

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Interpretação de ensaios DMT em solos com drenagem parcial

Marcus Vinicius Alves Belloli

Porto Alegre
2018

MARCUS VINICIUS ALVES BELLOLI

**INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DMT EM SOLOS COM
DRENAGEM PARCIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof. Ph.D. Fernando Schnaid.

Porto Alegre
2018

CIP - Catalogação na Publicação

Beloli, Marcus Vinicius Alves
Interpretação de ensaios DMT em solos com drenagem
parcial / Marcus Vinicius Alves Beloli. -- 2018.
167 f.
Orientador: Fernando Schnaid.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2018.

1. Ensaio DMT. 2. Solos siltosos. 3. Drenagem
parcial. 4. dissipação de poropressão. I. Schnaid,
Fernando, orient. II. Título.

MARCUS VINICIUS ALVES BELLOLI

**INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DMT EM SOLOS COM
DRENAGEM PARCIAL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de Março de 2018

Prof. Fernando Schnaid
Ph.D. University of Oxford, Reino Unido
Orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D pela Concordia University, Canadá
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Edgar Odebrecht (UDESC / Geofoma Engenharia Ltda)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Gracieli Dienstmann (UFSC)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família por toda dedicação,
suporte, incentivo, companheirismo e compreensão
durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho simboliza o final de uma jornada de dois anos em que o ditado “Nenhum de nós é tão bom, quanto todos nós juntos” se fez presente. A conclusão desta dissertação só foi possível devido ao trabalho e dedicação, direta ou indiretamente, de diversas pessoas ao longo deste período. Portanto, nada seria mais justo do que estas pessoas receberem os devidos reconhecimentos. Assim, externo meus sinceros agradecimentos:

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-UFRGS) pela oportunidade de cursar o mestrado.

À CAPES pelo suporte financeiro que me possibilitou dedicar aos meus estudos.

Ao Prof. Fernando Schnaid, orientador deste trabalho, por sua fundamental contribuição, atenção, confiança, dedicação, paciência, ensinamentos e críticas que muito me acrescentaram e, por saber como inspirar, e motivar, nos momentos de dúvidas e dificuldades.

À Geoforma Engenharia Ltda, representada pelo Prof. Dr. Edgar Odebrecht, Dr. Fernando Mantarás e MSc. Jonatas Sosnoski, por fornecer os equipamentos necessários, pela parceria e disponibilidade na realização da campanha de investigação, fundamentais para a realização desta pesquisa.

Ao Studio Marchetti, representado pelo Eng. Diego Marchetti, pelos dados complementares utilizados neste trabalho, bem como pelas discussões, contribuindo de forma significativa com o avanço dos métodos propostos aqui.

À minha família, por todo apoio, incentivo, suporte e paciência. Sou a consequência da educação, amor e carinho, que recebi de vocês ao longo da vida e, portanto, minhas conquistas são os frutos dos nossos esforços, suor e determinação.

À Kamila Ferraz, e família, pelo companheirismo, incentivo, dedicação e compreensão. Por entenderem que a ausência em determinados momentos foi necessária. Vocês me acompanham, e torcem por mim, desde a fase da graduação e sou muito grato por isso.

Ao grupo de professores do programa de pós-graduação da UFRGS pelos conhecimentos repassados e por servirem de inspiração aos alunos. Agradeço especialmente aos professores Ph.D. Fernando Schnaid, Ph.D. Nilo Cesar Consoli e Ph.D. Luiz Antônio Bressani.

Aos amigos Anderson Peccin, Francisco da Silva Pereira, Naloan Coutinho Sampa e Ricardo Born, pelas parcerias, discussões e ensinamentos, que permitiram uma maior evolução do conhecimento geotécnico.

Aos amigos e colegas do PPGEC-UFRGS, e do LEGG, pelas discussões, trocas de conhecimentos e apoio que possibilitaram um melhor aproveitamento do curso de mestrado.

A todos que, de forma direta ou indireta, torceram por mim ao longo destes dois anos de mestrado e contribuíram para a concretização desta dissertação.

“A journey of a thousand miles begins with a single step”

“Uma jornada de mil milhas começa com um único passo”

Lao Tzu

RESUMO

BELLOLI, M.V.A. **Interpretação de ensaios DMT em solos com drenagem parcial**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Entre os objetivos da engenharia geotécnica está a busca pelo entendimento e previsão do comportamento mecânico dos solos. Para isso, existem basicamente duas abordagens: ensaios de laboratório ou ensaios de campo. Em cada obra o Engenheiro Geotécnico deve julgar quais são os métodos e procedimentos mais indicados de investigação, que resultarão em parâmetros confiáveis de projeto. Os ensaios de campo foram desenvolvidos baseados nos solos argilosos e arenosos em virtude dos comportamentos distintamente bem definidos, especialmente em termos de drenagem. O mesmo ocorre para o ensaio DMT, cuja execução e interpretação são influenciadas pelo tipo de solo e pelas condições de drenagem. O grande desafio, neste caso, está na interpretação dos ensaios em solos cuja solicitação ocorre sob condição de drenagem parcial, como nos casos de barragens de rejeito de mineração, ou em depósitos naturais de solos siltosos, onde esta condição pode levar a erros de interpretação. No DMT, a ocorrência de drenagem parcial influencia tanto na etapa de cravação da lâmina, quanto na etapa de expansão da membrana. Neste sentido, o foco deste trabalho está no problema da dissipação de poropressão durante a expansão da membrana, apresentando procedimentos especiais para realização do ensaio DMT. Serão apresentados dois métodos de interpretação de resultados, visando compensar os erros de interpretação causados pela dissipação parcial de poropressão: Método de Dissipação Completa e, Método de Dissipação Incompleta. Este trabalho foi desenvolvido baseado na realização de ensaios de campo, com uma campanha executada em solo brasileiro argiloso, que serviu de base à interpretação, sendo complementada por 6 ensaios realizados em diferentes sítios na Itália. Os resultados dos ensaios realizados pelo Método de Dissipação Completa foram interpretados através de duas abordagens: Método da Igualdade (analítico) e Método Simplificado. Enquanto a interpretação do Método de Dissipação Incompleta é permitida apenas através de procedimento simplificado. A análise paramétrica apresentou comportamentos similares entre ambas abordagens, demonstrando que a taxa de dissipação é o fator que mais influencia nos resultados. Ao final, os métodos foram aplicados e validados em diferentes locais, apresentando resultados adequados e compatíveis com o comportamento previamente definido através de outros ensaios.

Palavras-chave: *DMT; solos siltosos; drenagem parcial; dissipação de poropressão.*

ABSTRACT

BELLOLI, M.V.A. **Interpretação de ensaios DMT em solos com drenagem parcial**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Among the geotechnical engineering goals are the understanding and prediction of soil behavior. For this, there are basically two approaches: laboratory or in situ tests. In this case, the Geotechnical Engineer must judge the most appropriate investigation methods and procedures that will result in reliable design parameters. In situ tests were developed for clay and sand given to the fact that the behavior of these soils is well-defined and drainage conditions are properly controlled. The DMT is no exception, with test and interpretation methods influenced by the drainage conditions. The challenge resides in the interpretation of tests carried out in soils under partial-drainage conditions, such as tailings dams or natural deposits of silty soils, where partial-drainage conditions are taking place around the DMT blade leading to errors on its interpretation. The partial drainage condition influences both the DMT blade penetration phase and the membrane expansion phase. In this sense, this work focus on the problem of the pore pressure dissipation taking place simultaneously to membrane expansion. A non-standard procedure is proposed to sounding the DMT in silts that include two methods for DMT interpretation in order to compensate the errors caused by the partial pore pressure dissipation: Method of Complete Dissipation Curve and Method of Incomplete Dissipation Curve. This work was developed based on tests carried out in Brazilian clay soils to develop the proposed approach that was validated latter in non-standard tests carried out in different Italian sites. The results of the tests performed by the complete dissipation method were interpreted through two approaches: Equality Method (analytical) and Simplified Method, while the interpretation of the incomplete dissipation method is possible only through simplified procedure. The parametric analysis showed that these approaches yield similar results, demonstrating that the dissipation rate is the most important factor in the analysis. At the end, the methods were applied and validated at different sites, showing results that are compatible to previously defined behavior of the soils.

Key-words: *DMT; silts; partially-drained condition, rate effects.*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	22
1.1.	RELEVÂNCIA DA PESQUISA	22
1.2.	OBJETIVOS	24
1.2.1.	Objetivos gerais.....	24
1.2.2.	Objetivos específicos.....	24
1.3.	DELIMITAÇÕES	25
1.4.	LIMITAÇÕES	25
1.5.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
2.	DILATÔMETRO DE MARCHETTI - DMT.....	27
2.1.	EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS	28
2.1.1.	Equipamento	28
2.1.2.	Procedimento	31
2.2.	CALIBRAÇÃO DO DILATÔMETRO	34
2.3.	LEITURAS E PARÂMETROS INTERMEDIÁRIOS	36
2.3.1.	Índice de Material (I_D).....	37
2.3.2.	Índice de tensão horizontal (K_D)	39
2.3.3.	Módulo dilatométrico (E_D)	39
3.	INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DMT CONVENCIONAL	41
3.1.	SOLOS ARGILOSOS	43
3.1.1.	Coefficiente de empuxo ao repouso (K_0).....	44
3.1.2.	História de tensões	45
3.1.3.	Resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u).....	48
3.2.	SOLOS ARENOSOS	50
3.2.1.	Coefficiente de empuxo ao repouso (K_0).....	50
3.2.2.	História de tensões	51
3.2.3.	Parâmetro de resistência em areias	53
3.3.	ARGILAS E AREIAS - parâmetros de deformabilidade.....	55
3.4.	SOLOS EM CONDIÇÃO PARCIALMENTE DRENADA	57
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	61
4.1.	CAMPO EXPERIMENTAL DE TUBARÃO	61

4.2.	PROCEDIMENTOS PARA O ENSAIO ESPECIAL – DISSIPACÃO COMPLETA.....	65
4.3.	PROCEDIMENTOS PARA O ENSAIO ESPECIAL – DISSIPACÃO INCOMPLETA.....	67
5.	INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO ESPECIAL	69
5.1.	CORREÇÃO DA LEITURA A.....	69
5.1.1.	Método pela Distribuição de Weibull	69
5.1.2.	Método expedito (\sqrt{t}).....	71
5.2.	CORREÇÃO DA LEITURA B – DISSIPACÃO COMPLETA	73
5.3.	CORREÇÃO DA LEITURA B – DISSIPACÃO INCOMPLETA	77
6.	ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	79
6.1.	VARIAÇÃO DE η	79
6.2.	VARIAÇÃO DA σ'_{v0}	86
6.3.	VARIAÇÃO DA TAXA DE QUEDA DA LEITURA A.....	92
7.	RESULTADOS E ANÁLISES	98
7.1.	VALIDAÇÃO DO MÉTODO EM ARGILAS.....	98
7.1.1.	Campo experimental de Tubarão (dissip. completa em 8 e 9m).....	98
7.1.2.	Bologna, Itália (dissip. completa em 19,2m)	105
7.1.3.	Roma, Itália (dissip. completa em 25,6m).....	112
7.1.4.	Roma, Itália (dissip. incompleta em 17m).....	118
7.1.5.	Livorno, Itália (dissip. incompleta em 12 e 20m)	125
7.2.	APLICAÇÃO EM SILTES	136
7.3.	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....	142
8.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	147
8.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	147
8.2.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	150
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151
	ANEXO – CORREÇÃO DA LEITURA A	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Lâmina dilatométrica (Fonte: Autor). (b) Detalhes da lâmina (U.S. DOT, 1992).	29
Figura 2: Detalhes da membrana dilatométrica (U.S. DOT, 1992).	29
Figura 3: Detalhe do cabo elétrico e de pressão (MARCHETTI et al., 2001).	30
Figura 4: Unidade de controle com caixa de controle de SDMT (Fonte: Autor).	31
Figura 5: Princípio de funcionamento do DMT (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).	32
Figura 6: Representação das leituras A e B , e seus respectivos sinais sonoros (Fonte: Studio Marchetti).	33
Figura 7: (a) Procedimento de calibração (adaptado de Marchetti e Monaco, 2001).	35
Figura 8: Correção das leituras A e B (adaptado de DOT, 1992).	36
Figura 9: Diferença entre p_1 e p_0 (MARCHETTI et al., 2001).	37
Figura 10: Classificação dos solos (adaptado de Marchetti e Crapps, 1981).	38
Figura 11: (a) Relação entre p_0 e força F de cravação. (b) Relação entre K_D e q_D normalizado Campanella e Robertson (1991).	41
Figura 12: Fluxograma das etapas do ensaio DMT (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).	43
Figura 13: Correlação entre K_D e K_0 (MARCHETTI, 1980).	44
Figura 14: Estimativas de OCR em função de K_D (KAMEI e IWASAKI, 1995 apud SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).	47
Figura 15: Correlação teórica entre K_D e OCR (YU, 2004).	47
Figura 16: Comparação entre S_u/σ'_{v0} e K_D (adaptado de Powel e Uglow, 1988 apud Schnaid, 2009).	49
Figura 17: Estimativa de ϕ' baseado em K_0 e q_c (MARCHETTI, 1985).	54
Figura 18: Dissipação da poropressão u para diferentes materiais (SOSNOSKI, 2016).	58
Figura 19: Dissipação de poropressão e decaimento de A em siltes (SCHNAID et al., 2016).	59
Figura 20: Leituras de A e B em solos de drenagem parcial. (Fonte: Autor)	60
Figura 21: Campo experimental de Tubarão (adaptado de Nascimento, 2010).	62
Figura 22: Perfil geotécnico do campo de Tubarão através do ensaio CPTU (Mantaras, Odebrecht e Schnaid, 2015).	63
Figura 23: Perfil geotécnico do campo de Tubarão através do ensaio DMT (Mantaras, Odebrecht e Schnaid, 2015).	64

Figura 24: Comparação entre sucessivas leituras do DMT padrão com a dissipação de poropressão lida por um equipamento DMTU (ROBERTSON et al, 1988).	65
Figura 25: Representação genérica da distribuição de Weibull e equação simplificada.	69
Figura 26: Exemplo de aplicação da distribuição de Weibull para obtenção de $A_{0(nd)}$	70
Figura 27 (a) e (b): Obtenção de $A_{0(nd)}$ através do gráfico de A x raiz de tempo.	71
Figura 28: Estimativa de A em $t = 0$	72
Figura 29: Leituras do ensaio DMT com tempo (Fonte: Autor).	73
Figura 30: Tensão-deslocamento da membrana pelo ensaio DMT (Fonte: Autor).	74
Figura 31: Ensaio com dissipação incompleta com obtenção de A_0 e parâmetros para obtenção de B_i (Fonte: Autor).	78
Figura 32: Valores de η por material (JANBU, 1963).	80
Figura 33: Influência da variação de η nos parâmetros I_D , E_D , K_D , K_0 e OCR	82
Figura 34: Influência da variação de η nos parâmetros M_{DMT} , S_u , e S_u/σ'_{v0}	83
Figura 35: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de η . .	84
Figura 36: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de η . .	85
Figura 37: Influência da variação de σ'_{v0} nas leituras A e em $A_{0(nd)}$	86
Figura 38: Influência da variação de σ'_{v0} nos parâmetros I_D , E_D , K_D , K_0 e OCR	88
Figura 39: Influência da variação de σ'_{v0} nos parâmetros M_{DMT} , S_u , e S_u/σ'_{v0}	89
Figura 40: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de σ'_{v0}	90
Figura 41: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de σ'_{v0}	91
Figura 42: Influência da variação de m nas leituras A e em $A_{0(nd)}$	92
Figura 43: Influência da variação de m nos parâmetros I_D , E_D , K_D , K_0 e OCR	94
Figura 44: Influência da variação de m nos parâmetros M_{DMT} , S_u , e S_u/σ'_{v0}	95
Figura 45: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de m . .	96
Figura 46: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de m . .	97
Figura 47: Sequência de leituras A em 8 e 9m de profundidade (Fonte: Autor).	99
Figura 48: Correção de A pelo método expedito (Fonte: Autor).	99
Figura 49: Cálculo de $B_{0(nd)}$ através do Solver para 8m de profundidade (Fonte: Autor).	100
Figura 50: Cálculo de $B_{0(nd)}$ através do Solver para 9m de profundidade (Fonte: Autor).	100
Figura 51: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).	103

Figura 52: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).....	104
Figura 53: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 19,20m.....	106
Figura 54: Sequência de leituras A em 19,2m de profundidade.....	106
Figura 55: Correção de A pelos métodos Weibull e expedito (Fonte: Autor).....	107
Figura 56: Cálculo de $B_{0(nd)}$ para 19,2m de profundidade (Fonte: Autor).	107
Figura 57: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional (realizado ao longo de toda a profundidade e o ensaio DMT especial (realizado somente na profundidade de 19,2m) (Fonte: Autor).....	110
Figura 58: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).....	111
Figura 59: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 25,60m.....	113
Figura 60: Sequência de leituras A em 25,60m de profundidade (Fonte: Autor).....	113
Figura 61: Correção de A pelos métodos Weibull e expedito (Fonte: Autor).....	114
Figura 62: Cálculo de $B_{0(nd)}$ para 25,6m de profundidade (Fonte: Autor).	114
Figura 63: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).....	116
Figura 64: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).....	117
Figura 65: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 17m	119
Figura 66: Sequência de leituras A em 17m de profundidade (Fonte: Autor).	119
Figura 67: Correção de A pelo método expedito (Fonte: Autor).....	120
Figura 68: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).....	123
Figura 69: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).....	124
Figura 70: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 12 e 20m.....	125
Figura 71: Sequência de leituras A em 12m de profundidade (Fonte: Autor).	126
Figura 72: Correção de A pelo método expedito em 12m de profundidade (Fonte: Autor). .	126

Figura 73: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial em 12m de profundidade (Fonte: Autor).	129
Figura 74: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial em 12 m de profundidade (Fonte: Autor).	130
Figura 75: Sequência de leituras A em 20m de profundidade (Fonte: Autor).	131
Figura 76: Correção de A pelo método expedito em 20m de profundidade (Fonte: Autor). .	131
Figura 77: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial em 20m de profundidade (Fonte: Autor).	134
Figura 78: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial em 20 m de profundidade (Fonte: Autor).	135
Figura 79: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 2,40m.....	136
Figura 80: Sequência de leituras A em 2,40m de profundidade (Fonte: Autor).	137
Figura 81: Correção de A pelos métodos Weibull e expedito (Fonte: Autor).	137
Figura 82: Cálculo de $B_{0(nd)}$ para 2,40m de profundidade (Fonte: Autor).	138
Figura 83: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).	140
Figura 84: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial (Fonte: Autor).	141
Figura 85: Comparação entre $A_{0(nd)}$ pelos métodos Weibull e expedito.	143
Figura 86: Comparação entre $B_{0(nd)}$ pelos métodos da Igualdade e Simplificado.	143
Figura 87: Comparação entre P_0 e P_1 calculados através $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$ que foram obtidos pelos métodos da Igualdade e Simplificado.	144
Figura 88: Comparativos entre E_D e K_D pelos métodos da igualdade e simplificado.....	144
Figura 89: Comparativo entre I_D obtido pelos métodos da igualdade e simplificado.	145
Figura 90: Comparativo entre K_0 e S_u/σ'_{v0} obtidos pelos métodos da igualdade e simplificado.	145
Figura 91: Comparativo entre os parâmetros OCR e M_{DMT} obtidos pelos métodos da igualdade e simplificado.	146
Figura 92: Comparativo entre S_u obtidos pelo método da igualdade e simplificado.	146
Figura 93: Perfil geotécnico campo experimental Fucino.	159
Figura 94: Perfil de dissipação para 5m.	160
Figura 95: Correções das leituras A em 5m.	160
Figura 96: Perfil de dissipação para 10m.	160

Figura 97: Correções das leituras A em 10m.....	161
Figura 98: Perfil de dissipação para 15m.	161
Figura 99: Correções das leituras A em 15m.....	161
Figura 100: Perfil do depósito da Mina Santa Bárbara.....	162
Figura 101: Perfil geotécnico da Mina Santa Bárbara.	163
Figura 102: Perfil de dissipação para 33,2m.	163
Figura 103: Correções das leituras A em 33,2m.	163
Figura 104: Perfil geotécnico analisado em Parma.	164
Figura 105: Perfil de dissipação para 17,2m.	165
Figura 106: Correções das leituras A em 17,2m.	165
Figura 107: Perfil geotécnico obtido no campo experimental de Tubarão.	166
Figura 108: Correções das leituras A em 8m.....	167
Figura 109: Correções das leituras A em 9m.....	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos solos baseado no parâmetro intermediário I_D	38
Tabela 2: Principais estudos realizados para o desenvolvimento de correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos através do ensaio DMT.....	42
Tabela 3: Aproximação do histórico de carregamento em areias baseado em M_{DMT}/q_c	53
Tabela 4: Valores do fator F de proporcionalidade.	56
Tabela 5: Monitoramento das leituras A pelo tempo.	79
Tabela 6: Diferença (p_1-p_0) com aumento de η	80
Tabela 7: Diferença (p_1-p_0) com aumento de σ'_{v0}	87
Tabela 8: Diferença (p_1-p_0) com aumento de A.....	93
Tabela 9: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial.	102
Tabela 10: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.	104
Tabela 11: Comparação entre os métodos igualdade e simplificado.	105
Tabela 12: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial.	109
Tabela 13: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.	111
Tabela 14: Comparação entre os métodos igualdade e simplificado.	112
Tabela 15: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial.	115
Tabela 16: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.	117
Tabela 17: Comparação entre os métodos igualdade e simplificado.	118
Tabela 18: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial (método simplificado).....	122
Tabela 19: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.	124
Tabela 20: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial (método simplificado em 12m de profundidade).	128
Tabela 21: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.	130
Tabela 22: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial (método simplificado em 20m de profundidade).	133
Tabela 23: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.	135
Tabela 24: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial.	139
Tabela 25: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.	141
Tabela 26: Comparação entre os métodos igualdade e simplificado.	142

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ϕ' : Ângulo de atrito interno efetivo

Δu_{pen} : Variação de poropressão durante a cravação da lâmina dilatométrica

Δu_{diss} : Dissipação da poropressão com o tempo

ΔA e ΔB : Fatores de correção obtidos através da calibração da lâmina dilatométrica

Δf_i : Diferença entre $A_{f(dr)}$ e A_i

η : Parâmetro do solo – Expoente de Janbu (1963)

σ'_{ho} : Tensão horizontal efetiva

σ'_{vo} : Tensão vertical efetiva

γ : Peso específico

ν : Coeficiente de Poisson

A : Leitura realizada em 0,05mm de deslocamento da membrana dilatométrica

$A_{0(nd)}$: Leitura A estimada em $t = 0$ (condição não-drenada)

A_{ext} : Leituras A extrapoladas

$A_{f(dr)}$: Última leitura A do ensaio

A_i : Leitura A estimada em tempo i qualquer

A_{pd} : Leitura A em condição de drenagem parcial

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: Sociedade Americana de Ensaio e Materiais

B : Leituras realizada em 1,1mm de deslocamento da membrana dilatométrica

$B_{0(nd)}$: Leitura B referente ao $A_{0(nd)}$ (condição não-drenada)

$B_{f(nd)}$: Leitura B referente à leitura $A_{f(dr)}$.

B_i : Leitura B estimada em tempo i qualquer

B_{pd} : Leitura B referente à leitura A_{pd}

CPT: Ensaio de cone

CPTu: Ensaio de cone com leitura de poropressão (Piezocone)

DMT: Dilatômetro de Marchetti

DMTu: Dilatômetro de Marchetti com leitura de poropressão

E : Módulo de elasticidade

E_D : Módulo dilatométrico

E_{Df} : Módulo dilatométrico referente a $t = \infty$

E_{D0} : Módulo dilatométrico referente a $t = 0$

I_D : Índice do Material - Parâmetro intermediário

ISSMGE: Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica

K_0 : Coeficiente de empuxo ao repouso

k_D : Coeficiente de Empuxo – Parâmetro intermediário

M : Módulo oedométrico

M_{DMT} : Módulo oedométrico obtido através do ensaio dilatométrico

OCR: Razão de pré-adensamento

p_0 : Leitura A corrigida pela rigidez da membrana

p_1 : Leitura B corrigida pela rigidez da membrana

p'_f : Nível de tensões em $t = \infty$

p'_0 : Nível de tensões em $t = 0$

q_D : Resistência de ponta do DMT

SPT: *Standard Penetration Test*

S_u : Resistência não-drenada

u : Poropressão

Z_M : Fator de correção Desvio do zero do manômetro, obtido na calibração do ensaio

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Um projeto geotécnico é considerado correto quando o projetista compreende, além dos esforços atuantes e das características da superestrutura, o comportamento do solo. A obtenção dos parâmetros de comportamento pode ser dada através de ensaios de laboratório ou ensaios de campo, em que o engenheiro deverá julgar quais são os métodos e procedimentos mais apropriados de investigação que resultarão em parâmetros confiáveis de projeto. Os ensaios de campo são utilizados na prática de engenharia devido principalmente à produtividade e capacidade de identificar as variabilidades no perfil de solo. No Brasil, os principais tipos de ensaios *in situ* são Cone (CPT), *Piezocone* (CPTu), *Vane test* (ensaio de palheta), Dilatômetro de Marchetti (DMT) e *Standard Penetration Test* (SPT), sendo este último o mais criticado e o mais utilizado em virtude da sua simplicidade e baixo custo (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Apesar de o SPT ser largamente difundido no Brasil, e obrigatório por norma (NBR 6122/2010), a utilização de apenas um tipo de ensaio não é recomendável em obras especiais, de grande porte, e/ou maior complexidade. Neste tipo de obras é preferível a utilização de dois, ou mais métodos complementares, buscando redundância nos resultados, e assim, proporcionando maior confiabilidade ao julgamento geotécnico.

A utilização de mais de um método de ensaio de campo, buscando redundância, é prática usual em barragens de rejeitos de mineração, por exemplo, em virtude de sua elevada complexidade. Devido ao grande volume, e aos custos de outros materiais, nestas barragens são utilizados os próprios rejeitos oriundos da extração do minério para construção do sistema de contenção, necessitando de grandes áreas de armazenamento. Nestas obras o risco de impactos ambientais de grandes proporções é elevado, caso estes depósitos venham a romper. O alteamento da barragem, prática comum no setor de mineração, gera depósitos de materiais saturados, em processo de adensamento pelo peso próprio do rejeito, tendo a geração de excesso de poropressão e resistência ao cisalhamento como pontos críticos de projeto. Em virtude dos riscos envolvidos e complexidade, é primordial que sejam realizados procedimentos corretos

de ensaio e interpretação correta dos resultados. As barragens de rejeito são exemplos de depósito de materiais siltosos saturados, formados através de ação antrópica. Depósitos siltosos saturados também podem ser formados através da ação da natureza em diferentes períodos geológicos de deposição.

Por conta de seus comportamentos distintamente bem definidos, de maneira geral, a concepção dos ensaios de campo, e suas interpretações, foram desenvolvidas baseadas em dois principais grupos de solos: argilosos e arenosos. Da mecânica dos solos clássica, os solos argilosos saturados são solicitados em condições não-drenadas e, por tanto, a interpretação é usualmente realizada em termos de tensões totais. Enquanto em solos arenosos, é considerada a total dissipação do excesso de poropressão gerada e, portanto, a interpretação é feita em termos de tensões efetivas. O grande desafio, neste caso, está na interpretação dos ensaios e na previsão de comportamento de solos em condição de drenagem parcial. A drenagem parcial é uma condição de drenagem situada entre as condições drenada e não-drenada, ocorrendo em barragens de rejeito de mineração, ou em depósitos naturais de solos siltosos. Nestes geomateriais pode ocorrer drenagem parcial durante a execução de ensaios que conduz a erros em suas interpretações, podendo resultar em parâmetros de comportamento subdimensionados, ou nos piores casos, em parâmetros de comportamento superestimados (HOUSE; OLIVEIRA; RANDOLPH, 2001, SCHNAID; LEHANE; FAHEY, 2004, SCHNAID, 2005, SCHNEIDER; LEHANE; SCHNAID, 2007, LUNNE; YANG; SCHNAID, 2014, SCHNAID; ODEBRECHT, 2015, MARCHETTI; MARCHETTI, 2016, SCHNAID et al., 2016). Ou seja, a interpretação convencional de ensaios em solos com drenagem parcial é conceitualmente equivocada e, portanto, trabalhos recentemente publicados visam propor, ou incentivar a discussão sobre, a utilização de equipamentos padrão de ensaios de campo com procedimentos especiais (RANDOLPH; HOPE, 2004, BEDIN, 2006, POULSEN; NIELSEN; IBSEN, 2011, MARTINEZ, 2014, SOSNOSKI, 2016).

Sendo assim, conhecida a relevância do tema, este trabalho visa propor procedimentos especiais para a execução do ensaio DMT e para a interpretação de seus resultados em solos com solicitações sob condição de drenagem parcial.

1.2.OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram divididos em gerais e específicos, sendo apresentados abaixo.

1.2.1. Objetivos gerais

A interpretação de ensaios de campo para a estimativa de parâmetros geotécnicos em solos sob condição de drenagem parcial é um dos desafios da engenharia, exigindo julgamento geotécnico e tomadas de decisões criteriosas e conservadoras. Estas decisões são muitas vezes baseadas apenas na experiência do projetista. Decisões conservadoras são justificadas em virtude das incertezas envolvidas durante o processo de investigação de solos, do grau de risco, ou da magnitude das consequências caso haja ocorrência de falha no projeto geotécnico.

Portanto, este trabalho visa entender os efeitos das condições de drenagem que ocorrem durante a execução do ensaio DMT, bem como propor um método para a realização e interpretação do ensaio em solos sob drenagem parcial que auxilie na estimativa de parâmetros de projeto.

1.2.2. Objetivos específicos

Para que os objetivos gerais desta pesquisa sejam alcançados, é necessário o atendimento dos seguintes objetivos específicos:

- a. Definir os procedimentos especiais para execução do ensaio DMT em solos com drenagem parcial e realizá-los em solos previamente caracterizados e com comportamentos geotécnicos bem definidos;
- b. Propor, a partir dos resultados obtidos através de procedimentos especiais para o ensaio DMT, um método analítico e um método expedito para correções das leituras do ensaio em condição de drenagem parcial, para estimativa de parâmetros representativos de condição não-drenada;
- c. Interpretar e validar os métodos de correções propostos em solo argiloso, cujo comportamento geotécnico fora previamente bem definido;
- d. Aplicar os métodos de interpretação propostos em ensaios executados em solos argilosos, e siltoso, de diferentes sítios na Itália, nos quais observam-se a ocorrência de drenagem parcial durante a expansão da membrana.

1.3. DELIMITAÇÕES

Este trabalho se delimita à realização de 2 ensaios DMT em solo argiloso do Campo Experimental de Tubarão, cujo comportamento é bem caracterizado através de outros ensaios, sendo, por este motivo, adotado como referência para o desenvolvimento do método de interpretação proposto (baseado nas correções das leituras *A* e *B* do ensaio DMT). Complementarmente, o procedimento de ensaio especial proposto, foi validado através da interpretação de 5 ensaios em solos argilosos e 1 ensaio em solo siltoso realizados na Itália. Além de utilizar dados obtidos em literatura para complementar o desenvolvimento dos métodos de correção da leitura *A*.

1.4. LIMITAÇÕES

As limitações desta pesquisa se deram em função da disponibilidade de equipamentos para realização do ensaio DMT especial pela empresa parceira Geoforma Engenharia Ltda, cuja campanha de investigação foi acompanhada pelo autor. Além de estar condicionado à disponibilidade dos dados dos ensaios realizados fora do Brasil pelos engenheiros Silvano e Diego Marchetti e, dos dados obtidos em literatura nacional e internacional.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação sobre o tema de pesquisa proposto foi realizada em 8 capítulos, sendo descritos brevemente a seguir.

O primeiro capítulo aborda o tema de forma introdutória, contextualizando e dissertando sobre a relevância da pesquisa, bem como definindo os objetivos, delimitações, limitações e organização do trabalho.

O capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica acerca do equipamento DMT e procedimento padrão para realização do ensaio, da calibração e leituras obtidas através do ensaio.

No capítulo 3, serão abordados os métodos convencionais de interpretação para solos argilosos e arenosos e, análise conceitual sobre ocorrência de drenagem parcial e os erros envolvidos durante a realização do ensaio convencional neste tipo de solo.

No capítulo 4 é apresentado o programa experimental, iniciando pela descrição e caracterização do local de referência para o desenvolvimento do procedimento especial e do método de interpretação dos dados, além de definir o procedimento especial para realização do ensaio DMT.

O capítulo 5 é reservado para o desenvolvimento do método de tratamento e interpretação dos dados obtidos na realização do ensaio DMT especial, através da realização das correções das leituras de *A* e *B*.

No capítulo 6 é apresentada a análise paramétrica do método proposto.

O capítulo 7 destina-se à apresentação e análise dos resultados. Neste capítulo será apresentada a aplicação do método proposto, validação do método no solo argiloso utilizado como referência no em seu desenvolvimento e aplicação do método em sítios complementares.

E, no capítulo 8, são reunidas as considerações finais e conclusões acerca do objeto de estudo deste trabalho, além das sugestões de pesquisas futuras objetivando a continuidade do desenvolvimento, ou validação, do método proposto neste trabalho em solos com drenagem parcial de diferentes regiões.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para desenvolver e fundamentar esta dissertação, citadas ao longo do texto.

2. DILATÔMETRO DE MARCHETTI - DMT

O ensaio dilatométrico foi desenvolvido em 1975 pelo Professor da Universidade de L'Aquila, engenheiro Silvano Marchetti, sendo inicialmente desenvolvido para investigar o comportamento do solo, sob a ótica do módulo de elasticidade, em problemas envolvendo estacas carregadas lateralmente (MARCHETTI, 1975). Após 1975 o foco dos estudos sobre o ensaio foi ampliado, deixando de ser apenas um ensaio de análise de módulo, sobretudo com base em uma série de correlações empíricas publicadas em 1980 para estimar o comportamento geotécnico do solo, baseadas nos ensaios DMT realizados em mais de 40 sítios para classificação e interpretação do comportamento dos solos (MARCHETTI, 1980). Destacam-se como marcos para a internacionalização do ensaio: as publicações do Engenheiro John H. Schmertmann através de ensaios realizados em sua prática de engenharia e de sua discussão publicada no mesmo *Journal* em que Silvano Marchetti publicou suas correlações; o manual sobre DMT publicado por Marchetti e Crapps (1981) e; a realização da primeira conferência internacional sobre ensaio dilatométrico (SCHMERTMANN et al., 1983).

O ensaio DMT é um ensaio *in situ* simples, e robusto, cujas formulações empíricas, e semi-empíricas, desenvolvidas para sua interpretação foram baseadas, em conceito, para solos de origem sedimentar, argiloso ou arenoso. Através deste ensaio é possível classificar o solo em areia (condição de drenada), argila (condição não-drenada) ou silte (condição parcialmente drenada), determinar a estratigrafia local; estimar valores de resistência não-drenada (S_u), razão de pré-adensamento (OCR), ângulo de atrito interno de solos arenosos (ϕ'), coeficiente de empuxo ao repouso (K_0), módulo de elasticidade (E) e módulo oedométrico (M).

Através dos resultados obtidos pelo ensaio DMT é possível monitorar serviços de compactação; avaliar e prever recalques de fundações superficiais e aterros; estimar a capacidade de carga de fundações profundas; avaliar o coeficiente de empuxo horizontal; identificar a possibilidade de ocorrência de liquefação e; verificar condição de estabilidade em taludes, encostas, diques e barragens.

2.1.EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS

Apesar de ser um ensaio difundido internacionalmente, a experiência brasileira ainda é insipiente, sendo utilizado basicamente para fins acadêmicos, para comprovação e validação da prática internacional em condições locais, ou em obras complexas como ensaio complementar na definição dos parâmetros de projeto (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Por consequência, no Brasil não há normatização específica para ensaios DMT, sendo então seguidas as normas e procedimentos internacionais:

- a) TC16 (2001) "The DMT in Soil Investigations" - ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*);
- b) Eurocode 7 (1997 e 2007). "Geotechnical Design - Part 2: Ground Investigation and Testing";
- c) Eurocode 7 (1997) "Geotechnical Design. Part 3: Design assisted by field tests, Flat Dilatometer Test (DMT)". Section 9;
- d) ASTM D6635-01 (2001 e 2007). "Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer.";
- e) CEN ISO/TS 22476-11 (2005) "Geotechnical investigation and testing - Field testing". Part 11: Flat dilatometer test. (Technical Specifications).

2.1.1. Equipamento

Conforme U.S. DOT (1992), EUROCODE 7 (1997) e ISO 22476-11 (2017) o DMT é composto pelos seguintes equipamentos:

- a) Lâmina: é o elemento que será introduzido no solo, contendo uma membrana flexível que é inflada durante o ensaio. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), em virtude do seu material, geralmente aço especial, a lâmina tem capacidade de receber cargas superiores a 250kN, permitindo a realização de ensaios em solos de maior resistência. Possuindo 230mm de altura, 95mm de largura, 15mm de espessura e face inferior chanfrada formando um ângulo interno de 12 a 16°, como apresentado na Figura 1.

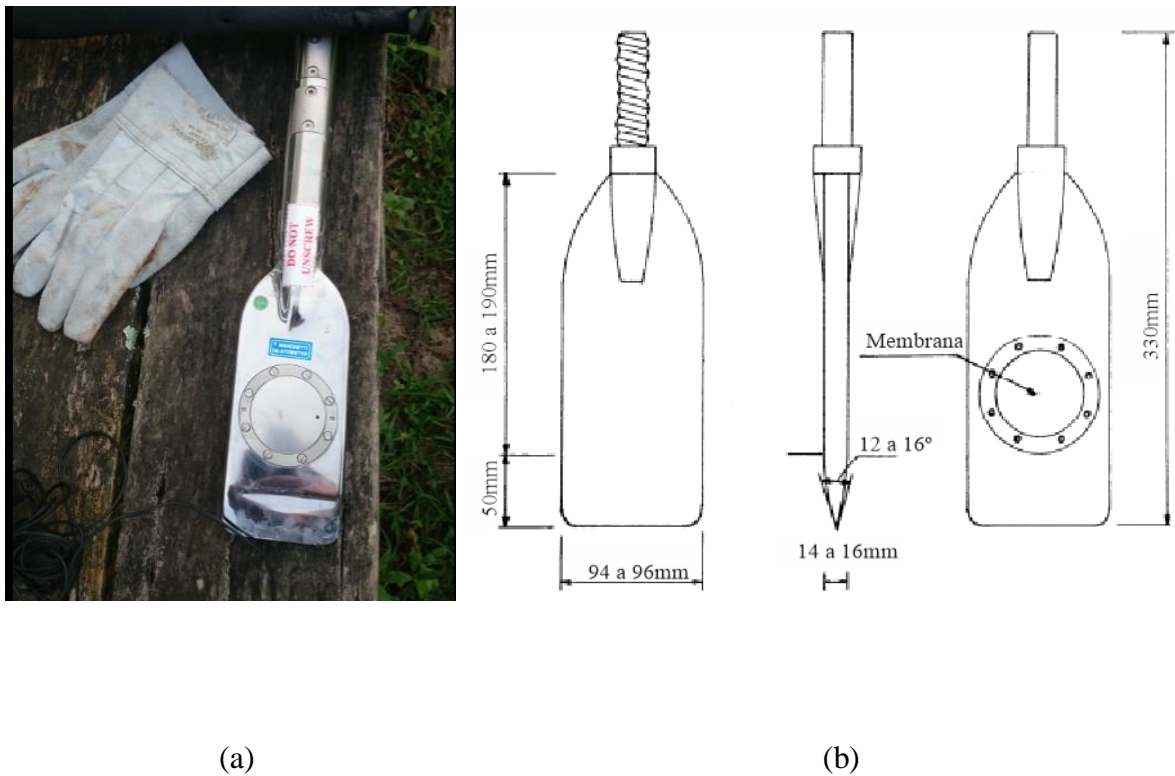


Figura 1: (a) Lâmina dilatométrica (Fonte: Autor). (b) Detalhes da lâmina (U.S. DOT, 1992).

b) Membrana: Elemento circular flexível confeccionado de aço, com espessura de 0,2mm, fixado em uma das faces da lâmina através de um anel circular e 8 parafusos. A membrana é inflada para realização das leituras *A*, *B* e *C* do ensaio na unidade de controle, sendo apenas um separador entre o solo e o gás de insuflagem. Na Figura 2 são apresentados os detalhes dimensionais da mesma.

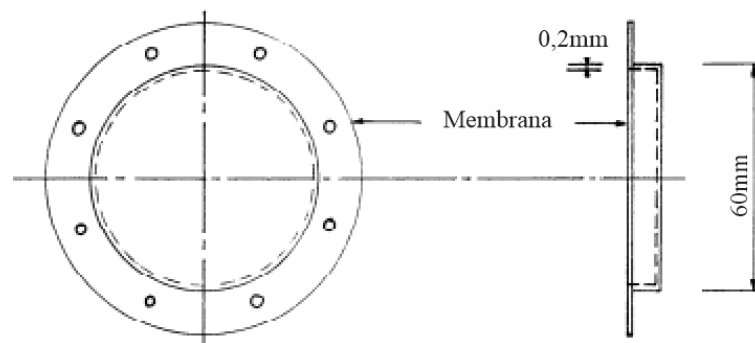


Figura 2: Detalhes da membrana dilatométrica (U.S. DOT, 1992).

- c) Hastes: São os elementos que transferem a carga do elemento de cravação empurrando a lâmina contra o solo. As hastes podem ser as mesmas utilizadas nos ensaios de cone e piezocone, sendo elementos com 1 metro de comprimento, contendo roscas macho/fêmea nas extremidades. Assim como para o ensaio CPT, ou CPTU, as hastes devem apresentar resistência e rigidez suficientes para não fraturarem, ou flambarem, durante o ensaio.
- d) Cabo elétrico e de pressão: Consiste basicamente em um fio condutor contido dentro de uma mangueira de nylon. O objetivo da mangueira é pressurizar a membrana com o gás contido no cilindro. Simultaneamente, o fio condutor mantém o sistema eletrificado. Na Figura 3 são apresentados detalhes do cabo.

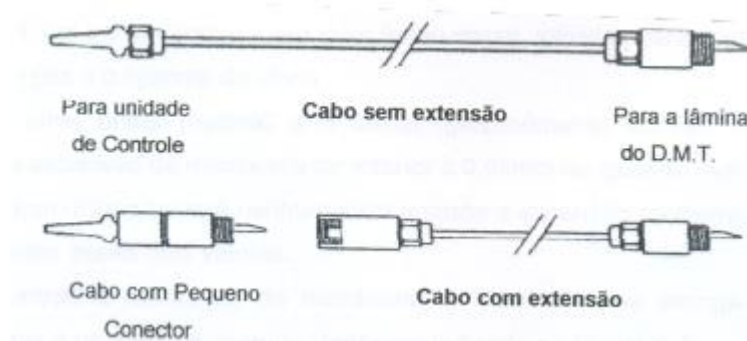


Figura 3: Detalhe do cabo elétrico e de pressão (MARCHETTI et al., 2001).

- e) Unidade de controle: Na unidade de controle estão contidos os manômetros de pressão onde são realizadas as leituras de pressão provenientes do deslocamento de 1,1mm da membrana flexível durante sua expansão, além dos circuitos elétricos responsáveis pelos avisos sonoros e luminosos. Fazem parte do sistema de pressão, além dos manômetros, o cilindro de gás que é conectado à unidade de controle, e as válvulas de controle de pressão, que são responsáveis por evitar sobrepressão no sistema. As leituras obtidas nos manômetros são corrigidas em virtude da rigidez da membrana e pelo eventual deslocamento do ponteiro em relação ao zero do manômetro. Na Figura 4 é possível verificar as válvulas e manômetros, bem como a caixa do dilatômetro sísmico (SDMT), anexada à unidade de controle.



Figura 4: Unidade de controle com caixa de controle de SDMT (Fonte: Autor).

- f) Cilindro de gás: Não há restrições para o tipo de gás utilizado, desde que não reaja com *nylon*, ou com os materiais presentes no fio condutor. No entanto, por uma questão de segurança, e também comercial, o ar comprimido e o nitrogênio gasoso são os mais utilizados. Além da facilidade de obtenção, visto sua utilização nas mais diversas áreas da indústria, o ar comprimido e o nitrogênio gasoso possuem as vantagens de ser atóxico, não inflamável, não corrosivo ou explosivo (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).
- g) Caixa de controle do dilatômetro sísmico (SDMT): No SDMT são instalados 2 geofones, acima da lâmina, que recebem e emitem sinais que são filtrados na caixa de controle.

2.1.2. Procedimento

O ensaio DMT consiste basicamente na cravação da lâmina dilatométrica no solo, e assim que atingida a cota de ensaio, a membrana (ou diafragma) é inflada com gás sob pressão em condição de deformação controlada (deslocamento de 1,1mm). A partir da pressão necessária para inflar a membrana são calculados os parâmetros intermediários do ensaio.

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), por ser um ensaio cujo deslocamento da membrana é controlado e pequeno (1,1mm), é assumido que as leituras são realizadas entorno da condição

de comportamento elástico do solo. E, por se tratar da cravação de uma lâmina, assume-se que são geradas menores perturbações no solo, quando comparado com outros ensaios de cravação.

A lâmina dilatométrica é conectada às hastes, que por sua vez são conectadas ao equipamento de cravação, enquanto o cabo eletropneumático liga à lâmina à unidade de controle, passando por dentro das hastes. Com o equipamento hidráulico de cravação devidamente ancorado, é iniciada a cravação. Conforme EUROCODE 7 (1997), a cravação é realizada com avanço de 2cm/s, sendo aceitas velocidades entre 1 e 3cm/s. O avanço é feito de forma contínua, sendo evitados equipamentos de cravação por percussão. Marchetti et al., (2001) recomendam a realização da cravação de forma segmentada, onde a cada 20cm a cravação é sessada e iniciada a expansão de membrana. O operador do equipamento deverá iniciar a expansão da membrana, adicionando incrementos de pressão ao sistema, em no máximo 2 segundos após a paralisação da cravação, obtendo a primeira leitura, chamada de leitura *A*, entre 13 e 20 segundos (geralmente 15s). Obtida a leitura *A*, a expansão continua até que se obtenha a segunda leitura, chamada de leitura *B*, obtida em torno de 20 a 30 segundos após a leitura *A*. Em outras palavras, em no máximo 1 minuto são obtidas as principais leituras necessárias para interpretação do ensaio na profundidade de interesse, acarretando em aproximadamente 12m/h de produtividade.

De forma sucinta, nas Figuras 5 e 6 são apresentados os princípios de funcionamento do equipamento e a representação das leituras *A* e *B*, respectivamente.

