial Consolidation during Cone Penetration on Estimated Soil Behavior Type and Pore Pressure Dissipation Measurements. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.** v. 138, n. 7, 2012, p. 777-788.

DURGUNOGLU, H.T.; MITCHELL, J.K. Static penetration resistance of soils: I-Analysis. In: **In Situ Measurement of Soil Properties.** ASCE. p. 151, 1975.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 7: Geotechnical Design. **Part 3: Design assisted by field testing;** Section 9: Flat dilatometer test (DMT), 2007.

EUROPEAN COMMISSION. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/eipp/desktop/en/projects/project-9520.html>>. Acesso em: 13 set. 2019.

FINNIE, I. M. S., RANDOLPH, M. (1994). Punch-through and liquefaction induced failure of shallow foundations on calcareous sediments. In **Seventh International Conference on the Behaviour of Offshore Structures.** vol. 1, p. 217-230. Massachusetts, USA: Pergamon. Google Earth. 1994. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: jan. 2019.

GEOFORMA ENGENHARIA LTDA. Banco de dados das sondagens executadas no Campo Experimental de Araquari - SC. Fornecido em mar. 2020.

GOMES, D. D. **Uso do dilatômetro de Marchetti para a previsão da capacidade de carga e dos recalques elásticos das estacas.** 2007. 164 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. GOOGLE EARTH. Disponível em <https://www.google.com/earth/>. Acesso em jan. 2019.

HOLDEN, J. C. The calibration of electrical penetrometers in sand. Final Report. **Norwegian Council for Scientific and Industrial Research** (NTNF), 1976. (Reprinted in Norwegian Geotech Institute, Internal Report 52108-2 Jan.1977).

IRTP, 1988. International Reference Test Procedure for Cone Penetration Test (CPT). **Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils**, TC 16, Swedish Geotechnical Institute, Linkoping, Information, 7, 6-16.

JANBU, N., SENNESET, K. Effective stress interpretation of in situ static penetration tests. In: ESOPT, 1, 1974, Stockholm. **Proceeding**. Stockholm: National Swedish Building Research, 1974. 2 v. p. 181-193.

JEFFERIES, M.; BEEN, K. **Soil Liquefaction: a critical state approach**. London: Taylor & Francis Group, 2006.

KLAHOLD, P. A. **Interpretação de Ensaios de Campo em Solos com Permeabilidade Intermediária**. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

KULHAWY, Fred H.; MAYNE, Paul W. **Manual on estimating soil properties for foundation design**. Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Geotechnical Engineering Group, 1990.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. SI Version, Wiley, New York, 1979.

LAVALLE, L., V., A. **Estudo da interação solo - concreto das estacas escavadas do campo experimental de Araquari**. 2017. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LUTENEGGER, A. J. Current status of the Marchetti Dilatometer Test. In: **In Int. Symp. On Penetration Testing**, ISOPT-1. Rotterdam, 1988, p. 137-156.

MARCHETTI, D. Dilatometer and Seismic Dilatometer Testing Offshore: Available Experience and New Developments. **Journal Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 41, 2018. p. 967-977.

MARCHETTI, S. A New In Situ Test for the Measurement of Horizontal Soil Deformability. 1975. **Proceeding**. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, North Carolina State University, USA.

MARCHETTI, S. In Situ Tests by Flat Dilatometer. **Journal American Society of Civil Engineers**. 1980.

MARCHETTI, S. On the Field Determination of K_0 in Sand. **Proceeding.** XI ICSMFE, Panel Presentation, S. Francisco vol. 5, 1985. p. 2667-2672.

MARCHETTI, S. The Flat Dilatometer: Design Applications. **Proceeding.** Third International Geotechnical Engineering Conference, Keynote lecture, Cairo University. Jan., 1997. p. 421-448.

MARCHETTI, S.; MONACO, P. **Short Course in Flat Dilatometer (DMT).** University of L'Aquila, Italy, 2001.

MARCHETTI, S.; MONACO, P.; AMOROSO, S.; MINARELLI, I. In situ tests by Medusa DMT. *In XVII European Conference.* Reykjavik, Islândia. 2019.

MARCHETTI, S.; MONACO, P.; TOTANI, G.; CALABRESE, M. The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations. **Proceeding.** Int. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, Parahyangan Catholic Univ., Bandung, Indonesia, 2001. p. 95-132.

MORGENSTERN, N.R.; VICK, S.G.; VIOTTI, C.B.; WATTS, B.D. **Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão.** Minas Gerais, 2016.

NIENOV, F. A. **Desempenho de estacas escavadas de grande diâmetro em solo arenoso sob carregamento vertical.** 2016. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração.** 2019. 231 p. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

NIERWINSKI, H. P. **Potencial de Liquefação de Rejeitos de Mineração Estimado através de Ensaios de Campo.** 2013. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

PARKIN, A.K.; HOLDEN, K.; AAMOT, K.; LAST, N.; LUNNE, T. **Laboratory investigation os CPT in sand.** Report 52108-9. Oslo: Norwegian Geotech. Institute, 1980.

PINTO, C.S.; **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. p. 367.

PORTAL DO CAMPO EXPERIMENTAL DE ARAQUARI. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/araquari-ets/> Acesso em: mar.-nov. de 2019.

RANDOLPH, M.F., HOPE, S. Effect of Cone Velocity on Cone Resistance and Excess Pore Pressures. **Proceeding.** Int. Symp. On Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, Osaka, 2004.

ROBERTSON, P. K. **Guide to in-situ testing.** California, 2006. 100 p.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R.G. Interpretation of cone penetration tests. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 20, n. 4, 1983, p. 734-745.

ROBERTSON, P.K. Estimating in Situ Soil Permeability from CPT & Cptu. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10). **Proceeding.** Huntington Beach, Califórnia. Edited by Mitchell *et al.*, 2010.

ROBERTSON, P.K.; WRIDE, C. E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 35, n. 3, Ottawa, 1998. p. 442-459.

SCHMERTMANN, J. B. **DMT Test Methods and Data Reduction.** Final Report, March, Schmertmann & Crapps, Inc., Gainesville, Florida, 1988. 322 p.

SCHMERTMANN, J. H. A new method for determining the friction angle in sands from the flat dilatometer test. **Proceeding.** European Symp. On Penetration Testing. Esopt-2. Amsterdam. v. 2, 1982. p. 853-861.

SCHNAID, F. Geo-Characterization and Properties of Natural Soils by In Situ Tests. In: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. **Anais.** v. 1, Osaka, 2005, p. 3-47.

SCHNAID, F. **In Situ Testing in Geomechanics.** 1^a ed, v. 1. Oxon: Taylor & Francis, 2009. 329 p.