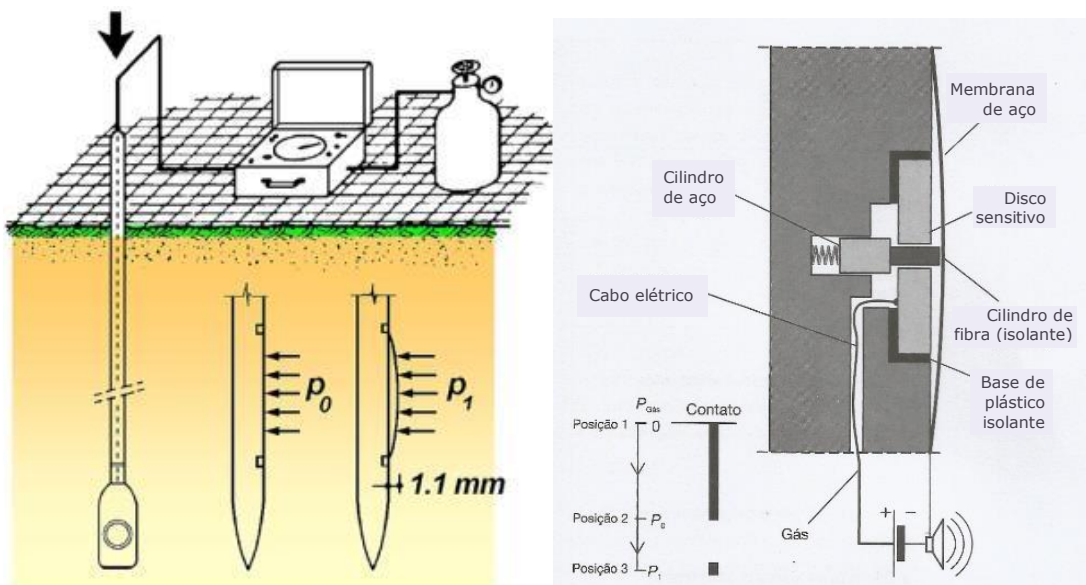


Figura 5: Princípio de funcionamento do DMT (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

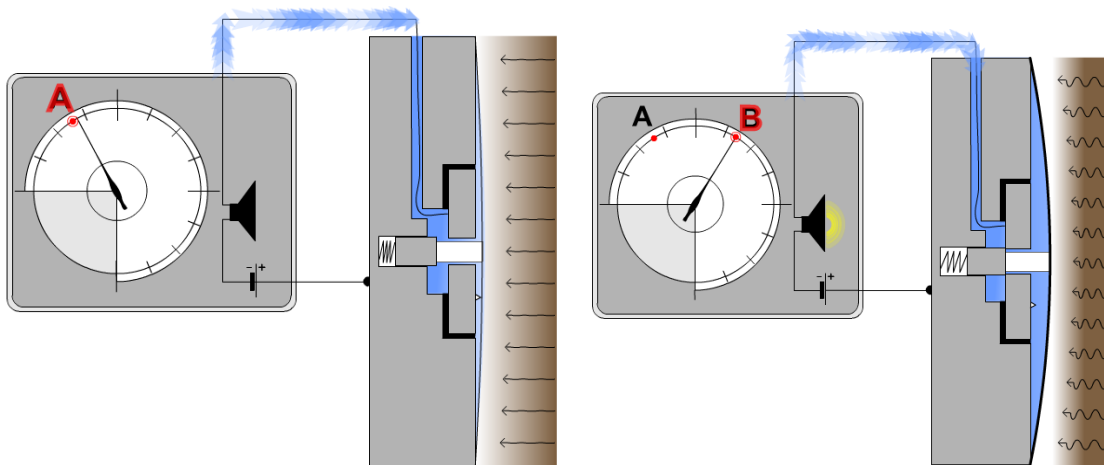


Figura 6: Representação das leituras *A* e *B*, e seus respectivos sinais sonoros
(Fonte: Studio Marchetti).

Assim que a lâmina dilatométrica eletrificada é cravada, o solo pressiona a membrana contra o disco sensível, fechando contato, emitindo sinais sonoro e luminoso na unidade de controle (posição 1 na Figura 5). Atingida a cota de interesse, a cravação é interrompida, e o operador inicia as aplicações de incrementos de pressão. Assim que a membrana perde o contato com o disco sensível, equivalendo ao deslocamento de 0,05mm, o sistema elétrico se torna aberto (posição 2 na Figura 5), interrompendo os sinais sonoro e luminoso, indicando o valor da leitura *A*. Os incrementos de pressão são continuados até que o cilindro de aço, presente no interior da lâmina e se deslocando concomitantemente com a membrana, fecha contato com o disco sensível (posição 3 na Figura 5), emitindo novamente sinais sonoro e luminoso, indicando a leitura *B*. Há ainda, uma terceira leitura, chamada de leitura *C*, que ocorre quando realizada a depressurização controlada do sistema (retornando da posição 3 para posição 1). No entanto, a leitura *C* não é fundamental para interpretação do ensaio, estando ligada à caracterização da condição de drenagem de solos arenosos (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

De forma resumida, a leitura *A* representa a pressão de gás (kPa) mínima necessária para vencer a tensão que o solo exerce sobre a membrana empurrando-a contra o disco sensível, equivalendo ao deslocamento de 0,05mm, e; a leitura *B* representa a pressão de gás (kPa) imposta ao solo necessária para deformar 1,10mm.

Um dos motivos pelos quais o DMT é considerado um ensaio simples, é o fato de ser um equipamento elétrico, como descrito anteriormente, ao invés de eletrônico. Ou seja, suas leituras são realizadas em termos dos sinais aberto e fechado. Em comparativo com o piezocone, por

não possuir *straingages*, ou transdutores de poropressão, o DMT é menos sensível às vibrações, variação da temperatura do solo, e não é influenciado por erros na saturação do equipamento. E ainda, é um equipamento portátil, de fácil manuseio e manutenção, de boa produtividade e econômico. No entanto, apesar de sua operação ser simples, é necessário experiência do operador para que este consiga identificar a velocidade dos incrementos de pressão necessária para realizar as leituras dentro do tempo médio determinado para cada leitura. Em solos menos resistentes, a velocidade do incremento é menor; em solos mais resistentes, maior pressão é necessária para expansão da membrana, sendo necessário maior velocidade no incremento de pressão. Portanto, uma das principais fontes de erro está ligada ao tempo de expansão da membrana. Outros erros citados por Schnaid e Odebrecht (2012) estão relacionados ao tempo de espera entre a cravação e o início da expansão; à expansão em excesso e; ao desvio de verticalidade.

2.2. CALIBRAÇÃO DO DILATÔMETRO

Antes de iniciar a execução do ensaio, é necessário que se faça a calibração da lâmina. Sendo esta calibração aferida após o término do ensaio.

O procedimento de calibração é simples e análogo à realização das leituras.

Conforme descrito por ISO 22476-11(2017), e apresentado na Figura 7, estando a lâmina eletrificada, na superfície (pressão atmosférica), e conectada à unidade de controle, com o auxílio de uma seringa cujo papel é simular a pressurização do sistema, é aplicado inicialmente o máximo de pressão negativa possível, simulando a pressão que o solo exerce sobre a membrana durante a cravação (posição 1 da Figura 5), promovendo o perfeito contato entre membrana e disco sensitivo, e por consequência, o fechamento do circuito elétrico. A leitura obtida no manômetro é chamada de ΔA . Após, é aplicada pressão positiva até que a membrana se expanda 1,10mm (posição 3 da Figura 5), fechando novamente o contato do circuito elétrico, obtendo a leitura ΔB . As leituras ΔA e ΔB são correções necessárias às leituras de A e B em virtude da influência da rigidez da membrana durante sua expansão.

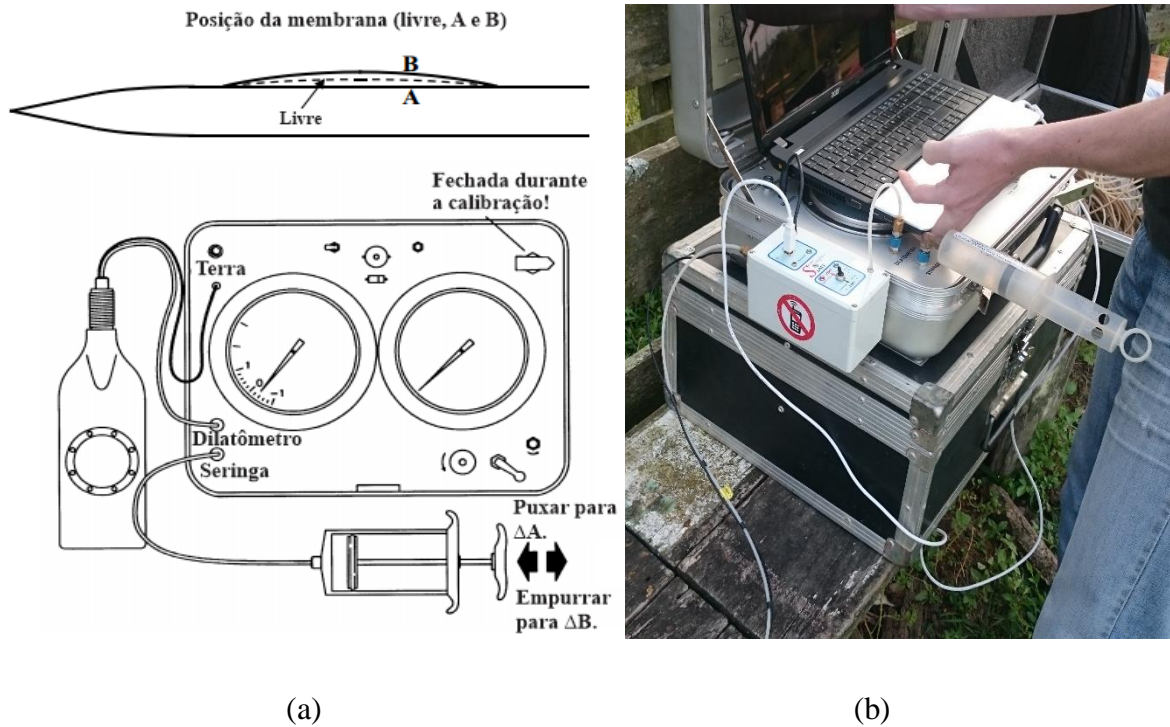


Figura 7: (a) Procedimento de calibração (adaptado de Marchetti e Monaco, 2001).

(b) Execução da calibração do DMT (Fonte: Autor).

O procedimento de calibração é um bom indicador sobre a condição do equipamento, e por consequência, sobre a qualidade dos dados, onde segundo Marchetti et al. (2001), ΔA pode variar em 5 e 30 kPa, sendo tipicamente 15 kPa, e; ΔB pode variar entre 5 e 80 kPa, sendo tipicamente 40 kPa. 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.

Outra correção importante está relacionada à verificação da possível ocorrência de desvio do ponteiro em relação ao zero no manômetro de leitura, chamado de Z_m .

Além de necessária ao início e término do ensaio, a calibração é importante quando ocorre a substituição da membrana, sendo necessário também a verificação quanto à estanqueidade (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

2.3. LEITURAS E PARÂMETROS INTERMEDIÁRIOS

Como descrito anteriormente, o ensaio DMT retorna ao operador 3 medidas de pressão, A , B e C . A leitura A representa a pressão de gás necessária para que a membrana se desloque 0,05mm. A leitura B representa a pressão de gás necessária para que a membrana se desloque 1,10mm. A leitura C representa a pressão interna na membrana lida após o término da depressurização, não sendo uma leitura fundamental para a interpretação do ensaio DMT em siltes, ou argilas.

Por conta da rigidez da membrana e da possibilidade de ocorrência de desvio do zero no manômetro, as leituras A , B e C se tornam, após correção pela calibração do equipamento, p_0 , p_1 e p_2 , respectivamente. A Figura 8 apresenta graficamente a obtenção das leituras corrigidas.

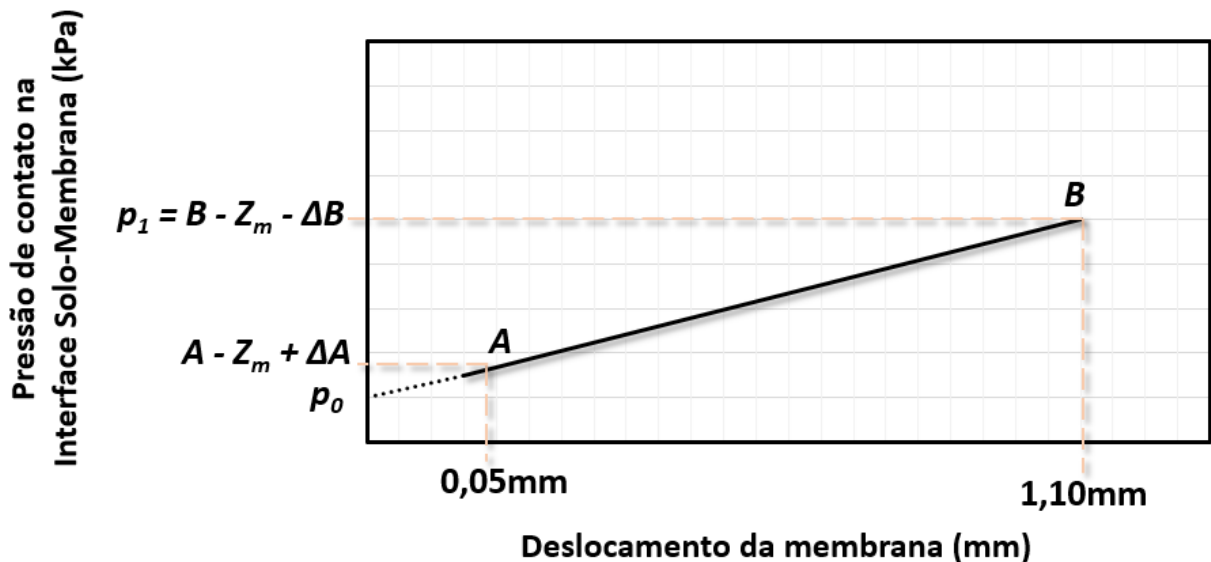


Figura 8: Correção das leituras A e B (adaptado de DOT, 1992).

Como a obtenção de ΔA na calibração ocorre com a aplicação de pressão negativa (sucção), considera-se sua utilização na equação com sinal positivo. E, ainda, como A é obtido com deslocamento de 0,05mm, por semelhança entre triângulos, tem-se que a leitura A corrigida (p_0) pela rigidez da membrana e extrapolada para origem, é obtida através da equação 1.

$$p_0 = 1,05(A - Z_M + \Delta A) - 0,05(B - Z_M - \Delta B) \quad (1)$$

Enquanto a correção pela rigidez da membrana da leitura B (p_1) é obtida através da equação 2.

$$p_1 = (B - Z_M - \Delta B) \quad (2)$$

Baseado nas principais leituras do DMT (p_0 e p_1), Marchetti (1980) definiu 3 parâmetros intermediários do solo, onde através deles, obtém-se os parâmetros do solo para classificação e estimativa de comportamento.

2.3.1. Índice de Material (I_D)

O parâmetro I_D , chamado de índice do material, fornece um indicador do tipo de solo, servindo como referência na escolha das demais correlações empíricas do ensaio. O I_D é calculado através da equação 3, abaixo.

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (3)$$

Onde, u_0 é a poropressão hidrostática.

Conforme apresentado por Marchetti et al. (2001) através da Figura 9, a diferença ($p_1 - p_0$) é maior quanto maior for o índice de vazios, conseqüentemente, maior a permeabilidade do material. Portanto, I_D não identifica o tipo de solo através de distribuição granulométrica ou plasticidade, mas reflete o comportamento que ele apresenta.

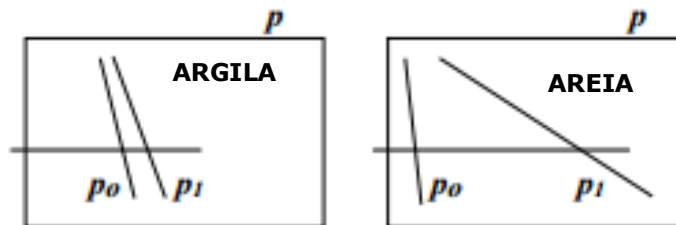


Figura 9: Diferença entre p_1 e p_0 (MARCHETTI et al., 2001).

Sendo assim, valores baixos de I_D podem representar condição não-drenada, enquanto valores altos, condição drenada. Logo, durante o procedimento convencional do ensaio DMT, Marchetti (1980) assumiu que I_D baixos representavam existência de solo argiloso e I_D altos, solo arenoso, estabelecendo faixas de classificação, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos solos baseado no parâmetro intermediário I_D .

TIPO DE SOLO	I_D
Argila muito mole/turfa	<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).

Posteriormente, Marchetti e Crapps (1981) apresentaram o gráfico baseado nas faixas de I_D para classificação propostas por Marchetti (1980) e no módulo dilatométrico (E_D), conforme Figura 10.

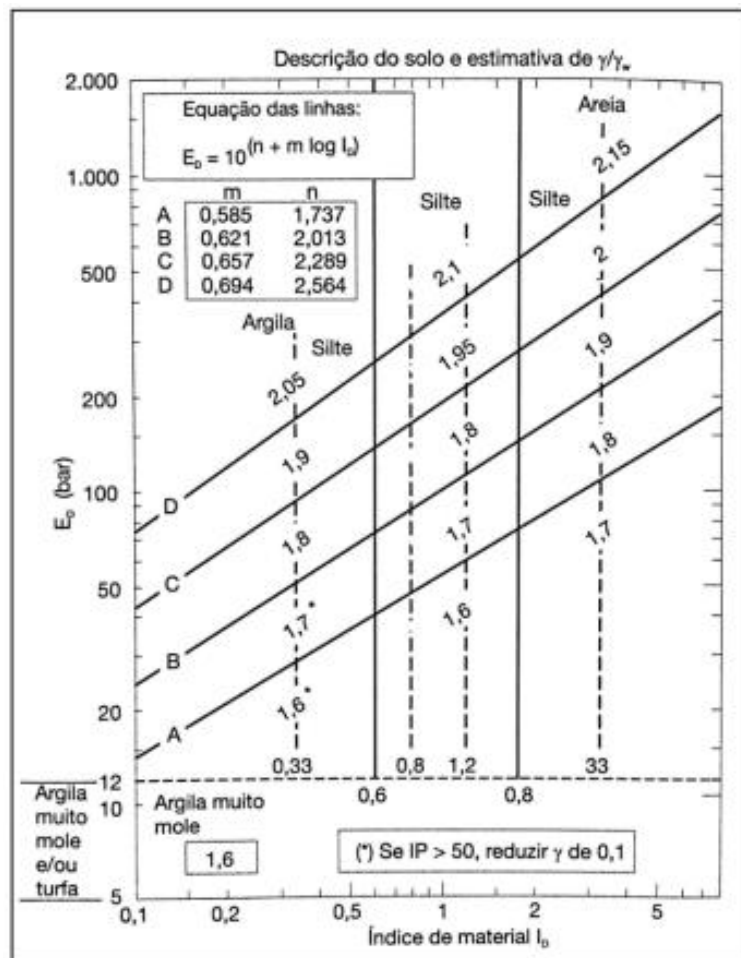


Figura 10: Classificação dos solos (adaptado de Marchetti e Crapps, 1981).

As linhas A, B, C e D representam o estado em que o solo se encontra, do muito mole/compressível/fofo (linha A) para duro/muito duro/muito compacto (linha D).

Como o I_D reflete o comportamento mecânico do material, pode haver a inversão entre argila e silte ou, classificar como silte uma mistura de argila e areia.

2.3.2. Índice de tensão horizontal (K_D)

O índice K_D é de extrema relevância na interpretação do ensaio, pois é base de várias correlações para obtenção de parâmetros do solo. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), o K_D é definido de forma análoga ao coeficiente de empuxo ao repouso (K_0), sendo a razão entre tensão efetiva horizontal (σ'_{ho}) e vertical (σ'_{vo}), calculado através da equação 4.

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{vo}} \quad (4)$$

Apesar de análogo, K_D não representa uma medida direta de K_0 devido ao fato de que a cravação da lâmina no solo causa perturbações descaracterizando a condição de “repouso verdadeiro” do solo.

Conforme Marchetti et al. (2001), em argilas Normalmente Adensadas (NA), K_D apresenta valores aproximadamente 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 de OCR , contribuindo para o entendimento sobre o depósito do solo e seu histórico de tensões.

2.3.3. Módulo dilatométrico (E_D)

Assim como K_D não representa a medida direta de K_0 , E_D não representa a medida direta do módulo de elasticidade do solo. No entanto, conforme Marchetti (1980) e Schnaid e Odebrecht (2012), como é assumido que o solo ao redor da lâmina forma dois semi-espacos elásticos, tendo a lâmina como plano de simetria, e expansão da membrana como carregamento flexível circular, é possível determinar E_D em função da teoria da elasticidade e, portanto, usá-lo para determinar as características de deformabilidade do solo.

E_D foi definido por Marchetti (1980) em função da teoria da elasticidade através da equação 5, a seguir.

$$S_0 = \frac{2D(p_1 - p_0)(1 - \nu^2)}{\pi E} \quad (5)$$

Onde,

S_0 = deslocamento da membrana (1,10mm);

D = diâmetro da membrana (60 mm);

p_1 e p_0 , as leituras corrigidas do ensaio;

ν , coeficiente de Poisson e;

E , módulo de Young do solo.

Sendo a razão $\frac{E}{(1 - \nu^2)}$ definida como E_D , obtém-se através da equação 5, a equação 6, abaixo:

$$E_D = 34,7(p_1 - p_0) \quad (6)$$

Como p_1 tem relação direta com a resistência do solo, o E_D demonstra a pressão necessária para que a membrana se desloque 1,10mm, podendo ser relacionado com a compactidade das areias, consistência das argilas e peso específico do solo (γ), motivo pelo qual E_D está presente na Figura 10, proposta por Marchetti e Crapps (1981) para classificação dos solos.

3. INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DMT CONVENCIONAL

Conforme Marchetti et al. (2001), o ensaio DMT possui 2 leituras (p_0 e p_1) que originarão 3 parâmetros intermediários (I_D , K_D e E_D). Ou seja, apenas 2 parâmetros são independentes. Conforme apresentado por Campanella e Robertson (1991), nas Figuras 11(a) e 11(b), a força de cravação (F_{DMT}), e a resistência de ponta (q_D), tem relação direta com $(p_0 - u_0)$, não sendo necessária sua leitura. Neste caso, as leituras de resistência de ponta são realizadas apenas para fins acadêmicos. Da mesma forma, apresentado na Figura 11(b), K_D possui relação direta com q_D , e por consequência, com $(p_0 - u_0)$. No entanto, conforme Marchetti et al. (2001) a utilização dos 3 parâmetros intermediários (I_D , K_D e E_D) foi introduzida ao ensaio em virtude de que cada um deles apresenta a capacidade de reconhecer características específicas de comportamento do solo.

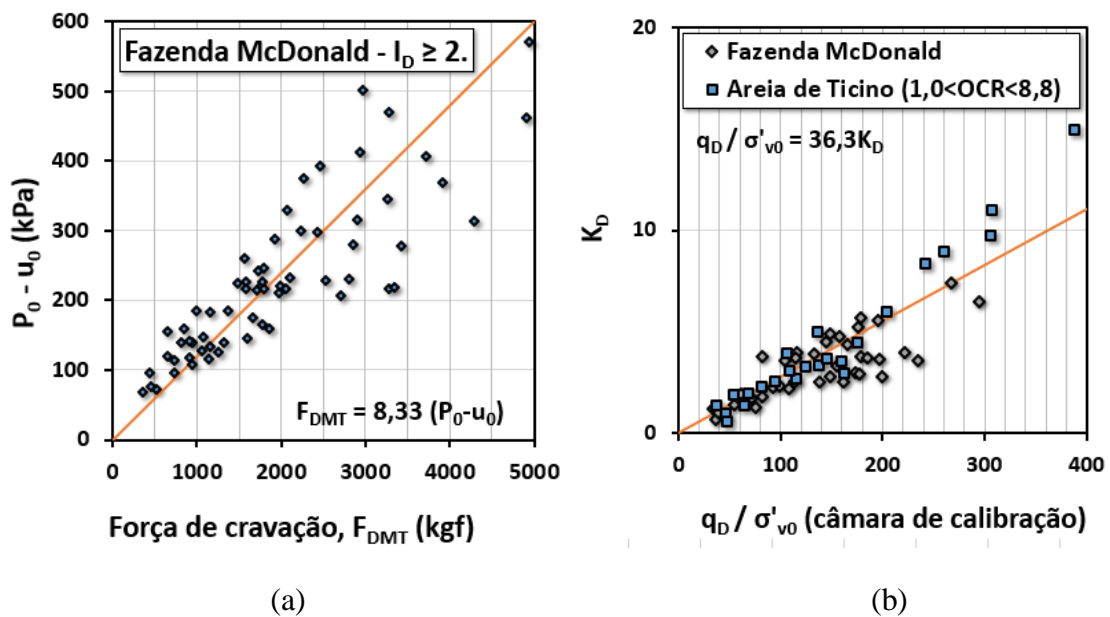


Figura 11: (a) Relação entre p_0 e força F de cravação. (b) Relação entre K_D e q_D normalizado Campanella e Robertson (1991).

Baseados nos parâmetros intermediários, Marchetti (1980) determinou as primeiras, e principais, correlações semi-empíricas utilizadas para obter parâmetros de comportamento dos solos. Com I_D , K_D e E_D , é possível determinar parâmetros como coeficiente de empuxo ao repouso (K_0), razão de pré-adensamento (OCR), módulos de deformabilidade (M e E) e resistência ao cisalhamento não-drenado (S_u).

A partir de Marchetti (1980), outros estudos foram realizados, sendo desenvolvidas novas correlações, empíricas e semi-empíricas, como a Tabela 2 apresentada abaixo.

Tabela 2: Principais 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_θ (Argilas)	$f(I_D, K_D)$	Marchetti (1980), Lunne et al. (1990)
K_θ (Areias)	$f(K_D, \text{força de cravação})$	Schmertmann (1982)
OCR (Argilas)	$f(I_D, K_D)$	Marchetti (1980), Powel e Uglow (1988), Lunne, Lacasse e Rad (1989)
OCR (Areias)	$f(K_D, \text{força de cravação})$	Baldi et al. (1988)
Módulos (E e M)	$f(I_D, E_D, K_D)$	(Marchetti (1980), Baldi et al. (1986), Roberston, Campanella e Gillespie (1988))

Fonte: Lutenegger (1988).

Baseado nos estudos realizados para o desenvolvimento das correlações para obtenção dos parâmetros geotécnicos citados acima, Schnaid e Odebrecht (2012) propuseram o fluxograma das etapas do ensaio DMT apresentado na Figura 12, abaixo.

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_0	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 de interpretação	OCR	Razão de sobreadensamento
	S_U	Resistência não drenada
	ϕ'	Ângulo de atrito interno do solo
	C_h	Coefficiente de adensamento horizontal
	K_h	Coefficiente de permeabilidade
	γ	Peso específico
	M	Módulo oedométrico
K_0	Coefficiente de empuxo horizontal	

Figura 12: Fluxograma das etapas do ensaio DMT (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Como pode ser visto na Tabela 2, a interpretação do ensaio é realizada diferentemente entre Areias e Argilas. A exceção, neste caso, está no módulo de deformabilidade, que é interpretado da mesma forma para ambos os casos, utilizando os parâmetros intermediários apenas como definidores do coeficiente de correlação.

3.1. SOLOS ARGILOSOS

A realização do DMT em solo argiloso saturado permite, através dos parâmetros intermediários, obter os parâmetros geotécnicos do solo sob condição não-drenada. Ou seja, durante realização do ensaio DMT são gerados excessos de poropressão que, por conta da baixa permeabilidade do solo, não são dissipados durante o período de realização das leituras.

3.1.1. Coeficiente de empuxo ao repouso (K_0)

Inicialmente, o DMT foi desenvolvido para análise de carregamentos laterais em estacas, estando diretamente relacionado com o Coeficiente de Empuxo ao Repouso (K_0), que é definido como sendo a razão entre as tensões efetivas horizontal e vertical, quando a variação das deformações horizontais é nula.

O parâmetro K_0 é sensível à variação do estado de tensões e ao envelhecimento do solo, o que impossibilita sua obtenção de forma direta através do ensaio. Em virtude das perturbações causadas durante a cravação da lâmina, do ensaio DMT obtém-se K_D , ao invés de K_0 .

A primeira correlação de K_0 (equação 7) foi baseada no comportamento entre K_D e K_0 apresentado na Figura 13.

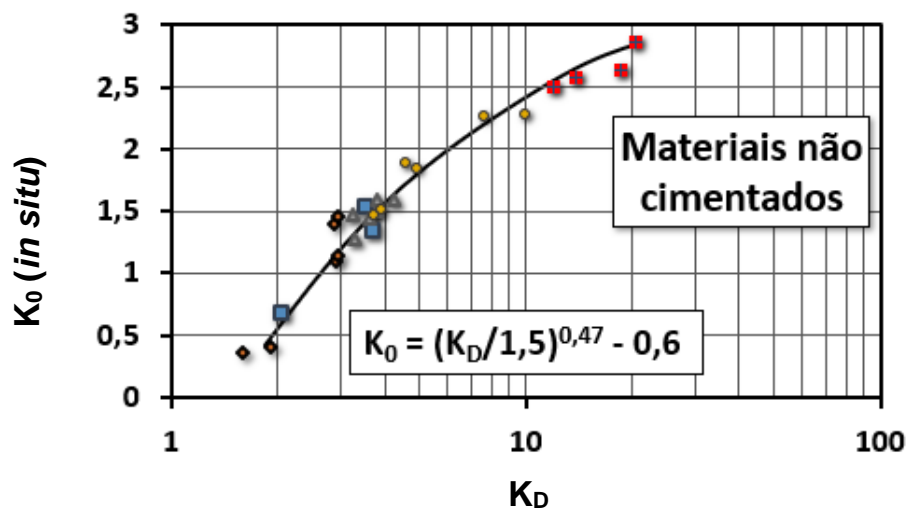


Figura 13: Correlação entre K_D e K_0 (MARCHETTI, 1980).

Sendo então, proposto por Marchetti (1980):

$$K_0 = \left(\frac{K_D}{1,5} \right)^{0,47} - 0,6 \quad (7)$$

Esta correlação, considerada generalizada, foi obtida através resultados de ensaios DMT realizados *in situ*, e em laboratório, em argilas na Itália. A equação 7 é indicada apenas para argilas normalmente adensadas, não cimentadas e que não estão sujeitas aos efeitos de envelhecimento. Por este motivo, Jamiolkowski et al. (1988) recomenda o uso da equação 7 apenas em depósitos de argilas mole a medianamente rija, com $I_D < 1,2$.

Baseado em Powel e Uglow (1988) que sugerem que argilas envelhecidas (formação > 60 milhões de anos) possuem comportamento diferente das argilas “jovens” (formação < 70mil anos), tendo valores de K_0 maiores do que os previstos pela equação desenvolvida por Marchetti (equação 7) e, portanto, sugerindo que a relação entre K_0 e K_D é função da idade do depósito, Lunne et al. (1990) propõe as seguintes equações 8 e 9.

$$K_0 = 0,34K_D^{0,54} \quad \text{para} \quad \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \leq 0,5 \quad (8)$$

$$K_0 = 0,68K_D^{0,54} \quad \text{para} \quad \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} > 0,8 \quad (9)$$

3.1.2. História de tensões

A razão de pré-adensamento (OCR), ou sobre-adensamento (RSA), é um indicativo dos carregamentos sofridos pelo solo da sua formação até o momento do ensaio, sendo definida como a razão entre a máxima tensão vertical efetiva em que o solo foi carregado, e a tensão vertical efetiva em que o solo está submetido no momento do ensaio.

Como mencionado anteriormente, o K_D é fortemente influenciado pelo histórico de tensões, servindo de indicativo da história de tensões do solo, motivo pelo qual Marchetti (1980) formulou a equação de OCR em função de K_D , apresentada abaixo (equação 10). A relação entre OCR e K_D foi comprovada por Jamiolkowski et al. (1988).

$$OCR = (0,5K_D)^{1,56} \quad \text{para} \quad I_D < 1,2 \quad (10)$$

Como discutido anteriormente, segundo Marchetti (1980), K_D constante entre 1,8 e 2,3 , indicam argila em condição normalmente adensada; K_D constante e maior que 2,3 , indica argila normalmente adensada envelhecida, ou cimentada e; $K_D > 3$ com perfil em redução de magnitude com a profundidade indica depósito argiloso pré-adensado. Baseado nisso, é possível verificar que a equação 10 é válida para argilas normalmente adensadas que não sofreram com processo de envelhecimento, pois quando $K_D = 2$, temos $OCR = 1$.

Além da equação 10, na literatura é possível encontrar outras correlações entre OCR e K_D .

$$OCR = (0,24K_D)^{1,32} \quad \text{Powel e Uglow (1988)} \quad (11)$$

$$OCR = (0,30K_D)^{1,17} \quad \text{para } \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} < 0,8 \quad \text{Lunne, Lacasse e Rad (1989)} \quad (12)$$

$$OCR = (0,27K_D)^{1,17} \quad \text{para } \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} > 0,8 \quad \text{Lunne, Lacasse e Rad (1989)} \quad (13)$$

$$OCR = 034K_D^{1,43} = (047K_D)^{1,43} \quad \text{Kamei e Iwasaki (1995)} \quad (14)$$

Como pode-se notar, há similaridade entre as correlações descritas acima e a equação 10, validando mais uma vez as premissas assumidas inicialmente por Marchetti (1980).

A Figura 14, desenvolvida por Kamei e Iwasaki (1995), compila os resultados de estimativas de OCR baseado em K_D obtidos por diversos autores. Apesar de apresentar dispersão considerável, é possível estimar valores de OCR quando $K_D < 5$. Quando $K_D < 5$, tem-se que $OCR < 3 \sim 4$, característico de um material pré-adensado. Quando $K_D > 5$, a dispersão aumenta e, portanto, aumenta possibilidade de erro na estimativa de OCR .

Uma outra forma de analisar a dispersão da equação 10 é apresentada na Figura 15, onde Yu (2004), através de análise numérica, comprova a imprecisão da equação a partir de $K_D > 5$, afirmando que esta equação deve ser empregada com cautela em solos pré-adensados.

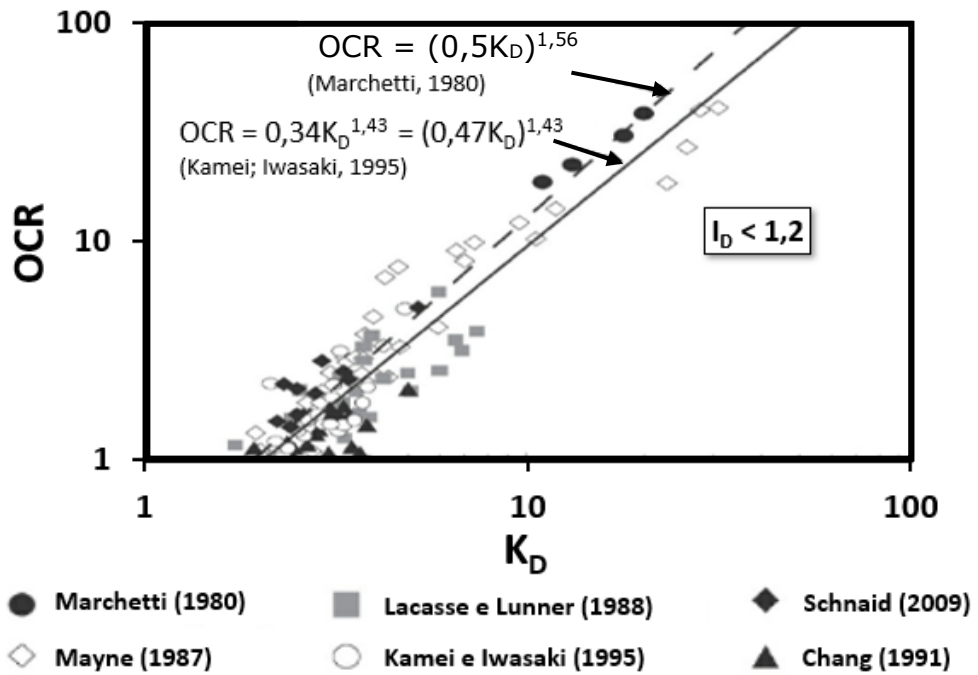


Figura 14: Estimativas de *OCR* em função de *K_D* (KAMEI e IWASAKI, 1995 apud SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

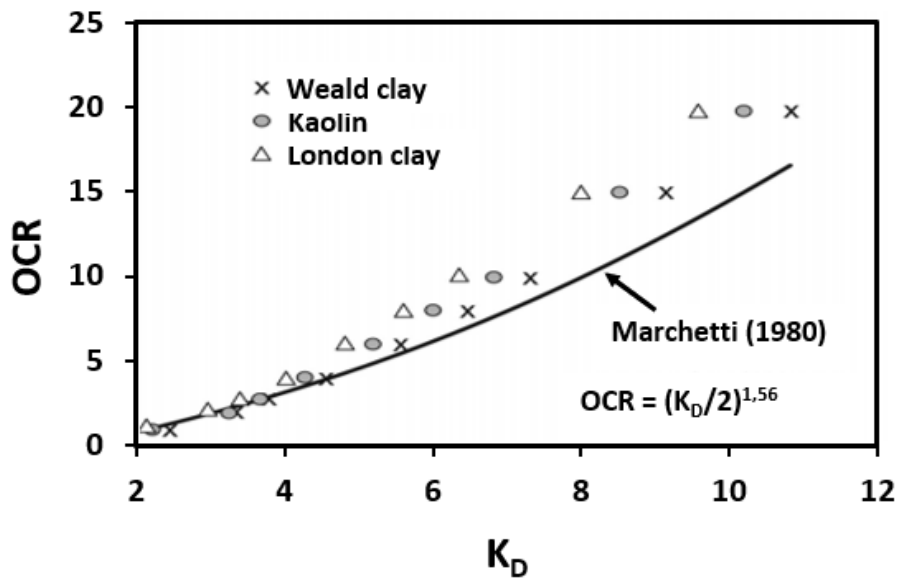


Figura 15: Correlação teórica entre *K_D* e *OCR* (YU, 2004).

Tendo definida as relações entre *OCR* e *K_D* e, entre *K_D* e *K₀*, é possível estimar *K₀* em função de *OCR* combinando as equações 7 e 10, obtendo a expressão 15.

$$K_0 = 1,14OCR^{0,3} - 0,6 \quad (15)$$

3.1.3. Resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u)

O parâmetro S_u é o parâmetro utilizado para estimar a resistência ao cisalhamento de um solo saturado, com baixa permeabilidade diante de um dado carregamento, caracterizando carregamento em condição não-drenada. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), a utilização de resultados normalizados é prática recomendável na engenharia. Em relação à resistência não-drenada, costuma-se apresentar sua normalização através da razão S_u/σ'_{v0} . Segundo Marchetti (1980), conhecendo a relação entre S_u/σ'_{v0} e OCR e, considerando correta a relação entre OCR e K_D , é possível estimar o valor de S_u baseado na proposição de Ladd et al. (1977).

Ladd et al. (1977) verificaram que há o aumento de S_u/σ'_{v0} com o aumento de OCR , havendo, portanto, uma relação direta entre ambos os termos, sendo expressa como:

$$\left(\frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{PA} = \left(\frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{NA} OCR^\Lambda \quad (16)$$

Onde, o índice “PA” significa condição de “Argila pré-adensada” e, “NA” significa condição de “Argila normalmente adensada”.

Segundo Ladd et al. (1977), o parâmetro Λ pode variar entre 0,75 e 0,85, sendo comumente utilizado $\Lambda = 0,8$.

Mesri (1975), baseado em retroanálises de taludes sobre solos moles, definiu que S_u quando normalizado pela tensão efetiva de pré-adensamento (σ'_p), tende à valores próximos a 0,22.

Baseado nas proposições de Ladd et al. (1977), Mesri (1975) e na equação de OCR em função de K_D para valores de $I_D < 1,2$ (equação 10), Marchetti (1980) pode expressar a equação de S_u em função de K_D apresentada abaixo.

$$\left(\frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{PA} = \left(\frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{NA} OCR^\Lambda \rightarrow \left(\frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{PA} = 0,22OCR^{0,8} \rightarrow S_u = 0,22\sigma'_{v0} ((0,5K_D)^{1,56})^{0,8}$$

$$S_u = 0,22\sigma'_{v0} (0,5K_D)^{1,25} \quad (17)$$

Como demonstrado, a equação 17 é baseada em análises realizadas em argilas NA, o que implica que sua utilização é restrita à depósitos argilosos NA saturados.

Schnaid (2009) afirma que a equação 17 tem sua aplicabilidade confirmada em estudos posteriores, tanto por comparativos com outros métodos de ensaios (LACASSE; LUNNE, 1988, POWELL; UGLOW, 1988, BURGHIGNOLI et al., 1991, IWASAKI et al., 1991, NASH et al., 1992, COUTINHO et al., 1998), quanto através de análise numérica (HUANG, 1989, FINNO, 1993; WHITTLE; AUBENY, 1993, YU, 2004). Apesar da aplicação ter sido validada por diversos autores, como pode ser visto na Figura 16, a mesma deve ser utilizada com cautela, pois possui um nível de dispersão considerável, haja visto que é baseada em análise estatística de Mesri (1975) e Ladd et al. (1977).

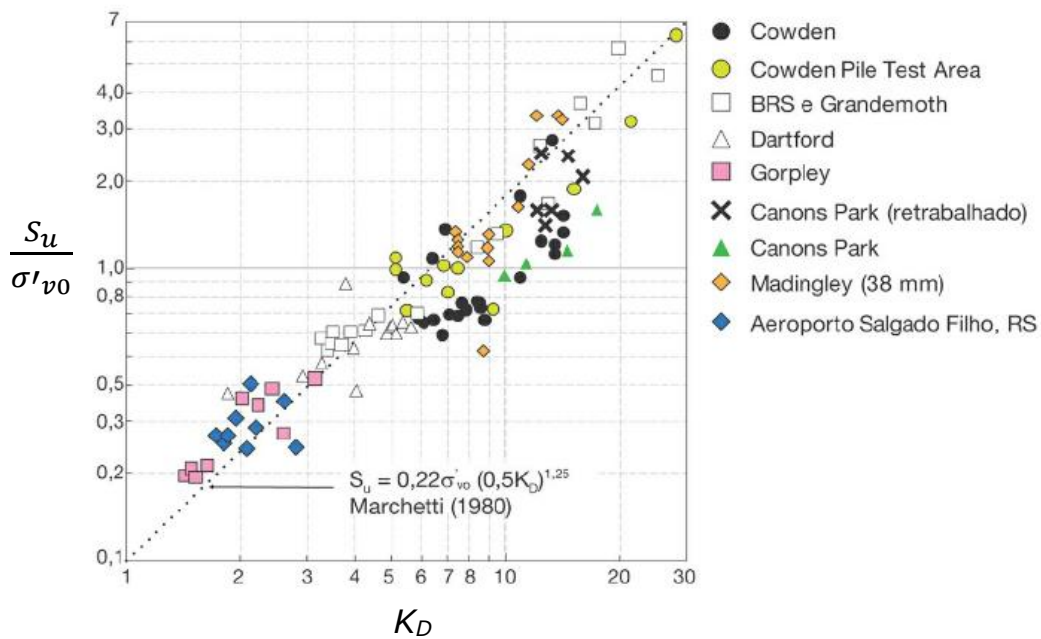


Figura 16: Comparação entre S_u/σ'_{v0} e K_D (adaptado de Powel e Uglow, 1988 apud Schnaid, 2009).

Há, ainda, outras correlações entre S_u e K_D na literatura baseadas nos mesmos princípios adotados no desenvolvimento da equação 17.

$$S_u = 0,20\sigma'_{v0} (0,5K_D)^{1,25} \quad \text{Lacasse e Lunne (1983)} \quad (18)$$

$$S_u = 0,34\sigma'_{v0} (0,47K_D)^{1,14} \quad \text{Kamei e Iwasaki (1995)} \quad (19)$$

3.2. SOLOS ARENOSOS

A cravação da lâmina em solos arenosos saturados implica na execução do ensaio em condição drenada. Portanto, todo o excesso de poropressão que eventualmente foi gerado na cravação é dissipado antes de realizar a primeira leitura do equipamento, a leitura A .

Segundo Yu (2006), há poucos trabalhos relacionados à análise de DMT em solos arenosos, tendo a maioria deles focados em desenvolvimento de correlações de natureza empírica. E, conforme Marchetti et al. (2001), um dos motivos da dificuldade de interpretação do DMT nestas condições está relacionado à dependência do ângulo de atrito interno do solo (ϕ'), ou da densidade relativa (D_r), impedindo estabelecer correlações únicas para alguns parâmetros.

A seguir, serão apresentados os parâmetros de comportamento de areias obtidos através do ensaio DMT.

3.2.1. Coeficiente de empuxo ao repouso (K_0)

Os primeiros estudos para expressar a relação entre K_0 e K_D em areias foram realizadas baseadas na comparação entre interpolações de banco de dados em solos arenosos e a equação 7, demonstrando que a mesma não estima de forma correta o valor de K_0 em areias, limitando seu uso apenas para argilas, sendo classificado o resultado como insatisfatório por Marchetti e Crapps (1981).

Diante da dependência do solo em relação ao seu ângulo de atrito, e portanto, da impossibilidade de estabelecer uma correlação em função apenas entre K_0 e K_D , Schmertmann (1983), baseado em Schmertmann (1982) e Durgunoglu & Mitchell (1975), propõe a existência da relação $K_0 - K_D - \phi'$, válida para $I_D > 2$, sendo expressa através da equação 20.

$$K_0 = \frac{40 + 23K_D - 86K_D\alpha + 152\alpha - 717\alpha^2}{192 - 717\alpha} \quad (20)$$

Onde, $\alpha = (1 - \text{sen } \phi'_{ax})$ e, ϕ'_{ax} é o ângulo de atrito interno do solo em condição de axissimetria.

Conforme Schmertmann (1988, apud U.S. DOT, 1992):

$$\phi'_{ps} \text{ (ângulo de atrito interno drenado)} \leq 32^\circ, \quad \phi'_{ax} = \phi'_{ps}$$

$$\phi'_{ps} \text{ (ângulo de atrito interno drenado)} > 32^\circ, \quad \phi'_{ax} = \phi'_{ps} - \left(\frac{\phi'_{ps} - 32}{3} \right)$$

De forma resumida, Schnaid e Odebrecht (2012) apresentam esta abordagem de forma iterativa para avaliar K_0 em função de K_D , em 3 passos:

- a) Assumir um valor de K_0 para obter uma primeira estimativa de ϕ'_{ax} através da equação $K_0 = 1 - \text{sen } \phi'$, proposta por Jacky (1944);
- b) Calcular K_0 através da equação 20, a partir de ϕ'_{ax} estimado no item a).
- c) Comparar o K_0 calculado em b) com o valor de K_0 assumido em a); após várias iterações, ambos valores de K_0 deverão convergir, com diferença menor que 10%.

Uma outra abordagem, foi proposta por Baldi et al. (1986), assumindo a relação $K_0 - K_D - q_c$, expressa através da equação 21.

$$K_0 = 0,376 + 0,095K_D - 0,00172 \left(\frac{qc}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (21)$$

onde, conforme Marchetti et al. (2001), o coeficiente multiplicador do último termo da equação, “-0,00172”, na prática varia entre “-0,002” e “-0,005”.

No entanto, esta abordagem implica na necessidade de realizar um ensaio de cone complementar, o que acaba desincentivando seu uso.

3.2.2. História de tensões

Segundo Marchetti (1997) e Marchetti et al. (2001), a obtenção do OCR em areias ocorre de forma mais dificultosa que em argilas. Isso porque enquanto o pré-adensamento da argila ocorre com a retirada de uma sobrecarga, para as areias é muitas vezes o resultado de uma história complexa de pré-carregamento, influenciado pelo envelhecimento do depósito arenoso. Por este motivo, em ensaio oedométrico é possível obter OCR em argilas, mas as perturbações durante a coleta de amostra não permitem o mesmo em areias.

Marchetti e Crapps (1981) propuseram as seguintes correlações para solos com $I_D > 1,2$.

$$\text{Para } 1,2 < I_D < 2, \quad OCR = mK_D^n \quad (22)$$

Onde,

$$m = 0,5 + 0,17P$$

$$n = 1,56 + 0,35P$$

$$P = \frac{I_D - 1,2}{0,8}$$

E,

$$\text{Para } I_D > 2, \quad OCR = (0,67K_D)^{1,91} \quad (23)$$

No entanto, Marchetti e Crapps (1981) descrevem as estimativas de *OCR* através das equações 22 e 23 como insatisfatórias, e geralmente superestimadas.

Estando o comportamento do solo arenoso dependente do ângulo de atrito interno do solo, assim como assumido para interpretação de K_0 em areias, Schmertmann (1988) propôs uma correlação partindo de K_0 , em função de K_D e ϕ'_{ax} , para areias não cimentadas e que não sofreram com processo de envelhecimento.

$$OCR = \left(\frac{K_0}{1 - \text{sen}\phi'_{ax}} \right)^{\left(\frac{1}{0,8\text{sen}\phi'_{ax}} \right)} \quad (24)$$

O método proposto por Schmertmann (1988) é aceito pela norma U.S. DOT (1992).

Conforme apresentado por Marchetti et al. (2001), uma outra proposição é obter uma ideia do histórico de carregamento, sendo avaliado de forma aproximada, em função da razão M_{DMT}/q_c . Onde M_{DMT} é o módulo oedométrico estimado através do dilatômetro, e será abordado posteriormente. Diversos autores realizaram estudos sobre essa abordagem, sendo publicados em Marchetti et al. (2001) e resumidos na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Aproximação do histórico de carregamento em areias baseado em M_{DMT}/q_c .

Publicações	M_{DMT}/q_c	
	Areias N.A.	Areias P. A.
Jendeby (1992)	7-10	12-24
Jamiolkowski (1995)	3-8	10-20
Baldi et al. (1986)	4-7	12-16
Marchetti et al. (2001)	5-10	12-24

Fonte: Marchetti et al. (2001).

3.2.3. Parâmetro de resistência em areias

Em areias saturadas, o excesso de poropressão gerado durante a cravação é dissipado antes de ocorrer a expansão da membrana. Portanto, a interpretação dos parâmetros de resistência do solo está relacionada à condição de resistência drenada, ocorrendo na forma de estimativa do ângulo de atrito interno do solo (ϕ').

Conforme Marchetti et al. (2001), existem duas formas de estimar o ângulo de atrito interno do solo. O primeiro método, foi desenvolvido por Schmertmann (1982, 1983), baseado na relação $\phi'-K_0-q_c$, sendo novamente necessário um ensaio CPT complementar. Por praticidade, esta metodologia foi expressa graficamente por Marchetti (1985) e apresentada na Figura 17. Nesta estimativa, é necessária uma previsão independente de K_0 , no entanto, erros na estimativa de K_0 não tem efeitos significativos nos valores de ϕ' (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

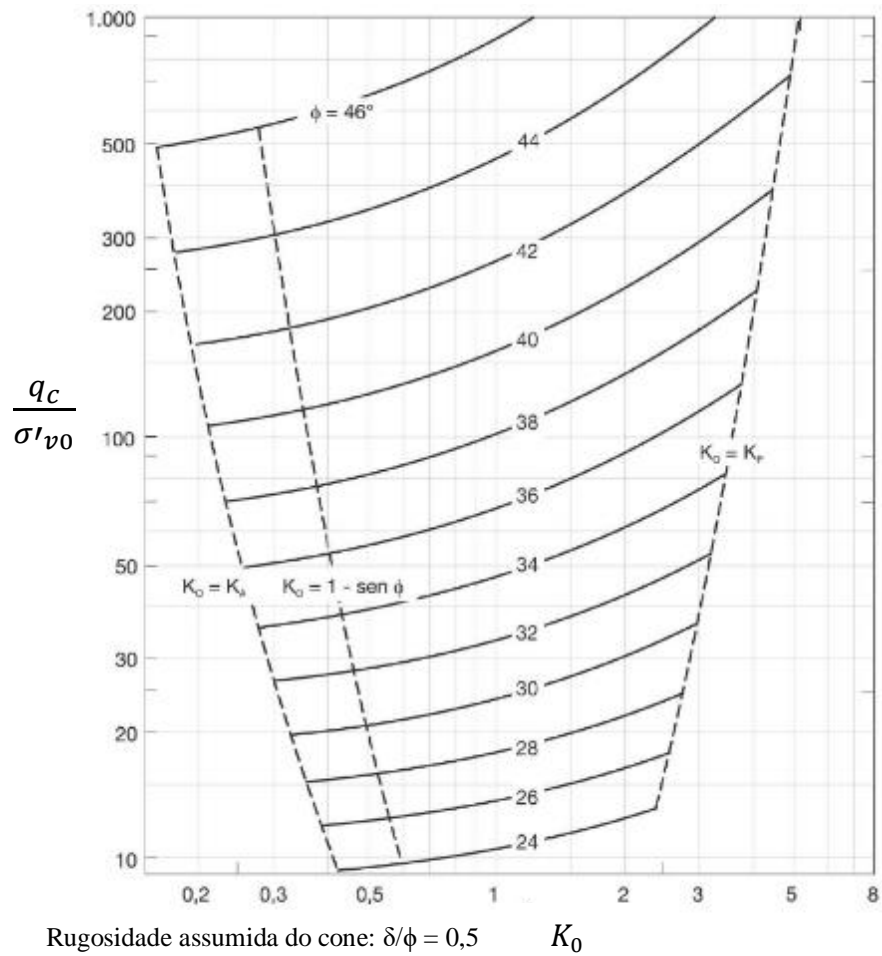


Figura 17: Estimativa de ϕ' baseado em K_0 e q_c (MARCHETTI, 1985).

O segundo método, apresentado por Marchetti et al. (2001), é uma correlação baseado em ϕ' e K_D , que tende a ser conservadora, subestimando os valores em 2 a 4°.

$$\phi'_{DMT} = 28^\circ + 14,6^\circ \log(K_D) - 2,1^\circ \log^2(K_D) \quad (25)$$

Marchetti et al (2001) comenta que para areias cimentadas, a correta estimativa de ϕ' é dificultosa pela presença de uma parcela coesiva, que influencia na resistência do solo.

3.3. ARGILAS E AREIAS - PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE

O método para estimar os parâmetros de deformabilidade do solo independe se o solo é arenoso, ou argiloso. Neste caso, o diferencial não está no método, mas no uso dos diferentes valores de I_D durante o processo de análise.

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), uma das formas frequentemente utilizadas para determinar parâmetros de deformabilidade de um solo, é através de expansão de diafragma. Marchetti (1980) verificou que a relação entre o módulo oedométrico (M) e E_D é proporcional e única, sendo confirmada por Lunne et al. (1990) e expressa através da equação 26.

$$M_{DMT} = R_M E_D \quad (26)$$

Onde, R_M é a razão entre M e E_D , sendo função de I_D e K_D .

$$\text{Para } I_D \leq 0,6: \quad R_M = 0,14 + 2,36 \log(K_D)$$

$$\text{Para } 0,6 < I_D < 3: \quad R_M = R_{MO} + (2,5 - R_{MO}) \log(K_D)$$

$$R_{MO} = 0,14 + 0,15(I_D - 0,6)$$

$$\text{Para } 3 \leq I_D < 10: \quad R_M = 0,5 + 2 \log(K_D)$$

$$\text{Para } I_D \geq 10: \quad R_M = 0,32 + 2,18 \log(K_D)$$

*Se $R_M < 0,85$, utilizar $R_M = 0,85$.

De forma simplificada, Marchetti et al. (2001) comenta que M_{DMT} seria o módulo corrigido por pelo fator R_M , onde R_M varia entre 1 e 3, enquanto M_{DMT} varia entre 0,4 e 400MPa, para a maioria dos sítios.

Ainda, através do DMT é possível estimar o valor do módulo de Young (E) através de três métodos. A primeira estimativa pode ser realizada através da teoria da elasticidade, relacionando E com coeficiente de Poisson (ν).

$$E = \frac{1 - \nu - \nu^2}{1 - \nu} M \quad (27)$$

Onde, conforme Marchetti (1997), para ν entre 0,25 e 0,30, a equação 27 pode ser simplificada, conforme apresentada abaixo.

$$E = 0,8M_{DMT} \quad (28)$$

A segunda estimativa, proposta por Marchetti (1980) é baseada também na teoria da elasticidade, sendo expressa através da equação 29.

$$E = (1 - \nu^2)E_D \quad (29)$$

A terceira estimativa, desenvolvida por Campanella et al. (1985) e Robertson, Campanella e Gillespie (1988), propõe uma simples proporcionalidade entre E e E_D .

$$E = FE_D \quad (30)$$

Conforme levantamento realizado por Lutenegeger (1988), segue na Tabela 4 abaixo, os valores do fator de proporcionalidade, F .

Tabela 4: Valores do fator F de proporcionalidade.

Tipo de solo	Módulo	F	Referências
Coesivos	E_i	10	Robertson, Campanella e Gillespie (1988)
Areia	E_i	2	Robertson, Campanella e Gillespie (1988)
Areia	E_{25}	1	Campanella et al. (1985)
Areia N.A.	E_{25}	0,85	Baldi et al. (1986)
Areia S.A.	E_{25}	3,5	Baldi et al. (1986)

Fonte: Lutenegeger (1988).

Apesar de haver estudos comprovando as metodologias acima descritas, em determinados sítios ambas metodologias apresentaram dispersões significativas. Baseado nisso, Schnaid e Odebrecht (2012) afirmam que as previsões de módulo com correlações de natureza semi-empíricas devem ser tomadas como ideia da ordem de magnitude, e não como valores absolutos.

3.4. SOLOS EM CONDIÇÃO PARCIALMENTE DRENADA

O desafio na interpretação do DMT em solos sujeitos à drenagem parcial durante a execução do ensaio (exemplo: siltes) está relacionado à influência da taxa de penetração e dos efeitos desenvolvidos durante essa etapa, além da dissipação da poropressão anteriormente e durante a expansão da membrana. Os efeitos de taxa dependem do estado inicial do solo em relação ao seu estado crítico. Em solos saturados, normalmente adensados, a execução de ensaios não-drenados gera excesso de poropressão, enquanto em solos em condição de drenagem, haverá variação de volume, sem geração de poropressão, durante o período de expansão da membrana. Em condição de drenagem parcial, há a ocorrência de dissipação de parte da poropressão, seguindo trajetória de tensões intermediárias entre as condições drenadas e não-drenadas.

Análises de ensaios *in situ* como CPT, penetração da lâmina dilatométrica e a expansão da membrana, são baseados no mesmo princípio e podem ser aproximados através de expansão de cavidade (YU; CARTER; BOOKER, 1993, YU, 2004, 2006). Como apresentado por House, Oliveira e Randolph (2001), Randolph e Hope (2004), Lunne, Yang e Schnaid (2014) e Dejong et al. (2016) para menores taxas de penetração do piezocone, o excesso de poropressão reduz em relação à condição não-drenada, aumentando a tensão efetiva e, conseqüentemente, aumentando a resistência de ponta do piezocone em relação à resistência que seria obtida em condição não-drenada. O entendimento deste mecanismo foi proporcionado por análises de expansão de cavidade, relacionando à velocidade de penetração com taxa de expansão de cavidade, assumindo que a deformação é puramente radial (Silva et al, 2006; Dientsmann et al, 2017). Segundo Dienstmann et al. (2018), a distribuição radial do excesso de poropressão após uma penetração lenta se difere da condição não-drenada, especialmente na face do cone, onde é observada uma considerável redução do excesso de poropressão. Considerando que a tensão total na face do cone praticamente não é influenciada pela taxa de penetração, a redução do excesso de poropressão leva ao aumento radial da tensão efetiva e, por conseqüência, no aumento da resistência de ponta, q_c .

Os efeitos observados durante a cravação da lâmina dilatométrica seguem essencialmente os mesmos princípios descritos para o piezocone, onde a condição de drenagem parcial na cravação pode ser evitada aumentando a velocidade de penetração (SCHNAID; ODEBRECHT, 2015). Por este motivo, a atenção desta pesquisa está relacionada à fase de expansão da

membrana, onde o excesso de poropressão gerado durante a cravação influencia na interpretação do ensaio.

Em solos coesivos, em condição não-drenada, o DMT experimenta um aumento da tensão total dado exclusivamente pela geração de excesso de poropressão na fase de cravação da lâmina. Este fato foi evidenciado através de simulações numéricas tri-dimensionais por Huang (1989), Finno (1993), Kouretzis et al. (2015) e Shen et al. (2018). Nas argilas, este excesso de poropressão é representativo e se mantém constante ao longo do tempo necessário para realização do ensaio DMT em procedimento padrão (Campanella e Robertson, 1991; Schnaid et al. 2016). Para areias saturadas, o excesso de poropressão que eventualmente for gerado deve ser completamente dissipado antes da primeira leitura A (Schnaid et al. 2016). No caso dos siltes, a condição não-drenada pode não ser atingida, introduzindo erros nas leituras A e B e, conseqüentemente, na interpretação dos resultados.

Como comentado anteriormente, p_0 e p_1 são medidas expressas em termos de tensões totais, sendo afetados pela condição de drenagem durante o período de expansão da membrana. Como pode ser observado na Figura 18, na faixa de permeabilidade da maioria dos solos siltosos, quando cravado em velocidade padrão (20mm/s), nem a condição de totalmente não-drenada, ou totalmente drenada, são atingidas, introduzindo o primeiro erro nas medidas do DMT. Este erro vem do fato de que em condições de drenagem parcial ocorre dissipação de poropressão simultaneamente à expansão da membrana. Neste caso, são obtidos valores de p_0 menores em comparação àqueles obtidos em condição não-drenada.

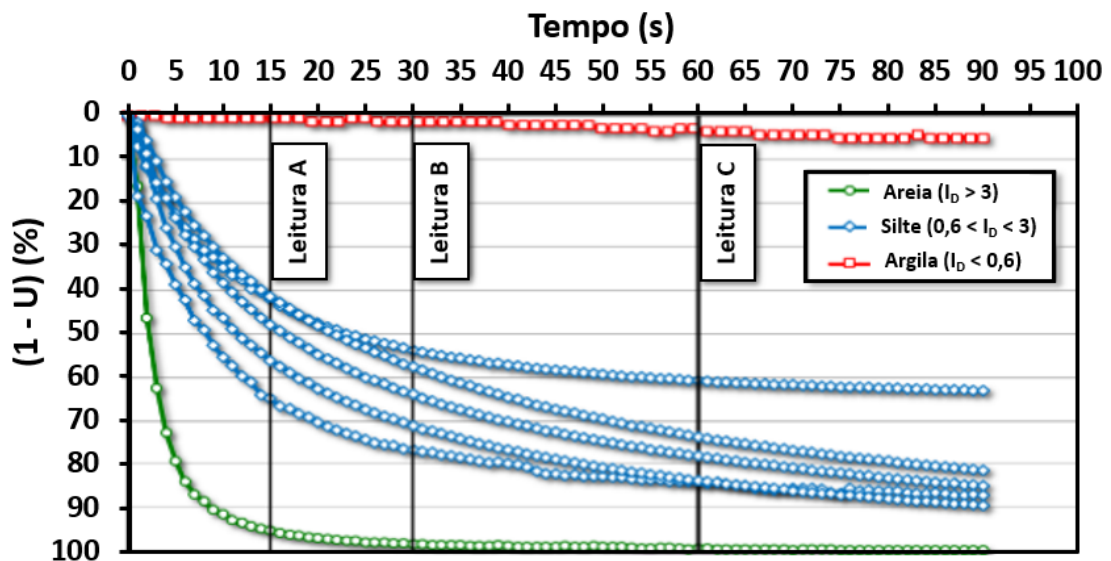


Figura 18: Dissipação da poropressão u para diferentes materiais (SOSNOSKI, 2016).

Na Figura 19, é apresentado um exemplo típico da dissipação de poropressão u , obtido por uma lâmina dilatométrica com transdutor de poropressão acoplado no lugar do diafragma (DMTu), e de leituras sucessivas de A obtidas por equipamento DMT. A figura apresenta a variação das leituras com o tempo para siltes oriundos de barragem de rejeitos de mineração. Como pode ser observado durante o primeiro minuto, período em que normalmente se obtém as leituras A e B do ensaio convencional, há ocorrência de dissipação significativa da poropressão u e queda das leituras de A , indicando um comportamento similar de queda para ambas as curvas. Neste exemplo, a recomendação do procedimento padrão de realizar a leitura de A em aproximadamente 15s após interrupção da cravação, é inadequada por não ter a condição não-drenada garantida. Neste caso, para que as leituras de A e B fossem satisfatórias, assumindo desprezíveis os efeitos da drenagem parcial e, tomando como válida a aproximação à condição não-drenada, as leituras deveriam ser realizadas entre 1 e 2 segundos após cessada a cravação. No entanto, esta taxa de expansão não é factível na prática.

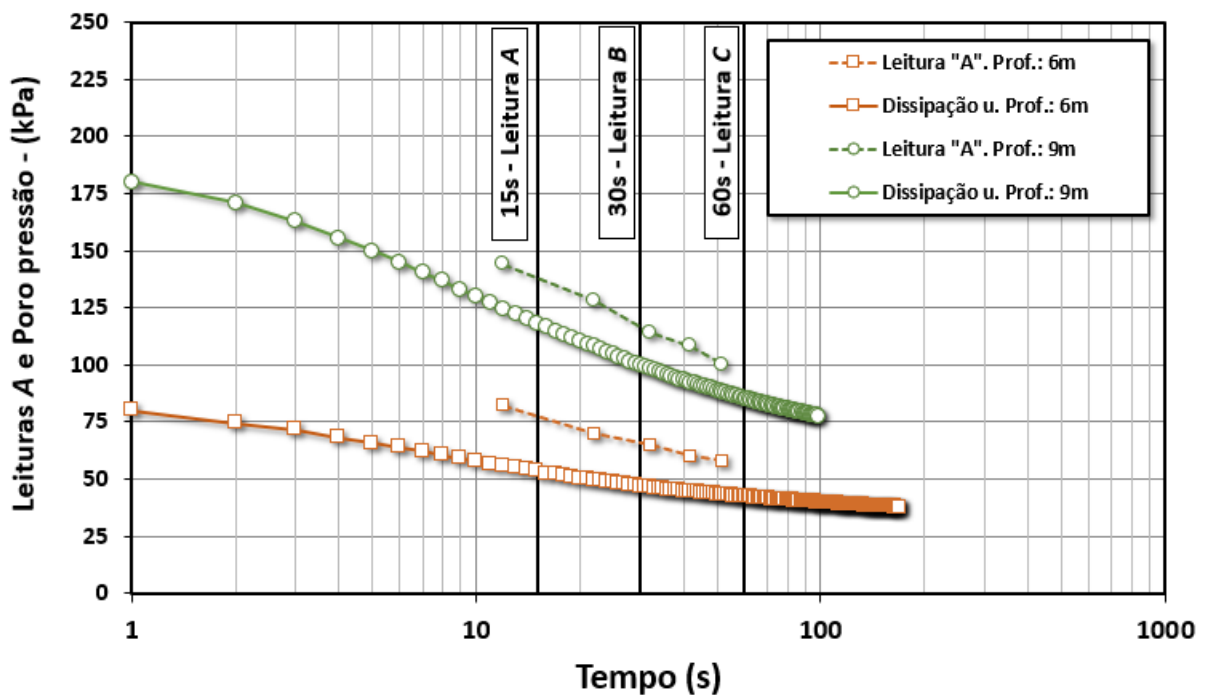


Figura 19: Dissipação de poropressão e decaimento de A em siltes (SCHNAID et al., 2016).

Uma forma mais simples de entender o problema é apresentada na Figura 20, onde é exemplificado o efeito da influência da dissipação da poropressão durante a primeira leitura de A e, durante a expansão da membrana, de A para B , num tempo i qualquer.

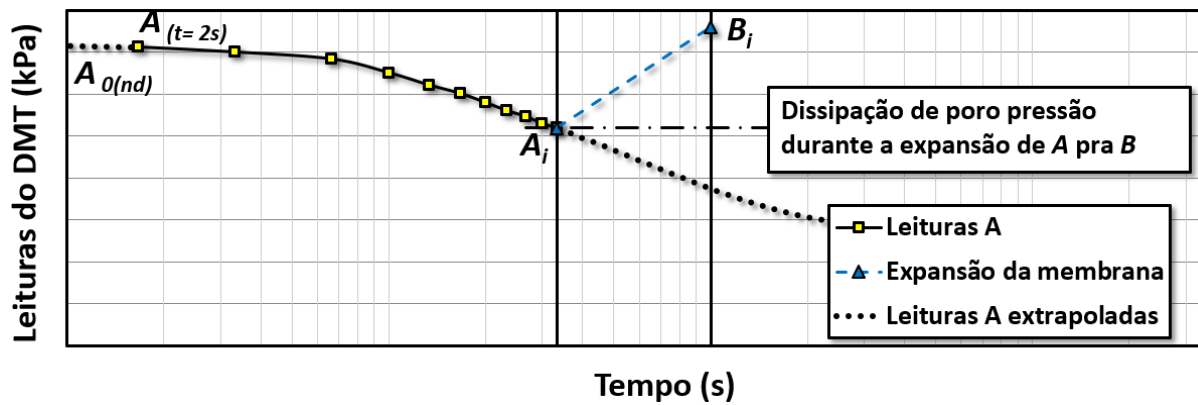


Figura 20: Leituras de A e B em solos de drenagem parcial. (Fonte: Autor)

Outros exemplos similares ao exposto acima foram observados por Robertson, Campanella e Gillespie (1988), Schmertmann, (1988), Marchetti e Totani (1989), Campanella e Robertson (1991) e Totani, Calabrese e Monaco (1998). Neste caso, uma alternativa ao procedimento convencional do ensaio DMT recomendado por ISSMGE TC16(2001) se faz necessário para reduzir as inconsistências oriundas dos efeitos de drenagem parcial.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo destina-se à descrição do programa experimental realizado para o desenvolvimento do método de interpretação que será proposto ao decorrer deste trabalho, bem como discutir o desenvolvimento de um novo procedimento de ensaio DMT, não padronizado, distinto do procedimento recomendado por normas para solos arenosos e argilosos.

4.1. CAMPO EXPERIMENTAL DE TUBARÃO

O ensaio DMT que foi utilizado como base experimental para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado em depósito argiloso situado no delta do Rio Tubarão, entre os municípios de Tubarão, Laguna e Jaguaruna, ao sul do estado de Santa Catarina (Figura 20). Segundo Nascimento (2010), que estudou a evolução sedimentar deste depósito, o termo delta, utilizado na geologia, possui diversas definições estando geralmente relacionadas à uma área de depósitos de sedimentos transportados por um rio e depositados às margens de uma bacia inundada, que por sua vez, corresponde a uma região de depressão onde se depositam argilas, siltes e sedimentos orgânicos. O delta do Rio Tubarão possui rochas do Escudo Atlântico do período pré-cambriano ao norte e a oeste e, ao sul e leste, sistemas deposicionais lagunar, barreira e eólico, formando depósitos em planícies com cerca de 250km² (NASCIMENTO, 2010). Segundo Nascimento (2010) e Schnaid e Odebrecht (2015), o depósito foi formado a mais de 5mil anos AP (antes do presente) após a glaciação mais recente, no período Holoceno, sendo formado predominantemente de material normalmente adensado.

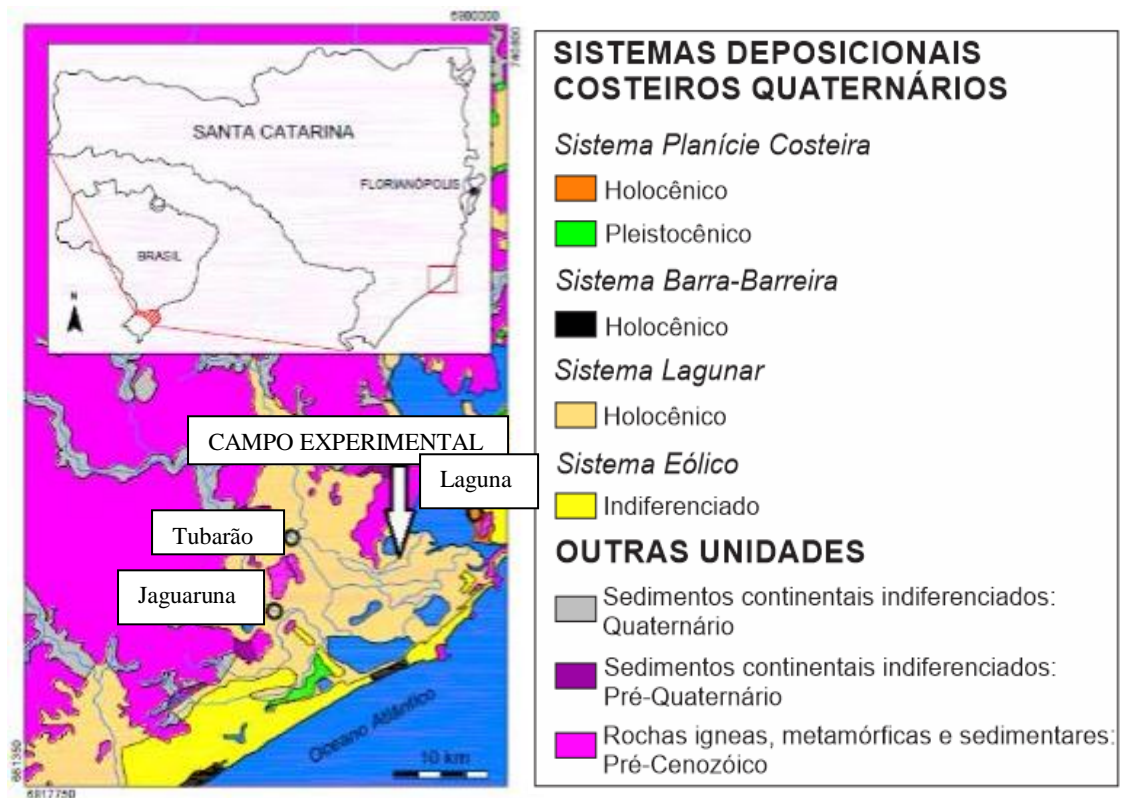


Figura 21: Campo experimental de Tubarão (adaptado de Nascimento, 2010).

Sob o ponto de vista geotécnico, a região foi estudada por Mantaras, Odebrecht e Schnaid (2015), Schnaid e Odebrecht (2015), Sosnoski (2016) e Pereira (2016). A interpretação de ensaio piezocone (CPTU) não faz parte do escopo desta pesquisa, porém, como já discutido anteriormente, a utilização de ensaios complementares é recomendada. Neste sentido, antes mesmo dos ensaios DMT realizados por Sosnoski (2016) e pelo presente autor, o solo do campo experimental já havia sido previamente reconhecido através de outros tipos de ensaios. O perfil típico obtido através do ensaio CPTU é mostrado na Figura 22.

Como pode ser observado através do perfil geotécnico apresentado por Mantaras, Odebrecht e Schnaid (2015), na Figura 22, a partir dos 7m o material possui comportamento típico de solo argiloso normalmente adensado, com a diminuição de q_t , geração de excesso de poropressão durante a cravação do piezocone, $OCR \approx 1,5$ e, aumento de B_q para valores aproximadamente iguais a 0,8.

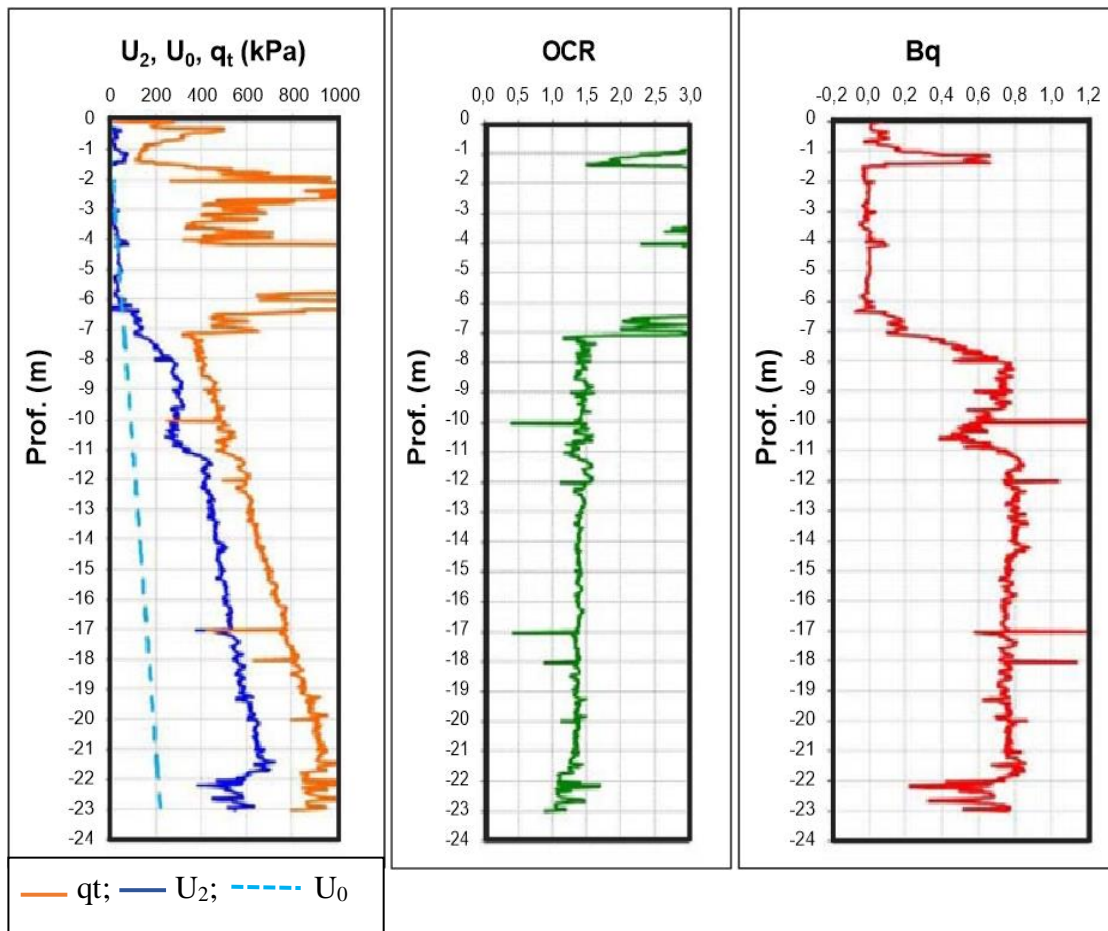


Figura 22: Perfil geotécnico do campo de Tubarão através do ensaio CPTU (Mantaras, Odebrecht e Schnaid, 2015).

De forma redundante, e complementar, o perfil geotécnico do ensaio DMT apresentado na Figura 23 corrobora as informações extraídas do laudo CPTU. Com $I_D < 0,6$ o material se encontra na faixa dos materiais argilosos, com K_D próximo a 3 e constante a partir dos 6m resultando em $OCR \approx 1,9$. Neste caso a presença de camada espessa de material argiloso, normalmente a levemente pré-adensado e com comportamento bem definido, foi um fator importante na adoção deste local como campo experimental.

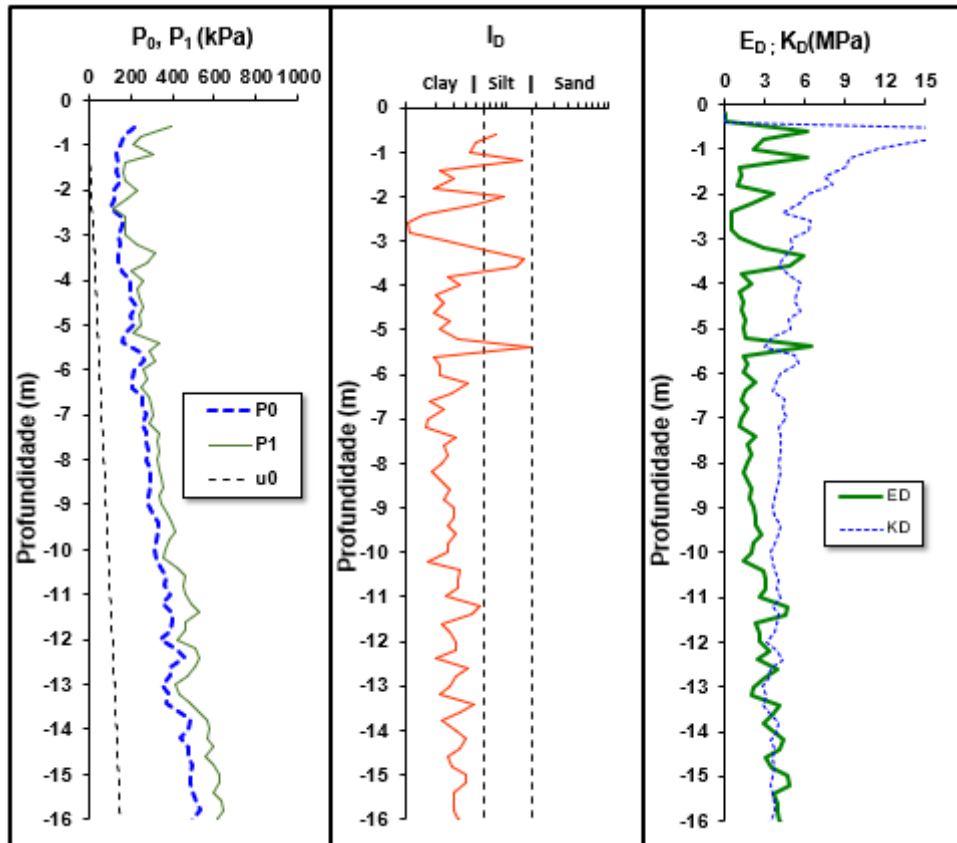


Figura 23: Perfil geotécnico do campo de Tubarão através do ensaio DMT (Mantaras, Odebrecht e Schnaid, 2015).

4.2. PROCEDIMENTOS PARA O ENSAIO ESPECIAL – DISSIPACÃO COMPLETA

Como já discutido anteriormente, o DMT é um ensaio robusto e simples que, por não possuir transdutor de poropressão, força a interpretação de suas leituras em termos de tensões totais. Diversos autores realizaram estudos para avaliar a influência da dissipação de poropressão nas leituras *A* e a equivalência entre a taxa de queda das leituras *A* e a taxa de queda de poropressão. A partir dos trabalhos clássicos sobre a relação entre a dissipação da poropressão e a interpretação dos resultados é possível assumir que a curva de decaimento de *A* tem comportamento de queda semelhante ao da curva de dissipação da poropressão (ROBERTSON et al, 1988; SCHMERTMANN, 1988; MARCHETTI e TOTANI, 1989; CAMPANELLA e ROBERTSON, 1991; TOTANI et al, 1998).

Através da Figura 24 é possível comparar as curvas de poropressão e das leituras de *A* e *B*, além de observar a sequência de leituras (*A-B-C*), e como a queda de poropressão interfere nos valores da diferença *B - A*.

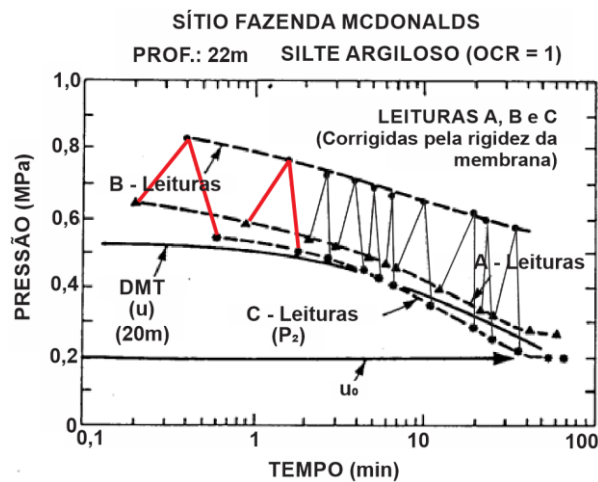


Figura 24: Comparação entre sucessivas leituras do DMT padrão com a dissipação de poropressão lida por um equipamento DMTU (ROBERTSON et al, 1988).

Como ilustrado na Figura 20, imediatamente após interrompida a cravação ($t = 0$ segundos), a leitura *A* inicial, aqui definida como A_0 , pode ser obtida através da relação apresentada abaixo.

$$A_0(t = 0) = \sigma'_{h,pen} + (u_0 + \Delta u_{pen}) \quad (31)$$

onde, $\sigma'_{h,pen}$ é a tensão efetiva horizontal imediatamente após a penetração, u_0 é a poropressão hidrostática e, Δu_{pen} a poropressão induzida pela penetração.

Em um tempo qualquer i após a penetração, onde há ocorrência de drenagem parcial, a leitura A , referida como A_i , é obtida a partir da equação 32, abaixo.

$$A_i(t=i) = (\sigma'_{h,pen} + \Delta\sigma'_h) + (u_0 + \Delta u_{pen}) - \Delta u_{dis} \quad (32)$$

Sendo que, neste caso, $\Delta\sigma'_h$ representa o aumento da tensão efetiva horizontal em virtude da dissipação Δu_{dis} no tempo ($t=i$).

Partindo dos mesmos conceitos adotados na interpretação da leitura A , a leitura B quando lida em condição não-drenada, sem a ocorrência de mudança de volume, e a diferença entre ($B-A$), respeitam a relação:

$$(B-A) = \Delta\sigma'_h + (\Delta u_{exp}) \quad (33)$$

onde, $\Delta\sigma'_h$ representa o aumento da tensão efetiva horizontal durante a expansão da membrana e, Δu_{exp} a poropressão induzida pela expansão.

Em expansão de cavidade cilíndrica, o nível de tensões radial e circunferencial variam igualmente e opostas ao valor inicial de σ'_h , mantendo constante o nível de tensões no regime elástico. Consequentemente, é esperado que não haja variação de poropressão durante a expansão de cavidade. No caso do DMT, durante o deslocamento de 1,1mm da membrana na fase de expansão, assume-se que não haja deformações plásticas significativas. No entanto, neste ensaio, a expansão da membrana ocorre na forma elíptica, sendo levemente diferente da cavidade cilíndrica ideal e, por tanto, induzindo tensões de compressão e cisalhamento, podendo ocorrer o desenvolvimento de excesso de poropressão Δu_{exp} .

A equação 33 é válida somente para condição não-drenada por ter a influência da dissipação desprezada ($\Delta u_{dis} = 0$). Em casos em que há ocorrência de dissipação de poropressão durante a expansão, deve-se realizar os seguintes passos:

- Corrigir a leitura A medida no tempo $t=i$ (A_i) para o valor correspondente ao A inicial representativa de condição não-drenada ($A_{0(nd)}$);

- Estimar a leitura B correspondente à $A_{0(nd)}$, referida como $B_{0(nd)}$.

A partir da estimativa de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$ pode-se então, obter os parâmetros intermediários do ensaio DMT (I_D , E_D e K_D) e, posteriormente, obter os parâmetros geotécnicos do solo siltoso sob uma condição não-drenada teórica.

Baseado nos estudos supracitados, bem como no que foi explanado acerca da influência da dissipação nas leituras do DMT, foi definido o procedimento especial necessário para o prosseguimento do trabalho, cujas etapas são apresentadas abaixo:

- Após atingida cota de interesse, realizar sucessivas leituras de A (sem expandir a membrana para B) e observar a curva de queda de A até que as leituras estabilizem. A partir deste momento, em que A não varia, todo o excesso de poropressão gerado durante a cravação foi dissipado e, portanto, pode-se considerar que a leitura A final é representativa de condições drenadas $A_{f(dr)}$;
- Estando o solo saturado, a partir de $A_{f(dr)}$, a membrana é expandida em condição não-drenada para $B_{f(nd)}$ (i.e.. esta expansão é realizada em curto período de tempo no qual eventuais dissipações de poro pressão podem ser desprezadas).

4.3. PROCEDIMENTOS PARA O ENSAIO ESPECIAL – DISSIPACÃO INCOMPLETA

O A final ($A_{f(dr)}$) é obtido pelo monitoramento da queda das leituras de A até que seu valor estabilize, obtido após a completa dissipação do excesso de poropressão gerado durante a cravação. Apesar de ser um procedimento simples, é dependente da condição de permeabilidade do solo, podendo levar de minutos a horas para o ensaio ser realizado. Sendo assim, para que o procedimento especial se torne viável na prática de engenharia, é necessário que o tempo de ensaio seja reduzido.

O procedimento, neste caso, segue os mesmos dois passos citados para dissipação completa, com algumas diferenças.

- (a) Após atingida cota de interesse, realizar de 6 a 8 leituras de A (sem expandir para B) durante um período de 2 a 3 minutos. Neste caso, a estimativa de $A_{0(nd)}$ ocorre baseado leituras de A parcialmente drenada ($A_{(pd)}$), ao invés de $A_{f(dr)}$;
- (b) Estando o solo saturado, a partir de $A_{(pd)}$, a membrana é expandida em condição parcialmente drenada para $B_{(pd)}$.

O desenvolvimento dessa abordagem é mais complexo e desafiador pois na estimativa de $B_{0(nd)}$ há a inclusão de uma nova variável no problema, a dissipação da poropressão Δu_{dis} que ocorre no período entre a leitura de A_{pd} e B_{pd} .

5. INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO ESPECIAL

Neste capítulo será abordado sobre os procedimentos de tratamento dos dados obtidos do ensaio especial, de forma que permita sua correta interpretação.

5.1. CORREÇÃO DA LEITURA A

Sem as leituras de poropressão, considerações quanto às condições de drenagem parcial podem ser feitas com base na variação da leitura de A (MARCHETTI e TOTANI, 1989) ou de C (ROBERTSON et al., 1988; SCHMERTMANN, 1988, 1991; U.S. DOT, 1992). Adotando o método de variação de A , em solos intermediários essa leitura deve ser corrigida para um valor equivalente de A na condição não-drenada, $A_{0(nd)}$. Neste caso, A_i representa a primeira leitura do equipamento, obtida em um tempo em torno de $t=15s$, enquanto $A_{0(nd)}$ o valor extrapolado para $t = 0$, assim como proposto por LeClair (1988) para leituras de C .

Neste trabalho são propostos dois métodos de interpretação: o primeiro é analítico, com base estatística e o segundo empírico e simplificado. Enquanto a primeira abordagem dá bases conceituais à interpretação do ensaio, o segundo é uma abordagem expedita que pode ser usada sem dificuldades na prática de engenharia.

5.1.1. Método pela Distribuição de Weibull

Em posse da curva completa da queda de A até a sua estabilização, os dados podem ser plotados e interpretados a partir da escolha de uma função matemática que gere o melhor ajuste dos pontos. Muito utilizada na engenharia, a distribuição contínua de probabilidade de Weibull foi escolhida como referência por representar a curva em forma de S em um diagrama $A-\log(t)$, gerando uma curva de ajuste compatível com a forma apresentada pela queda de A .

A distribuição de Weibull pode ser representada genericamente através da Figura 25.

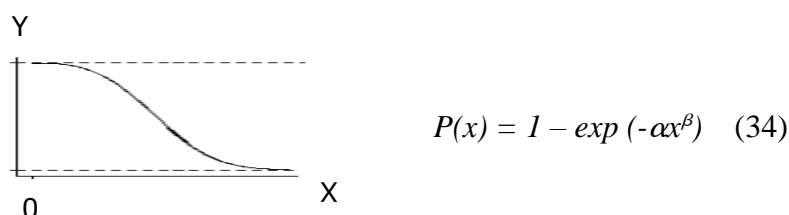


Figura 25: Representação genérica da distribuição de Weibull e equação simplificada.

Com o auxílio de software estatístico, foi analisada uma série de curvas de decaimento de A . Através do software, foi obtido a seguinte equação geral, em conformidade com a equação 34:

$$A_{nd,dr} = M + (N - M) * \exp(-T * t^Y) \quad (35)$$

sendo, M e N as constantes baseadas na distribuição dos dados, T e Y as constantes que dependem do tipo de solo e t a variável tempo.

A distribuição de Weibull, apresentada na forma da equação 35, foi escolhida por possibilitar uma interpretação onde as variáveis possuem representação física da distribuição de dados, conforme as condições:

- Em $t = 0$: $N = A_{0(nd)} = A_{m\acute{a}x}$ (valor de A em condição não-drenada teórica);
- Em $t = \infty$: $M = A_{f(dr)} = A_{m\acute{i}n}$ (valor de A medido após a completa dissipação das poropressões).

A Figura 26 apresenta um exemplo da aplicação da estimativa de A , baseado nos dados de Marchetti (2016), de forma analítica, em condição não-drenada teórica.

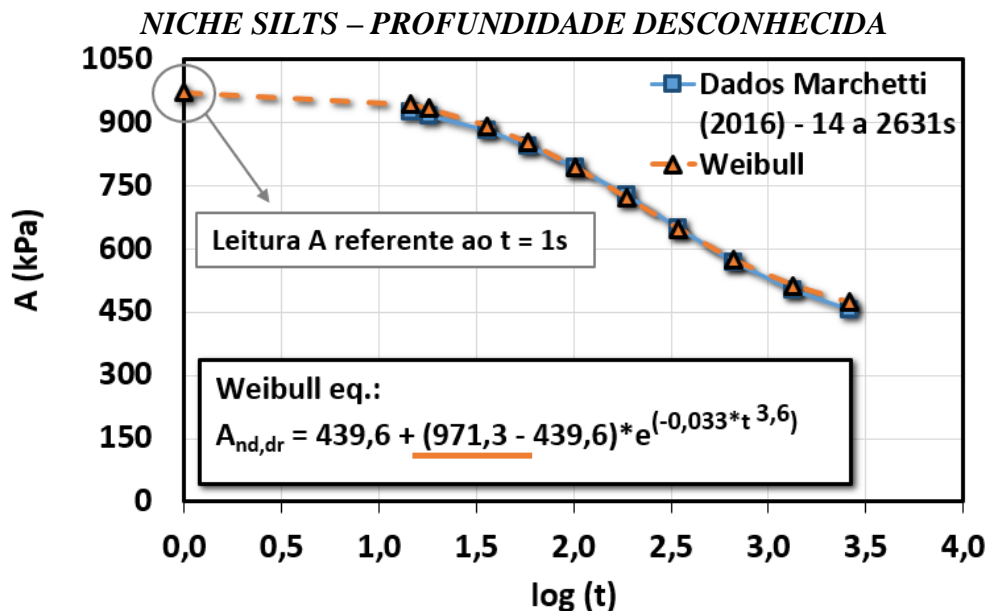


Figura 26: Exemplo de aplicação da distribuição de Weibull para obtenção de $A_{0(nd)}$.

Neste exemplo, a solução analítica é usada para estimar as constantes M , N , T e Y , da equação 35, resultando nos seguintes valores:

- ($\log t = 0$): $A_{0(nd)} = 971,3$ kPa;
- ($\log t = \infty$): $A_{f(dr)} = 439,6$ kPa.

5.1.2. Método expedito (\sqrt{t})

Uma alternativa para a obtenção de $A_{0(nd)}$ é baseada nos trabalhos apresentados por LeClair (1988) e Bullock (2015), considerando o eixo x expresso como a raiz do tempo. A vantagem desta abordagem, conforme será demonstrada, está na possibilidade de realizar as leituras A por um período de aproximadamente 1 min (média de 3 a 5 leituras), possibilitando o uso da metodologia sem alterar substancialmente o tempo de cada ensaio. As leituras A plotadas como função da raiz quadrada do tempo (\sqrt{t}) produzem uma linha reta de ajuste, permitindo que os resultados sejam extrapolados de volta à origem para estimar a leitura A em $t = 0$ s.

Tomando novamente como exemplo o banco de dados obtido através de Marchetti (2016), a Figura 27 ilustra a realização do método expedito para obtenção de $A_{0(nd)}$.

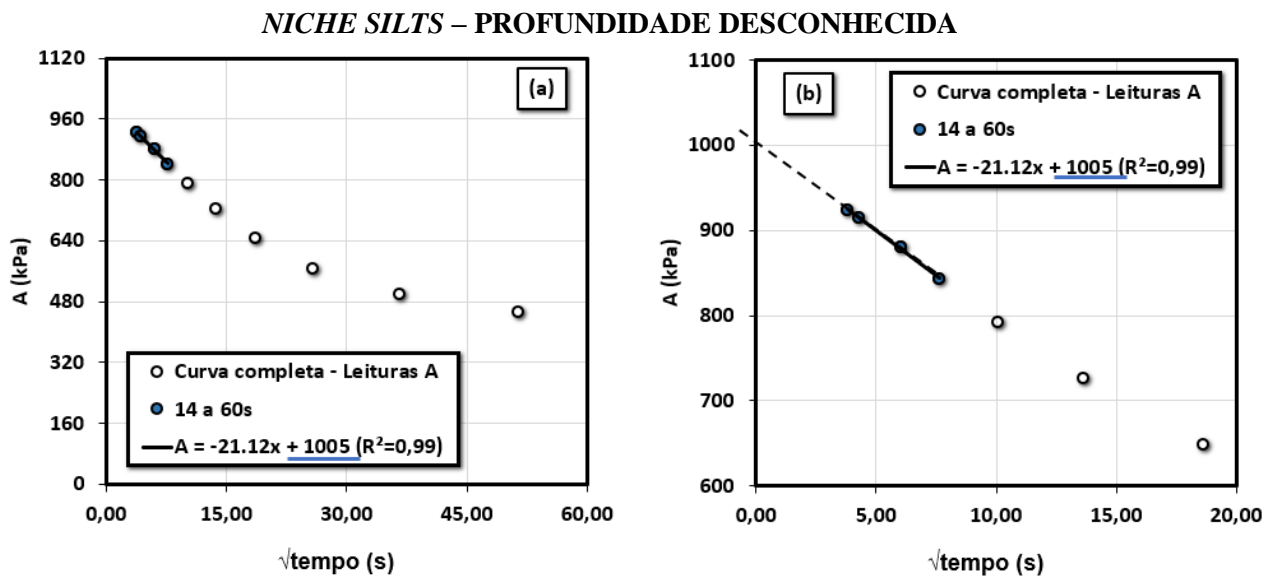


Figura 27 (a) e (b): Obtenção de $A_{0(nd)}$ através do gráfico de A x raiz de tempo.

No exemplo típico apresentado na Figura 27 foram analisados apenas os dados medidos entre 14s a 60s, período em que ocorrem as leituras do ensaio padrão, gerando um ajuste de primeiro grau, permitindo através da equação de ajuste apresentada na Figura 27, estimar os valores de $A_{0(nd)} = 1005$ kPa para $t = 0$.