SCHNAID, F. ODEBRECHT, E.; SOSNOSKI, J.; ROBERTSON, P.K.; Effects of Test Procedure on Flat Dilatometer Test (Dmt) Results in Intermediate Soils. Canadian Geotechnical Journal, 2016. p. 1270-1280.

SCHNAID, F.; BEDIN, J.; COSTA FILHO L.M. Drainage characterization of tailings from in situ test. **Proceeding.** 2nd Int. Symp. On cone penetration Testing, Omnipress, Madison, WI, 2010.

SCHNAID, F.; LEHANE, B.M.; FAHEY, M. In situ characterization of unusual geomaterials. **Proceeding.** ISC'2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Viana da Fonseca e Mayne eds. Porto, Portugal, Millpress, Rotterdam, v. 1, 2004, p. 49-73.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Challenges in the Interpretation of the DMT in Tailings, **Proceeding.** 3rd International Conference on the Flat Dilatometer, Rome, Itália, 2015. p. 13-23

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. p. 223.

SESTREN, L; SCHNAID, F; ODEBECHT, E; Shaft resistance from full scale instrumented large diameter bored pile load test at the Araquari Sand Testing Site. **Géotecnique**, (em fase de publicação) 2020.

SOSNOSKI, J., **Interpretação de ensaios de CPTU e MDT em solos com permeabilidade intermediária.** 2016. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre, 2016.

STUDIO MARCHETTI. Banco de dados das sondagens executadas no Campo Experimental de Araquari - SC. Fornecido em: Mar. 2020.

STUDIO MARCHETTI. **Marchetti Dilatometer.** Disponível em: <<http://www.marchetti-dmt.it/>>. Acesso em: Set. 2019.

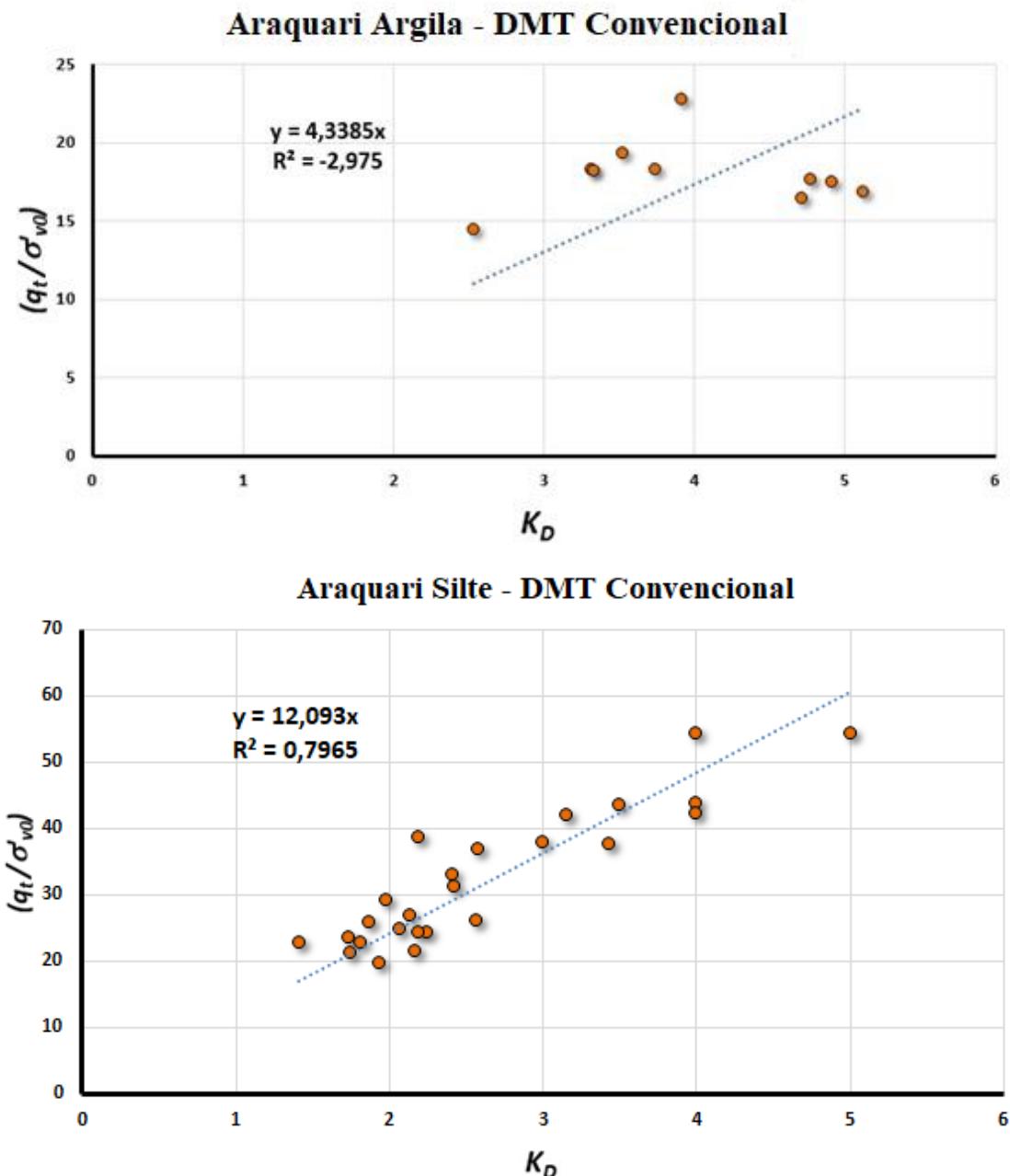
VEISMANIS, A. Laboratory investigation of electrical friction - cone penetrometers in sand. In: **Proceeding.** European Symposium on Penetration Testing, vol. 2, 1974. p. 407–420.

VILLET, W.C.B.; MITCHELL, J. K. Cone resistance, relative resistance and friction angle. Cone penetration test and experience. **Proceeding.** ASCE National Convention, St. Louis, 1981. p. 178-208.

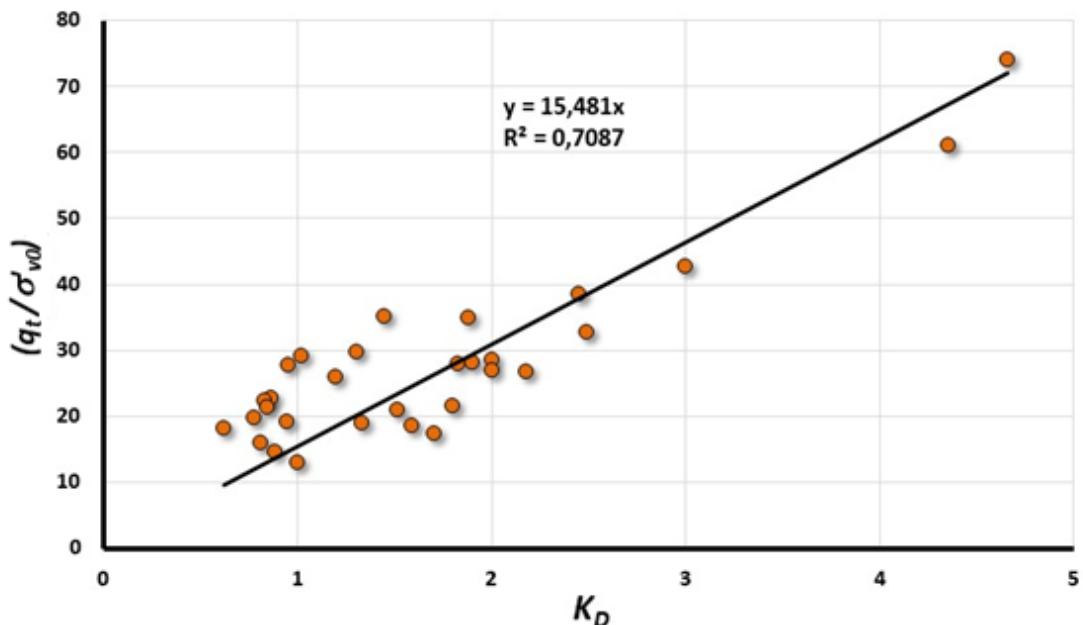
WHROTH, C.P. The interpretation on in-situ soil tests. Rankine Lecture, **Geotéchnique**, v. 34, n. 4, 1984. p. 449-489.

APÊNDICES

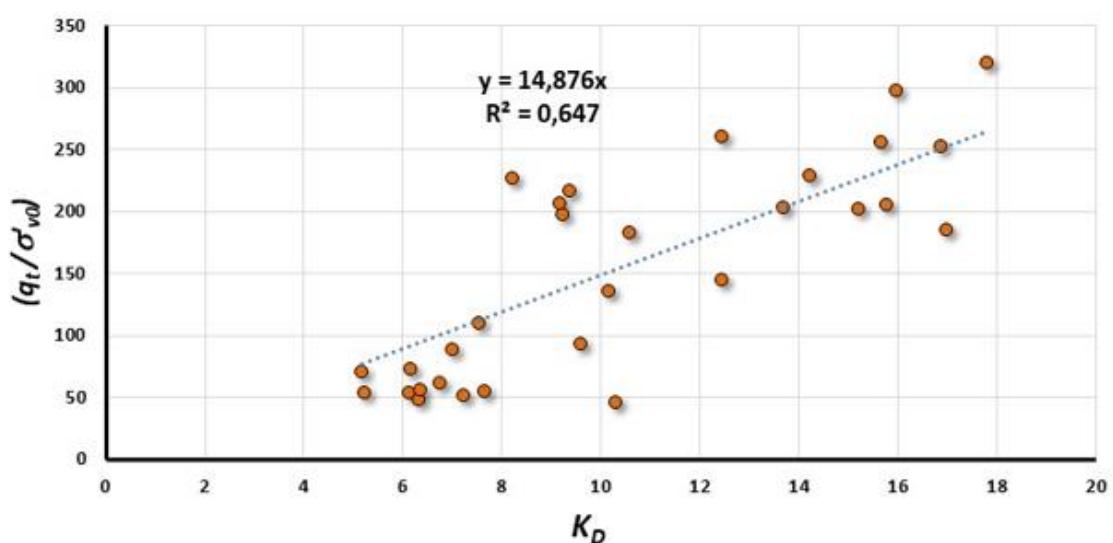
Apêndice I - Relações de $(q_t/\sigma'_{v0})/K_D$