A solução obtida através da relação entre A e \sqrt{t} é interessante pela simplicidade de utilização, pois permite estimar um valor de $A_{0(nd)}$ semelhante ao obtido pelo método estatístico. Note que o valor de $A_{0(nd)} = 1005$ kPa é muito próximo do valor esperado, conforme apresentado na Figura 28.

NICHE SILTS – PROFUNDIDADE DESCONHECIDA

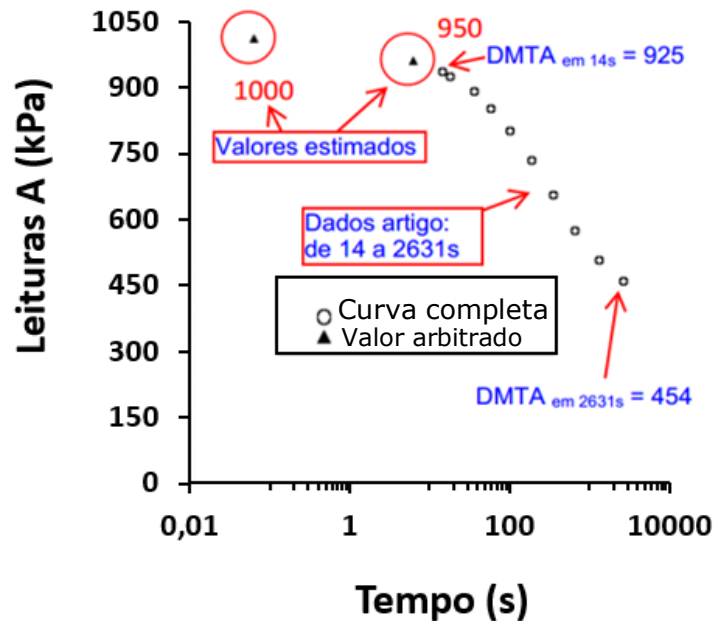


Figura 28: Estimativa de A em $t = 0$.

Em anexo são apresentados exemplos de aplicação das metodologias apresentadas, onde a utilização do método estatístico induz à uma análise mais conservadora por resultar valores de $A_{0(nd)}$ menores que o método expedito. O método estatístico através da equação de Weibull tende a retornar menor valor da leitura A_0 pois leva em conta a tendência média dos pontos durante o ajuste matemático. Enquanto o método expedito é baseado na extrapolação dos dados, considerando a extensão da reta, sendo $A_{(Weibull)} < A_{(\sqrt{t})}$. Além de ser menos conservador e mais simples de ser realizado, o método expedito possibilita o desenvolvimento de um procedimento especial baseado em dissipações incompletas e, portanto, ensaios mais rápidos. E, ainda, a utilização do método baseado em Weibull é altamente dependente da quantidade de leituras A e, requer a utilização de software estatístico, sendo uma análise menos produtiva.

Vale ressaltar que, ao extrapolar a pressão de deslocamento de volta para a origem usando qualquer um dos métodos supracitados, o efeito da dissipação após interrompida a cravação pode ser compensado. No entanto, é necessário notar que a pressão A_0 ($t = 0$ s) não é

necessariamente um valor não-drenado verdadeiro, pois pode ocorrer alguma dissipação durante a penetração, influenciada pela velocidade de cravação.

5.2. CORREÇÃO DA LEITURA B – DISSIPACÃO COMPLETA

Após o término da dissipação da poropressão, verificada com a realização de sucessivas leituras de A - obtendo $A_{f(dr)}$ ao final do processo -, a membrana é expandida para obter a leitura B final (B_f). Nesta etapa, Δu_{pen} foi totalmente dissipado e, assumindo que a expansão da membrana ocorre rapidamente, e que a dissipação nesta etapa (Δu_{dis}) pode ser desprezada, a leitura B_f será próxima à leitura em condição não-drenada ($B_{f(nd)}$).

As pressões lidas $A_{f(dr)}$ e $B_{f(nd)}$, e a pressão estimada ($A_{0(nd)}$) são indicadas na Figura 29, tendo como única leitura desconhecida, a leitura B correspondente à $A_{0(nd)}$, $B_{0(nd)}$.

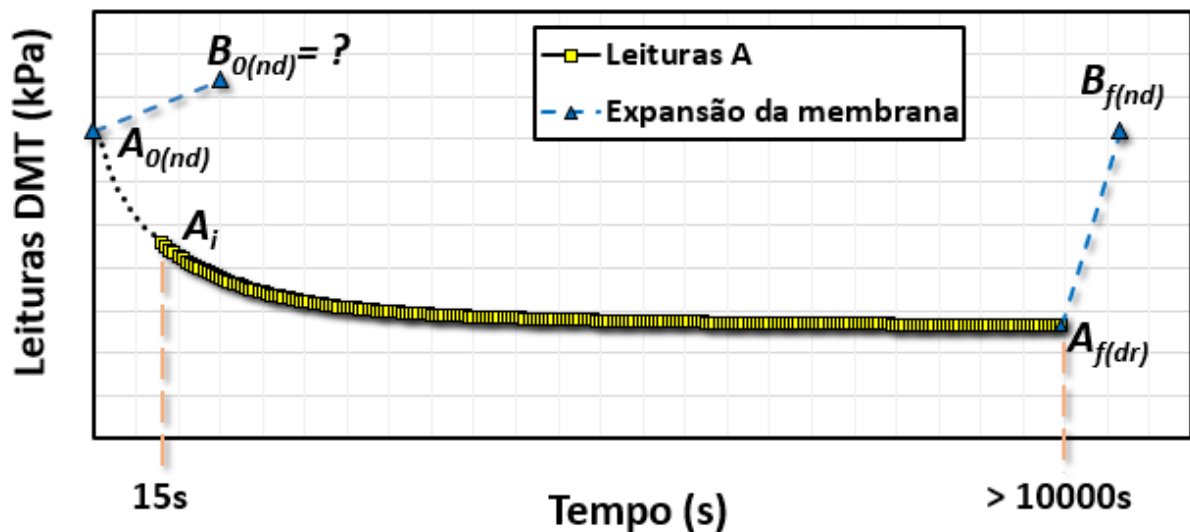


Figura 29: Leituras do ensaio DMT com tempo (Fonte: Autor).

As leituras obtidas pelo ensaio DMT relacionadas ao deslocamento da membrana no solo, são representadas através da relação linear apresentada na Figura 30. A partir do que é apresentado, a variação das leituras pode ser convertida em módulo de elasticidade do solo (E_D) pela teoria da elasticidade. A rigidez medida é reflexo das mudanças no nível de tensões e deformações do solo. Na análise subsequente, é demonstrado o procedimento formulado para derivar $B_{0(nd)}$ através da relação E_{D0} / E_{Df} .

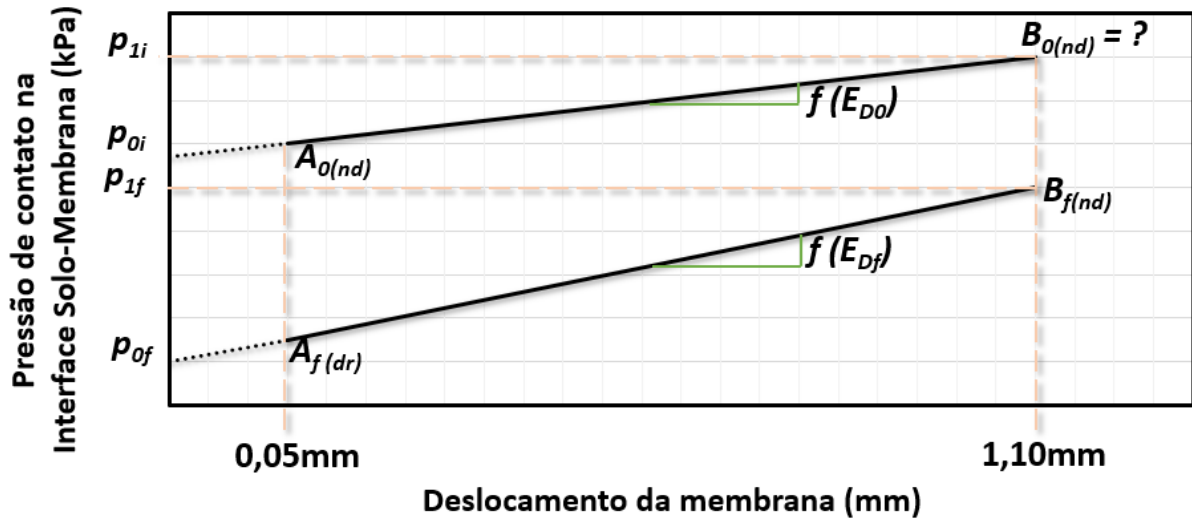


Figura 30: Tensão-deslocamento da membrana pelo ensaio DMT (Fonte: Autor).

As leituras $A_{f(dr)}$ e $B_{f(nd)}$ (para $t = \infty$) são usadas como valores de entrada para determinar as pressões p_0 e p_1 usando as seguintes fórmulas.

$$p_{0f}(t = \infty) = 1,05(A_f - Z_M + \Delta A) - 0,05(B_f - Z_M - \Delta B) \quad (36)$$

$$p_{1f}(t = \infty) = B_f - Z_M - \Delta B \quad (37)$$

onde ΔA e ΔB são as correções determinadas pela calibração de membrana e Z_M , a correção do zero do manômetro.

Baseado em Marchetti e Crapps (1981), $E_{Df}(t = \infty)$ pode ser calculado como:

$$E_{Df}(t = \infty) = 34,7(p_{1f} - p_{0f}) \quad (38)$$

Como mencionado anteriormente, a rigidez pode ser expressão em função do nível de tensões e do índice de vazios (JANBU, 1963).

$$\frac{E_0}{p_a} = k \cdot f(e_0) \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\eta \quad (39)$$

sendo p' o estado de tensões, k e η os parâmetros do solo e p_a , a pressão atmosférica. Conseqüentemente, a mudança no módulo com a variação do estado de tensões pode ser expressa como:

$$\frac{E_{D0(nd)}}{E_{Df}} = \frac{p_a k \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\eta}{p_a k \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\eta} \quad (40)$$

sendo k e η constantes do solo. Assim a equação 40 se torna:

$$\frac{E_{D0(nd)}}{E_{Df}} = \left(\frac{p'_0}{p'_f} \right)^\eta \quad (41)$$

O nível de tensões efetivas adjacente à lâmina dilatométrica ao final da leitura $A_{f(dr)}(p'_f)$ é maior que o nível de tensões imediatamente após interrompida a cravação (p'_0). Sendo assim, para a condição final, após a completa dissipação da poropressão, o estado de tensões efetivo médio p'_f pode ser calculado como:

$$p'_f = \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \approx \left(\frac{\sigma_v + p_{0f} - 2u_0}{2} \right) \quad (42)$$

O estado de tensões médias inicial p'_0 ($t = 0s$) é influenciado pela poropressão de penetração ($u_0 + \Delta u_{pen}$). No DMT, o excesso de poropressão gerado durante a cravação pode ser escrito como ($u_0 + \Delta u_{dis}$) e, tendo Δu_{dis} comportamento equivalente à curva de queda de A durante a dissipação completa ($\Delta u_{dis} \approx \Delta A_{f-i}$), então:

$$(u_0 + \Delta u_{pen}) = (u_0 + \Delta u_{dis}) \cong (u_0 + \Delta A_{f-i}) \quad (43)$$

Logo, p'_0 pode ser expresso como:

$$p'_0 = \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \approx \left(\frac{\sigma_v + p_{0i} - 2(u_0 + \Delta A_{f-i})}{2} \right) \quad (44)$$

Combinando as equações (36), (37), (38), (41), (42) e (44), a única variável é $B_{0(nd)}$:

$$\frac{E_{D0(und)}}{E_{Df}} = \frac{34,7(p_{1i} - p_{0i})}{34,7(p_{1f} - p_{0f})}$$

$$\frac{E_{D0(und)}}{E_{Df}} = \frac{(B_0 - Z_M - \Delta B) - (1,05(A_0 - Z_M + \Delta A) - 0,05(B_0 - Z_M - \Delta B))}{(B_f - Z_M - \Delta B) - (1,05(A_f - Z_M + \Delta A) - 0,05(B_f - Z_M - \Delta B))}$$

$$\frac{E_{D0(und)}}{E_{Df}} = \frac{1,05B_0 - 1,05\Delta B - 1,05A_0 - 1,05\Delta A}{1,05B_f - 1,05\Delta B - 1,05A_f - 1,05\Delta A}$$

$$\frac{E_{D0(nd)}}{E_{Df}} = \frac{B_0 - \Delta B - A_0 - \Delta A}{B_f - \Delta B - A_f - \Delta A} \quad (45)$$

A razão entre os estados de tensões inicial e final, é:

$$\left(\frac{p'_0}{p'_f}\right)^\eta = \left(\frac{\sigma_{vi} + p_{0i} - 2(u_0 + \Delta A_{f-i})}{\sigma_{vf} + p_{0f} - 2(u_0)}\right)^\eta$$

$$\left(\frac{p'_0}{p'_f}\right)^\eta = \left(\frac{\sigma_{vi} - 2(u_0 + \Delta A_{f-i}) + 1,05(A_0 - Z_M + \Delta A) - 0,05(B_0 - Z_M - \Delta B)}{\sigma_{vf} - 2(u_0) + 1,05(A_f - Z_M + \Delta A) - 0,05(B_f - Z_M - \Delta B)}\right)^\eta \quad (46)$$

A partir das equações 45 e 46, a relação expressa através da equação 41, se torna:

$$\frac{B_0 - \Delta B - A_0 - \Delta A}{B_f - \Delta B - A_f - \Delta A} = \left(\frac{\sigma_{vi} - 2(u_0 + \Delta A_{f-i}) + 1,05(A_0 - Z_M + \Delta A) - 0,05(B_0 - Z_M - \Delta B)}{\sigma_{vf} - 2(u_0) + 1,05(A_f - Z_M + \Delta A) - 0,05(B_f - Z_M - \Delta B)}\right)^\eta \quad (47)$$

Podendo ser reescrito como:

$$\frac{B_0 - \Delta B - A_0 - \Delta A}{C} = \left(\frac{D - 0,05(B_0 - Z_M - \Delta B)}{E}\right)^\eta \quad (48)$$

onde,

$$\sigma_{vi} = \sigma_{vf} = \sigma_v$$

$$C = B_f - \Delta B - A_f - \Delta A$$

$$D = \sigma_{vi} - 2(u_0 + \Delta A_{f-i}) + 1,05(A_0 - Z_M + \Delta A)$$

$$E = \sigma_v - 2(u_0) + 1,05(A_f - Z_M + \Delta A) - 0,05(B_f - Z_M - \Delta B)$$

η = propriedade do material (Janbu, 1963).

O valor de $B_{0(nd)}$ é calculado pela igualdade na equação 48, sendo válido quando $E_{D0} < E_{Df}$ e $p'_0 < p'_f$. Para esta solução será recorrido à ferramenta Solver, do Microsoft Excel.

Apesar de fundamentado, o método através da solução da igualdade (equação 48) não é trivial e demanda tempo, sendo inviável sua utilização na prática de engenharia.

Com o objetivo de ampliar a discussão e utilização desta pesquisa, uma abordagem simplificada foi desenvolvida baseada na solução por igualdade, através da simplificação abaixo:

$$\frac{E_{D0}(nd)}{E_{Df}} = \left(\frac{p'_{0}}{p'_{f}}\right)^{\eta} \approx \left(\frac{A_f + \Delta A - u_0}{A_0 + \Delta A - u_0}\right)^{\eta} \quad (49)$$

Sendo B_0 corrigido para condição não drenada através da equação 50, abaixo.

$$B_{0(nd)} = \left(\frac{A_f + \Delta A - u_0}{A_0 + \Delta A - u_0}\right)^{\eta} * (B_f - \Delta B - A_f - \Delta A) + \Delta B + A_0 + \Delta A \quad (50)$$

5.3. CORREÇÃO DA LEITURA B – DISSIPACÃO INCOMPLETA

A leitura A final ($A_{f(dr)}$) é obtida pelo monitoramento da queda de A com o tempo até um valor estável após dissipação completa do excesso de poropressão gerada durante a cravação. Esse procedimento é simples de ser realizado e foi provado com resultados confiáveis em argilas (MARCHETTI et al., 1986; LUTENEGGER; MILLER, 1993). No entanto, dependendo das condições do solo, isso pode exigir um longo período de espera, o que induz à necessidade de reduzir o tempo de ensaio na investigação de rotina comercial.

Um procedimento simples para reduzir o tempo do ensaio consiste em analisar a relação linear obtida quando plotada a variação das leituras de A com a raiz de tempo (\sqrt{t}) durante o período de 2 a 3min, tempo necessário para ter de 6 a 8 leituras consecutivas. Após esse intervalo de tempo, a membrana pode ser inflada para medir a leitura B . Neste caso, a membrana é expandida no momento em que ainda está ocorrendo a dissipação da poropressão Δu_{dis} , estando em condição parcialmente drenada. Esta leitura B em condição parcialmente drenada (B_{pd}) necessita de correção devido aos efeitos da dissipação da poropressão ocorridos durante o intervalo de expansão da membrana. Considerando que a variação da poropressão é aproximadamente igual à variação de A , tem-se que $\Delta u_{dis} \approx \Delta A_{ext}$. Sendo assim, a correção de B_{pd} , $B_{i(nd)}$, é dada pela extrapolação das leituras A (A_{ext}) do DMT plotadas em \sqrt{t} , como apresentada na Figura 31, e calculada através da equação 51.

$$B_{i(nd)} = B_{pd} + \Delta u_{dis} = (A_{pd} + \Delta P) + \Delta u_{dis} \approx B_{pd} + \Delta A_{ext} \quad (51)$$

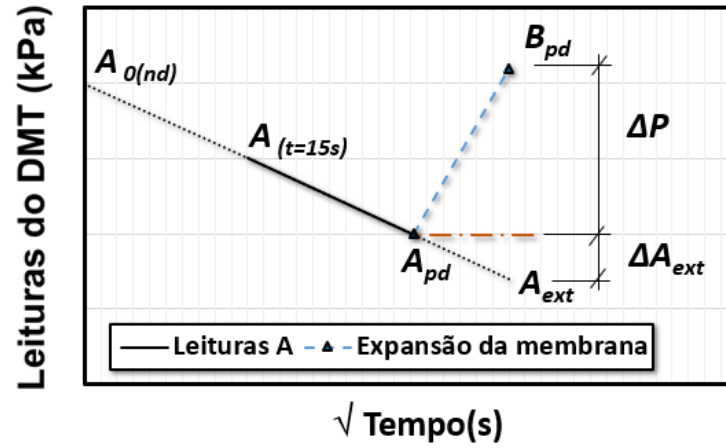


Figura 31: Ensaio com dissipação incompleta com obtenção de A_0 e parâmetros para obtenção de B_i (Fonte: Autor).

E, a partir de $B_{i(nd)}$, B_0 em condição não-drenada, em análise com dissipação incompleta, pode ser calculada através do método simplificado para correção da leitura B , abaixo:

$$B_{0(nd)} = \left(\frac{A_{pd} + \Delta A - u_0}{A_0 + \Delta A - u_0} \right)^\eta * (B_{i(nd)} - \Delta B - A_{pd} - \Delta A) + \Delta B + A_0 + \Delta A \quad (52)$$

6. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Neste capítulo é apresentada a análise paramétrica dos métodos propostos neste trabalho com o objetivo de avaliar a influência da variação de η , variação de σ'_{v0} e da taxa de queda das leituras A , em suas respostas.

A análise paramétrica foi realizada a partir da simulação de condição de drenagem parcial, com monitoramento das leituras A até sua estabilização - dissipação completa. A Tabela 5, abaixo, apresenta os valores utilizados como leituras de A nesta análise.

Tabela 5: Monitoramento das leituras A pelo tempo.

Leituras A (kPa)	372	345	336	315	297	290	274	259	253	248
t (s)	19	69	135	270	560	1081	2170	4320	8575	57675
\sqrt{t} (s)	4,38	8,30	11,62	16,43	23,66	32,88	46,58	65,73	92,60	240,16

Além disso, como dados iniciais de entrada, tem-se:

$\Delta A = 10\text{kPa}$; $\Delta B = 50\text{kPa}$; $Z_M = 0$; $u_0 = 20\text{kPa}$; $\sigma'_{v0} = 25\text{kPa}$; $\eta = 0,8$; $B_f = 760\text{ kPa}$; $\Delta A_{f-i} = 124\text{kPa}$ e; $B_f - A_f = 512\text{kPa}$.

A partir dos dados de entrada, tem-se como valores de referência:

$I_D = 0,9$; $K_D = 15\text{kPa}$; $E_D = 11\text{MPa}$; $K_0 = 2,32$; $\text{OCR} = 22,5$; $S_u = 66,5$; $S_u/\sigma'_{v0} = 2,66$ e $M_{DMT} = 31,6\text{MPa}$

Os dados de correção das leituras por conta da rigidez da membrana (ΔA , ΔB e Z_M), bem como a poropressão de equilíbrio (u_0) se manterão constantes em todas as análises desde capítulo.

6.1. VARIACÃO DE η

A variável η foi introduzida por Janbu (1963) na equação que expressa a rigidez do solo em função do nível de tensões (P') e índice de vazios (e_0) (equação 39), servindo de base para o desenvolvimento do método da igualdade. Segundo Janbu (1963), os valores de η variam entre 0 e 1, sendo expresso através da Figura 32.

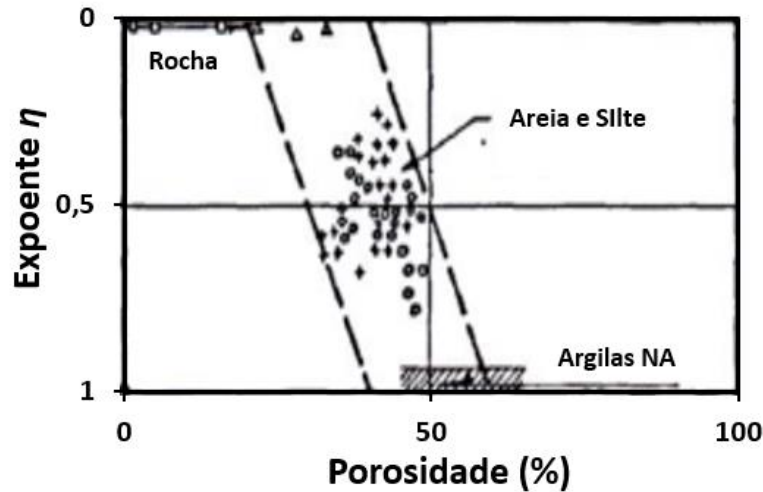


Figura 32: Valores de η por material (JANBU, 1963).

Nesta análise foram mantidos constantes σ'_{v0} , u_0 , as leituras A , e por consequência, são constantes também A_f , $(B_f - A_f)$, B_f , ΔA_{f-i} e taxa de queda de A .

A variação de η ocorreu de forma crescente através dos valores: 0,75, 0,80, 0,85, 0,90 e 1,00. Sendo $\eta = 0,80$ o valor de referência utilizado na aplicação dos métodos de interpretação no capítulo 7.

Mantidas constantes as leituras A , $A_{0(nd)}$ não é influenciada por η , mantendo-se constante independente da variação de η .

Aumentar o valor de η representa assumir a diminuição da capacidade de drenagem do solo, portanto, como discutido na seção 2.3.1., quanto maior η , menor a diferença entre p_1 e p_0 . Como pode ser visto através da Tabela 6, ambos os métodos de interpretação (igualdade e simplificado) apresentam este comportamento, possuindo a mesma taxa de queda de $(p_1 - p_0)$.

Tabela 6: Diferença $(p_1 - p_0)$ com aumento de η .

Igualdade	η	0,75	0,80	0,85	0,90	1,00
		$(P_1 - P_0)$	326,55	319,20	311,85	305,55
Simplificado						
	$(P_1 - P_0)$	332,82	325,04	317,44	310,02	295,69
$(P_1 - P_0)_{\text{simp}} / (P_1 - P_0)_{\text{igualdade}}$		1,02	1,02	1,02	1,01	1,01

Com objetivo de facilitar a identificação de tendência comportamento dos métodos com a variação de η foram geradas Figuras considerando os valores normalizados pelo valor equivalente ao η de referência ($\eta = 0,8$).

Através das Figuras 33 e 34 apresentadas a baixo, obtidas através do método pela igualdade, é possível verificar que a variação de η implica na diminuição dos parâmetros I_D , E_D e M_{DMT} , enquanto K_D , K_0 , S_u , S_u/σ'_{v0} e OCR não são influenciados.

Nas Figuras 35 e 36, são apresentadas comparações entre o método pela igualdade e o método simplificado, onde nesta análise, o método simplificado apresentou resultados coincidentes com os do método pela igualdade.

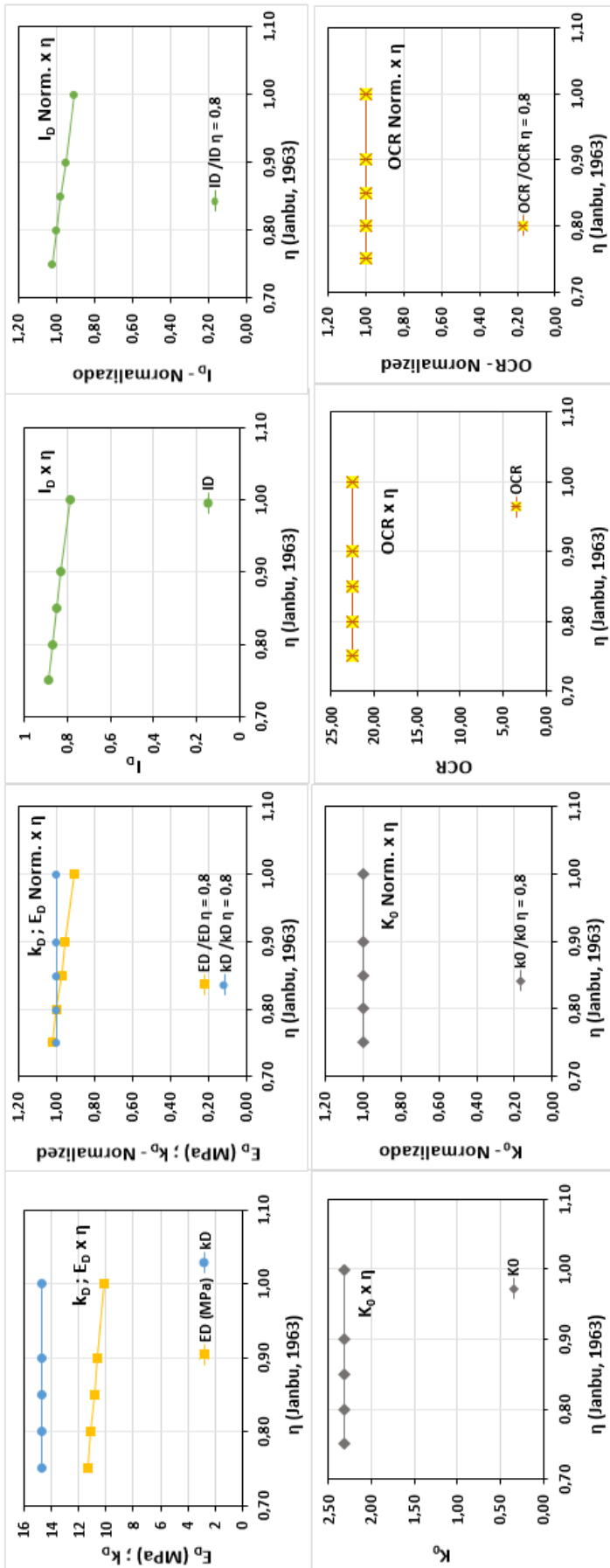


Figura 33: Influência da variação de η nos parâmetros I_D , E_D , k_D , K_θ e OCR.

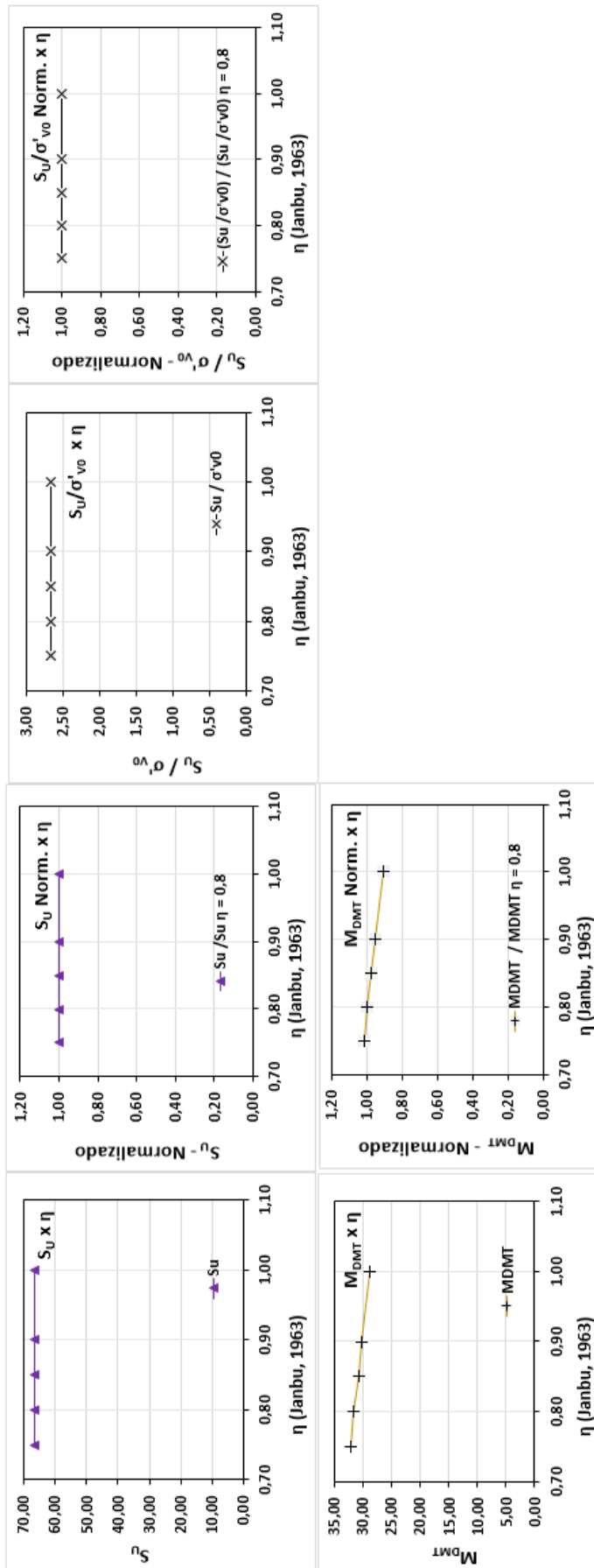


Figura 34: Influência da variação de η nos parâmetros M_{DMT} , S_u , e S_u / σ'_{v0} .

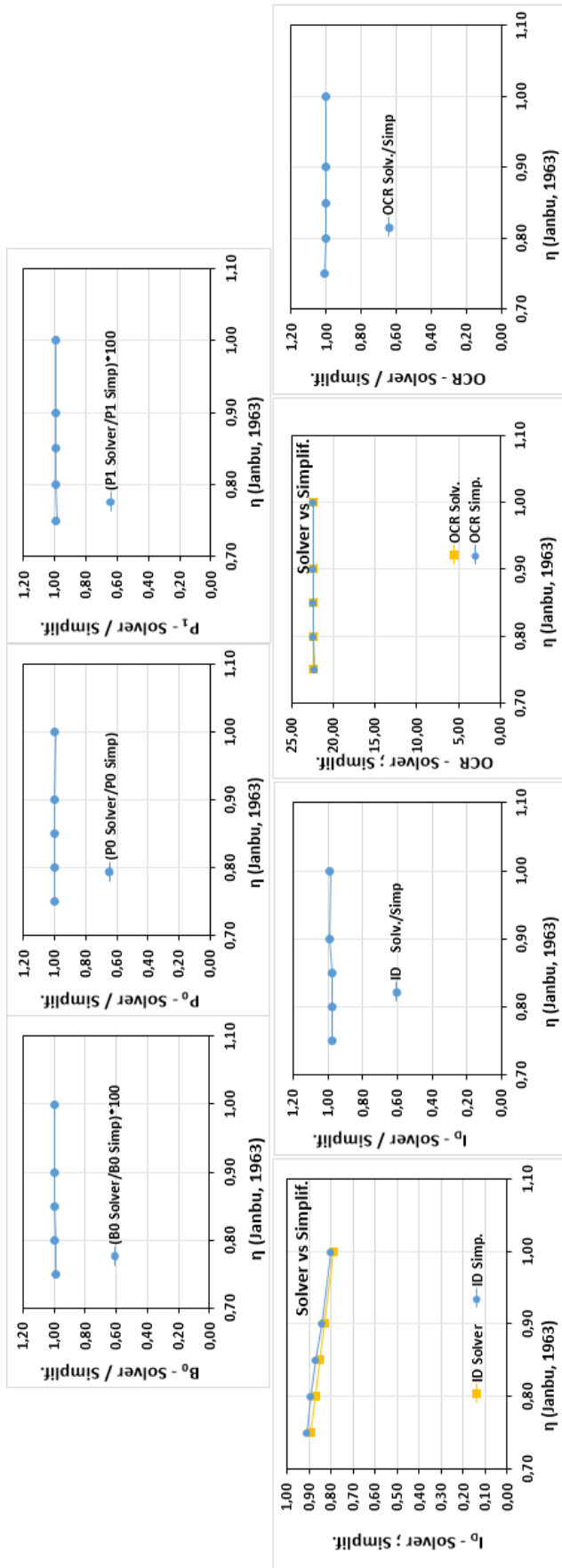


Figura 35: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de η .

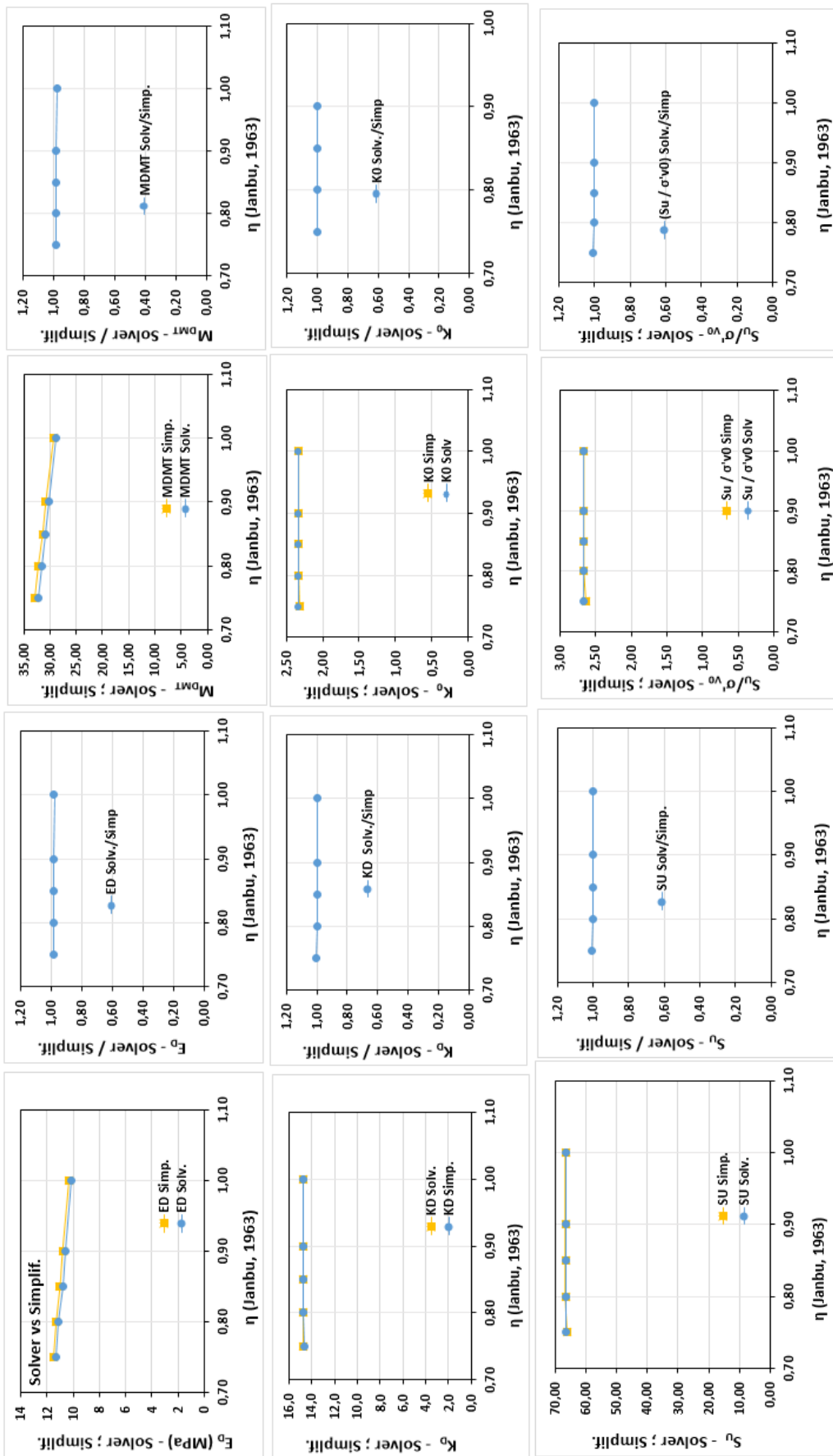


Figura 36: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de η .

6.2. VARIACÃO DA σ'_{v0}

Como vimos na seção 5.2., o método da igualdade foi desenvolvido a partir da razão entre o módulo após a estabilização das leituras (nível de tensão final, P'_f) e o módulo na condição não-drenada em $t=0s$ (nível de tensão inicial, P'_0). Portanto, variar σ'_{v0} implica em variar a magnitude das leituras A e B , que por consequência, impactará nos resultados de $A_{0(nd)}$ como apresentado na Figura 37. Nesta análise foram mantidos constantes u_0 , η , ΔA_{f-i} , taxa de queda de A e; por conta da variação do estado de tensões foram variados A_f , $(B_f - A_f)$, B_f , além de σ'_{v0} que variou de 25 a 200kPa. Os valores de B_f foram definidos de modo que I_D se mantivesse constante e próximo de 0,9 (valor de referência obtido através dos dados iniciais).

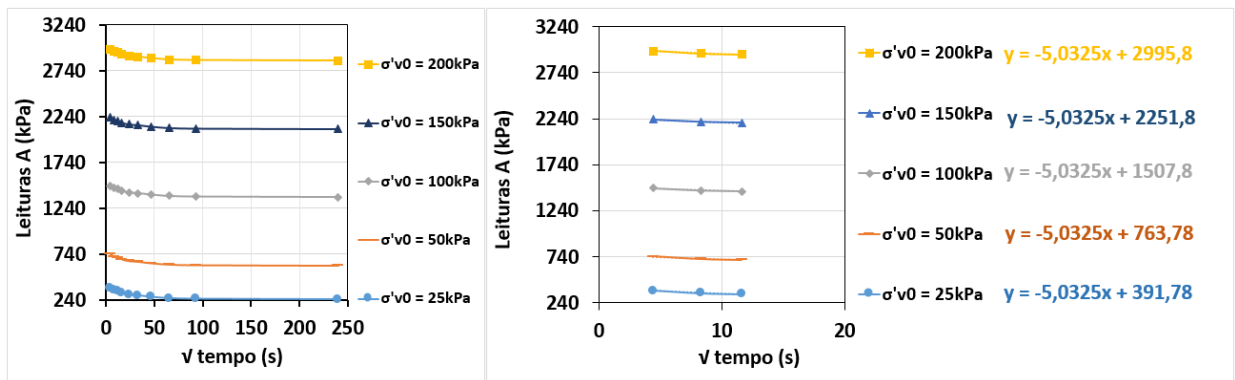


Figura 37: Influência da variação de σ'_{v0} nas leituras A e em $A_{0(nd)}$.

Para um mesmo solo, o aumento de σ'_{v0} implica no aumento das leituras do DMT, assim, quando maior σ'_{v0} , maior os valores de p_1 e p_0 . E, como equacionado por Janbu (1963), o módulo de deformabilidade do solo é proporcional ao nível de tesões, logo, é esperado que o aumento de σ'_{v0} conduza ao aumento do módulo E_D em virtude do seu aumento da rigidez. Portanto, através da equação 6, e com base nas hipóteses consideradas, E_D aumenta quando a diferença $(p_1 - p_0)$ aumenta (cabe salientar que não há comprovação experimental para justificar estas premissas).

Como pode ser visto através da Tabela 7, ambos os métodos de interpretação (igualdade e simplificado) apresentam comportamento similar e condizente com o ensaio e comportamento do solo.

Tabela 7: Diferença (p_1-p_0) com aumento de σ'_{v0} .

Igualdade	σ'_{v0}	25,00	50,00	100,00	150,00	200,00
	(P₁-P₀)	319,20	592,20	1171,20	1750,22	2329,25
Simplificado	(P₁-P₀)	325,04	567,72	1121,01	1680,90	2241,35
(P₁-P₀) simp / (P₁-P₀) Igualdade		1,02	0,96	0,96	0,96	0,96

Com objetivo de facilitar a identificação de tendência comportamento dos métodos com a variação de σ'_{v0} , foram geradas Figuras considerando os valores normalizados pelo valor equivalente ao σ'_{v0} de referência ($\sigma'_{v0} = 25\text{kPa}$).

Através das Figuras 38 e 39 apresentadas a baixo, obtidas através do método pela igualdade, é possível verificar que a variação de σ'_{v0} implica no aumento das leituras A e B e dos parâmetros E_D , S_u , e M_{DMT} , enquanto I_D , K_D , K_0 , S_u/σ'_{v0} e OCR mantiveram-se constantes.

Nas Figuras 40 e 41, são apresentadas comparações entre o método pela igualdade e o método simplificado, onde nesta análise, o método simplificado apresentou resultados coincidentes com os do método pela igualdade.

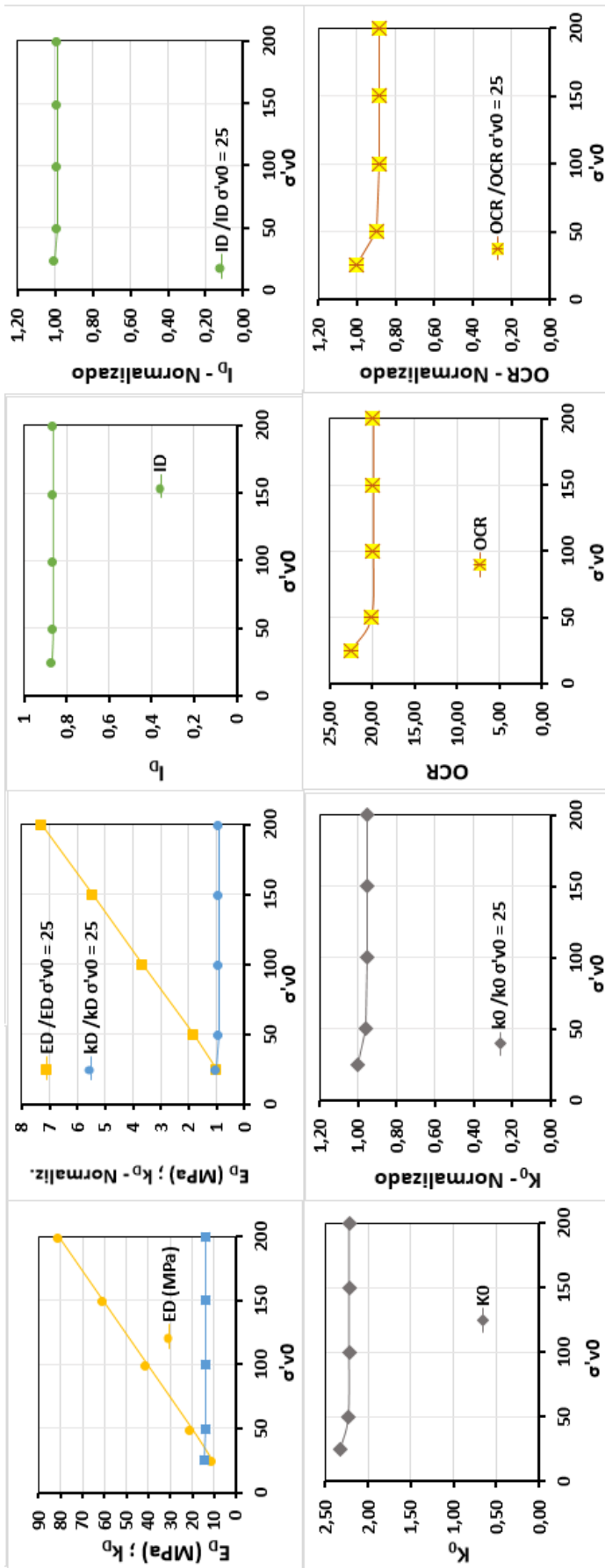


Figura 38: Influência da variação de σ'_{v0} nos parâmetros I_D , E_D , K_D , K_0 e OCR .

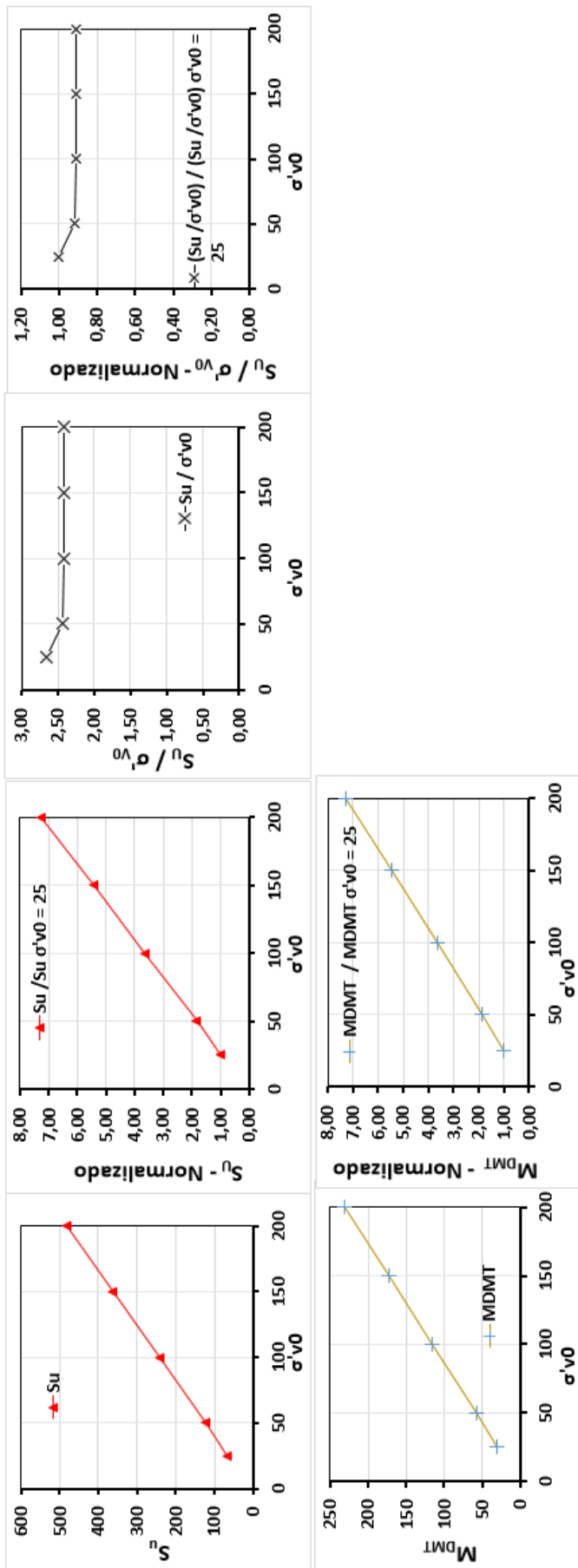


Figura 39: Influência da variação de σ'_{v0} nos parâmetros M_{DMT} , S_u , e S_u/σ'_{v0} .