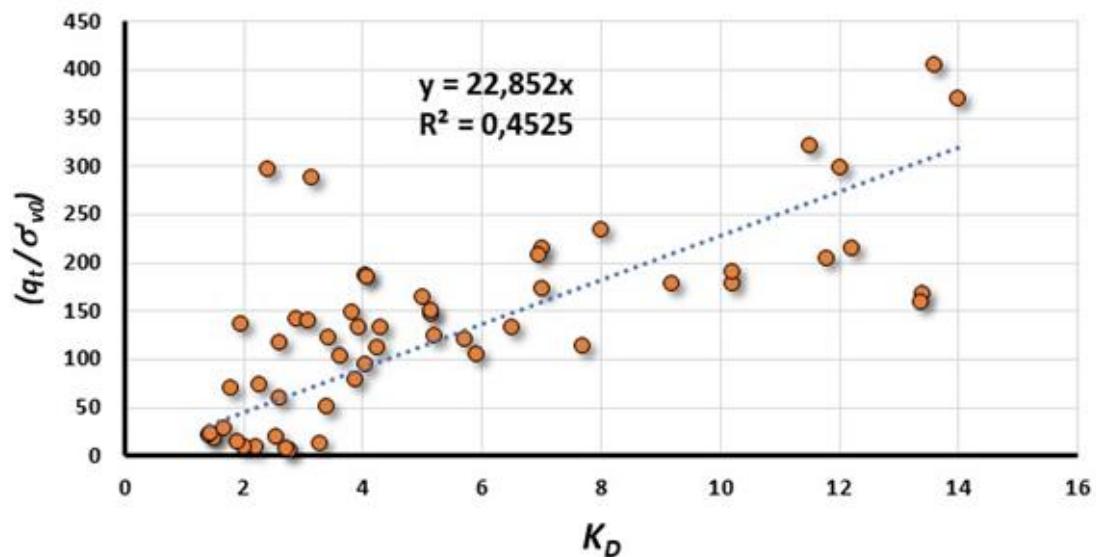


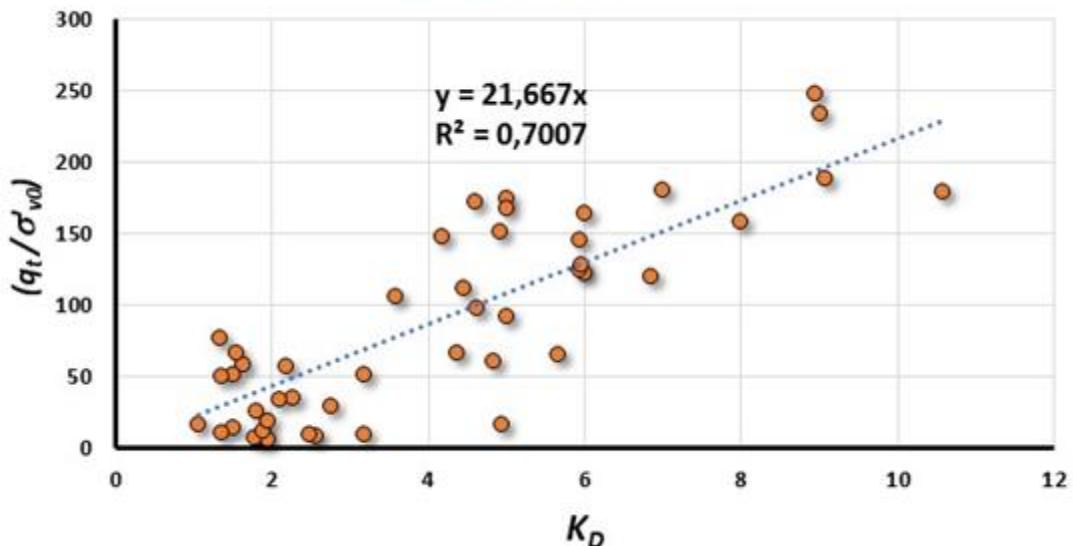
Araquari Silte - DMT Medusa



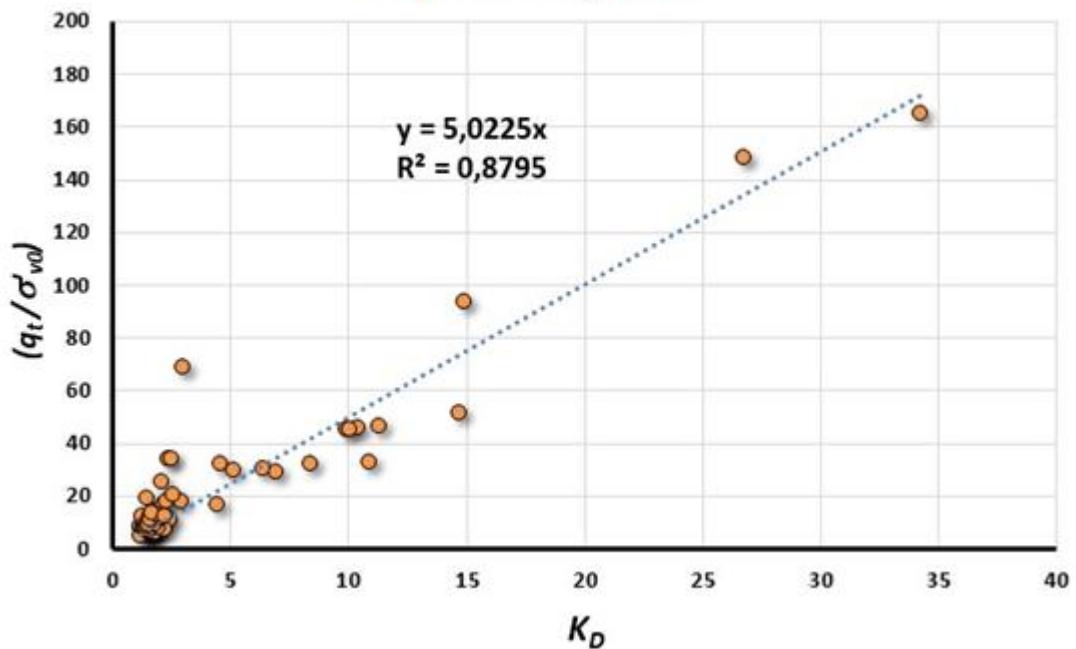
Araquari Superior - DMT Convencional



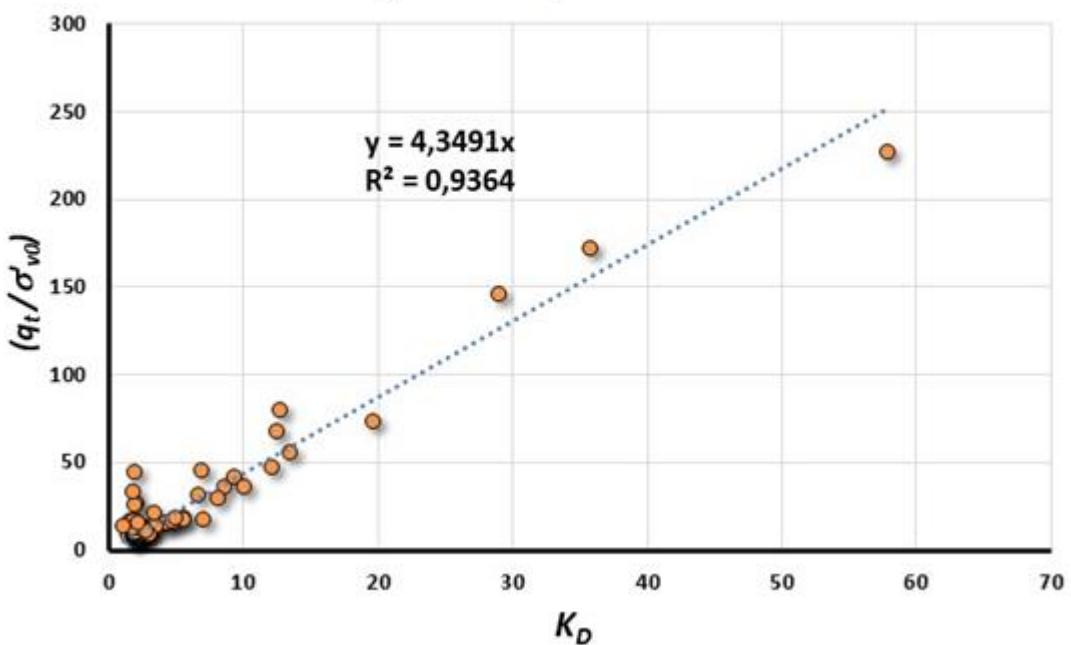
B. Camboriu 1

B. Camboriu 3

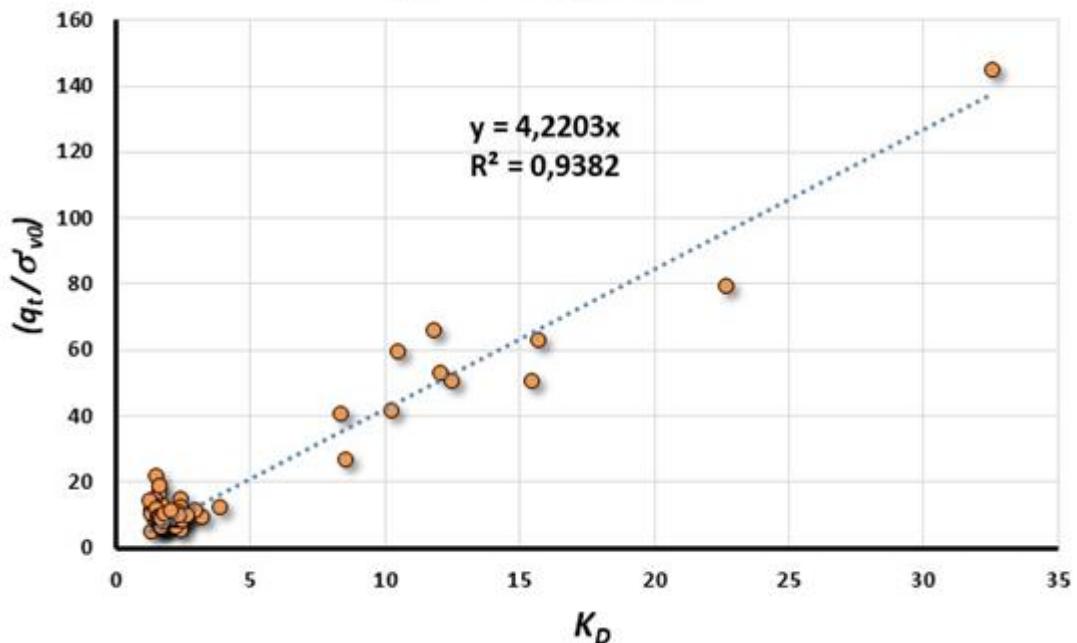
Capital Realty DMT 2



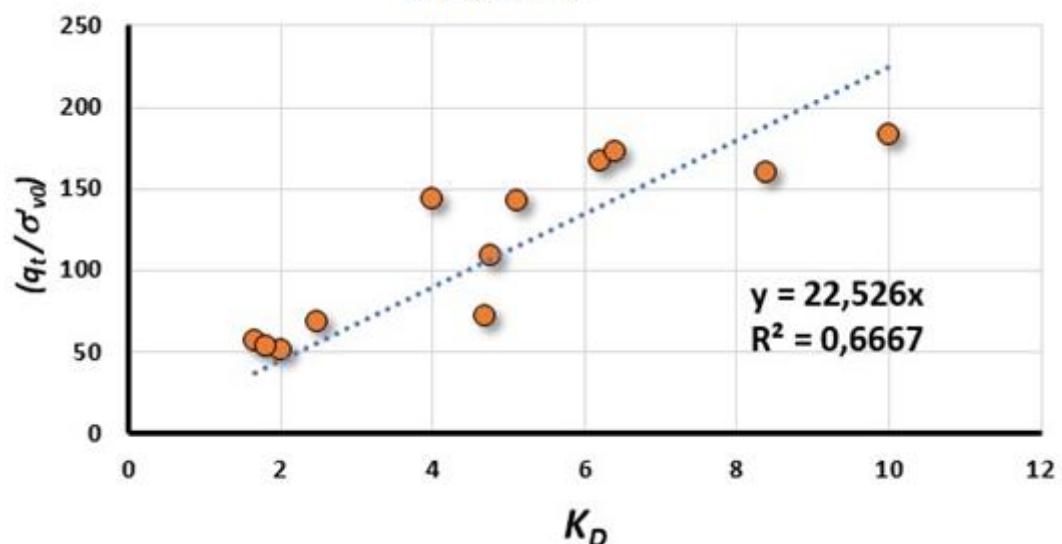