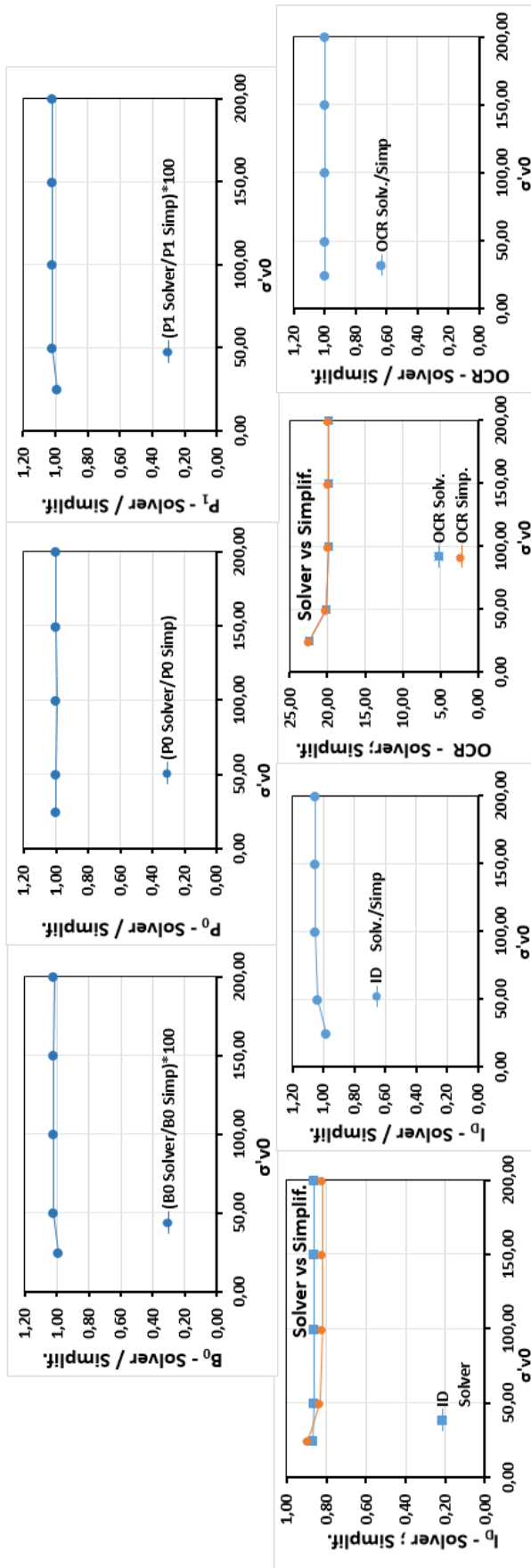


Figura 40: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de σ'_{v0} .

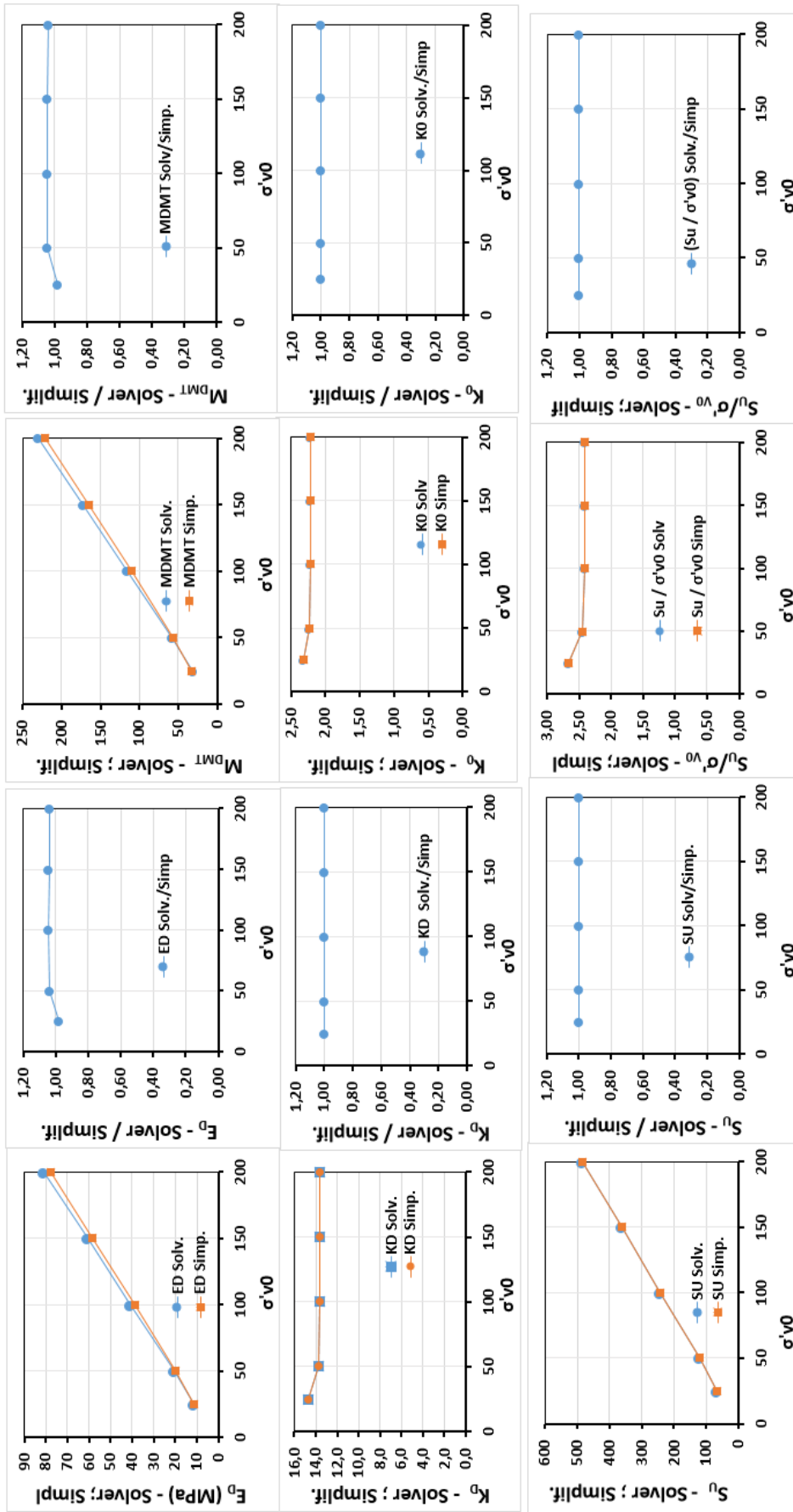


Figura 41: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de σ'_{v0} .

6.3. VARIACÃO DA TAXA DE QUEDA DA LEITURA A

A taxa de queda das leituras A é um parâmetro que indica o potencial de dissipação do excesso de poropressão gerado no solo estudado. Quanto maior a taxa de queda de A , maior a capacidade dissipação e, portanto, maiores serão as correções para condição não-drenada, $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$. Neste sentido, o aumento da taxa de queda das leituras A implica no aumento de $A_{0(nd)}$, como apresentado na Figura 42. O símbolo “ m ” foi utilizado como indicador de inclinação da reta formada pelos primeiros 2 minutos de leituras A no gráfico A por \sqrt{t} . Quanto menor valor de m , maior a inclinação da reta e, portanto, maior a taxa de queda.

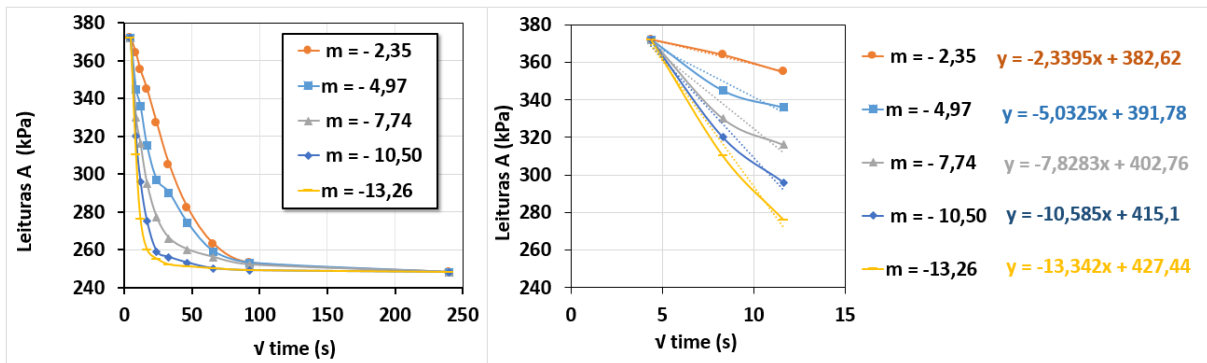


Figura 42: Influência da variação de m nas leituras A e em $A_{0(nd)}$.

Nesta análise foram mantidos constantes A_f , σ'_{v0} , u_0 e ΔA_{f-i} , sendo η , B_f , $(B_f - A_f)$ as variáveis consideradas, além da taxa de queda de A cuja inclinação variou de $m = -2,35$ (menos drenado) a $-13,26$ (mais drenado). O valor de $m = -4,97$ foi utilizado como referência na geração dos gráficos normalizados por ser a inclinação obtida através dos dados iniciais de entrada. A variação da taxa de queda da leitura A implica em considerar que estão sendo analisados solos que permitam diferentes condições de drenagem para um mesmo t , portanto, η variou de 0,85 para $m = -2,35$ a 0,5 para $m = -13,26$. Além disso, espera-se que quanto mais drenado for a condição, maior será o valor de B_f e $(B_f - A_f)$. Desta forma, variou-se B_f de modo que resultasse em valores de I_D representativos às taxas de queda de A .

Sabendo que o aumento da inclinação da reta (m) representa o aumento da drenagem, espera-se que ocorra maior diferença entre p_1 e p_0 quanto maior for a inclinação m (ver seção 2.3.1.). E, como pode ser visto através da Tabela 8, ambos os métodos de interpretação (igualdade e simplificado) apresentaram este comportamento.

Tabela 8: Diferença (p_1-p_0) com aumento de A .

Solver	m	-2,35	-4,97	-7,74	-10,50	-13,26
	(P1-P0)	284,55	319,20	358,05	404,67	442,05
Simplified	(P1-P0)	311,97	327,47	342,72	370,14	392,35
(P₁-P₀)_{Simp} / (P₁-P₀)_{Igualdade}		1,10	1,03	0,96	0,91	0,89

Através das Figuras 43 e 44 apresentadas a baixo, obtidas através do método pela igualdade, é possível verificar que a variação de m implica no aumento da correção $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$ (quanto mais drenado, maior a correção) e maior a diferença ($p_1 - p_0$). Os parâmetros I_D , K_D , E_D , S_u , M_{DMT} , K_0 , S_u/σ'_{v0} e OCR também aumentaram. Como OCR representa o histórico de carregamento do solo, o mesmo deveria permanecer constante. No entanto, seu comportamento crescente se deu pelo aumento de p_0 enquanto σ'_{v0} e u_0 foram mantidos constante.

Nas Figuras 45 e 46 são apresentadas comparações entre o método da igualdade e o método simplificado, sendo que nesta análise o método simplificado, de maneira geral, apresentou resultados similares com aqueles obtidos através do método da igualdade.

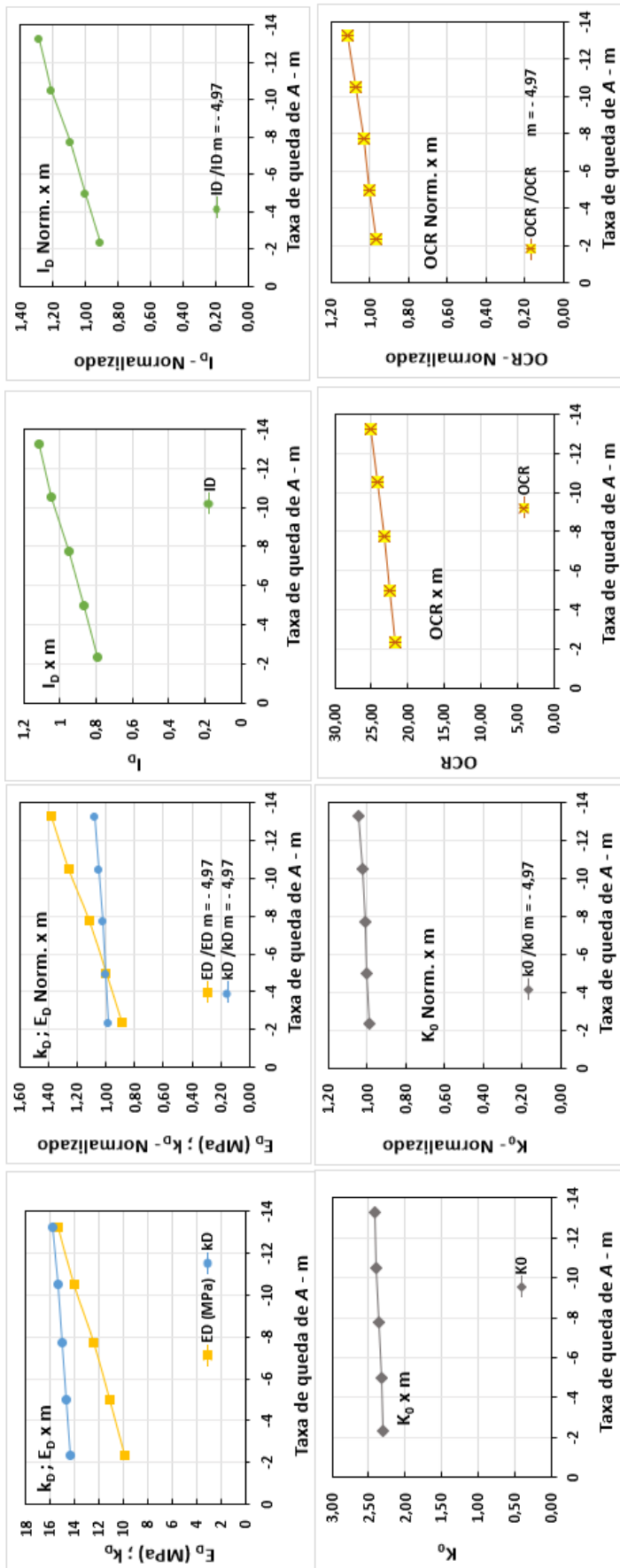


Figura 43: Influência da variação de m nos parâmetros I_D , E_D , K_D , K_0 e OCR .

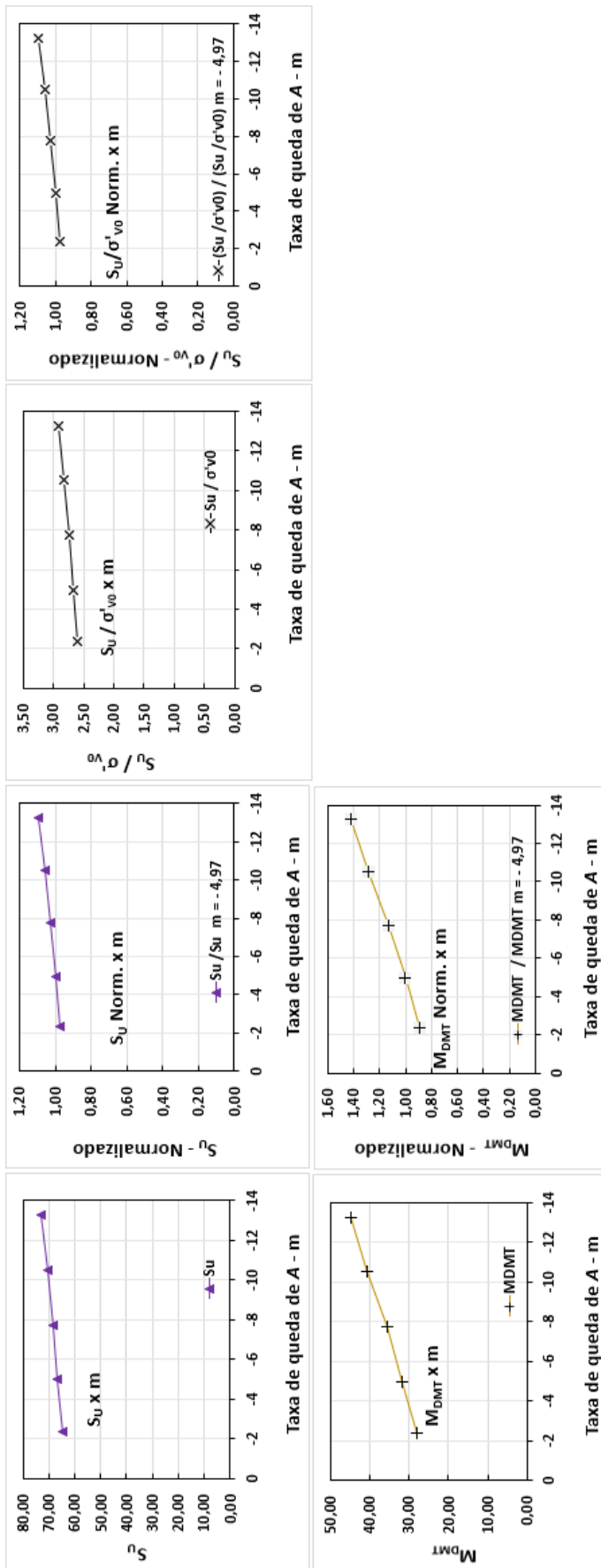


Figura 44: Influência da variação de m nos parâmetros M_{DMT} , S_u , e S_u/σ'_{v0} .

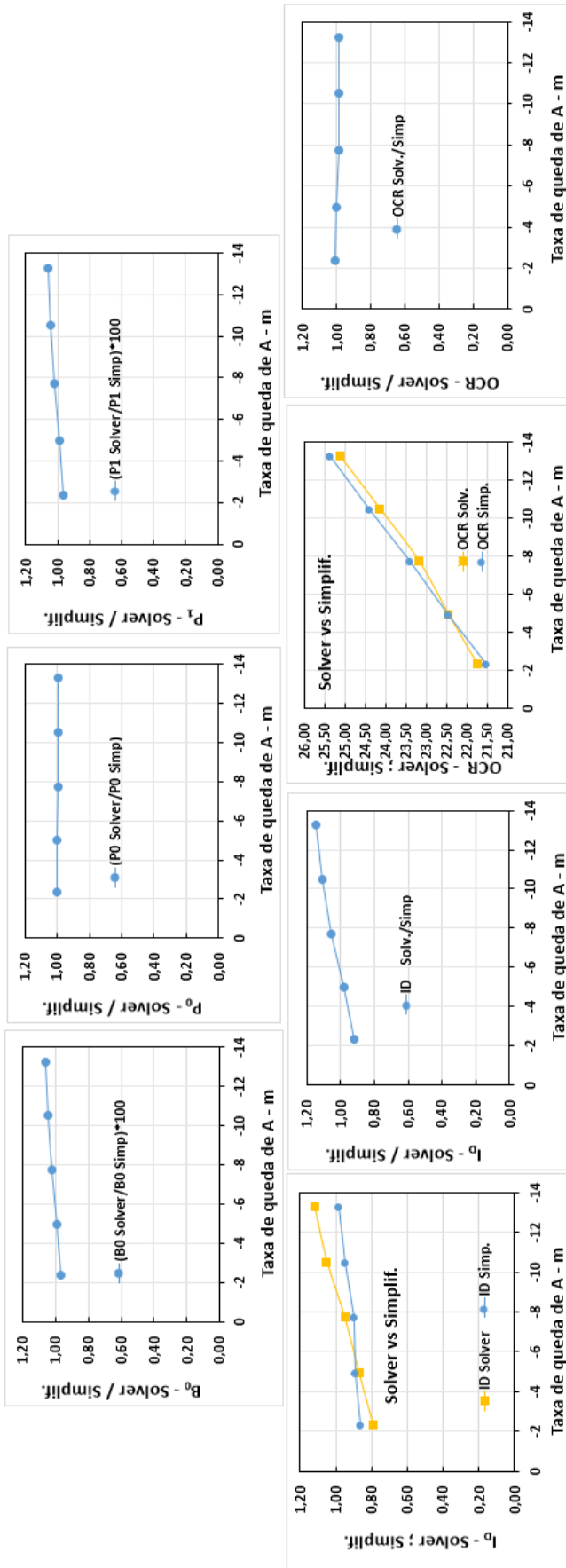


Figura 45: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de m.

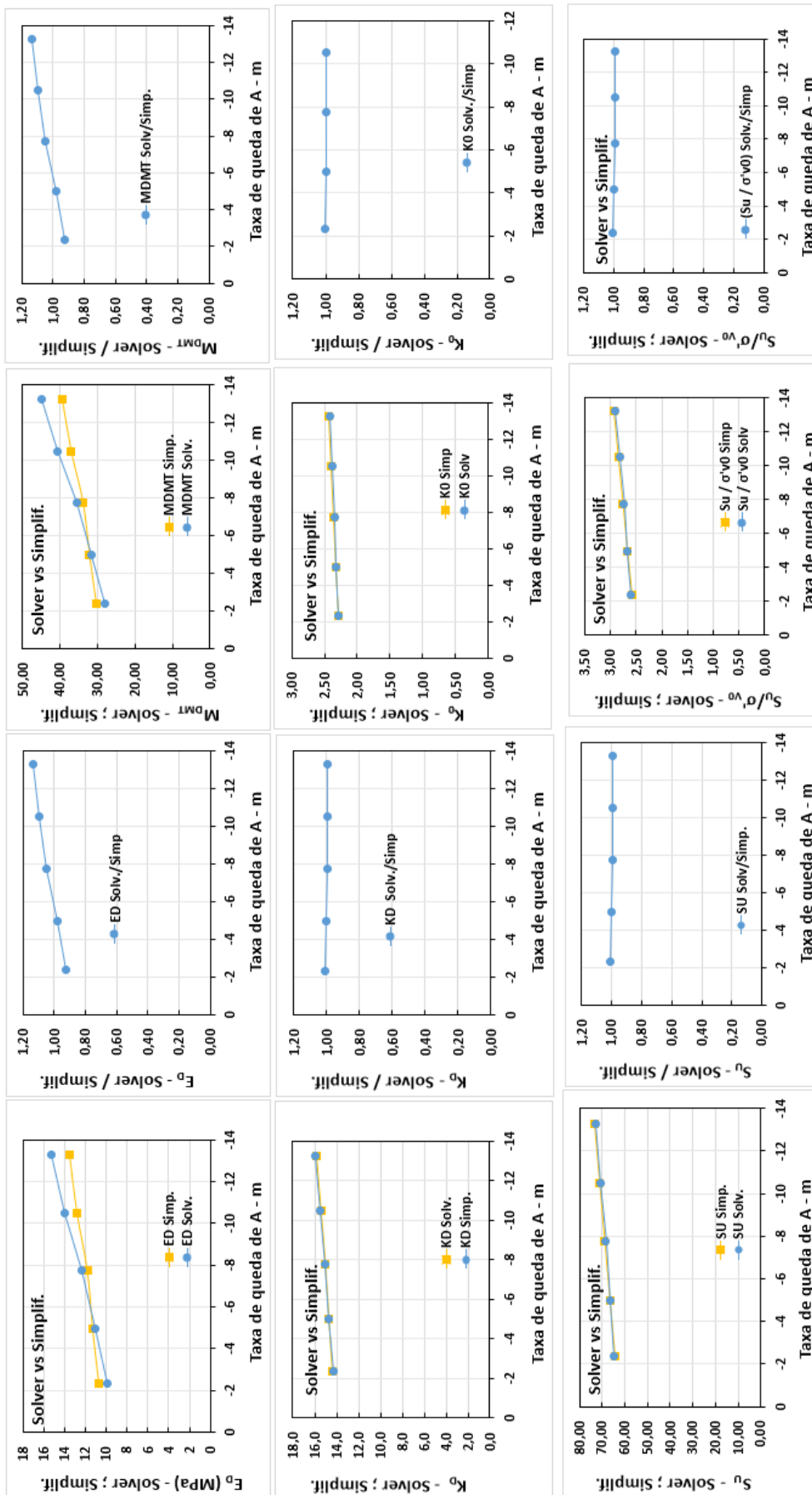


Figura 46: Comparação entre os métodos da igualdade e simplificado com a variação de m

7. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta a validação dos métodos propostos em solo argiloso do campo experimental de Tubarão, SC. Posteriormente o método é aplicado a solos de outros locais, nos quais o procedimento proposto, não padronizado, foi adotado na execução dos ensaios.

7.1. VALIDAÇÃO DO MÉTODO EM ARGILAS

A validação é obtida a partir de uma série de ensaios realizados em argila por meio de comparação entre os resultados medidos a partir da expansão utilizando o procedimento convencional do DMT, consagrado na engenharia geotécnica para interpretação de ensaios em condição não-drenada e o procedimento alternativo proposto neste trabalho. A realização do ensaio padrão em argilas assegura a condição não-drenada do ensaio, servindo de comparação com os resultados do ensaio especial, no qual os tempos de leitura foram propositalmente ampliados, forçando drenagem do solo para, posteriormente, corrigir os resultados e verificar se os mesmos são representativos da condição não-drenada.

7.1.1. Campo experimental de Tubarão (dissip. completa em 8 e 9m).

Para comparação com DMT padrão foram realizados dois ensaios com procedimento especial, cujas leituras de A foram monitoradas por mais de 10000s, até a estabilização dos valores – ensaio com dissipação completa. Uma sequência cronometrada de leituras A até sua estabilização é apresentada na Figura 47 para as profundidades de 8m e 9m.

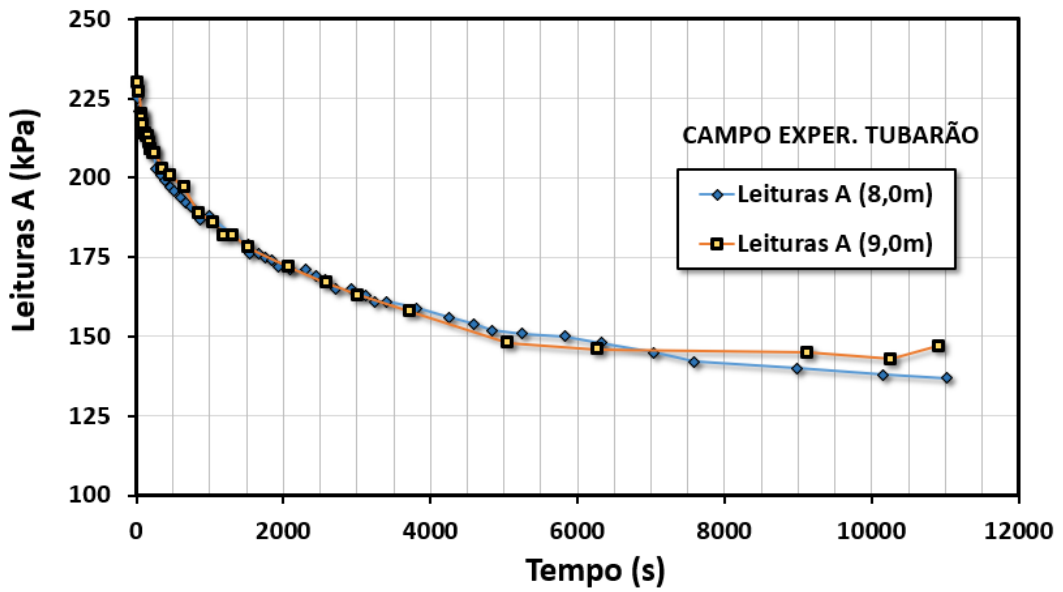


Figura 47: Sequência de leituras A em 8 e 9m de profundidade (Fonte: Autor).

Para correção da leitura A foi utilizado o método expedito – a comparação entre o método expedito e Weibull encontra-se em anexo. A partir da análise das primeiras leituras de A, A_0 foi obtido e representado através da Figura 48.

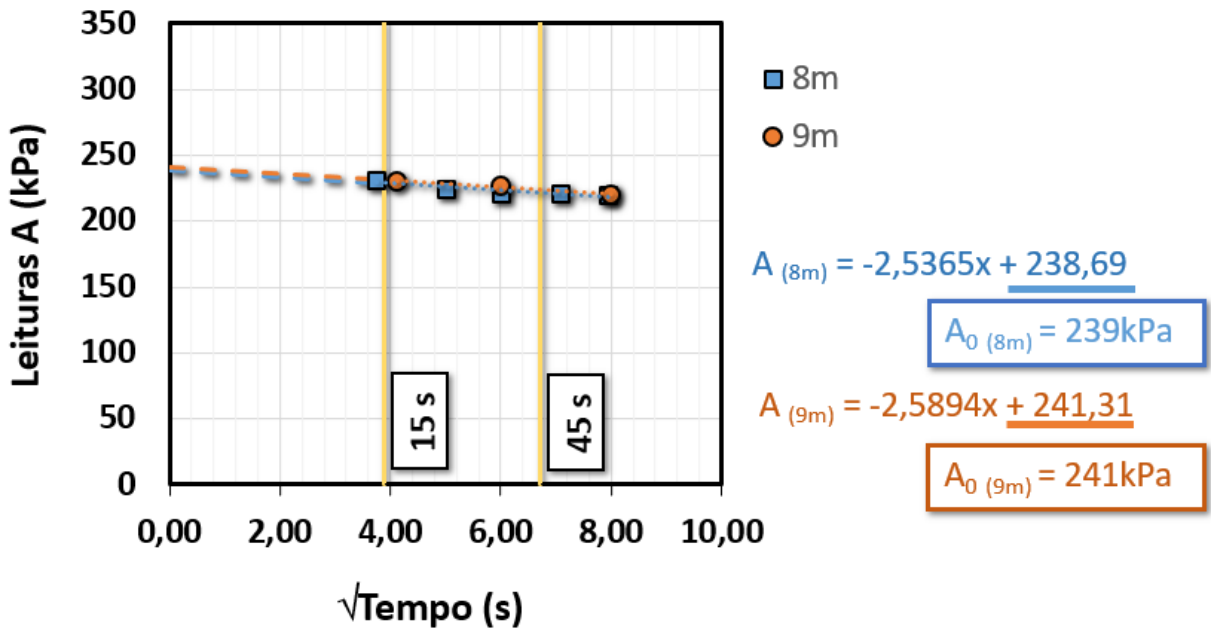


Figura 48: Correção de A pelo método expedito (Fonte: Autor).

Através do método expedito tem-se então que:

- Para 8m: $A_{0(nd)} = 239\text{kPa}$
- Para 9m: $A_{0(nd)} = 241\text{kPa}$

Para realizar a correção de B é necessário calcular uma série de dados de entrada, apresentados nas Figuras 49 e 50 das planilhas criadas para utilização do Solver, do Excel.

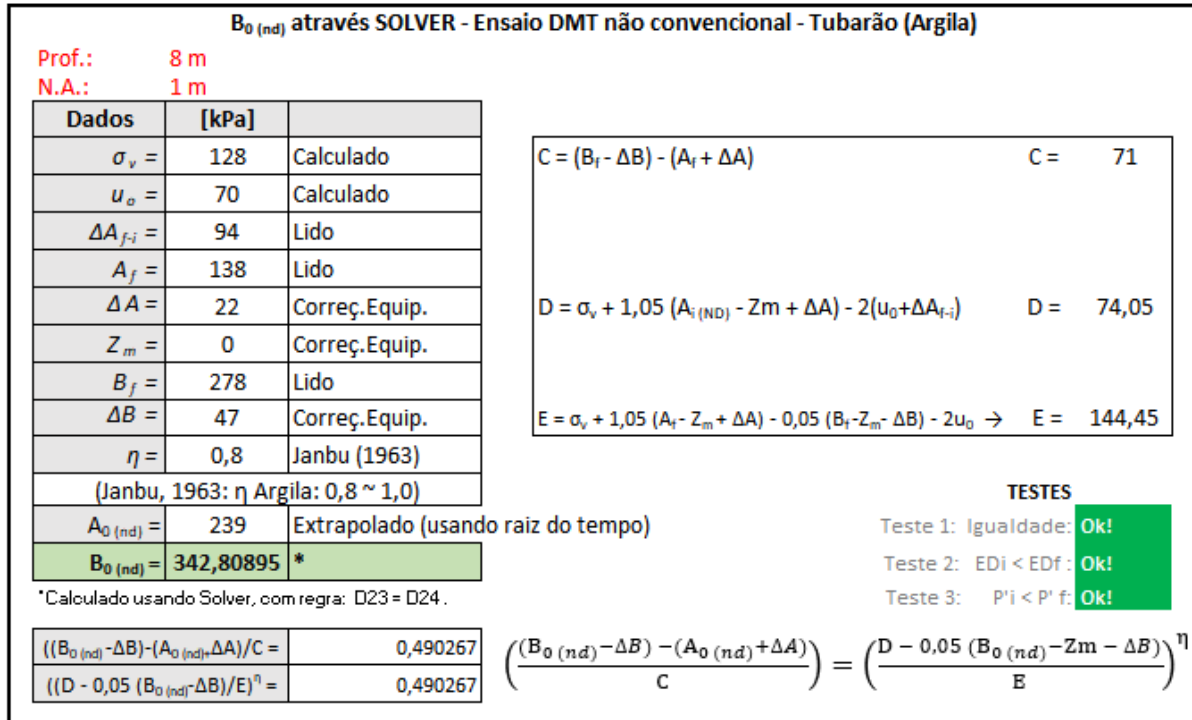


Figura 49: Cálculo de $B_{0(nd)}$ através do Solver para 8m de profundidade (Fonte: Autor).

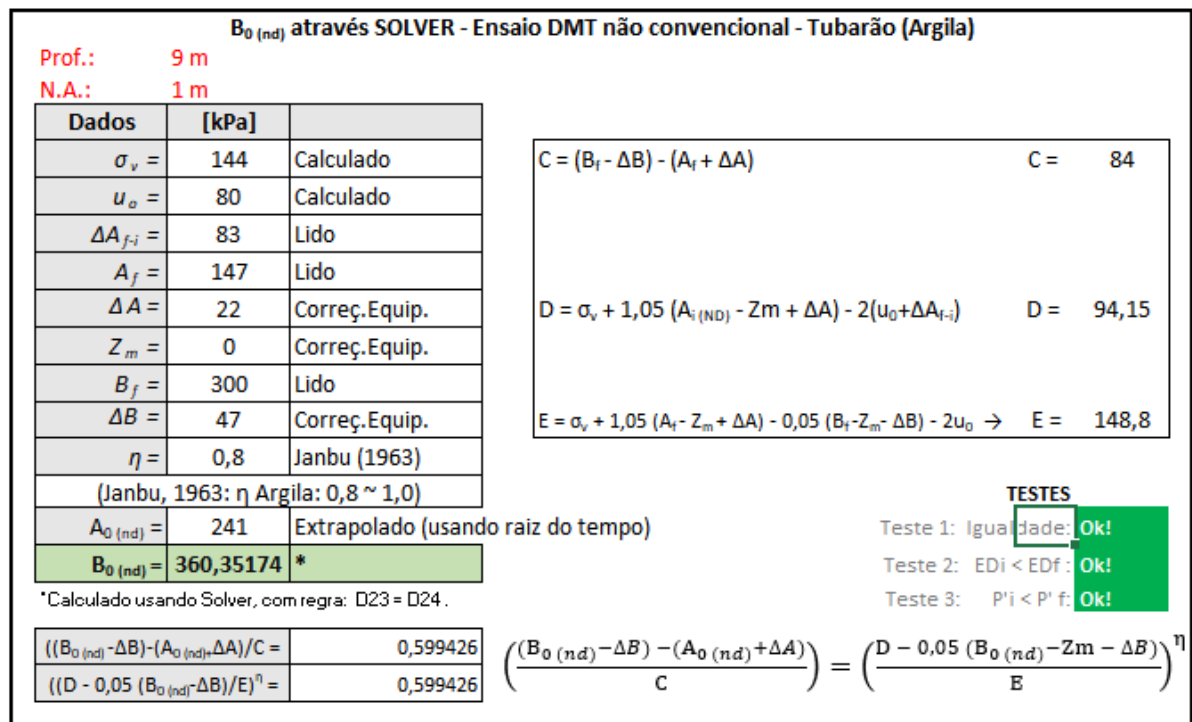


Figura 50: Cálculo de $B_{0(nd)}$ através do Solver para 9m de profundidade (Fonte: Autor).

Através da ferramenta Solver do Excel, os valores de B correspondente à condição não-drenada, são:

- Em $t = 0$: $B_{(8m)} = B_{0(nd)} = 343\text{kPa}$;
- Em $t = 0$: $B_{(9m)} = B_{0(nd)} = 361\text{kPa}$.

O Solver apresenta como retorno o valor da única variável que não é conhecida na igualdade representada pela equação 48. O valor de η foi escolhido baseado na Figura 32 apresentada por Janbu (1963), onde para argilas η varia entre 0,8 a 1,0.

Os valores de A_f são os últimos valores de A após sua estabilização e, B_f os valores de B pela expansão da membrana após lido A_f . ΔA_{f-i} é a diferença entre o último A lido (A_f) e o primeiro A lido pelo equipamento, geralmente em 15s após o término da cravação, (A_i).

Em posse dos pares $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$, a metodologia de interpretação do ensaio segue com o uso das equações clássicas do ensaio DMT para a obtenção dos parâmetros intermediários (I_D , K_D e E_D). A partir dos parâmetros intermediários são obtidos os parâmetros do solo, como já discutido ao longo deste trabalho. Para o ensaio em questão, na Tabela 9 são apresentados os parâmetros obtidos através do procedimento proposto neste trabalho para 8 e 9m de profundidade e o procedimento convencional.

Tabela 9: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial.

Z (m)	P ₀ (kPa)	P ₁ (kPa)	u ₀ (kPa)	γ _d (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	Parâmetros Intermediários			K ₀	OCR	S _u (kPa)	S _u / σ' _{vo}	M _{DMT}	
						E ₀ (Mpa)	I ₀	k ₀					RM ≥0,85	(Mpa)
0,00	0	0	0	16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	63,1	103,00	0	16	16,0	1,4	0,6	3,9	1,0	2,8	8,1	0,51	1,53	2,15
2,00	87,1	106,00	10	16	22,0	0,7	0,2	3,5	0,9	2,4	9,7	0,44	1,42	1,00
3,00	115,7	165,00	20	16	28,0	1,7	0,5	3,4	0,9	2,3	12,0	0,43	1,39	2,37
4,00	132,0	154,00	30	16	34,0	0,8	0,2	3,0	0,8	1,9	12,4	0,37	1,27	1,01
5,00	167,4	222,00	40	16	40,0	1,9	0,4	3,2	0,8	2,1	15,8	0,40	1,33	2,53
6,00	182,7	231,00	50	16	46,0	1,7	0,4	2,9	0,8	1,8	16,1	0,35	1,23	2,09
7,00	222,0	265,00	60	16	52,0	1,5	0,3	3,1	0,8	2,0	19,8	0,38	1,30	1,95
8,00	259,3	296,00	70	16	58,0	1,3	0,2	3,3	0,8	2,2	23,9	0,41	1,36	1,77
8,20	263,8	311,00	72	16	59,2	1,6	0,2	3,2	0,8	2,1	23,4	0,40	1,33	2,13
8,40	271,8	318,00	74	16	60,4	1,6	0,2	3,3	0,8	2,2	24,8	0,41	1,36	2,18
8,60	248,5	301,00	76	16	61,6	1,8	0,3	2,8	0,7	1,7	20,6	0,34	1,20	2,15
8,80	235,1	296,00	78	16	62,8	2,1	0,4	2,5	0,7	1,4	18,3	0,29	1,08	2,27
9,00	260,8	313,82	80	16	64,0	1,8	0,3	2,8	0,7	1,7	21,4	0,34	1,20	2,15

O perfil de comportamento geotécnico do local estudado é apresentado nas Figuras 51 e 52, onde nas profundidades de 8 e 9m são destacados os parâmetros obtidos através do método especial com dissipação completa de poro pressões e pela equação da igualdade (equação 48). Nas demais cotas são apresentados os parâmetros geotécnicos obtidos a partir do ensaio DMT convencional.

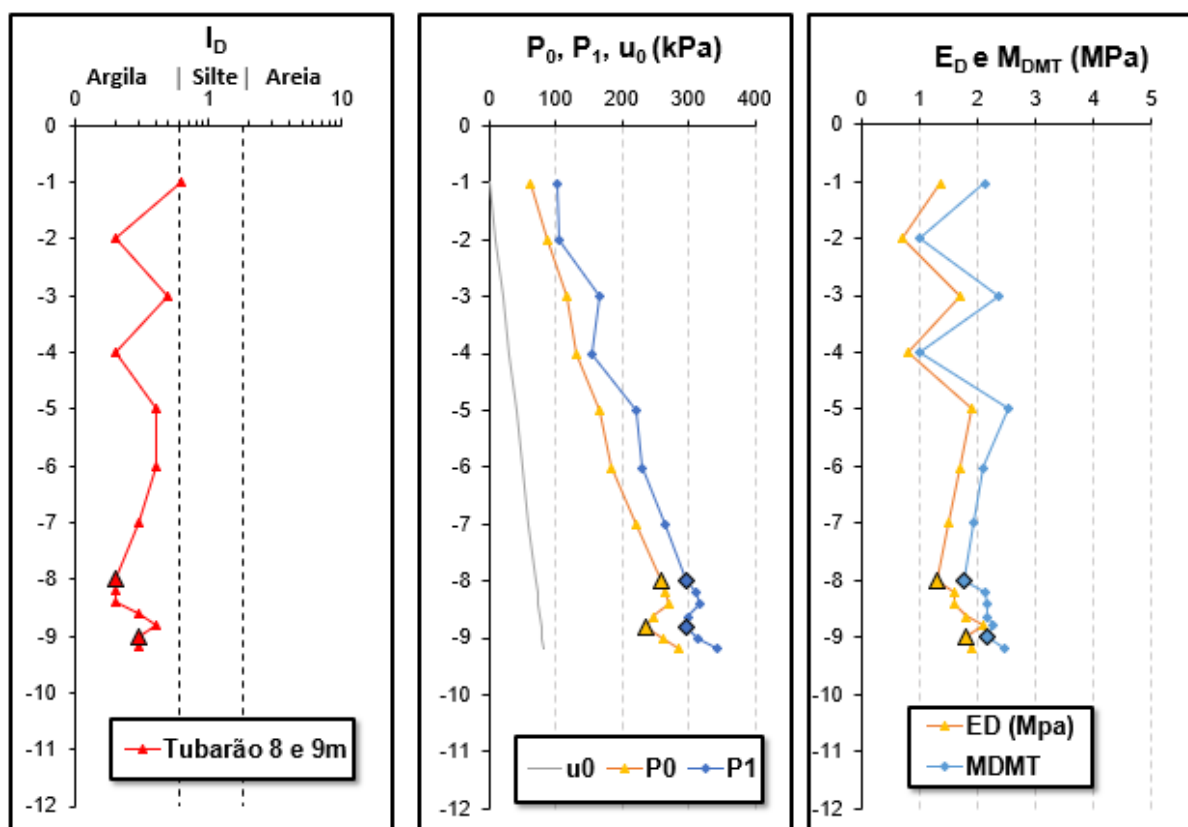


Figura 51: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

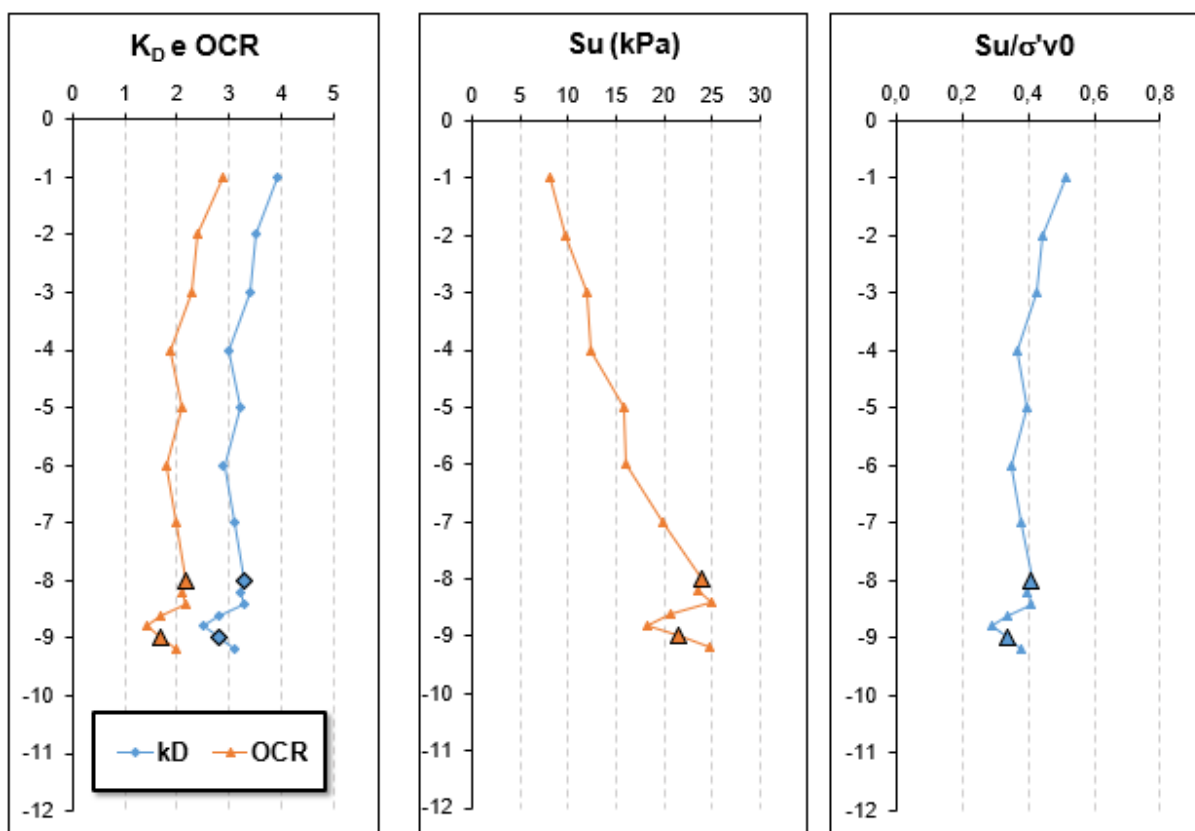


Figura 52: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

Além do método especial dado pela solução da igualdade (equação 48), a correção da leitura B foi feita através do método simplificado (equação 50). Na Tabela 10 é apresentado o comparativo entre os resultados obtidos por ambos os métodos de correção.

Tabela 10: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.

Ensaio Especial					Ensaio Convencional		
Prof. (m)	A_0 (Weibull) (kPa)	$A_0(\sqrt{t})$ (kPa)	B_0^a (kPa)	B_0^b (kPa)	Prof. (m)	A (kPa)	B (kPa)
8,00	233	239	343	347	8,20	244	358
9,00	234	241	361	369	8,80	216	343

^a Eq. (48): Análise por método da igualdade

^b Eq. (50): Análise simplificada

A Tabela 11, a seguir, apresenta os parâmetros geotécnicos do solo obtidos através do método da igualdade, analisado com auxílio da ferramenta Solver Microsoft Excel, e método simplificado. Notar que as 2 abordagens fornecem valores da mesma ordem de grandeza e comparáveis com as estimativas dos resultados obtidos a partir de ensaios padronizados.

Tabela 11: Comparação entre os métodos igualdade e simplificado.

Parâmetros Intermediários				Parâmetros Geotécnicos				
Prof. (m)	E_D (MPa)	I_D	k_D	K_0	OCR	S_u (kPa)	S_u / σ'_{v0}	M_{DMT}
8m (Solver)	1,3	0,2	3,3	0,8	2,2	23,9	0,41	1,77
8m (Simplif.)	1,4	0,2	3,3	0,8	2,2	23,9	0,41	1,91
9m (Solver)	1,8	0,3	2,8	0,7	1,7	21,4	0,34	2,15
9m (Simplif.)	1,7	0,3	2,8	0,7	1,7	21,4	0,34	2,03

7.1.2. Bologna, Itália (dissip. completa em 19,2m)

Neste sítio, em Bologna, Itália, está sendo construído uma linha de trem de alta velocidade (TAV) onde foram realizadas leituras do ensaio DMT convencional ao longo de 28m de profundidade, sendo que aos 19,20m de profundidade foi realizado o ensaio especial com dissipação completa. O perfil de solo é predominantemente siltoso, possuindo camada argilosa normalmente adensada entre os 18,80m e 22m de profundidade.

A Figura 53 apresenta a investigação geotécnica obtida pelo ensaio convencional, destacando a realização do ensaio especial em camada argilosa em 19,20m.

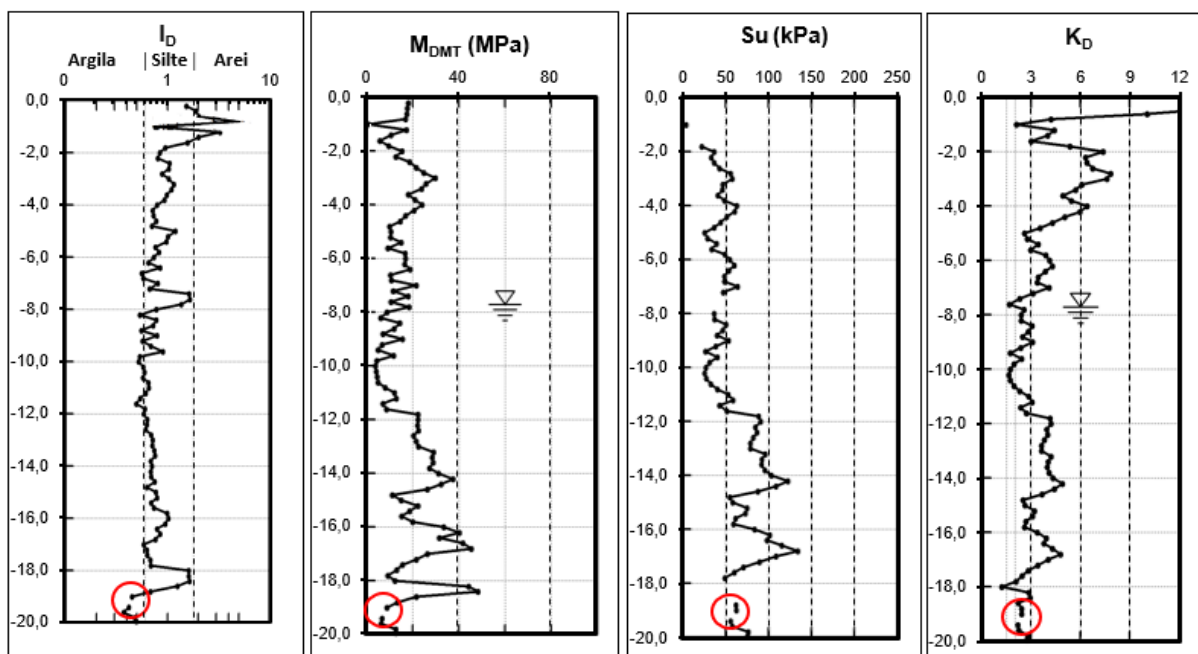


Figura 53: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 19,2m.

Para o procedimento especial, as leituras A foram monitoradas por mais de 2 horas, até que os valores estabilizassem, como apresentado na Figura 54, abaixo.

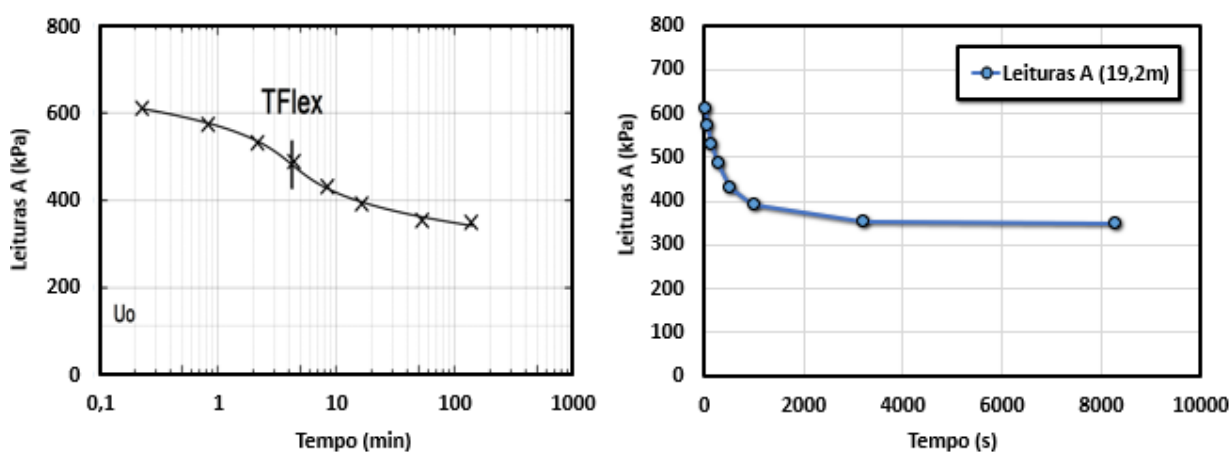


Figura 54: Sequência de leituras A em 19,2m de profundidade.

Para a correção da leitura A para condição não-drenada ($A_{0(nd)}$) foram realizados os métodos expedito e Weibull, conforme apresentado abaixo na Figura 55.

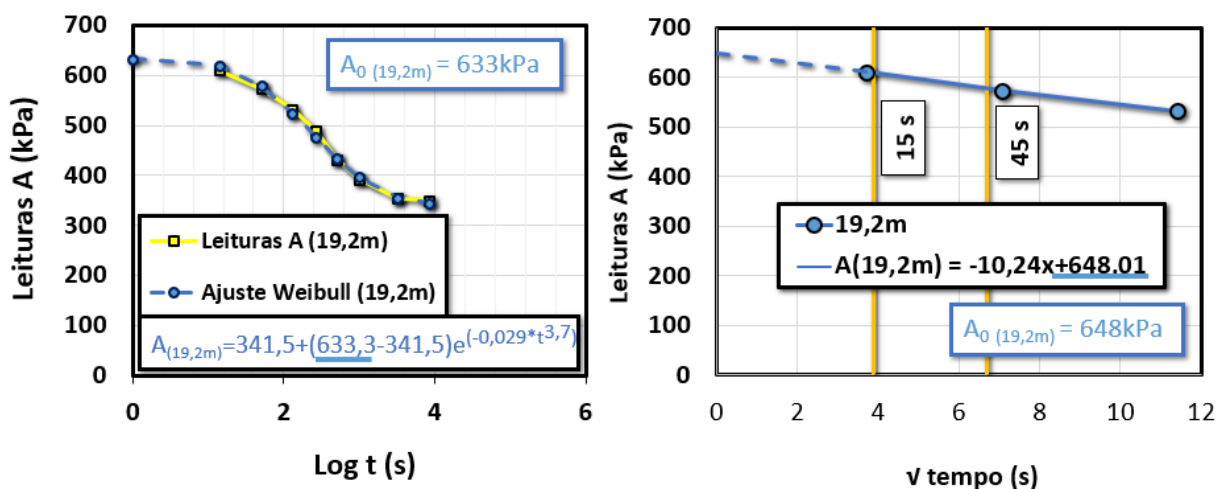


Figura 55: Correção de A pelos métodos Weibull e expedito (Fonte: Autor).

Como já discutido anteriormente, o método Weibull tende a apresentar uma correção ligeiramente inferior. Portanto, a partir da correção expedita, tem-se que $A_{0(nd)} = 648\text{kPa}$.

A correção da leitura B para condição não-drenada foi obtida através dos métodos da igualdade e simplificado. O método da igualdade é representado através da Figura 56, abaixo.

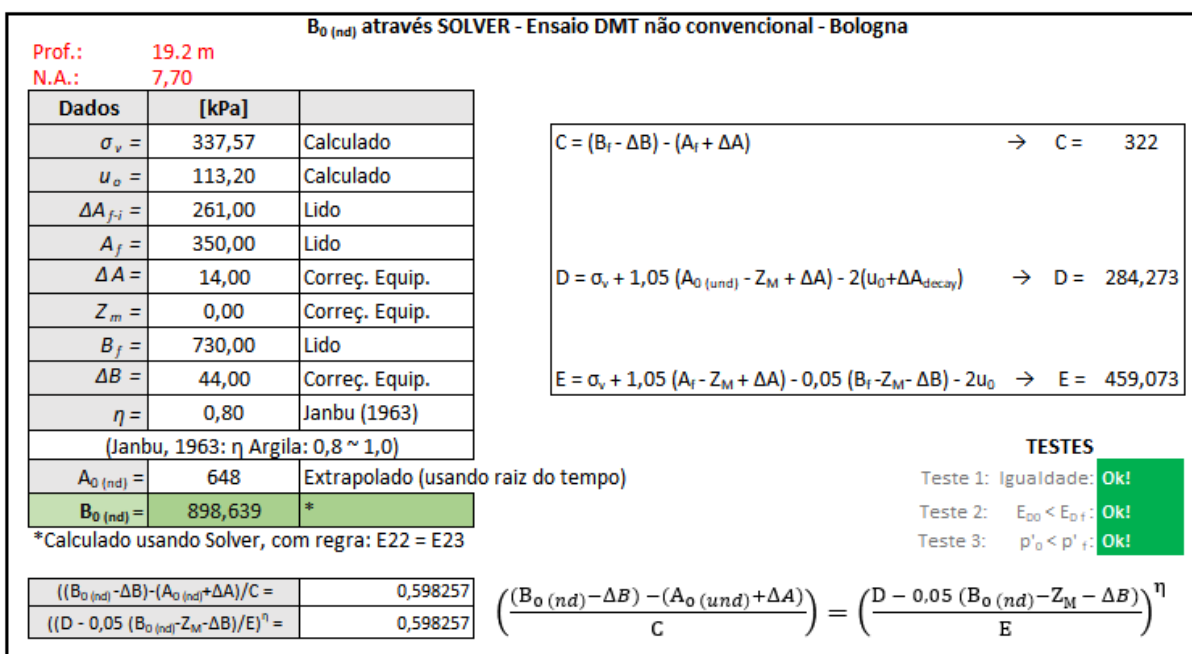


Figura 56: Cálculo de $B_{0(nd)}$ para 19,2m de profundidade (Fonte: Autor).

$B_{0(nd)}$ foi obtido considerando $\eta = 0,8$, conforme Janbu (1963).

Como discutido anteriormente, de A_f representa o último valor de A após sua estabilização e, B_f o valor de B pela expansão da membrana após lido A_f . ΔA_{f-i} é a diferença entre A_f e o primeiro A lido pelo equipamento (A_i).

A partir de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$, a metodologia de interpretação segue com o uso das equações clássicas do ensaio DMT para a obtenção dos parâmetros intermediários e, posteriormente, obtenção dos parâmetros do solo. A Tabela 12, abaixo, apresenta os parâmetros obtidos através da interpretação do DMT convencional e especial pelo método da igualdade.

Tabela 12: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial.

Depth (m)	p ₀ (kPa)	p ₁ (kPa)	u ₀ (kPa)	γ _d (kN/m ³)	σ' _{v0} (kPa)	Intermediate Parameters			K ₀	OCR	S _u (kPa)	S _u / σ' _{v0}	M _{DMT}	
						E ₀ (Mpa)	I _b	k ₀					RM ≥ 0,85	(Mpa)
17,40	686,15	1061,00	95,2	17,66	210,0	13,0	0,6	2,8	0,0	1,7	70,4	0,34	1,20	15,54
17,60	617,15	971,00	97,20001	17,66	211,5	12,3	0,7	2,5	0,0	1,4	61,5	0,29	1,09	13,38
17,80	539,65	841,00	99,20002	17,66	213,1	10,5	0,7	2,1	0,6	1,1	49,8	0,23	0,91	9,56
18,00	359,15	776,00	101,2	17,66	214,6	14,5	1,6	1,2	0,3	0,5	24,9	0,12	0,85	12,33
18,20	716,90	1706,00	103,2	19,13	216,4	34,3	1,6	2,8	0,7	1,7	72,5	0,34	1,28	43,84
18,40	743,90	1796,00	105,2	19,13	218,2	36,5	1,6	2,9	0,8	1,8	76,4	0,35	1,31	47,88
18,60	594,90	1206,00	107	17,66	219,8	21,2	1,3	2,2	0,6	1,2	54,5	0,25	1,02	21,56
18,80	646,65	1011,00	109	17,66	221,3	12,6	0,7	2,4	0,6	1,3	61,15	0,28	1,05	13,19
19,00	652,40	896,00	111,2	17,66	222,8	8,5	0,5	2,4	0,6	1,3	61,6	0,28	1,04	8,82
19,20	652,35	855,00	113	17,66	224,4	7,0	0,4	2,4	0,6	1,3	62,00	0,28	1,04	7,26
19,40	609,15	816,00	115	17,66	225,9	7,2	0,4	2,2	0,6	1,2	55,99	0,25	0,95	6,83
19,60	625,00	814,00	117	17,66	227,4	6,6	0,4	2,2	0,6	1,2	56,37	0,25	0,95	6,26
19,80	759,40	1066,00	119	17,66	229,0	10,6	0,5	2,8	0,7	1,7	76,71	0,34	1,20	12,67

O perfil geotécnico do local estudado é apresentado nas Figuras 57 e 58, onde em 19,2m são destacados os parâmetros obtidos através do método da igualdade.

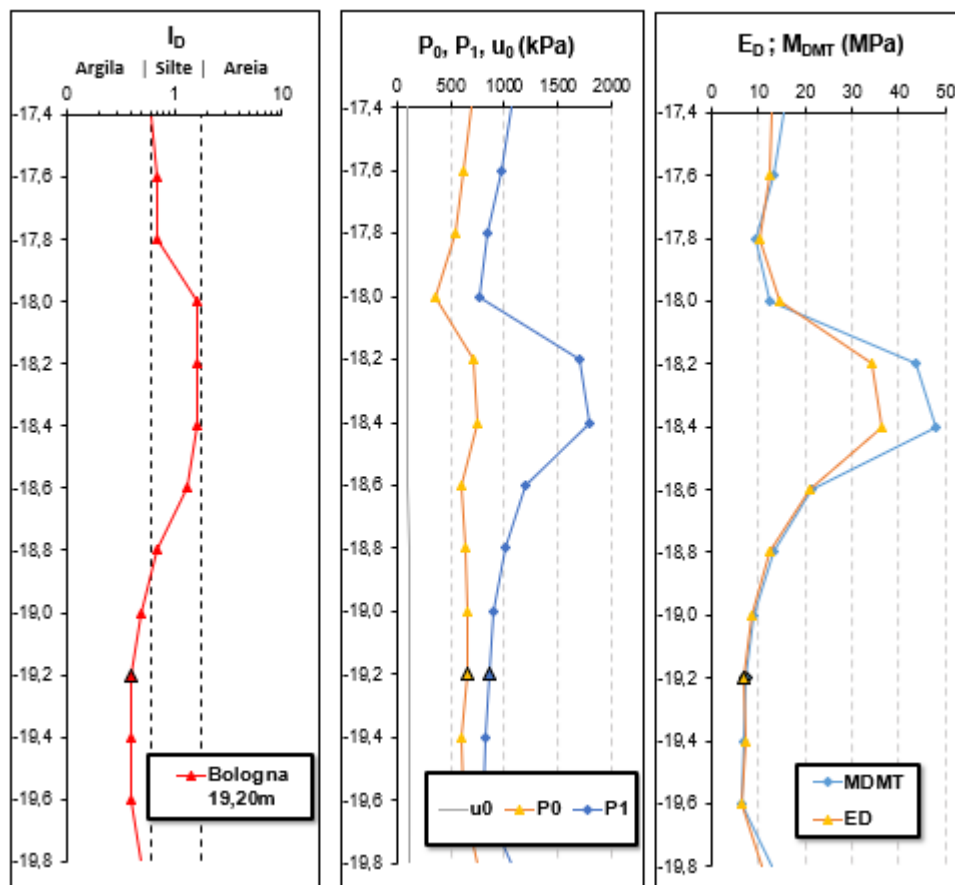


Figura 57: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional (realizado ao longo de toda a profundidade e o ensaio DMT especial (realizado somente na profundidade de 19,2m) (Fonte: Autor).

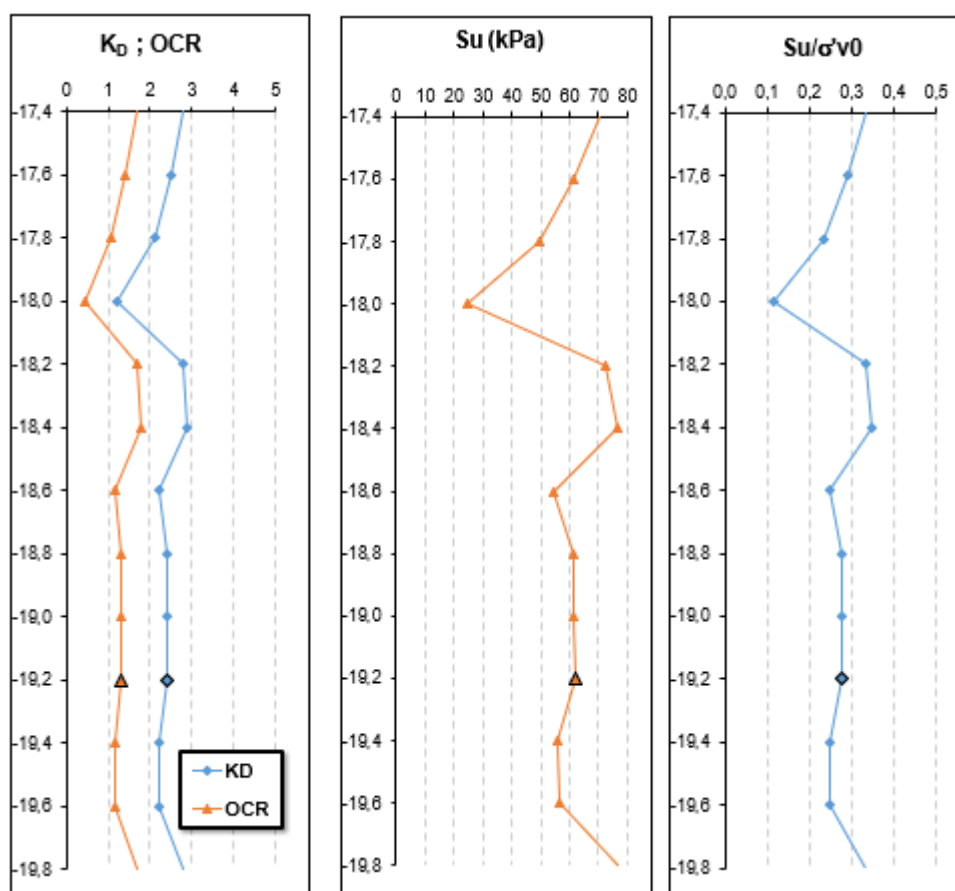


Figura 58: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

A Tabela 13 abaixo apresenta o comparativo entre as leituras A_0 e B_0 obtidas através dos métodos do ensaio especial e, A e B pelo ensaio convencional.

Tabela 13: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.

Prof. (m)	Ensaio Especial				Ensaio Convencional		
	$A_{0(Weibull)}$ (kPa)	$A_{0(\sqrt{t})}$ (kPa)	B_0^a (kPa)	B_0^b (kPa)	Prof. (m)	A (kPa)	B (kPa)
19,20	633	648	899	878	19,00	650	940

^a Eq. (48): Análise por método da igualdade

^b Eq. (50): Análise simplificada

E, a seguir, a Tabela 14 apresenta os parâmetros geotécnicos do solo obtidos através do método da igualdade, analisado com auxílio da ferramenta Solver Microsoft Excel, e método simplificado.

Tabela 14: Comparação entre os métodos igualdade e simplificado.

Parâmetros Intermediários				Parâmetros Geotécnicos				
Prof. (m)	E_D (MPa)	I_D	k_D	K_0	OCR	S_u (kPa)	S_u / σ'_{v0}	M_{DMT}
19,2m (Solver)	7,0	0,4	2,4	0,6	1,3	62,00	0,28	7,26
19,2m (Simplif.)	6,3	0,3	2,4	0,6	1,3	62,00	0,28	6,50

7.1.3. Roma, Itália (dissip. completa em 25,6m)

Neste sítio, em Roma, Itália, está situado o novo Centro de Convenções Italiano. O edifício foi construído em aço, vidro e pedras, possuindo grande valor artístico, cultural e arquitetônico, contendo aproximadamente 9mil lugares e um hotel de alto padrão com 441 quartos. Segundo Studio Fuksas, responsável pelo projeto da edificação, o início do projeto ocorreu em 1998, sendo inaugurado em 2016. Em 2008 foram realizadas leituras do ensaio DMT convencional ao longo de 30m de profundidade, sendo que em 25,60m de profundidade foi realizado o ensaio especial com dissipação completa em solo argiloso. O perfil de solo é dado predominantemente por solos coesivos, possuindo camada siltosa entre os 10,80m e 19,40m de profundidade.

A Figura 59 apresenta a investigação geotécnica obtida pelo ensaio convencional, destacando através do círculo, a realização do ensaio especial em camada argilosa.

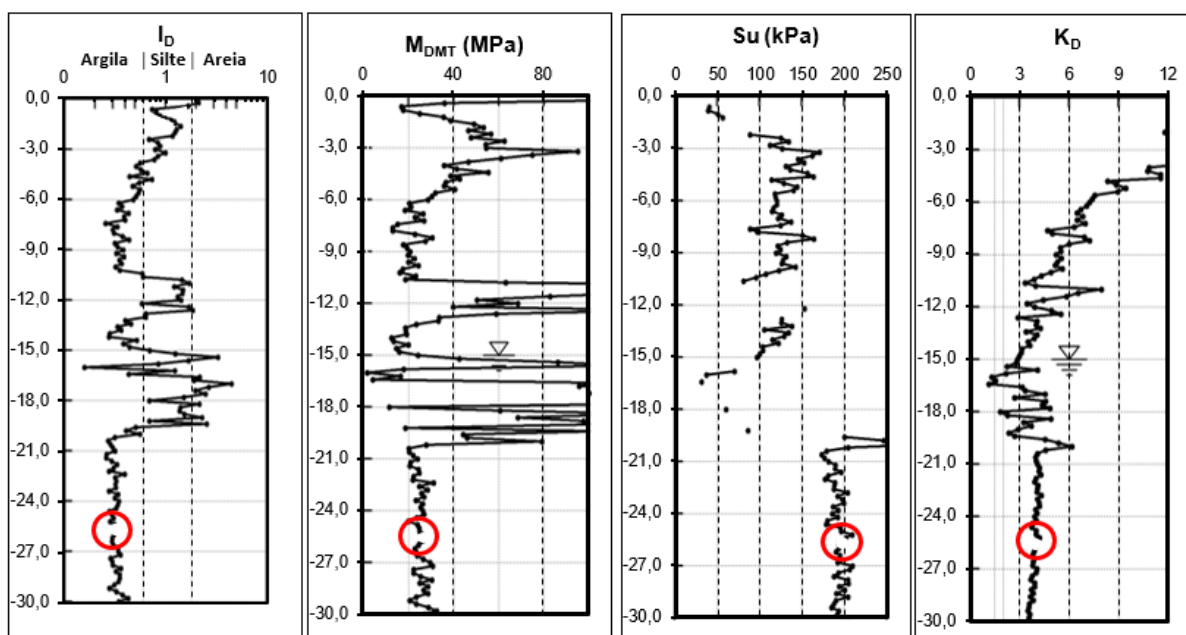


Figura 59: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 25,60m

Para o procedimento especial, as leituras A foram monitoradas por mais de 15 horas, até que as quedas de A deixassem de ser significativas, como apresentado na Figura 60, abaixo.

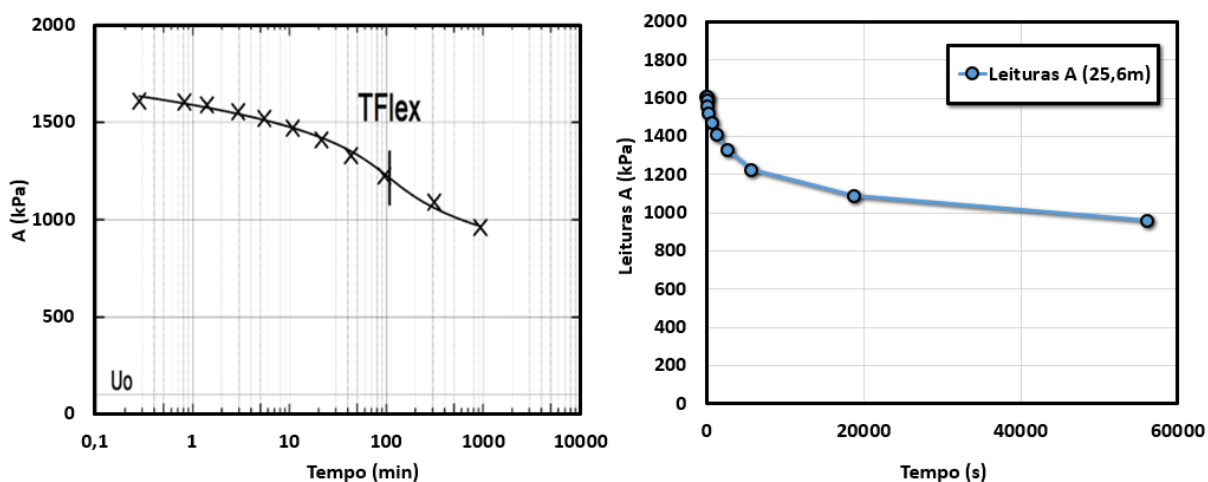


Figura 60: Sequência de leituras A em 25,60m de profundidade (Fonte: Autor).

Para a correção da leitura A para condição não-drenada ($A_{0(nd)}$) foram realizados os métodos expedito e Weibull, conforme apresentado abaixo na Figura 61.

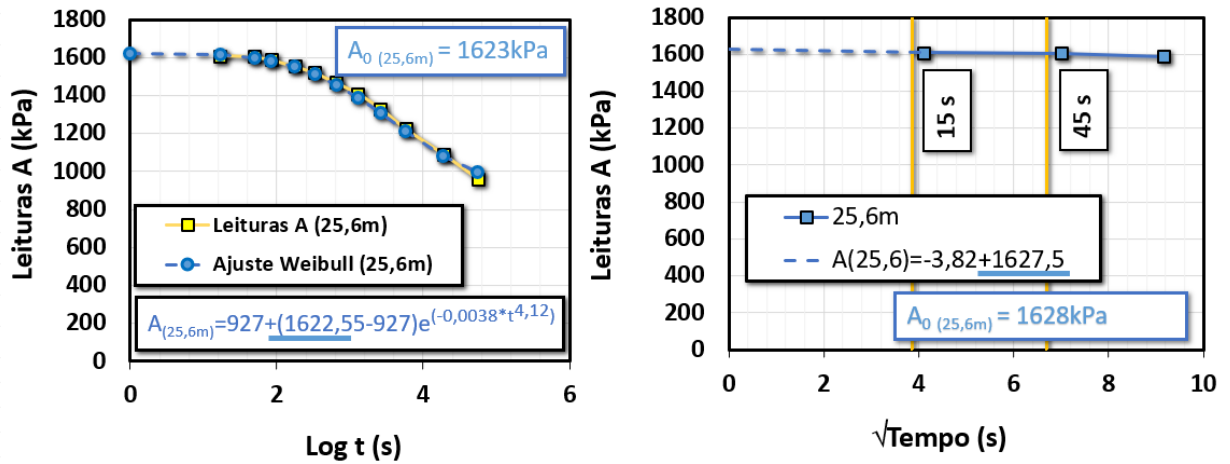


Figura 61: Correção de A pelos métodos Weibull e expedito (Fonte: Autor).

Portanto, a partir da correção expedita, tem-se que $A_{0(nd)} = 1628 \text{ kPa}$.

A correção da leitura B para condição não-drenada foi obtida através dos métodos da igualdade e simplificado. O método da igualdade é representado através da Figura 62, abaixo.

$B_{0(nd)}$ através SOLVER - Ensaio DMT não convencional - Roma

Prof.: 25.6 m
N.A.: 15,00

Dados	[kPa]	
$\sigma_v =$	484,73	Calculado
$u_o =$	104,30	Calculado
$\Delta A_{f-i} =$	650,00	Lido
$A_f =$	960,00	Lido
$\Delta A =$	12,00	Correç. Equip.
$Z_m =$	0,00	Correç. Equip.
$B_f =$	1780,00	Lido
$\Delta B =$	41,00	Correç. Equip.
$\eta =$	0,80	Janbu (1963)
(Janbu: η (Argila) = 0,8 - 1,0)		
$A_{0(nd)} =$	1628	Extrapolado (usando raiz do tempo)
$B_{0(nd)} =$	2115,41	*

*Calculado usando Solver, com regra: E22 = E23.

$$C = (B_f - \Delta B) - (A_f + \Delta A) \rightarrow C = 767$$

$$D = \sigma_v + 1,05 (A_{0(und)} - Z_m + \Delta A) - 2(u_o + \Delta A_{decay}) \rightarrow D = 698,133$$

$$E = \sigma_v + 1,05 (A_f - Z_m + \Delta A) - 0,05 (B_f - Z_m - \Delta B) - 2u_o \rightarrow E = 1209,78$$

TESTES

Teste 1: Igualdade: **Ok!**

Teste 2: $E_{p0} < E_{p1}$: **Ok!**

Teste 3: $p'_o < p'_1$: **Ok!**

$((B_{0(nd)} - \Delta B) - (A_{0(nd)} + \Delta A)) / C =$	0,56638
$((D - 0,05 (B_{0(nd)} - \Delta B) / E)^\eta =$	0,56638

$$\left(\frac{(B_{0(nd)} - \Delta B) - (A_{0(nd)} + \Delta A)}{C} \right) = \left(\frac{D - 0,05 (B_{0(nd)} - \Delta B) / E}{E} \right)^\eta$$

Figura 62: Cálculo de $B_{0(nd)}$ para 25,6m de profundidade (Fonte: Autor).

$B_{0(nd)}$ foi obtido considerando $\eta = 0,8$, conforme Janbu (1963).

A Tabela 15, abaixo, apresenta os parâmetros obtidos através da interpretação do DMT convencional e especial pelo método da igualdade, a partir de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$.

Tabela 15: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial.

Depth (m)	p ₀ (kPa)	p ₁ (kPa)	u ₀ (kPa)	Y _d (kN/m ³)	σ' _{vo} (kPa)	Intermediate Parameters			K ₀	OCR	S _u (kPa)		S _u / σ' _{vo}	M _{DMT} RM ≥ 0,85 (Mpa)
						E ₀ (Mpa)	I _b	k ₀						
23,80	1559,90	2024,00	86,3	18,64	364,0	16,1	0,31	4,0	0,0	2,9	190,5	0,52	1,56	25,13
24,00	1518,40	2014,00	88,3	18,64	365,7	17,2	0,35	3,9	0,0	2,8	185,4	0,51	1,53	26,40
24,20	1563,40	2059,00	90,3	18,64	367,5	17,2	0,34	4,0	1,0	2,9	192,3	0,52	1,56	26,85
24,40	1490,40	1944,00	92,3	18,64	369,2	15,7	0,32	3,8	0,9	2,7	181,2	0,49	1,51	23,68
24,60	1483,65	1869,00	94,3	18,64	370,9	13,4	0,28	3,7	0,9	2,6	176,1	0,47	1,48	19,84
24,80	1590,90	2034,00	96,3	18,64	372,6	15,4	0,30	4,0	1,0	2,9	195,0	0,52	1,56	24,04
25,00	1600,15	2059,00	98	18,64	374,4	15,9	0,31	4,0	1,0	2,9	195,9	0,52	1,56	24,82
25,20	1680,65	2129,00	100	20,11	376,4	15,6	0,28	4,2	1,0	3,2	209,33	0,56	1,61	25,13
25,40	1639,15	2119,00	102,3	20,11	378,4	16,7	0,31	4,1	1,0	3,1	204,2	0,54	1,59	26,49
25,60	1618,30	2074,00	104	20,11	380,4	15,8	0,30	4,0	1,0	2,9	199,06	0,52	1,56	24,66
25,70	1588,15	2089,00	105	20,11	381,4	17,4	0,34	3,9	1,0	2,8	193,37	0,51	1,53	26,71
25,80	1609,40	2084,00	106	20,11	382,5	16,5	0,32	3,9	1,0	2,8	193,89	0,51	1,53	25,33
26,00	1600,15	2059,00	108	18,64	384,2	15,9	0,31	3,9	1,0	2,8	194,76	0,51	1,53	24,41

O perfil geotécnico do local estudado é apresentado nas Figuras 63 e 64, onde em 25,6m são destacados os parâmetros obtidos através do método da igualdade.

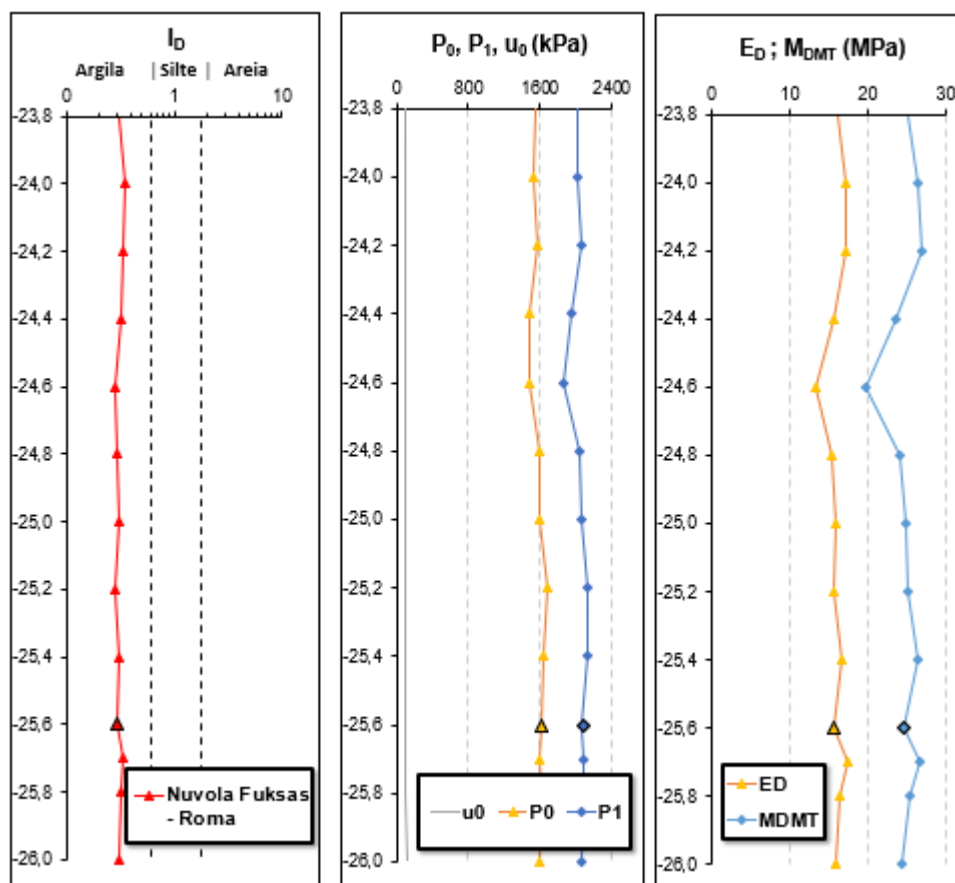


Figura 63: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

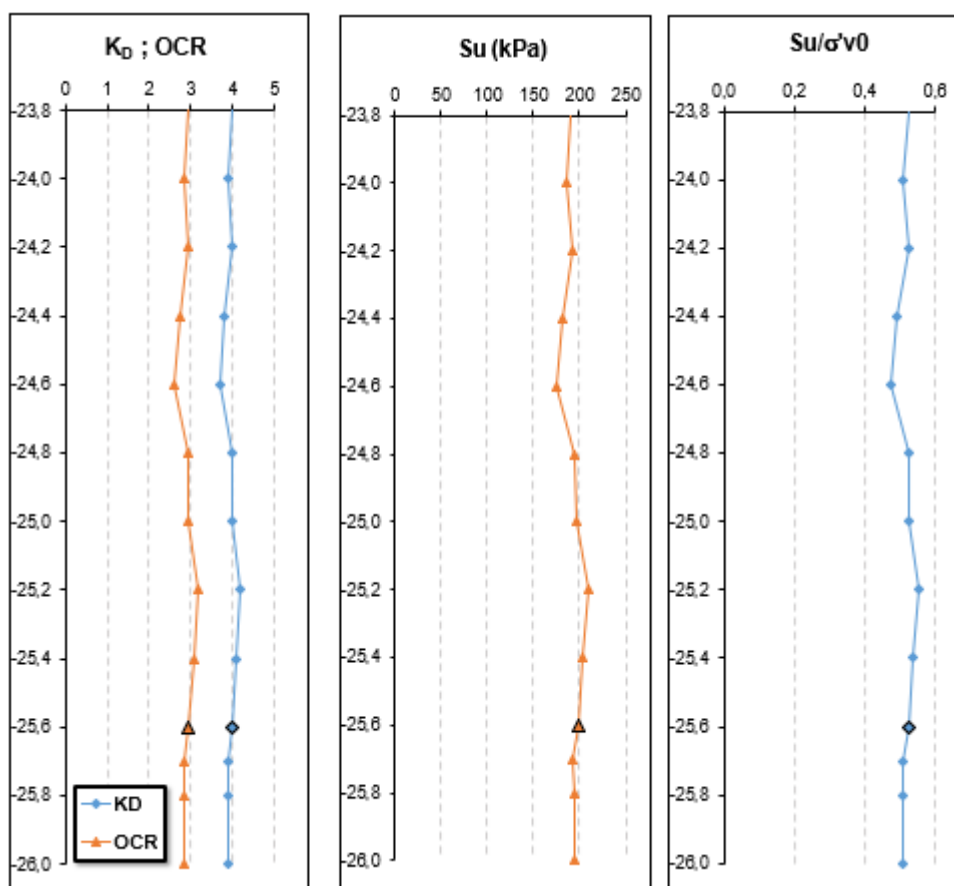


Figura 64: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

A Tabela 16 abaixo apresenta o comparativo entre as leituras A_0 e B_0 obtidas através dos métodos do ensaio especial e, A e B pelo ensaio convencional.

Tabela 16: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.

Ensaio Especial					Ensaio Convencional		
Prof. (m)	$A_{0(Weibull)}$ (kPa)	$A_{0(\sqrt{t})}$ (kPa)	B_0^a (kPa)	B_0^b (kPa)	Prof. (m)	A (kPa)	B (kPa)
25,60	1623	1628	2115	2166	25,70	1650	2160

^a Eq. (48): Análise por método da igualdade

^b Eq. (50): Análise simplificada

A Tabela 17, a seguir, apresenta os parâmetros geotécnicos do solo obtidos através do método da igualdade, analisado com auxílio da ferramenta Solver Microsoft Excel, e método simplificado.

Tabela 17: Comparação entre os métodos igualdade e simplificado.

Parâmetros Intermediários				Parâmetros Geotécnicos				
Prof. (m)	E_D (MPa)	I_D	k_D	K_0	OCR	S_u (kPa)	S_u / σ'_{v0}	M_{DMT}
25,6m (Solver)	15,8	0,3	4,0	1,0	2,9	199,0	0,52	24,66
25,6m (Simplif.)	17,7	0,3	4,0	1,0	2,9	199,0	0,52	27,63

7.1.4. Roma, Itália (dissip. incompleta em 17m)

Neste sítio está situado o novo supermercado da região de Settebagni, em Roma, onde foram realizadas leituras do ensaio DMT convencional ao longo de 30m de profundidade, sendo que em 17m de profundidade foi realizado o ensaio especial com dissipação incompleta. O perfil de solo é dado predominantemente siltoso, possuindo camadas argilosa e argilo-siltosa entre os 15m e 18m de profundidade e, entre 19,80m e 24,20m.

A Figura 65 apresenta a investigação geotécnica obtida pelo ensaio convencional, destacando através do círculo, a realização do ensaio especial em camada argilosa.

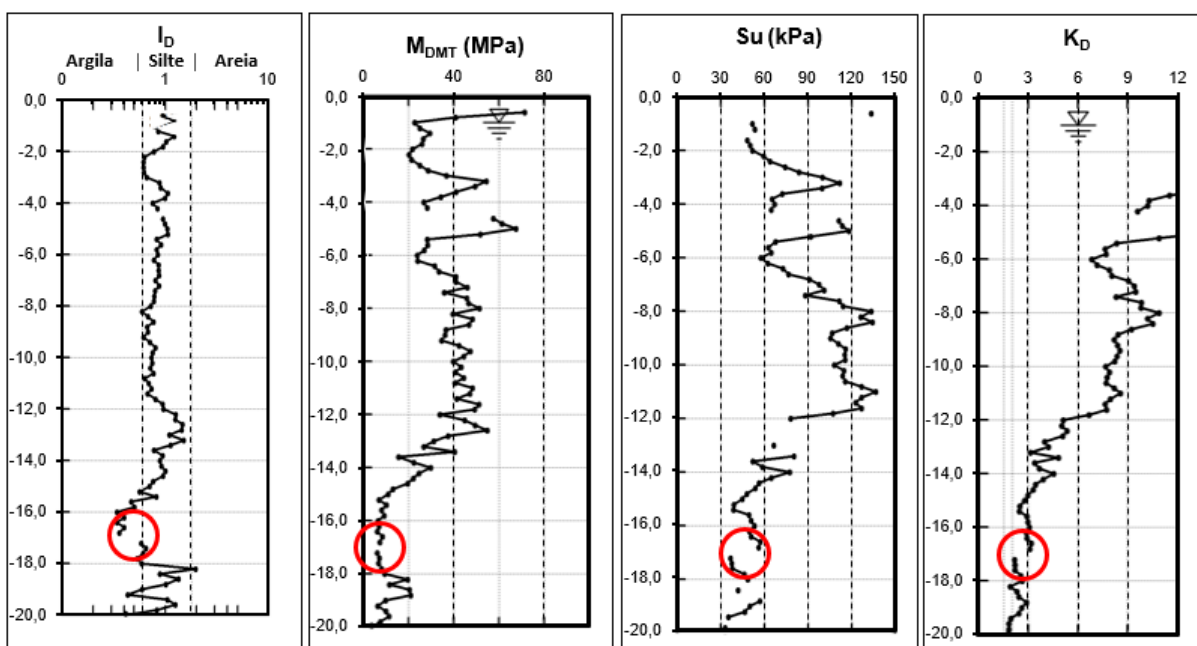


Figura 65: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 17m

Para o procedimento especial, as leituras A foram monitoradas por aproximadamente 36 minutos, caracterizando ensaio com dissipação incompleta, como apresentado na Figura 66, abaixo. A projeção da queda das leituras A , após 36 minutos, foi realizada por aproximação linear apenas como dado complementar, não sendo um dado necessário para o prosseguimento da análise.

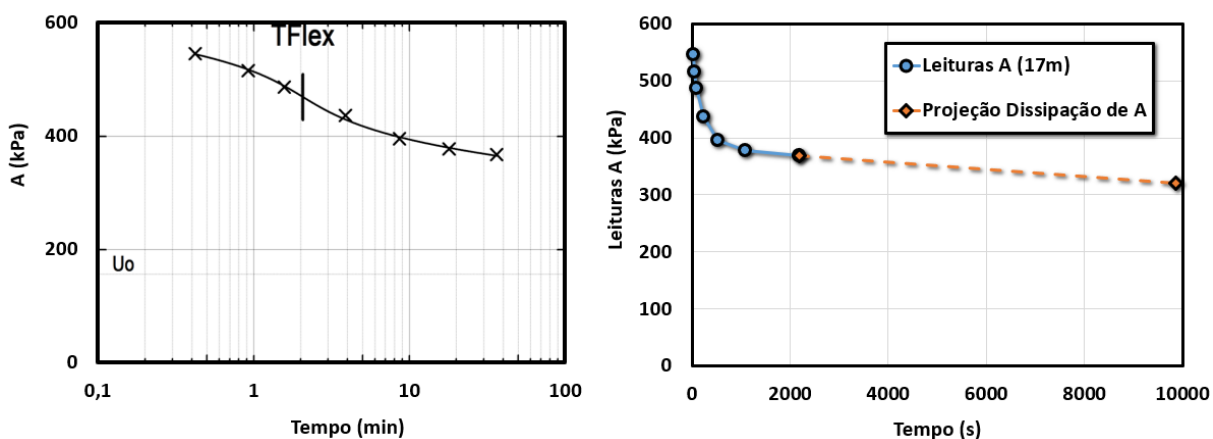


Figura 66: Sequência de leituras A em 17m de profundidade (Fonte: Autor).

Após última leitura A obtida no ensaio (A_{pd}), a membrana foi expandida para B_{pd} , sendo:

$$A_{pd} = 368\text{kPa} \quad \text{e} \quad B_{pd} = 740\text{kPa}$$

Diferentemente da correção das leituras A para dissipação completa, que pode ser realizada através de ambos os métodos (Weibull e expedito), para dissipação incompleta apenas o método expedito é considerado. A equação dada por Weibull é dependente da quantidade de pontos presentes na distribuição, podendo influenciar nos resultados da análise. Portanto, a correção da leitura A para condição não-drenada ($A_{0(nd)}$) foi realizada conforme metodologia apresentada na seção 5.1.2. e apresentado abaixo na Figura 67.

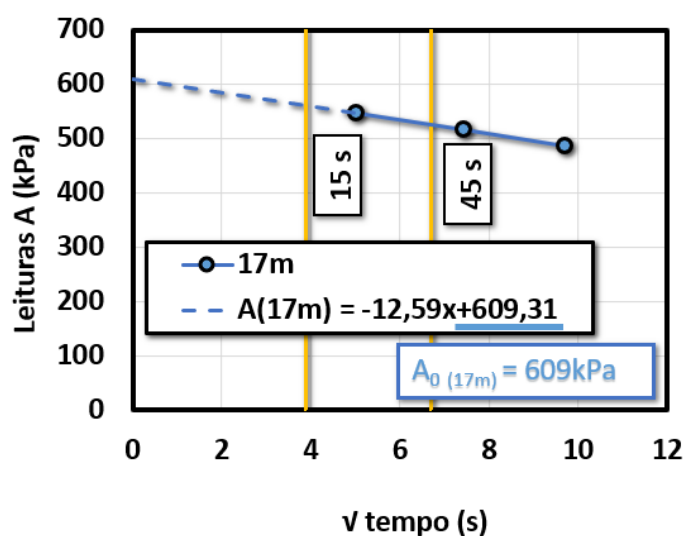


Figura 67: Correção de A pelo método expedito (Fonte: Autor).

A partir da correção expedita, tem-se que $A_{0(nd)} = 609\text{kPa}$.

A correção da leitura B para dissipação incompleta foi desenvolvida baseada na abordagem simplificada para dissipação completa, apresentada ao final da seção 5.2. Por tanto, considerando assertivo o método simplificado em comparação com método da igualdade dos ensaios de dissipação completa apresentados anteriormente, a correção da leitura B para condição não-drenada deste ensaio foi realizada conforme discutido na seção 5.3.

Extrapolando as leituras A (A_{ext}) no gráfico A por \sqrt{t} , tem-se:

$$\Delta A_{ext} = A_{pd} - A_{ext} = 368 - 334 = 34\text{kPa}$$

$$B_{i(nd)} = B_{pd} + \Delta A_{ext} = 740 + 34 = 774\text{kPa}$$

E, pela equação 52,

$$B_{0(nd)} = \left(\frac{A_{pd} + \Delta A - u_0}{A_0 + \Delta A - u_0} \right)^\eta * (B_{i(nd)} - \Delta B - A_{pd} - \Delta A) + \Delta B + A_0 + \Delta A$$

Tem-se, que:

$$B_{0(nd)} = \left(\frac{368 + 9 - 157}{609 + 9 - 157} \right)^{0,8} * (774 - 45 - 368 - 9) + 45 + 609 + 9 = 858kPa$$

A partir de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$, a metodologia de interpretação segue com o uso das equações clássicas do ensaio DMT para a obtenção dos parâmetros intermediários e, posteriormente, obtenção dos parâmetros do solo. A Tabela 18, abaixo, apresenta os parâmetros obtidos através da interpretação do DMT convencional e especial pelo método simplificado, a partir de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$ encontrados.

Tabela 18: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial (método simplificado).

Depth (m)	P ₀ (kPa)	p ₁ (kPa)	u ₀ (kPa)	Y _d (kN/m ³)	σ' _{v0} (kPa)	Intermediate Parameters		K ₀	OCR	S _u (kPa)	S _u / σ' _{v0}	M _{DMT}	
						E _b (Mpa)	I _b					k _b	RM ≥0,85
0,00	0,00	0,00	0	17,66	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15,20	474,95	665,00	139,3	16,68	136,0	6,6	2,5	0,00	1,42	39,5	0,29	1,08	7,12
15,40	475,95	750,00	141,3	17,66	137,5	9,5	2,4	0,00	1,33	38,0	0,28	1,06	10,03
15,60	549,95	740,00	143,3	17,66	139,1	6,6	2,9	0,76	1,79	48,7	0,35	1,23	8,13
15,80	563,95	775,00	145,3	17,66	140,6	7,3	3,0	0,79	1,88	51,3	0,37	1,27	9,24
16,00	581,95	730,00	147,3	16,68	141,9	5,1	3,1	0,81	1,98	54,0	0,38	1,30	6,63
16,20	561,20	725,00	149,3	16,68	143,3	5,7	2,9	0,76	1,79	50,2	0,35	1,23	7,02
16,40	572,20	715,00	151	16,68	144,6	5,0	2,9	0,76	1,79	50,6	0,35	1,23	6,16
16,60	615,20	800,00	153	17,66	146,1	6,4	3,2	0,83	2,08	57,85	0,40	1,33	8,53
16,80	611,20	775,00	155,3	17,66	147,7	5,7	3,1	0,81	1,98	56,2	0,38	1,30	7,41
17,00	608,27	812,66	157	17,66	149,2	7,1	3,0	0,79	1,88	54,49	0,37	1,27	8,99
17,20	484,95	675,00	159	16,68	150,5	6,6	2,2	0,60	1,16	37,31	0,25	0,95	6,26
17,40	493,70	710,00	161	16,68	151,9	7,5	2,2	0,60	1,16	37,64	0,25	0,96	7,18
17,60	499,20	705,00	163	16,68	153,2	7,1	2,2	0,60	1,16	37,97	0,25	0,95	6,73

O perfil geotécnico do local estudado é apresentado nas Figuras 68 e 69, onde em 17m são destacados os parâmetros obtidos através do método da dissipação incompleta (simplificado).