Capital Realty DMT 3



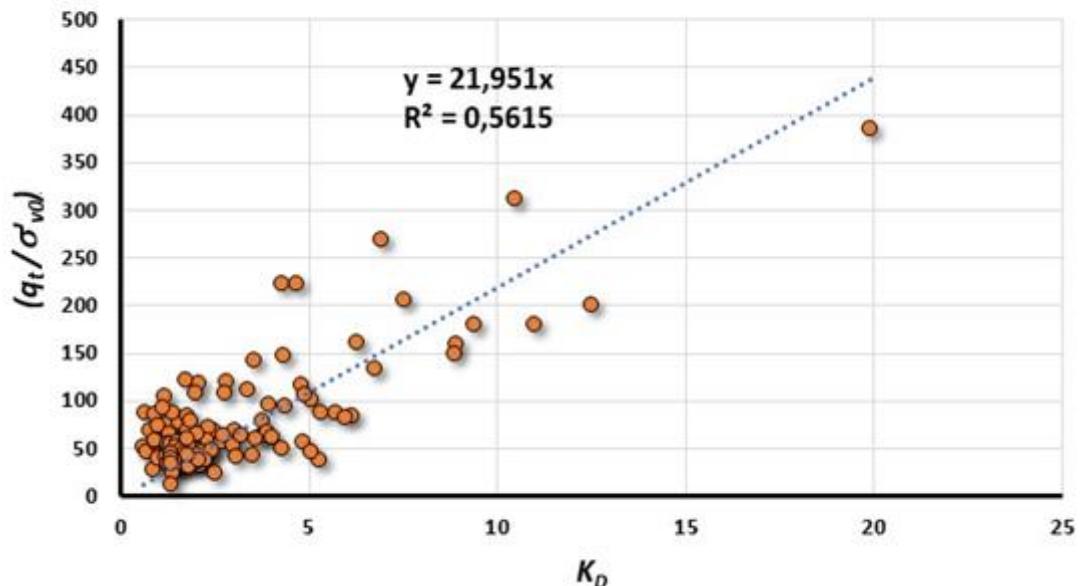
Capital Reality DMT 4



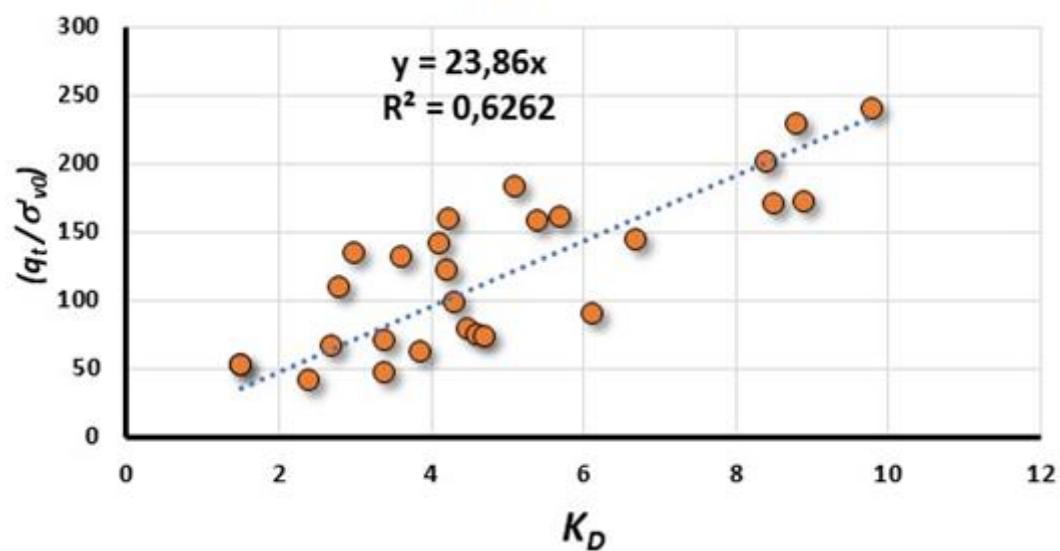
Hokksund