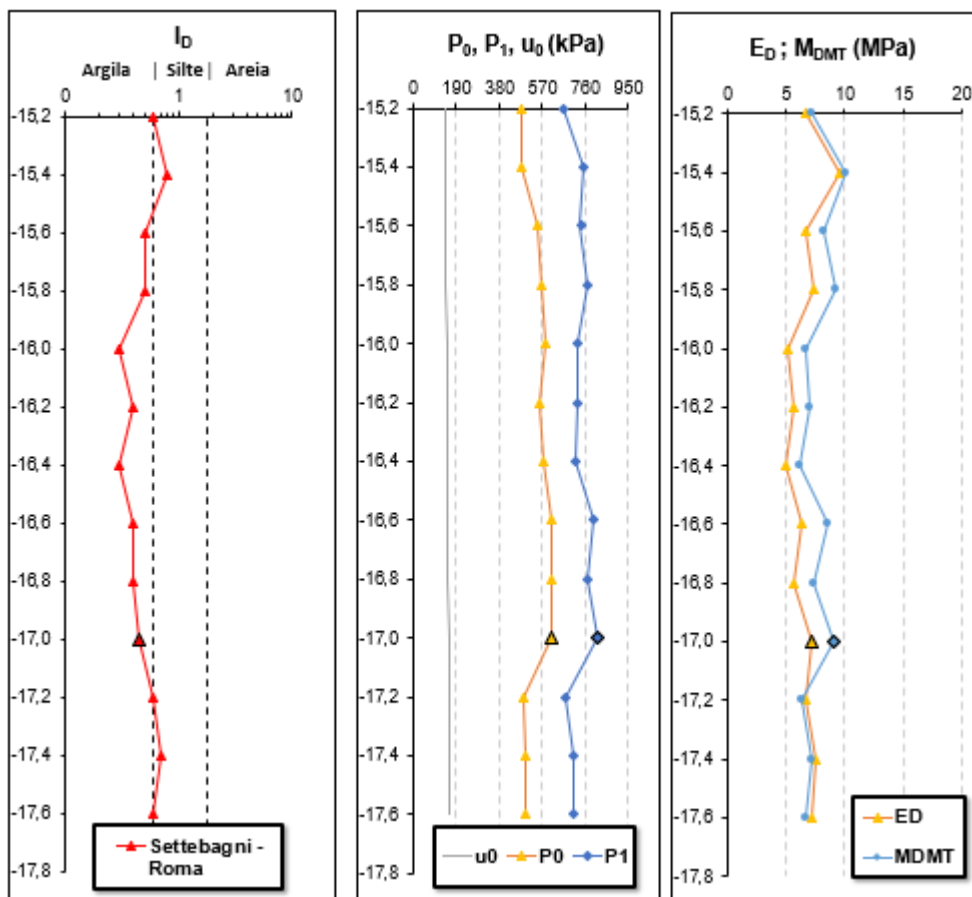


Figura 68: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

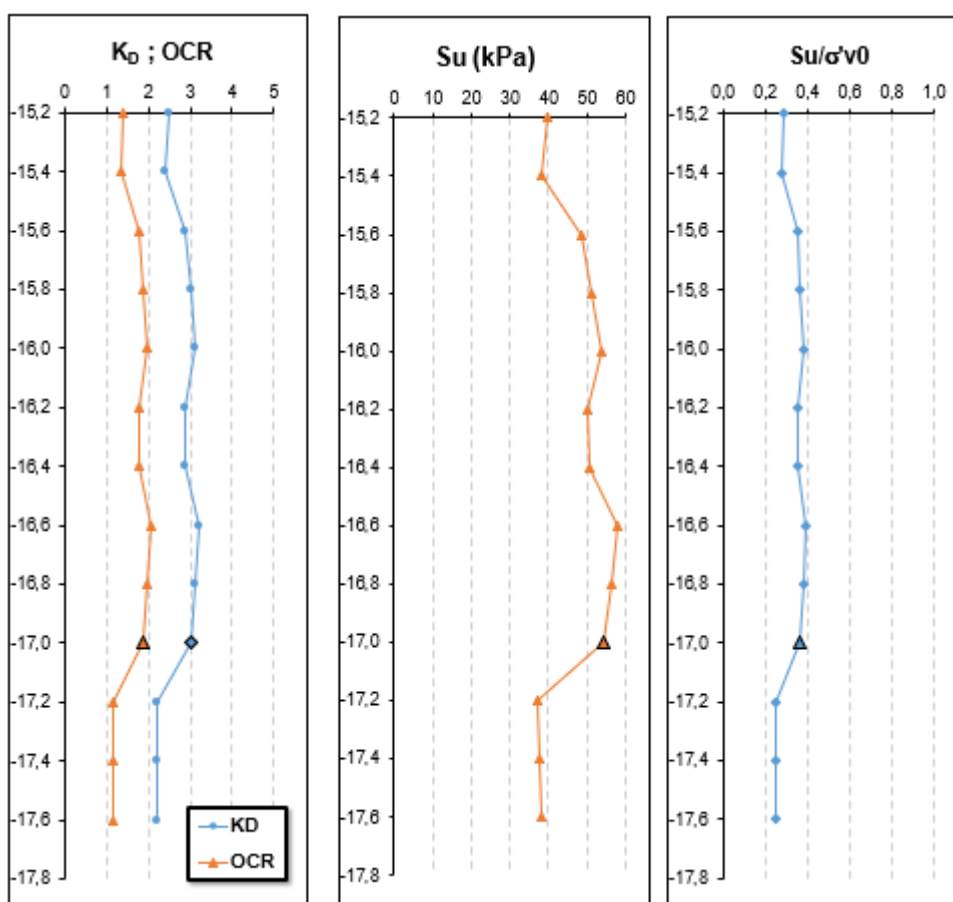


Figura 69: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

A Tabela 19 abaixo apresenta o comparativo entre as leituras A_0 e B_0 obtidas através do método do ensaio especial e, A e B pelo ensaio convencional.

Tabela 19: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.

Ensaio Especial			Ensaio Convencional		
Prof. (m)	$A_0(\sqrt{t})$ (kPa)	B_0^a (kPa)	Prof. (m)	A (kPa)	B (kPa)
17,0	609	858	16,80	610	820

^a Eq. (52): Análise simplificada – dissipação incompleta

7.1.5. Livorno, Itália (dissip. incompleta em 12 e 20m)

Este sítio, na região de Petrarca, em Livorno, Itália, receberá um novo supermercado, onde em novembro de 2017 foram realizadas leituras do ensaio DMT convencional ao longo de 25m de profundidade, sendo que em 12m e 20m de profundidade foram realizados ensaios especiais com dissipação incompleta. O perfil de solo é dado predominantemente argiloso, possuindo camadas siltosas nos primeiros 6m de profundidade.

A Figura 70 apresenta a investigação geotécnica obtida pelo ensaio convencional, destacando através dos círculos, a realização dos ensaios especiais em camadas argilosas.

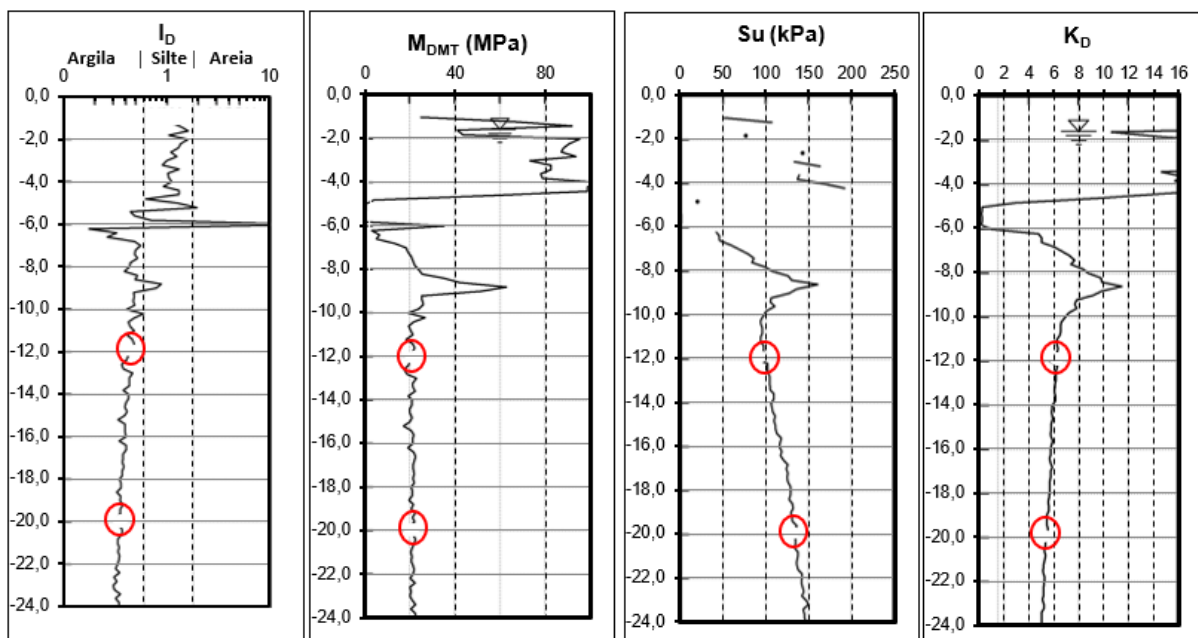


Figura 70: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 12 e 20m

Na profundidade de 12m, as leituras A foram monitoradas por aproximadamente 4 minutos, caracterizando ensaio com dissipação incompleta, como apresentado na Figura 71, abaixo.

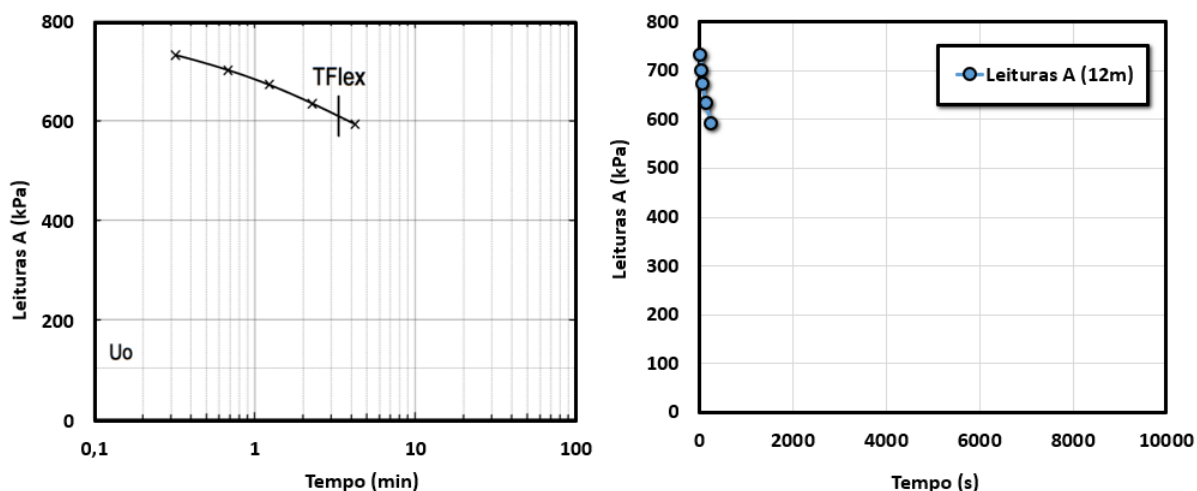


Figura 71: Sequência de leituras A em 12m de profundidade (Fonte: Autor).

Após última leitura A obtida no ensaio (A_{pd}), a membrana foi expandida para B_{pd} , sendo:

$$A_{pd} = 593\text{kPa} \quad \text{e} \quad B_{pd} = 1071\text{kPa}$$

Assim como no sítio anterior, a correção da leitura A para condição não-drenada ($A_{0(nd)}$) foi realizada através do método expedito e apresentado abaixo na Figura 72.

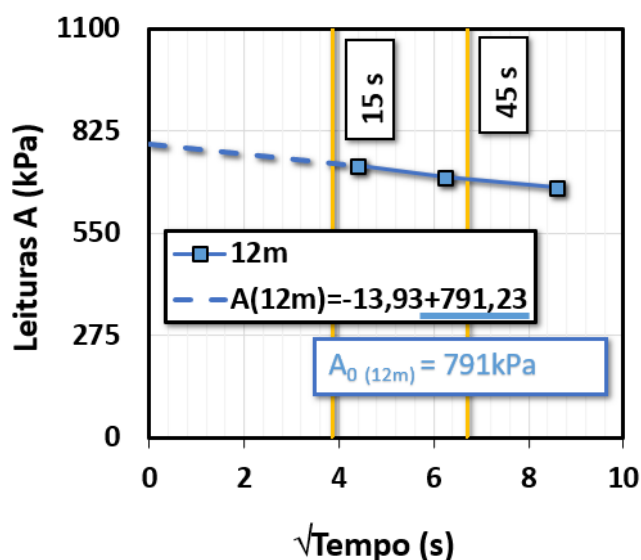


Figura 72: Correção de A pelo método expedito em 12m de profundidade (Fonte: Autor).

A partir da correção expedita, tem-se que $A_{0(nd)} = 791\text{kPa}$.

A correção da leitura B para dissipação incompleta se deu através do método simplificado, onde extrapolando as leituras A no gráfico A por \sqrt{t} , tem-se:

$$\Delta A_{ext} = A_{pd} - A_{ext} = 593 - 577,6 = 15,4kPa$$

$$B_{i(nd)} = B_{pd} + \Delta A_{ext} = 1071 + 15,4 = 1086,4kPa$$

E, pela equação 52,

$$B_{0(nd)} = \left(\frac{A_{pd} + \Delta A - u_0}{A_0 + \Delta A - u_0} \right)^\eta * (B_{i(nd)} - \Delta B - A_{pd} - \Delta A) + \Delta B + A_0 + \Delta A$$

Tem-se, que:

$$B_{0(nd)} = \left(\frac{593 + 12 - 103}{791 + 12 - 103} \right)^{0,8} * (1086,4 - 58 - 593 - 12) + 58 + 791 + 12 = 1185,5kPa$$

A partir de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$, a metodologia de interpretação segue com o uso das equações clássicas do ensaio DMT para a obtenção dos parâmetros intermediários e, posteriormente, obtenção dos parâmetros do solo. A Tabela 20, abaixo, apresenta os parâmetros obtidos através da interpretação do DMT convencional e especial pelo método simplificado, em 12m de profundidade, a partir de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$ encontrados.

Tabela 20: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial (método simplificado em 12m de profundidade).

Depth (m)	P ₀ (kPa)	P ₁ (kPa)	u ₀ (kPa)	Y _d (kN/m ³)	σ' _{v0} (kPa)	Intermediate Parameters			K ₀	OCR	S _u (kPa)	S _u / σ' _{v0}	M _{DMT}	
						E _p (Mpa)	I _b	k _b					RM ≥0,85	(Mpa)
0,00	0,00	0,00	0	17,70	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10,20	720,45	1089,00	85	17,70	96,0	12,8	0,6	0,00	6,44	93,9	0,98	2,07	26,55	
10,40	725,65	1027,00	87	17,70	97,5	10,5	0,5	0,00	6,29	93,6	0,96	2,06	21,61	
10,60	741,25	1009,00	89	17,70	99,1	9,3	0,4	1,41	6,44	97,0	0,98	2,07	19,29	
10,80	744,55	1027,00	91	17,70	100,6	9,8	0,4	1,39	6,29	96,6	0,96	2,06	20,17	
11,00	733,65	1035,00	93	17,70	102,2	10,5	0,5	1,36	5,99	94,3	0,92	2,03	21,28	
11,20	741,65	1001,00	95	17,70	103,7	9,0	0,4	1,35	5,84	93,8	0,90	2,01	18,09	
11,40	762,75	1062,00	97	17,70	105,2	10,4	0,4	1,36	5,99	97,2	0,92	2,03	21,08	
11,60	767,10	1080,00	99	17,70	106,8	10,9	0,5	1,36	5,99	98,58	0,92	2,03	22,09	
11,80	748,35	1056,00	101	17,70	108,3	10,7	0,5	1,32	5,55	94,1	0,87	1,98	21,15	
12,00	786,77	1127,52	103	17,70	109,9	11,8	0,50	1,35	5,84	99,42	0,90	2,01	23,72	
12,20	806,35	1093,00	105	17,70	111,4	9,9	0,4	1,36	5,99	102,85	0,92	2,03	20,06	
12,40	808,85	1085,00	107	17,70	112,9	9,6	0,4	1,35	5,84	102,21	0,90	2,01	19,30	
12,60	813,15	1062,00	109	17,70	114,5	8,6	0,4	1,35	5,84	103,60	0,90	2,01	17,29	

O perfil geotécnico do local estudado é apresentado nas Figuras 73 e 74, onde em 12m são destacados os parâmetros obtidos através do método simplificado.

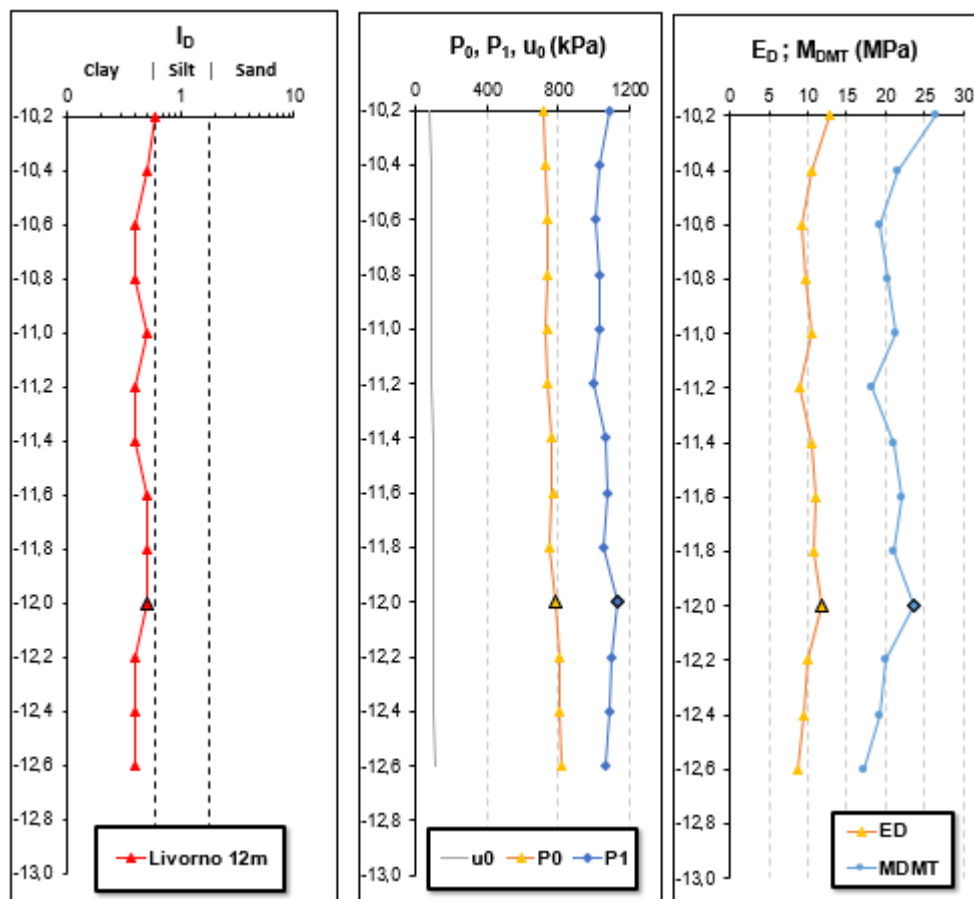


Figura 73: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial em 12m de profundidade (Fonte: Autor).

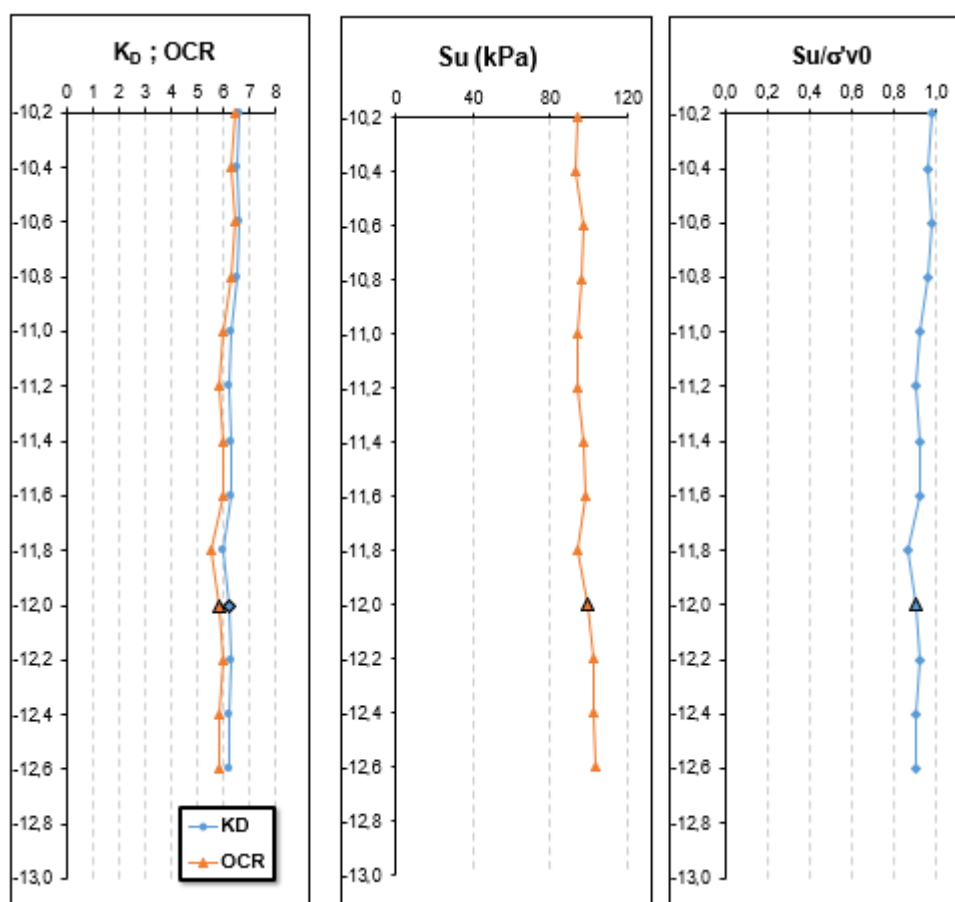


Figura 74: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial em 12 m de profundidade (Fonte: Autor).

A Tabela 21 abaixo apresenta o comparativo entre as leituras A_0 e B_0 obtidas através do método do ensaio especial e, A e B pelo ensaio convencional, para 12m de profundidade.

Tabela 21: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.

Ensaio Especial			Ensaio Convencional		
Prof. (m)	$A_0(\sqrt{t})$ (kPa)	B_0^a (kPa)	Prof. (m)	A (kPa)	B (kPa)
12,00	791	1185,5	11,80	751	1114,0

^a Eq. (52): Análise simplificada – dissipação incompleta

O método de análise foi o mesmo para a profundidade de 20m, onde as leituras A foram monitoradas por 18 minutos, caracterizando também o ensaio como realizado em condição de

drenagem parcial e, portanto, ensaio com dissipação incompleta. A Figura 75, abaixo, apresenta as leituras A lidas pelo DMT.

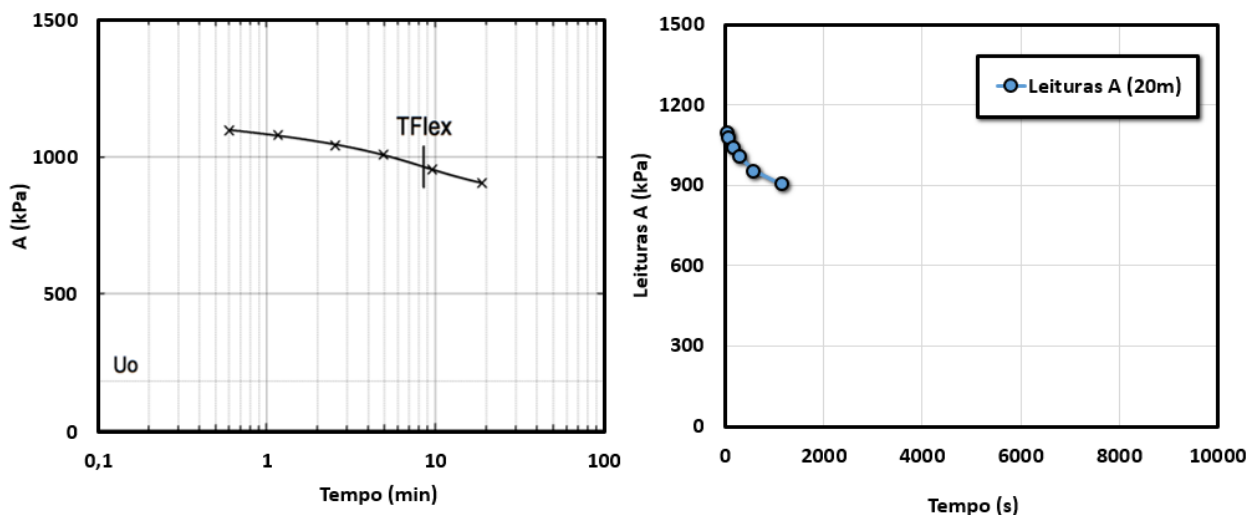


Figura 75: Sequência de leituras A em 20m de profundidade (Fonte: Autor).

Após última leitura A obtida no ensaio (A_{pd}), a membrana foi expandida para B_{pd} , sendo:

$$A_{pd} = 904\text{kPa} \quad \text{e} \quad B_{pd} = 1427\text{kPa}$$

Assim como para a profundidade de 12m, a correção da leitura A para condição não-drenada ($A_{0(nd)}$) foi realizada através do método expedito e apresentado abaixo na Figura 76.

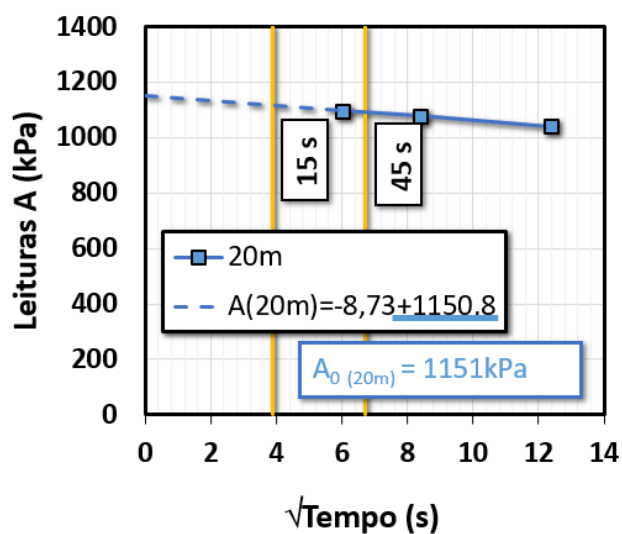


Figura 76: Correção de A pelo método expedito em 20m de profundidade (Fonte: Autor).

A partir da correção expedita, tem-se que $A_{0(nd)} = 1151\text{kPa}$.

A correção da leitura B para dissipação incompleta se deu através do método simplificado, onde extrapolando as leituras A no gráfico A por \sqrt{t} , tem-se:

$$\Delta A_{ext} = A_{pd} - A_{ext} = 904 - 892 = 12kPa$$

$$B_{i(nd)} = B_{pd} + \Delta A_{ext} = 1427 + 12 = 1439kPa$$

E, pela equação 52,

$$B_{0(nd)} = \left(\frac{A_{pd} + \Delta A - u_0}{A_0 + \Delta A - u_0} \right)^\eta * (B_{i(nd)} - \Delta B - A_{pd} - \Delta A) + \Delta B + A_0 + \Delta A$$

Tem-se, que:

$$B_{0(nd)} = \left(\frac{904 + 12 - 181}{1151 + 12 - 181} \right)^{0,8} * (1439 - 58 - 904 - 12) + 58 + 1151 + 12 = 1589,8kPa$$

Corrigidas as leituras A e B para a condição não-drenada, interpretação segue com o uso das equações clássicas do ensaio DMT onde na Tabela 22 são apresentados os parâmetros obtidos para 20m de profundidade, a partir de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$ encontrados pelo método simplificado.

Tabela 22: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial (método simplificado em 20m de profundidade).

Depth (m)	p ₀ (kPa)	p ₁ (kPa)	u ₀ (kPa)	V _d (kN/m ³)	σ' _{v0} (kPa)	Intermediate Parameters			K ₀	OCR	S _u (kPa)	S _u / σ' _{v0}	M _{DMT}	
						E _D (Mpa)	I _b	k _D					RM ≥ 0,85	(Mpa)
0,00	0,00	0,00	0	18,60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18,20	1070,80	1390,00	163	18,60	162,0	11,1	0,4	5,6	0,00	4,98	129,1	0,80	1,91	21,15
18,40	1067,80	1387,00	165	18,60	163,7	11,1	0,4	5,5	0,00	4,85	127,6	0,78	1,89	20,95
18,60	1092,00	1386,00	167	18,60	165,4	10,2	0,3	5,6	1,26	4,98	131,8	0,80	1,91	19,44
18,80	1100,55	1425,00	169	18,60	167,2	11,3	0,3	5,6	1,26	4,98	133,2	0,80	1,91	21,53
19,00	1088,05	1402,00	171	18,60	168,9	10,9	0,3	5,4	1,23	4,71	128,6	0,76	1,87	20,37
19,20	1104,75	1446,00	173	18,60	170,6	11,8	0,4	5,5	1,24	4,85	132,9	0,78	1,89	22,27
19,40	1108,60	1432,00	175	18,60	172,3	11,2	0,3	5,4	1,23	4,71	131,2	0,76	1,87	20,93
19,60	1140,10	1474,00	177	18,60	174,0	11,6	0,3	5,5	1,24	4,85	135,59	0,78	1,89	21,89
19,80	1126,35	1434,00	179	18,60	175,8	10,7	0,3	5,4	1,23	4,71	133,8	0,76	1,87	19,99
20,00	1144,56	1531,78	181	18,60	177,5	13,4	0,40	5,4	1,23	4,71	135,14	0,76	1,87	25,04
20,20	1142,25	1473,00	183	18,60	179,2	11,5	0,3	5,4	1,23	4,71	136,45	0,76	1,87	21,49
20,40	1148,40	1497,00	185	18,60	180,9	12,1	0,4	5,3	1,21	4,57	134,58	0,74	1,85	22,38
20,60	1145,70	1488,00	187	18,60	182,6	11,9	0,4	5,2	1,19	4,44	132,66	0,73	1,83	21,77

O perfil geotécnico do local estudado é apresentado nas Figuras 77 e 78, onde em 20m são destacados os parâmetros obtidos através do método simplificado.

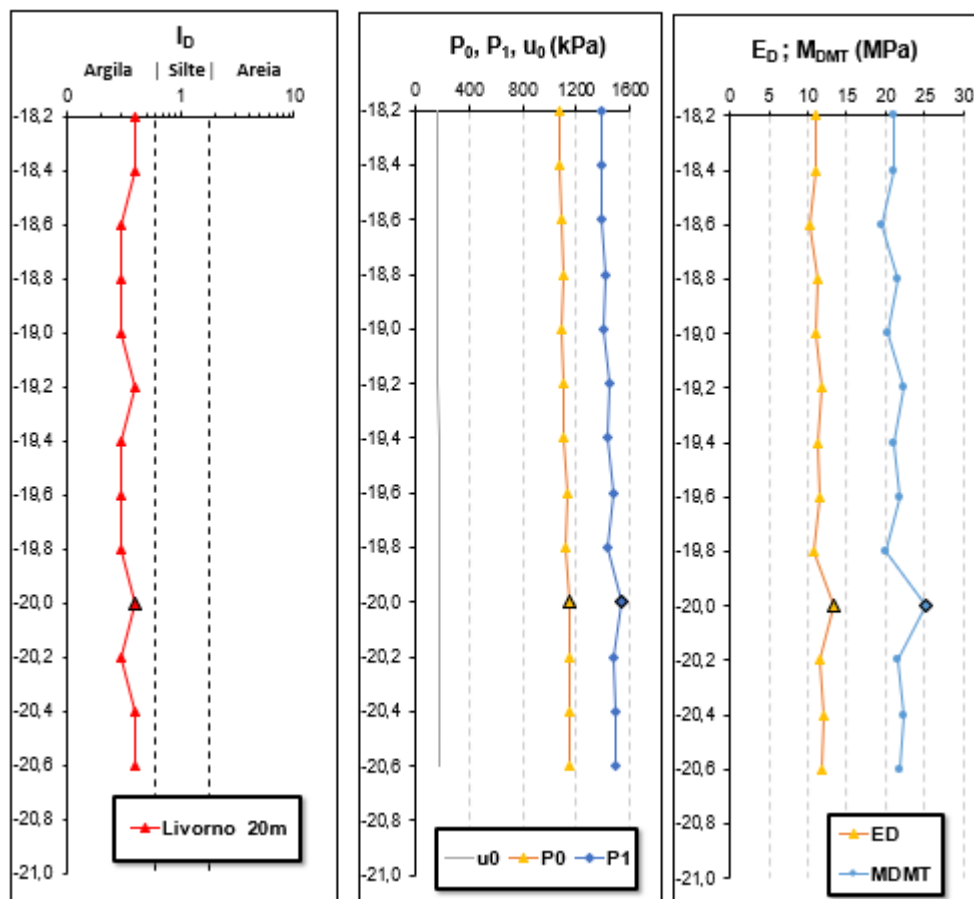


Figura 77: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial em 20m de profundidade (Fonte: Autor).

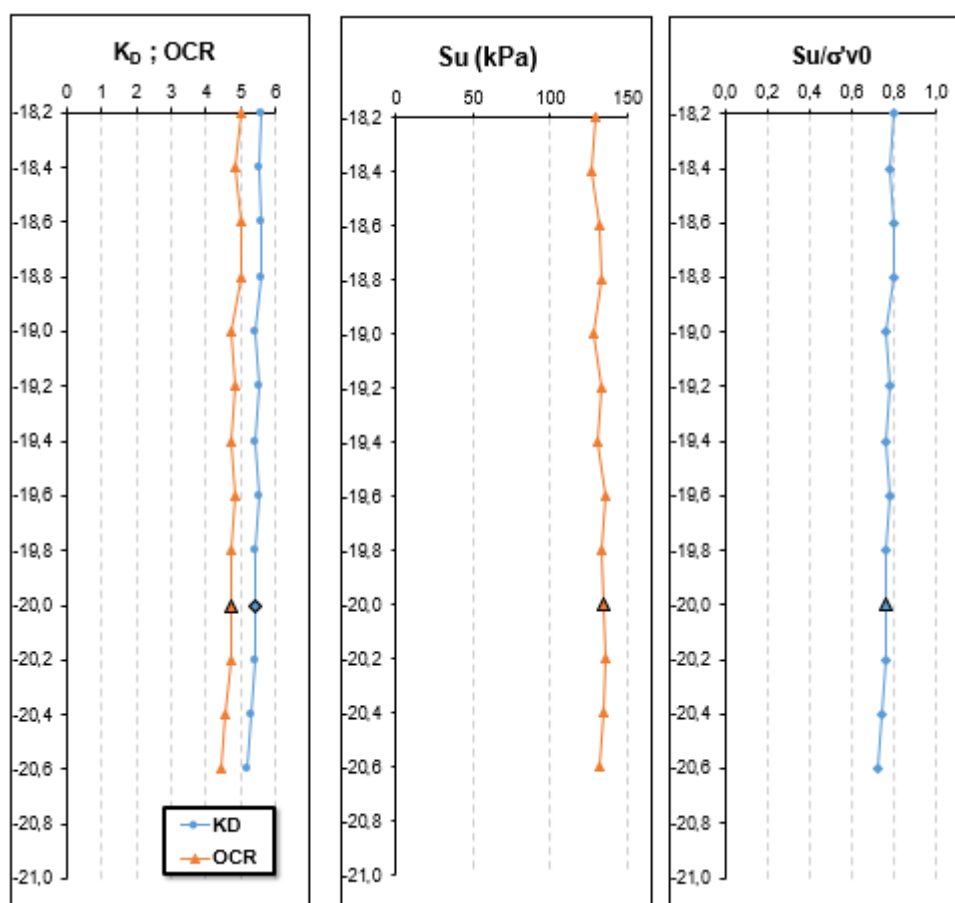


Figura 78: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial em 20 m de profundidade (Fonte: Autor).

A Tabela 23 abaixo apresenta o comparativo entre as leituras A_0 e B_0 obtidas através do método do ensaio especial e, A e B pelo ensaio convencional.

Tabela 23: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.

Ensaio Especial			Ensaio Convencional		
Prof. (m)	$A_{0(\sqrt{t})}$ (kPa)	B_0^a (kPa)	Prof. (m)	A (kPa)	B (kPa)
20,00	1151	1589,8	20,20	1146	1531

^a Eq. (52): Análise simplificada – dissipação incompleta

7.2.APLICAÇÃO EM SILTES

Para aplicação da análise em solo siltoso proposta neste trabalho, utilizou-se dados de investigação geotécnica realizado também na região de Settebagni, em Roma, onde foram realizadas leituras do ensaio DMT convencional ao longo de 20m de profundidade, identificando um perfil de solo predominantemente siltoso. Em 2,40m de profundidade foi realizado o ensaio especial com dissipação completa.

A Figura 79 apresenta parte da investigação geotécnica obtida pelo ensaio convencional, destacando através do círculo, a realização do ensaio especial em camada siltosa.

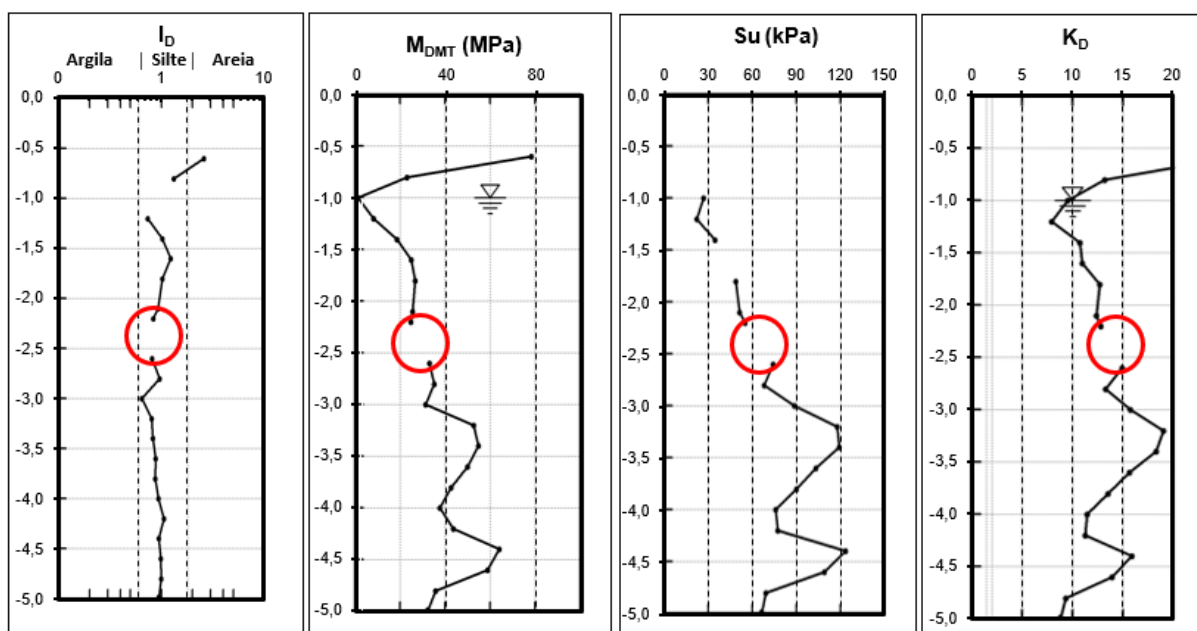


Figura 79: Perfil geotécnico do solo obtido por DMT convencional e indicação do ensaio DMT especial em 2,40m

Para o procedimento especial, as leituras *A* foram monitoradas por aproximadamente 16 horas, caracterizando ensaio com dissipação completa, como apresentado na Figura 80, abaixo.

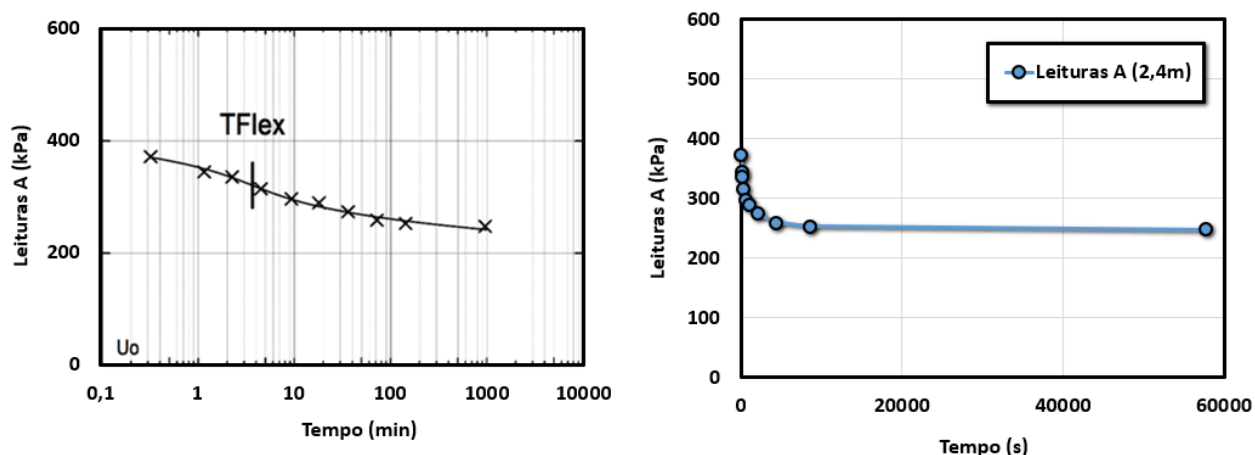


Figura 80: Sequência de leituras A em 2,40m de profundidade (Fonte: Autor).

Por se tratar de ensaio de dissipação completa, a correção da leitura A para condição não-drenada ($A_{0(nd)}$) foi realizada conforme os métodos expedito e Weibull, conforme apresentado abaixo na Figura 81.

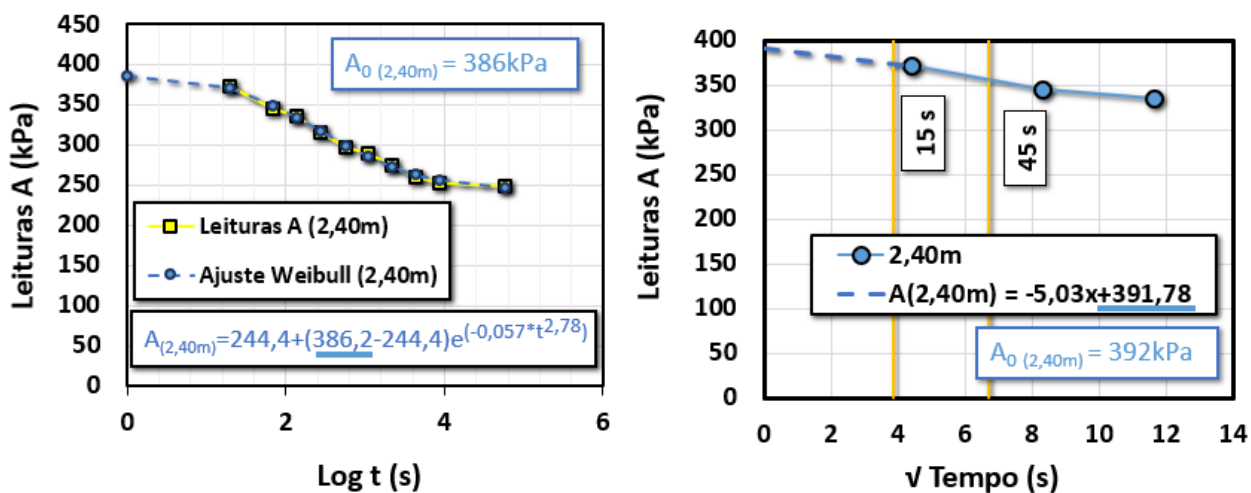


Figura 81: Correção de A pelos métodos Weibull e expedito (Fonte: Autor).

Portanto, a partir da correção expedita, tem-se que $A_{0(nd)} = 392 \text{ kPa}$.

A correção da leitura B para condição não-drenada foi obtida através dos métodos da igualdade e simplificado. O método da igualdade é representado através da Figura 82, abaixo.

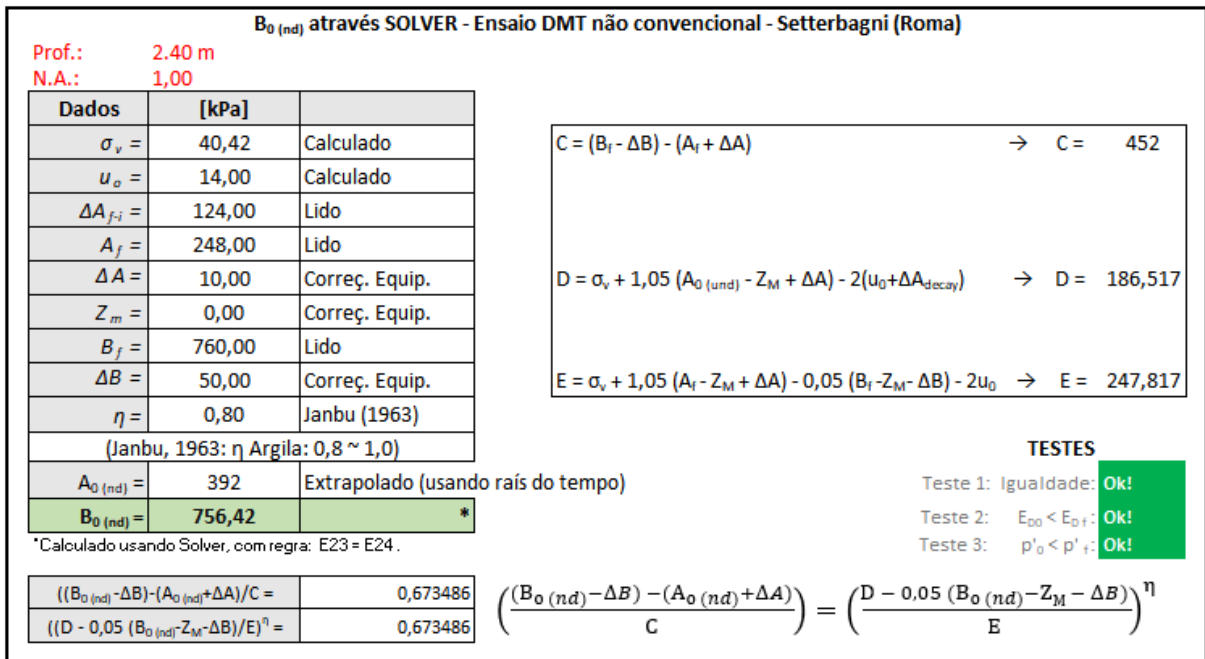


Figura 82: Cálculo de $B_{0(nd)}$ para 2,40m de profundidade (Fonte: Autor).

Onde, A_f representa o último valor de A após sua estabilização e, B_f o valor de B pela expansão da membrana após lido A_f . ΔA_{f-i} é a diferença entre A_f e o primeiro A lido pelo equipamento, A_i .

A partir de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$ obtidos pelo método analítico, foram calculados os parâmetros intermediários e parâmetros de comportamento do solo conforme metodologia clássica do ensaio DMT. Os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Tabela de análise dos resultados do ensaio DMT convencional e especial.