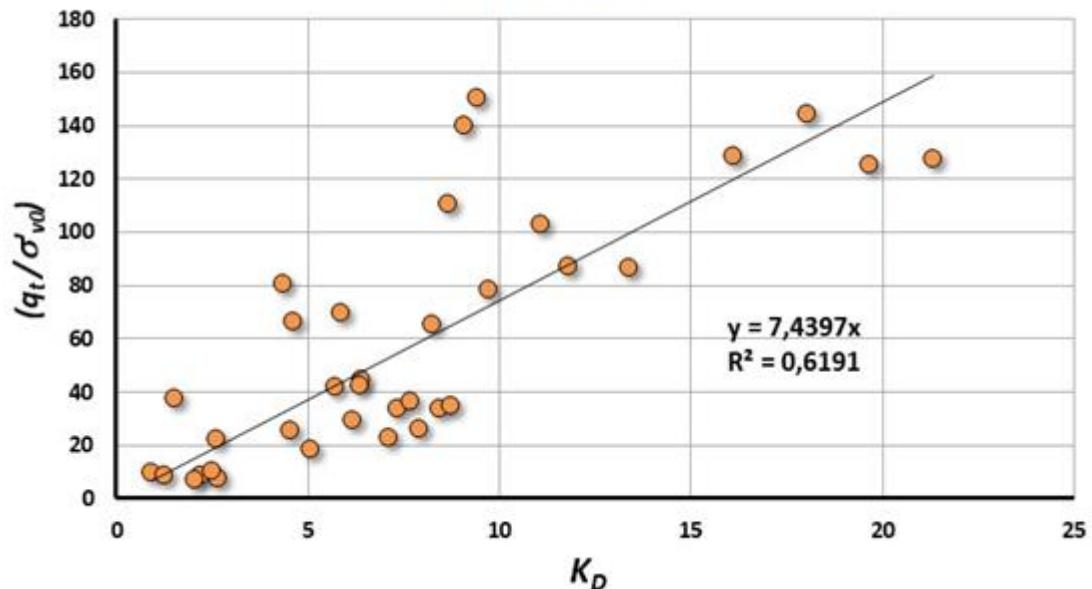
Rejeito de Ferro



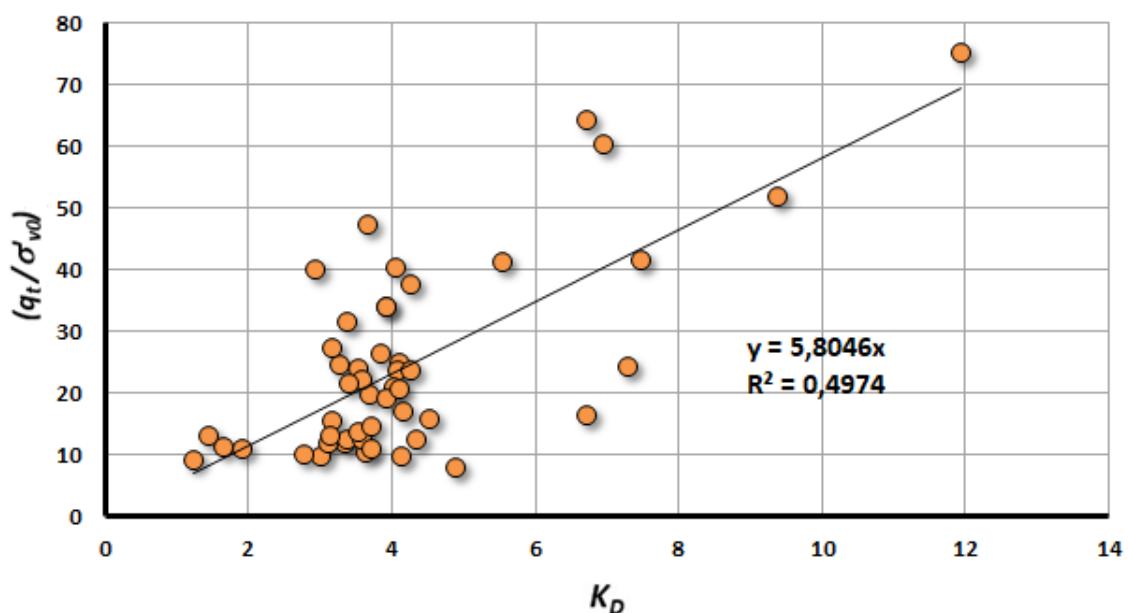
Ticino

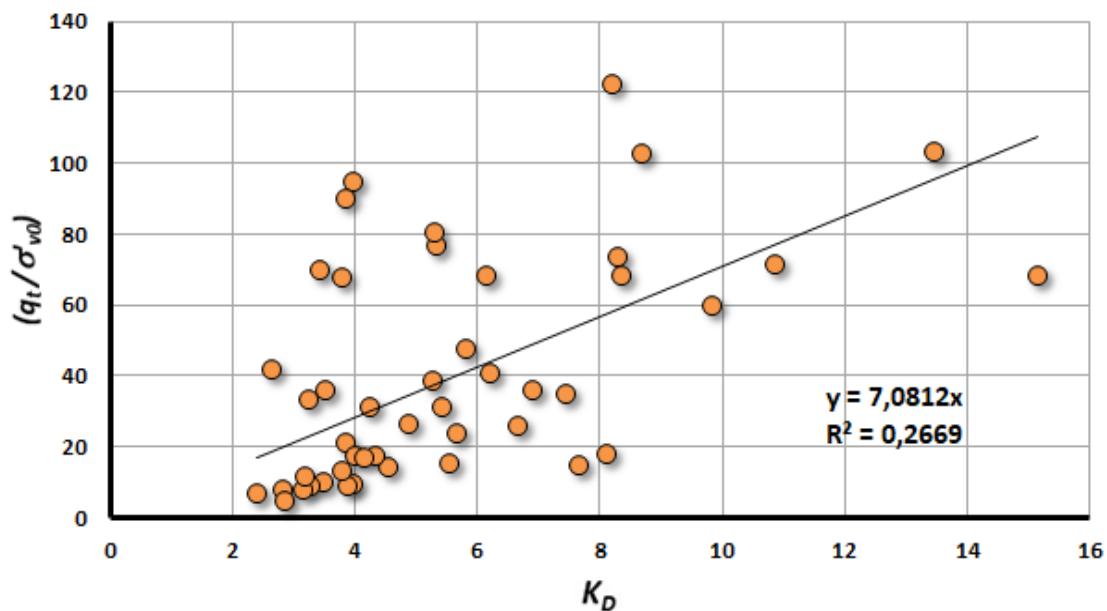
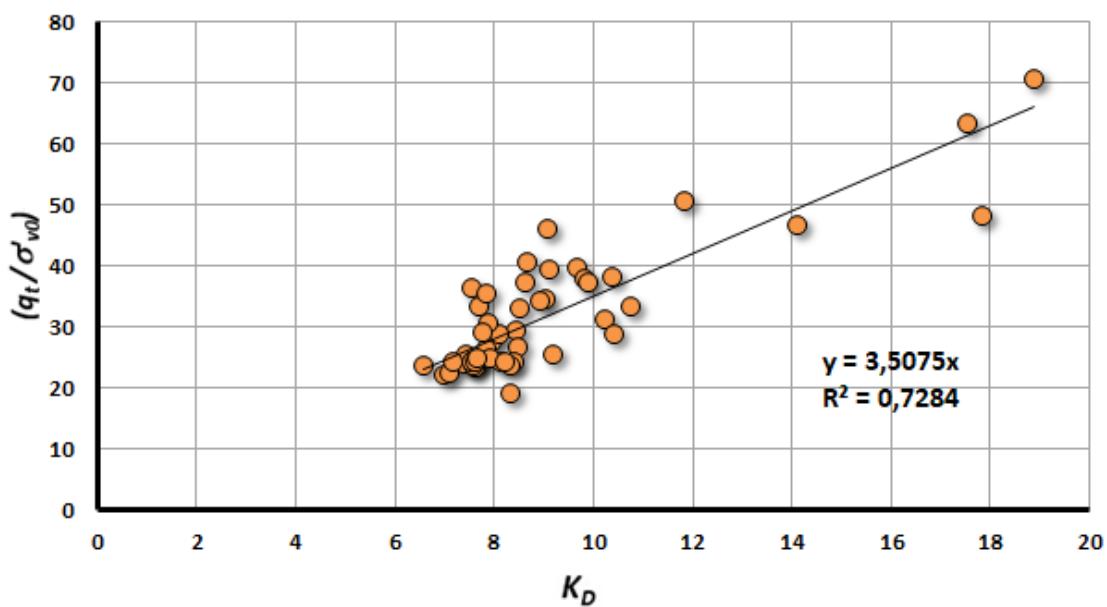


Trapp DMT 1

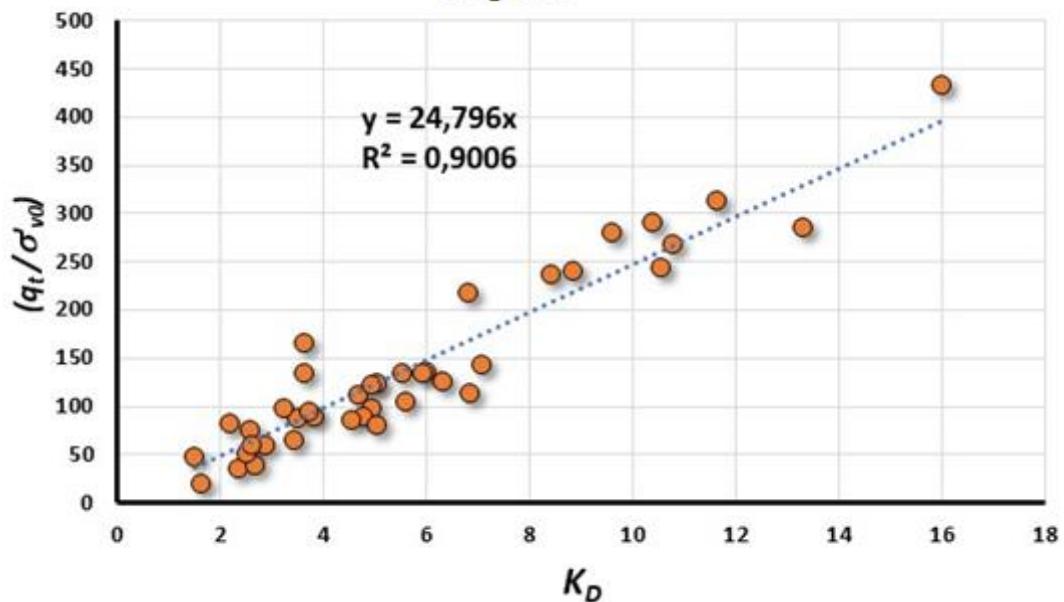


Trapp DMT 2

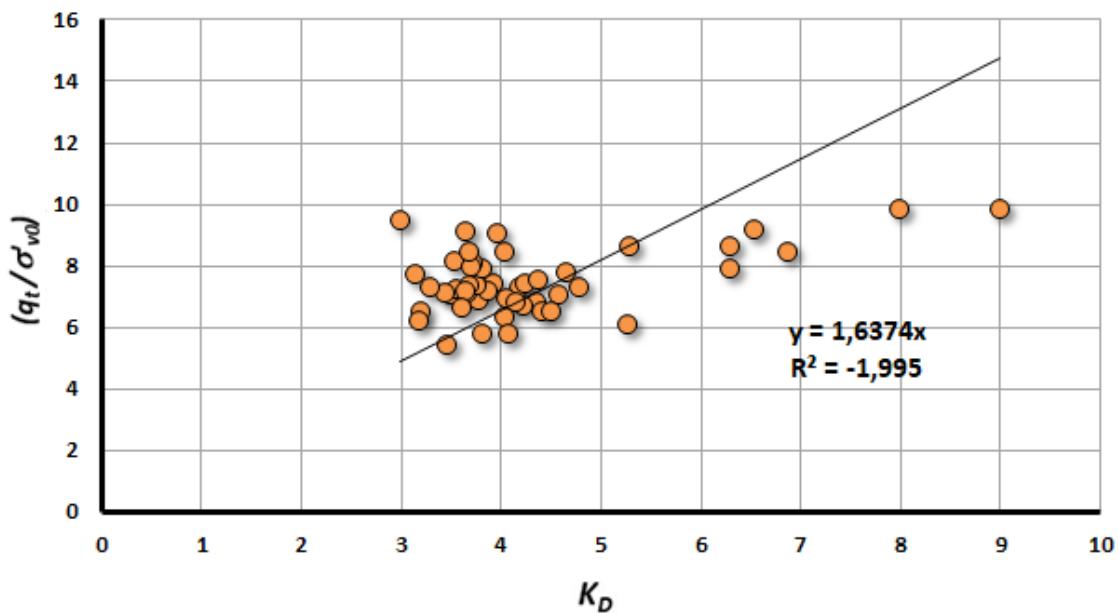


Trapp DMT 3**Trapp DMT 4**

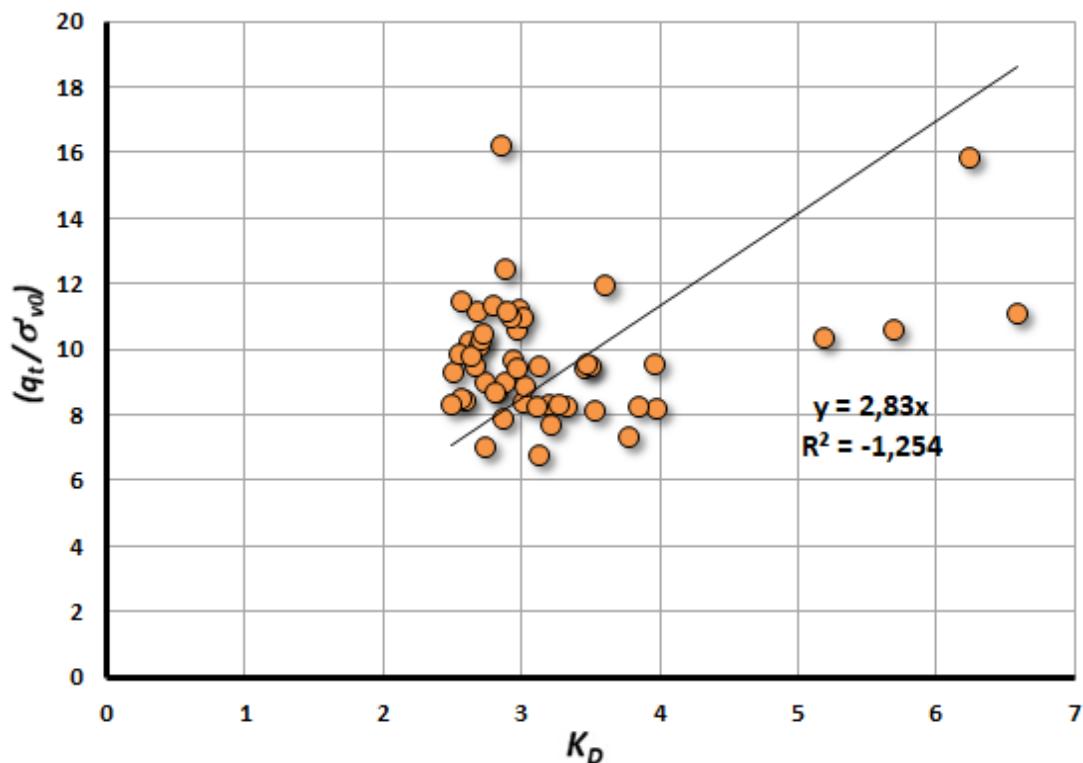
Treporti



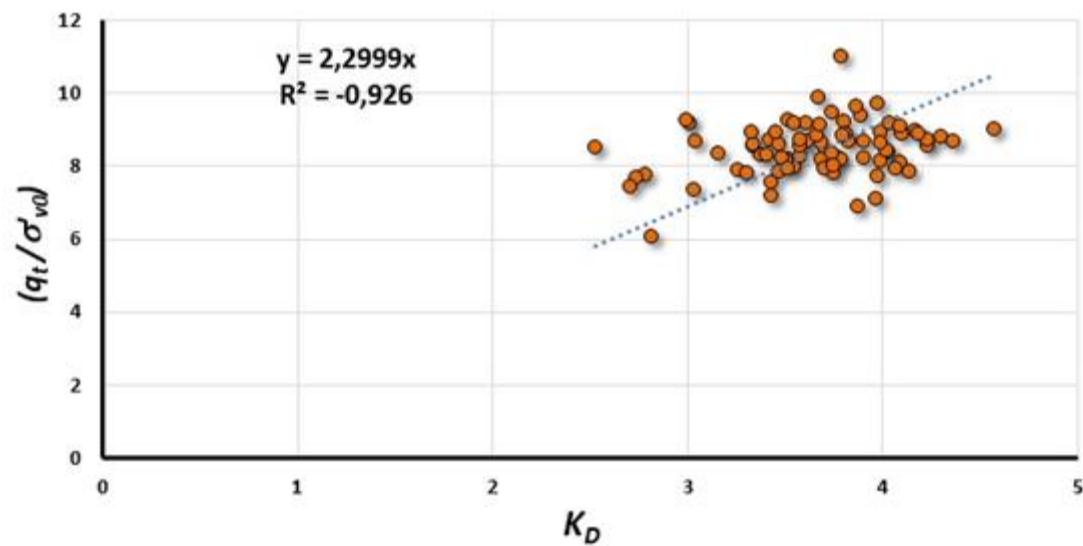
Tubarão Gelson DMT 1

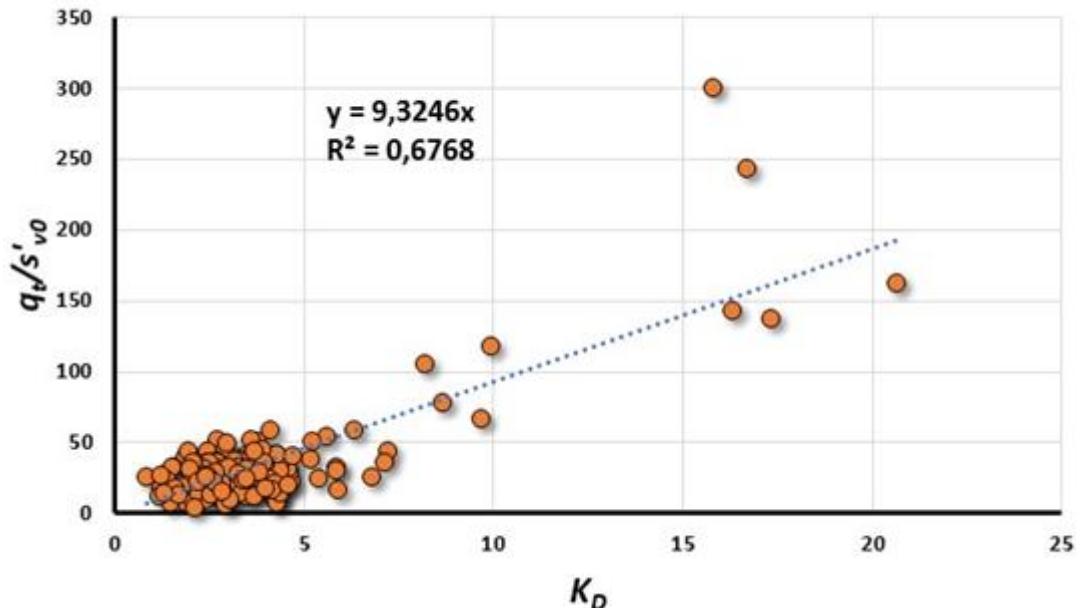


Tubarão Gelson DMT 2



Tubarão - Camp Exp. 1



Zelazny SDMT 3141 (180)**Zelazny SDMT 3141 (190)**