Depth (m)	P ₀ (kPa)	P ₁ (kPa)	u ₀ (kPa)	Y _d (kN/m ³)	σ' _{v0} (kPa)	Intermediate Parameters		K ₀	OCR	S _u (kPa)	S _u / σ' _{v0}	M _{DMT}		
						E ₀ (Mpa)	I _b					RM ≥ 0,85	(Mpa)	
0,60	258,25	925,00	0	18,6	11,2	23,1	2,6	23,1				3,25	75,05	
0,80	183,50	425,00	0	16,7	14,5	8,4	1,3	12,6				2,73	22,90	
1,00	164,25	180,00	0	13,7	17,3	0,5	0,1	9,5	1,8	11,4	26,6	1,54	2,45	1,22
1,20	145,00	250,00	2	15,7	18,4	3,6	0,7	7,8	1,6	8,4	22,2	1,21	2,25	8,09
1,40	210,00	420,00	4	16,7	19,7	7,3	1,0	10,4	1,9	13,1	34,1	1,73	2,54	18,54
1,60	231,75	510,00	6	16,7	21,1	9,7	1,2	10,7					2,57	24,90
1,80	286,50	570,00	8	16,7	22,4	9,8	1,0	12,4	2,1	17,2	48,2	2,15	2,71	26,61
2,10	307,00	580,00	11	16,7	24,4	9,5	0,9	12,1	2,1	16,6	50,96	2,09	2,69	25,57
2,20	327,50	590,00	12	16,7	25,1	9,1	0,8	12,6	2,1	17,7	55,1	2,20	2,73	24,88
2,40	386,80	706,00	14	16,7	26,4	11,1	0,9	14,1	2,3	21,0	66,76	2,53	2,85	31,58
2,60	424,25	755,00	16	17,7	27,9	11,5	0,8	14,6	2,3	22,2	73,78	2,64	2,88	33,15
2,80	402,50	770,00	18	17,7	29,5	12,8	1,0	13,0	2,2	18,5	67,31	2,28	2,76	35,35
3,00	500,25	810,00	20	17,7	31,0	10,7	0,6	15,5	2,4	24,4	88,22	2,84	2,95	31,56

O perfil geotécnico do local estudado é apresentado nas Figuras 83 e 84, onde em 2,40m são destacados os parâmetros obtidos através do método da igualdade.

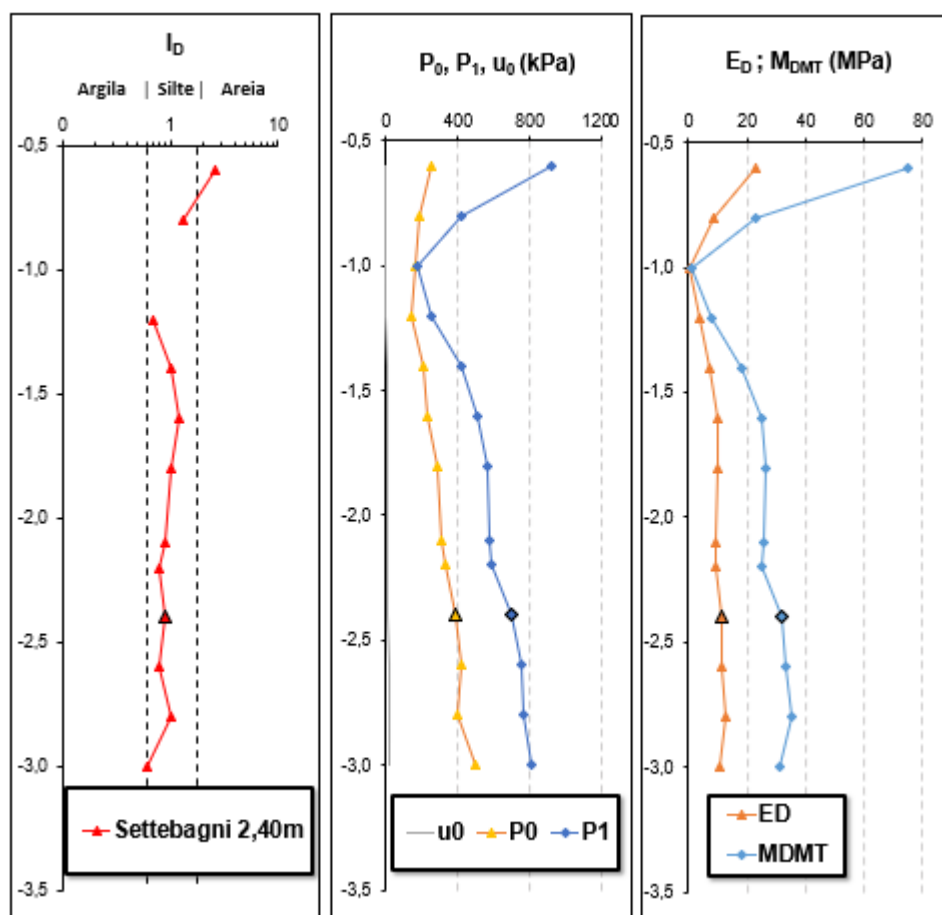


Figura 83: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

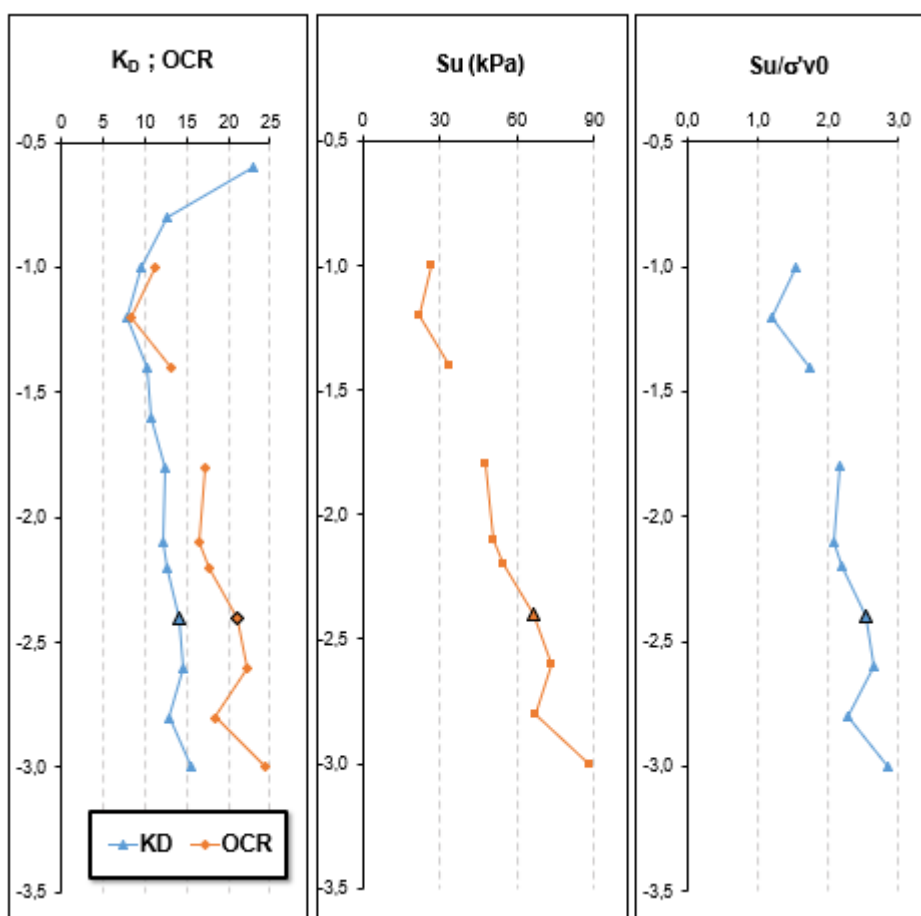


Figura 84: Parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios DMT convencional e especial
(Fonte: Autor).

A Tabela 25 abaixo apresenta o comparativo entre as leituras A_0 e B_0 obtidas através dos métodos do ensaio especial e, A e B pelo ensaio convencional.

Tabela 25: Comparação entre as leituras A_0 e B_0 pelo ensaio convencional e especial.

Ensaio Especial					Ensaio Convencional		
Prof. (m)	$A_{0(Weibull)}$ (kPa)	$A_{0(\sqrt{t})}$ (kPa)	B_0^a (kPa)	B_0^b (kPa)	Prof. (m)	A (kPa)	B (kPa)
2,40	386	392	756	764	2,20	330	640

^a Eq. (48): Análise por método da igualdade

^b Eq. (50): Análise simplificada

A Tabela 26, a seguir, apresenta os parâmetros geotécnicos do solo obtidos através do método da igualdade, analisado com auxílio da ferramenta Solver Microsoft Excel, e método simplificado.

Tabela 26: Comparação entre os métodos igualdade e simplificado.

Parâmetros Intermediários				Parâmetros Geotécnicos				
Prof. (m)	E_D (MPa)	I_D	k_D	K_0	OCR	S_u (kPa)	S_u / σ'_{v0}	M_{DMT}
2,4m (Solver)	11,1	0,9	14,1	2,3	21,0	66,76	2,53	31,58
2,4m (Simplif.)	11,4	0,9	14,1	2,3	21,0	66,76	2,53	32,44

7.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados gráficos nos quais são feitas comparações entre resultados de parâmetros estimados nos diferentes sítios analisados. Os dados são plotados em escala 1:1 com o objetivo de facilitar a comparação entre métodos de correção apresentados neste trabalho para dissipação completa: Método Weibull, Expedito, da Igualdade e Simplificado. Os resultados dos ensaios de dissipação incompleta não serão apresentados, uma vez que a análise através do método Weibull não é confiável devido à sua dependência do número de pontos contidos na curva de queda das leituras A . E, além disso, o método da igualdade é válido apenas para condição de dissipação completa, não sendo possível compará-lo com o método simplificado para dissipação incompleta.

A Figura 85 apresenta o comparativo entre as leituras $A_{0(nd)}$ obtidas pelos métodos Weibull e Expedito para os sítios analisados, agrupando inclusive os resultados apresentados no anexo.

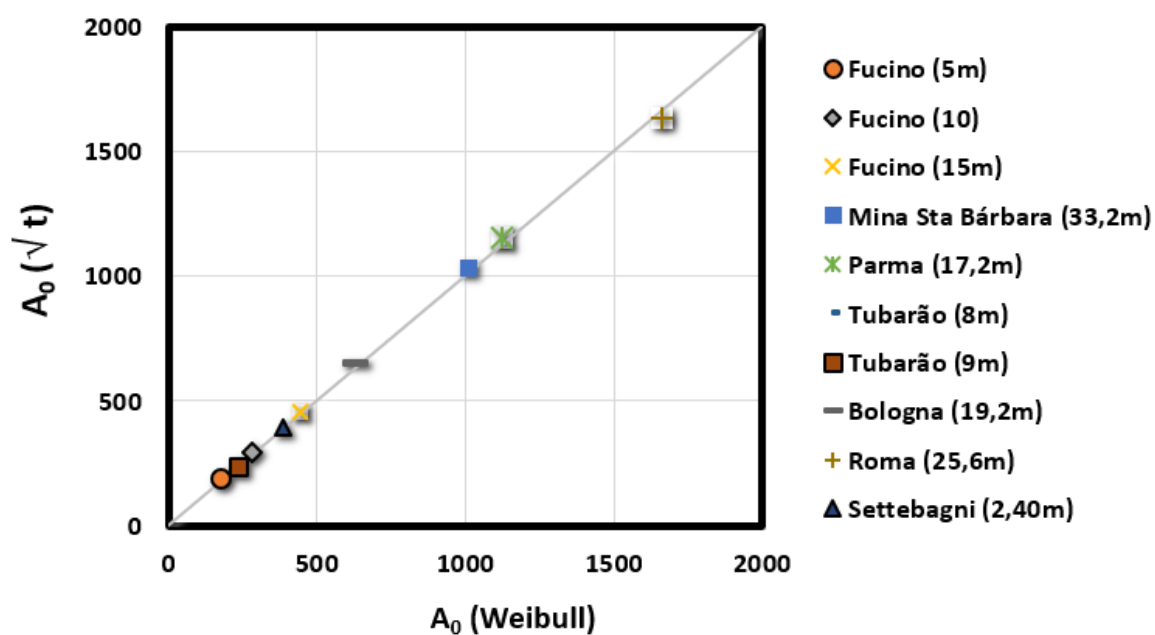


Figura 85: Comparação entre $A_{0(nd)}$ pelos métodos Weibull e expedito.

A Figura 86 apresenta a comparação a leitura B corrigida para condição não-drenada através dos métodos Simplificado e da Igualdade.

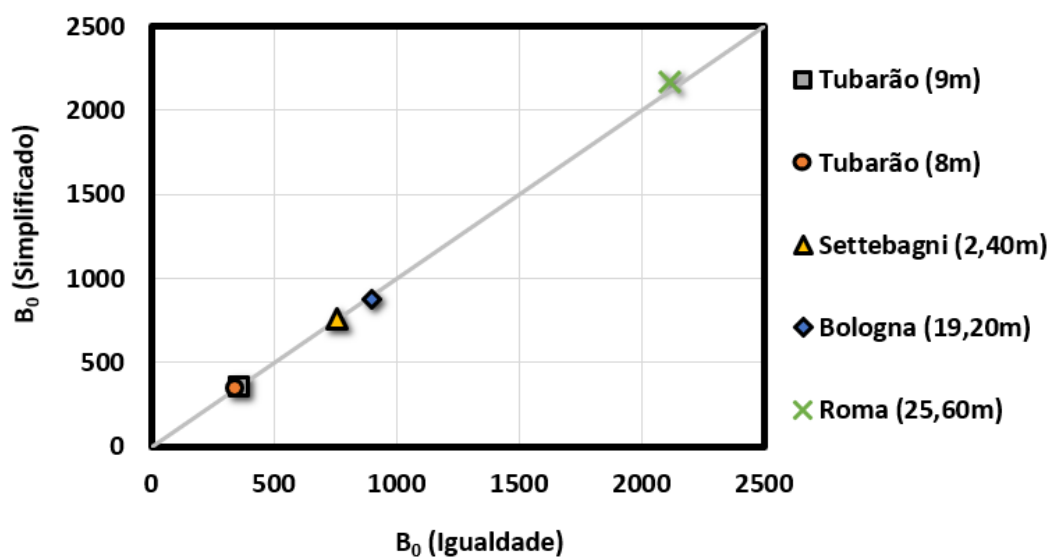


Figura 86: Comparação entre $B_{0(nd)}$ pelos métodos da Igualdade e Simplificado.

A Figura 87 apresenta o comparativo entre P_0 e P_1 calculados através de $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$, que por sua vez foram obtidos através dos métodos da igualdade e simplificado.

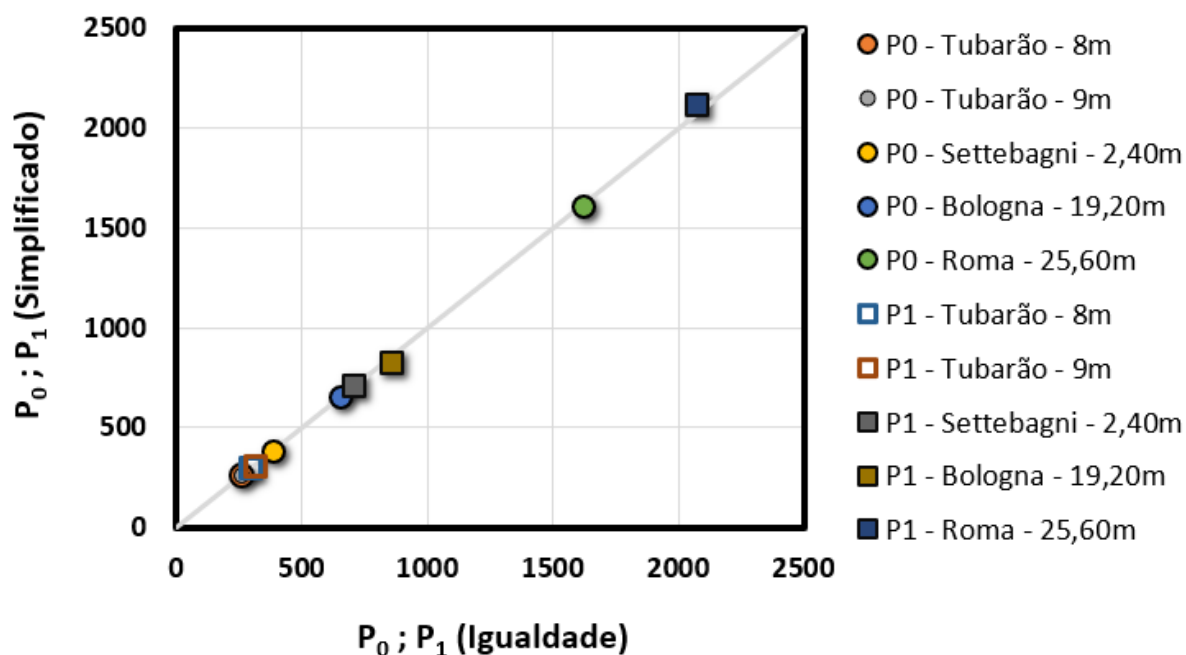


Figura 87: Comparação entre P_0 e P_1 calculados através $A_{0(nd)}$ e $B_{0(nd)}$ que foram obtidos pelos métodos da Igualdade e Simplificado.

As Figuras 88 e 89 apresentam o comparativo dos métodos da igualdade e simplificado para os parâmetros intermediários E_D , K_D e I_D .

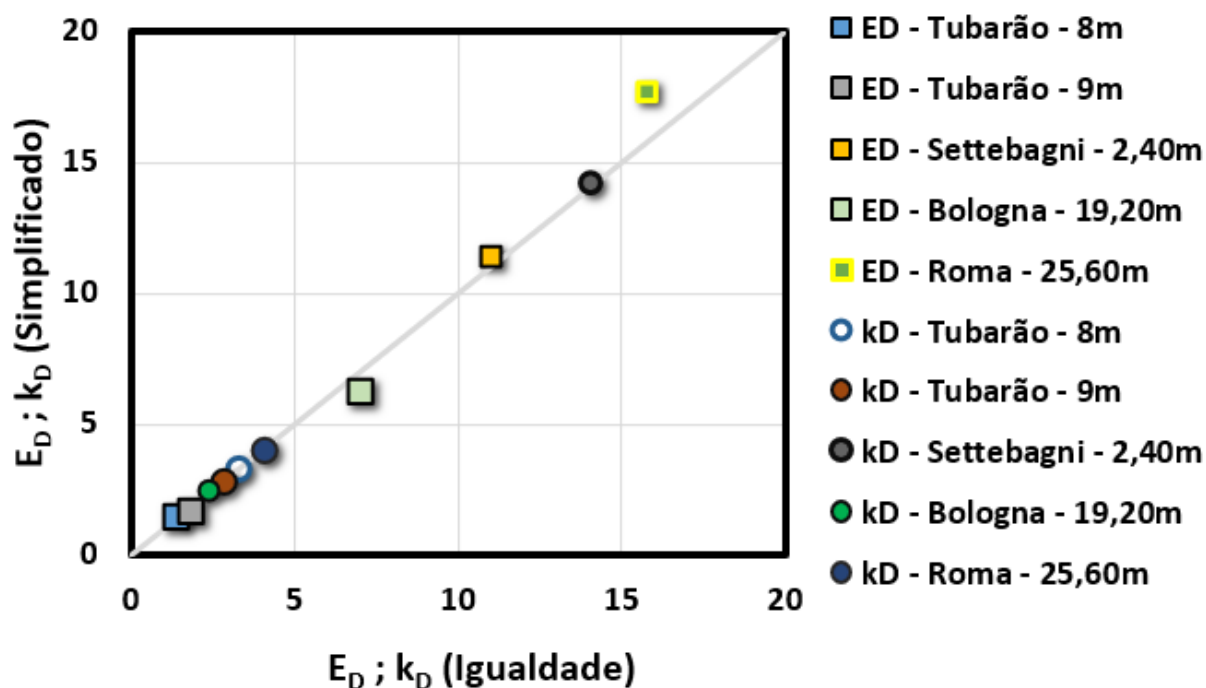


Figura 88: Comparativos entre E_D e K_D pelos métodos da igualdade e simplificado.

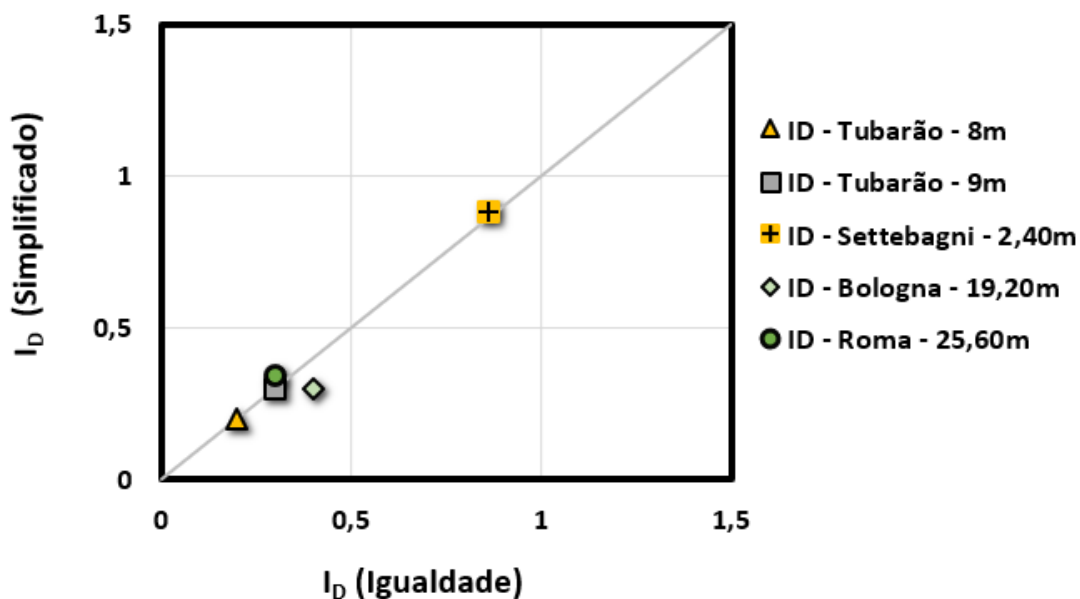


Figura 89: Comparativo entre I_D obtido pelos métodos da igualdade e simplificado.

A Figura 90, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos da igualdade e simplificado para os parâmetros do solo K_0 e S_u/σ'_{v0} .

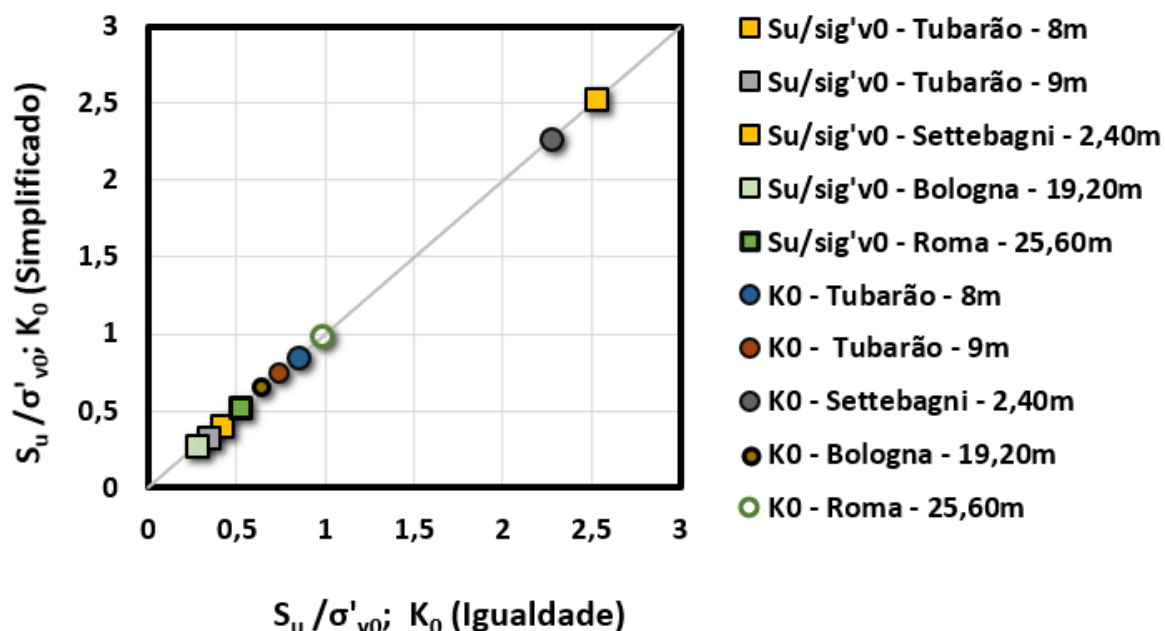


Figura 90: Comparativo entre K_0 e S_u/σ'_{v0} obtidos pelos métodos da igualdade e simplificado.

A Figura 91 apresenta o comparativo entre os parâmetros de comportamento do solo OCR e M_{DMT} obtidos através dos métodos da igualdade e simplificado.

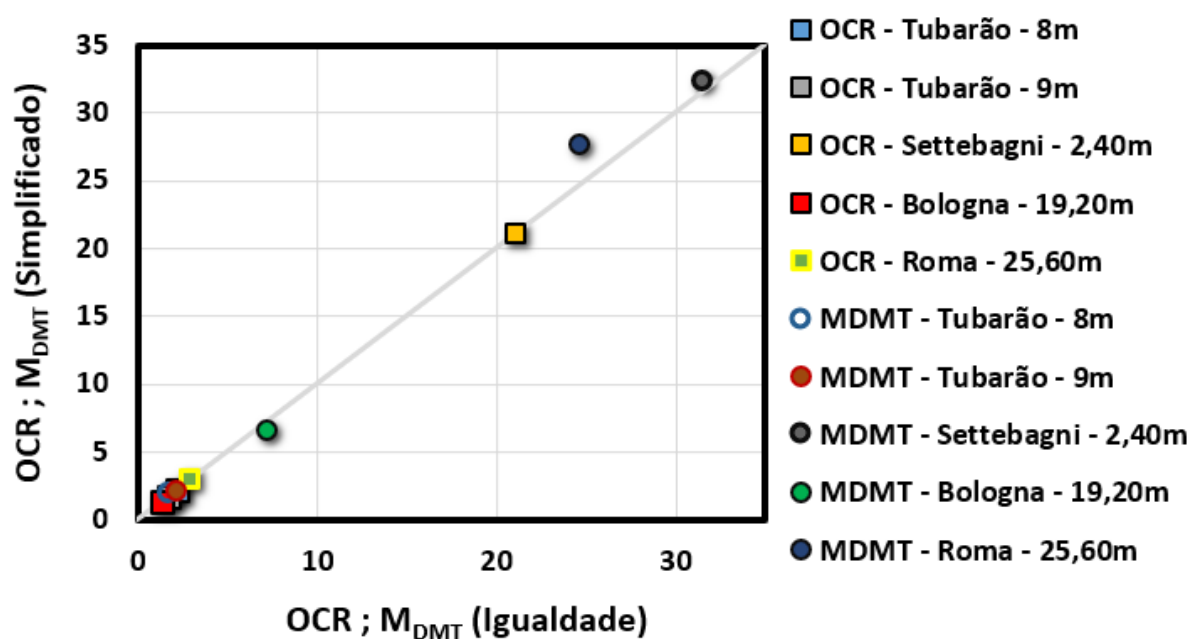


Figura 91: Comparativo entre os parâmetros OCR e M_{DMT} obtidos pelos métodos da igualdade e simplificado.

A Figura 92 apresenta o comparativo entre a resistência não-drenada do solo (S_u) obtida pelo método da igualdade e a resistência S_u obtida pelo método simplificado.

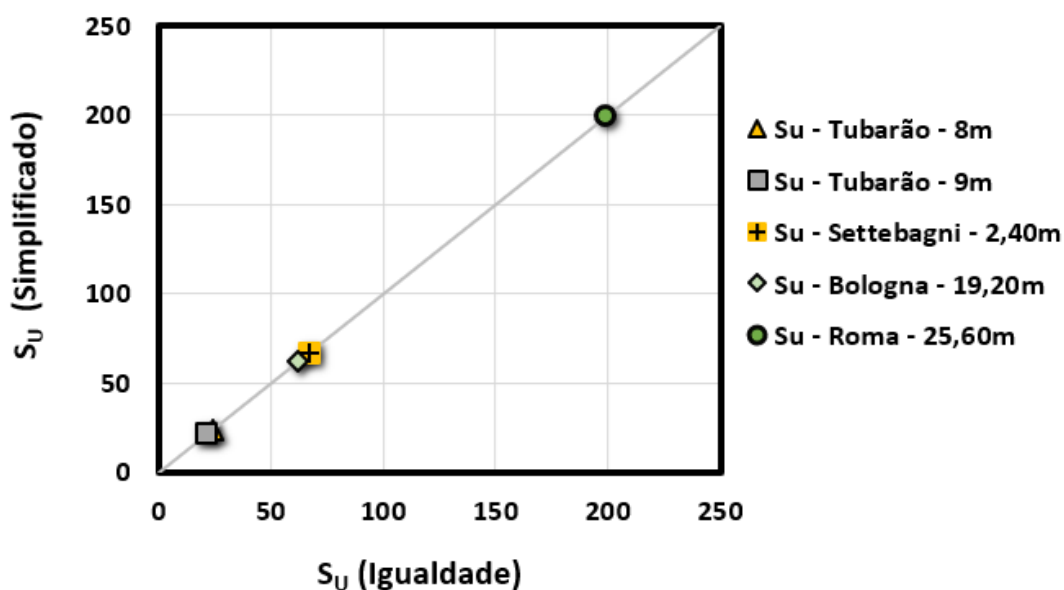


Figura 92: Comparativo entre S_u obtidos pelo método da igualdade e simplificado.

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões desta pesquisa, de forma resumida, baseadas nos objetivos apresentados no capítulo 1, na análise paramétrica apresentada no capítulo 6 e, ainda, nos resultados e análises obtidos através dos ensaios de campo apresentados no capítulo 7.

8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira geral, os objetivos deste trabalho visam contribuir no conhecimento sobre a influência da condição de drenagem parcial na realização do ensaio DMT. E, ainda, no avanço do conhecimento através da proposição de procedimentos, e métodos de interpretação, para condições especiais como forma de compensar os erros causados pela interpretação não adequada, em virtude da ocorrência dissipação de poropressão em solos sob drenagem parcial.

Para cumprir com estes objetivos fez-se necessário realizar a revisão bibliográfica acerca do equipamento DMT, dos procedimentos convencionais de execução e interpretação do ensaio e, da influência da condição de drenagem durante o ensaio, através de literatura nacional e internacional, que foram relevantes ao tema de pesquisa.

Verificou-se que o ensaio DMT possui seus métodos de interpretação baseados no comportamento dos solos em condição não-drenada (Argila) e drenada (Areia). Neste caso, o DMT convencional não é indicado – a depender da taxa de dissipação - para obtenção dos parâmetros geotécnicos dos solos sob condição de drenagem parcial, em virtude da ocorrência de dissipação de poropressão e de sua influência nas leituras do equipamento. Para o DMT, tal condição afeta tanto na etapa de cravação da lâmina, quanto na etapa de expansão da membrana, sendo este último o foco deste trabalho.

Para o prosseguimento das etapas de execução e interpretação especial do ensaio, foram realizados dois ensaios em solo argiloso do campo experimental de Tubarão, onde foram simuladas condições de drenagens através de sucessivas leituras *A* até atingir a completa dissipação de poropressão, sendo a membrana expandida para *B*, ao final. A opção de estudar o efeito da drenagem em solo argiloso surgiu em virtude do comportamento deste tipo de solo

ser conhecido quando ensaiado em condição não-drenada. Portanto, ao permitir a ocorrência de drenagem, o método de correção deve corrigir as leituras para condição não drenada, resultando em valores próximos ao esperado.

Como forma de compensar os erros de leitura causados pela dissipação de poropressão, concomitantemente à expansão da membrana, foi necessário corrigir as leituras A e B , transportando-as para a condição não-drenada teórica. Sendo então, apresentados 2 métodos de correção da leitura A : Weibull e Expedito. Apesar da diferença entre estes métodos (Weibull é baseado em estatística e pouco produtivo; O Expedito é simplificado e de fácil aplicação) ambos se mostraram confiáveis, como demonstrado nos capítulos 5, 7 e nas Figuras apresentadas em anexo.

Para a leitura B foram propostos dois métodos de correção: Método da Dissipação Completa e Método da Dissipação Incompleta. O primeiro método pode ser realizado através de duas abordagens: Abordagem Analítica (Equação da Igualdade) e Abordagem Simplificada. Enquanto o segundo, apenas pela abordagem simplificada. A interpretação do Método da Dissipação Completa através da abordagem pela equação da igualdade se mostrou complexo e improdutivo, sendo então desenvolvida a abordagem simplificada de interpretação com o intuito de incentivar sua utilização e ampliar a discussão das soluções propostas aqui. Apesar do Método da Dissipação Completa permitir também a obtenção do parâmetro C_h a partir dos trabalhos de Schmertmann (1988), Robertson, Campanella e Gillespie (1988), Marchetti e Totani (1989) e Totani, Calabrese e Monaco (1998), o tempo de ensaio será influenciado pelo potencial de drenagem do solo, podendo tornar-se economicamente inviável na prática. Assim, foi desenvolvido o Método da Dissipação Incompleta, onde é possível realizar as correções das leituras com ensaio de 2 a 3 minutos de dissipação, não sendo agregados grandes custos à campanha de investigação. Neste método, a solução por igualdade não é realizada por haver mais de uma variável no problema ($B_{0(nd)}$ e Δu_{dis}), sendo resolvido apenas a partir da abordagem simplificada.

Com o objetivo de avaliar o comportamento do Método da Dissipação Completa a partir da variação dos parâmetros, foi realizada a análise paramétrica de ambas as abordagens (Equação da Igualdade e Simplificada), sendo possível verificar que seus comportamentos foram praticamente iguais, onde:

- (a) A variação de η implicou na diminuição dos parâmetros I_D , E_D e M_{DMT} , enquanto K_D , K_0 , S_u , S_u/σ'_{v0} e OCR não são influenciados;
- (b) A variação de σ'_{v0} implicou no aumento das leituras A e B e dos parâmetros E_D , S_u , e M_{DMT} , enquanto I_D , K_D , K_0 , S_u/σ'_{v0} e OCR mantiveram-se constantes;
- (c) A variação de m (taxa de queda da leitura A) implicou no aumento da correção $A_{0(nd)}$ (quanto mais drenado, maior a correção) e maior a diferença $(p_1 - p_0)$. Os parâmetros I_D , K_D , E_D , S_u , M_{DMT} , K_0 , S_u/σ'_{v0} e OCR também aumentaram.

E, ainda, a taxa de queda das leituras A , que representa a taxa de dissipação de poropressão, se apresentou como a variável que mais influencia nos parâmetros de comportamento.

A aplicação e validação, dos métodos de interpretação propostos neste trabalho foi apresentada no capítulo 7, onde os resultados dos 7 ensaios realizados em solo argiloso através dos métodos de dissipação completa e incompleta se mostraram satisfatórios nas abordagens analítica e simplificada, estando próximos ao esperado para os solos analisados em condição não-drenada. Os resultados em argilas demonstram que é possível compensar os erros originados nas leituras pela ocorrência de drenagem durante o ensaio, transportando as leituras para a condição não-drenada e obtendo parâmetros de comportamento em concordância com os valores medidos em ensaios convencionais acima e abaixo da profundidade estudada. No ensaio em solo siltoso apresentado neste trabalho as correções não foram significantes por se tratar de um solo altamente pré-adensado ($OCR \sim 25$) e da cravação ter sido realizada também em condição de drenagem parcial. Portanto, embora não tenha sido o foco desta pesquisa, para solos siltosos é indicado que seja realizada a cravação com velocidade tal que garanta a manutenção da condição não drenada durante esta etapa e, posteriormente, aplicar os métodos propostos neste trabalho. Além disso, considerar que $S_u/\sigma'_p \sim 0,22$ para a estimativa da resistência não-drenada (S_u) de solos siltosos (ver seção 3.1.3.) significa subestimar sua resistência nesta condição.

Como já discutido, a taxa de dissipação é fator relevante na obtenção dos parâmetros de comportamento dos solos. Portanto, nos casos em que não se conhece o solo investigado, é indicado que seja feito sondagens teste realizando sucessivas leituras A . Se as leituras não variarem significativamente durante 1 min, o ensaio pode ser realizado através dos procedimentos convencionais e interpretado como condição não-drenada. Se as variações das

leituras A forem significativas, tanto os procedimentos dos ensaios, quanto os métodos de interpretação, apresentados nesta pesquisa são mais indicados.

8.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para dar continuidade à esta linha de pesquisa, aumentando a contribuição e incentivando a discussão sobre as soluções propostas neste trabalho, é sugerido:

- (a) Expandir o banco de dados de ensaios DMT especial em diferentes sítios e tipos de solos;
- (b) Estabelecer um valor de taxa de queda das leituras A em que, a partir dele, seja interessante utilizar o método especial;
- (c) Verificar a partir de qual valor de OCR as correções se tornam insignificantes nos siltes;
- (d) Aprofundar as pesquisas utilizando a combinação entre velocidade de cravação e as correções através do método especial de ensaio;
- (e) Realizar ensaios também em câmara de calibração, com o objetivo de refinar a análise paramétrica;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

BALDI, G.; BELLOTTI, R.; GHIONNA, V.; JAMIOLKOWSKI, M.; NARCHETTI, S.; PASQUALINI, E. Flat dilatometer tests in calibration chambers. **Use Of In-situ Tests In Geotech. Eng.** 1986. n.6, p. 431-446.

BALDI, G.; BELLOTTI, R.; GHIONNA, V.; JAMIOLKOWSKI, M. Stiffness of sands from CPT, SPT and DMT: A critical review. **Proceedings Of The Geotech. Conf. On Penetration Testinging**. Birmingham. 1988. n.42, p. 299-305.

BEDIN, J. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita**. 2006. 255 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BULLOCK, P. J. Driven Pile Setup Testing and the Dilatometer. **The 3rd International Conference On The Flat Dilatometer**. Roma, p. 1-8. 2015.

BURGHIGNOLI, A.; CAVALERA, L.; CHIEPPA, V.; JAMIOLKOVSKI, M.; MANCUSO, C.; MARCHETTI, S.; PANE, V.; PAOLIANI, P.; SILVESTRI, F.; VINAL, F. Geotechnical characterization of Fucino clay. **Proceedings Of The 10th European Conf. Soil Mech. Found. Engng.** 1991. v. 1, p. 27-40.

CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K.; GILLESPIE, D.G.; GREIG, J. Recent developments of in-situ testing of soils. **Proceedings Of The 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.** 1985. v. 2, p. 849-854.

CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K. Use and interpretation of a research dilatometer. **Canadian Geotechnical Journal**. Canadá. 1991. n. 10, v. 28, p. 113-126.

CEN. **EUROCODE 7: Geotechnical design. Part 3: design assisted by field testing. Section 9 - Flat dilatometer test (DMT)**. Bruxelas. 1997. 10 p.

COUTINHO, R. Q.; OLIVEIRA, J. T. R.; FRANÇA, A. E.; DANZIGER, F. A. B. Ensaio de piezocone na argila mole de Ibura, Recife, PE. **Proceedings of The 11th Bras. Cong. Mech. Solos Eng. Geotéc.** 1998. v. 2, p. 957-966.

DEJONG, J. T.; JAEGER, R. A.; BOULANGER, R. W.; RANDOLPH, M. F.; WAHL D. A. J.; Variable Penetration Rate Cone Penetration Testing for Characterizing Intermediate Soils. **4th International Conference On Geotechnical And Geophysical Site Characterization (ISC4)**. Porto de Galinhas, p. 25-42. 2012.

DIENSTMANN, G., MAGHOUS, S.; SCHNAID, F. Theoretical analysis and finite-element simulation for nonlinear poroelastic behavior of cylinder expansion in infinite media under transient pore-fluid flow conditions. **International Journal of Geomechanics**. 2017. n. 7. v. 17, p. 1-21.

DIENSTMANN, G.; SCHNAID, F.; MAGHOUS, S.; DEJONG, J. Piezocone penetration rate effects in transient gold tailings. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 2018. n. 2. v. 144.

DURGUNOGLU, H. T.; MITCHELL, J. K. Static penetration resistance of soils. **Proceedings Of The 1st ASCE Specialty Conf. On In Situ Measurement Of Soil Properties**. Raleigh. 1975. v. 1, p. 151-171.

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

HOUSE, A. R.; OLIVEIRA, J. R. M. S.; RANDOLPH, M. F. Evaluation the coefficient of consolidation using penetration tests. **Int. Journal Of Physical Modelling In Geomechanics**. 2001. v. 3, p. 17-26.

HUANG, A. B. Strain path analyses for arbitrary three-dimensional penetrometers. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. 1989. v. 13, p. 551-564.

ISO. **22476-11 (E)**: Geotechnical investigation and testing – field testing – part 11: flat dilatometer test. Genebra. 2017. 17 p.

IWASAKI, K.; TSUCHIYA, H.; SAKAI, Y.; YAMAMOTO, Y. Applicability of the Marchetti dilatometer test to soft ground in Japan. **Proc. GEOCOAST '91**. 1991. 4 p.

JACKY, J. The coefficient of Earth pressure at rest. **Journal Of The Society Of Hungarian Architects And Engineers**. p. 355-358. 1944.

JAMIOLKOWSKI, M.; GHIONNA, V. N.; LANCELLOTTA, R.; PASQUALINI, E. New correlations of penetration tests for design practice. **Int. Symp. On Penetration Testing. ISOPT-1**. Orlando. 1988. v. 1, p. 263-296.

JANBU, N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. **European Conf. On Soil Mech. And Fdn Engng**. Neisbaden. 1963. v.1, p. 19-25.

KAMEI, T.; IWASAKI, K. Evaluation of undrained shear strength of cohesive soils using a flat dilatometer. **Journal Soil Mech. Found. Eng., Japanese Society Soil Mech. Found. Eng.** 1995. n. 2, v.35, p. 111-116.

KOURETZIS, G. P., Numerical evaluation of clay disturbance during blade penetration in the Flat Dilatometer Test. **Geotechnique**. 2015. v. 5, p. 91-95.

LADD, C. C.; FOOT, R.; ISHIHARA, K.; POULOS, H. G.; SCHLOSSER, F. Stress-deformation and strength characteristics: State of the art report. **Proceedings Of The 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.** Tokyo. 1977. v. 2, p. 421-494.

LECLAIR, D.G. **Prediction of Embankment Performance Using In-Situ Tests**. 1988. 119 f. M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1988.

LUNNE, T.; POWELL, J. J. M.; HOUGE, E.; UGLOW, I. M.; MOKKELBOST, K. H. Correlations of dilatometer readings with lateral stress in clays. **NGI Publ**. Oslo, p. 183-193. 1990.

LUNNE, T.; LACASSE, S.; RAD, N. S. SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments on in situ testing of soils. **General Report Session. Proceedings Of The 12th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.** p. 2339-2404. 1989.

LUNNE, T.; YANG, S.; SCHNAID, F. Session report 2: CPT interpretation. **3rd Int. Symposium On Cone Penetration Testing**. Las Vegas, p. 145-164. 2014.

LUTENEGGER, A. J. Current status of the marchetti dilatometer test. **Int. Symp. On Penetration Testing, ISOPT-1**. Rotterdam, p. 137-156. 1988.

LUTENEGGER, A. J.; MILLER, G. A.. Evaluation of Dilatometer Method to Determine Axial Capacity of Driven Model Pipe Piles in Clay. **Design And Performance Of Deep Foundations: Poles And Piers In Soil And Soft Rock, ASCE**. Dallas, p. 40-63. 1993.

MANTARAS, F.M.; ODEBRECHT, E.; SCHNAID, F. Using piezocone dissipation test to estimate the undrained shear strength in cohesive soil. **Canadian Geotechnical Journal**. 2015. v. 52, p. 318-325.

MARCHETTI, D.; MARCHETTI, S. Flat dilatometer (DMT): Some recent advances. **Vi Italian Conference Of Researchers In Geotechnical Engineering**. 2016. v. 158, p. 428-433.

MARCHETTI, S.; MONACO, P.; TOTANI, G.; CALABRESE, M. TC16: The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations. **International Conference On In Situ Measurement Of Soil Properties. ISSMGE**. Bali. p. 1-41. 2001.

MARCHETTI, S; TOTANI, G.; CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K.; TADDEI, B. The DMT sigma-hc method for piles driven in clay. **Reprinted From Proc. In Situ '86 Gt Div., ASCE**. Blacksburg. p. 765-779. 1986.

MARCHETTI, S. A new in situ test for measurement of horizontal soil deformability. **Proceedings Of The Conference On In Situ Measurement Of Soil Properties. ASCE**. Raleigh, Carolina do Norte. 1975. v. 2, p. 254-259.

MARCHETTI, S. On the field determination of K_0 in sand. **11th International Conference On Soil Mechanics & Foundation Engineering**. São Francisco. 1985. n.1, v.5, p. 2667-2672.

MARCHETTI, S. The flat dilatometer design applications. **Third Geotechnical Engineering Conference**. Cairo. 1997, p. 1-26.

MARCHETTI, S. In situ tests by flat dilatometer. **Journal Of The Geotechnical Engineering Division**. 1980. v. 106, p. 299-320.

- MARCHETTI, S.; CRAPPS, D. **Flat dilatometer manual**. Gainesville. 1981, 95 p.
- MARCHETTI, S.; MONACO, P. Short course on flat dilatometer (DMT). Bali. 2001. p. 1-77.
- MARCHETTI, S.; TOTANI, G. Ch evaluations from DMTA dissipation curves. In: ICSMFE, 12. **Proc. XII ICSMFE**. Rio de Janeiro. 1989. v. 1, p. 281 - 286.
- MARTINEZ, M. G. **Geotechnical characterization of mixed sandy and silty soils using piezocone tests**: Analysis of partial drainage phenomena and rate effects on the experimental soil response. 2014. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Bolonha, Bolonha. 2014.
- MESRI, G. Discussion on “New design procedure for stability of soft clays”. **Journal Geotech. Eng. Div.** ASCE. 1975. v. 101, p. 409-412.
- NASCIMENTO, D. R. J. **Evolução Sedimentar Holocênica Do Delta Do Rio Tubarão, Estado De Santa Catarina**. 2010. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- NASH, D.F.T; POWELL, J.J.M.; LLOYD, I.M. Initial investigations of the soft clay test-bed site at Bothkennar. **Geotechnique**. 1992. n. 2, v. 42, p. 163-182.
- PEREIRA, F. S. **Nova metodologia para interpretação de ensaios de dissipação do piezocone**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- POULSEN, R.; NIELSEN, B. N.; IBSEN, L. B. Effect of drainage conditions on cone penetration testing in silty soils. **Pan-am CGS Geotechnical Conference**. Aalborg. 2011. p. 1-8.
- POWELL, J. J. M.; UGLOW, I. M. Marchetti dilatometer tests in UK. **Int. Symp. On Penetration Testing. ISOPT-1**. Orlando. 1988. v. 1, p. 555-562.
- RANDOLPH, M. F.; HOPE, S. Effect of cone velocity on cone resistance and excess pore pressures. **Proceedings Of The International Symposium On Deformation Characteristics Of Geomaterials – IS Osaka**. Osaka. 2004. n. 1, v.10, p. 147-152.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G.; GILLESPIE, D. Excess pore pressures and the flat dilatometer test. **Int. Symp. On Penetration Testing. ISOPT1**. Orlando, p. 567-576. 1988.

SCHMERTMANN, J. H.; HAYES, J. A.; MEKECHUK, J.; BURGESS, N.; CAMPANELLA, R. G. Proceedings on the Flat Dilatometer. **First International Conference On The Flat Dilatometer**. Edmonton. 1983. p. 1-134.

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

SCHMERTMANN, J. H. The coefficient of consolidation obtained from p_2 dissipation in the DMT. **PennDOT**. Pensilvânia, p. 1-18. 1988.

SCHNAID, F. et al. Effects of test procedure on flat dilatometer test (DMT) results in intermediate soils. **Canadian Geotechnical Journal**. 2016. n. 8, v. 5, p. 1-12.

SCHNAID, F. Geocharacterisation and properties of natural soils by in situ tests. **Proceedings Of The 16th International Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering. Xvi ICSMGE**. Osaka. 2005. v. 1, p. 3-45.

SCHNAID, F. **In situ testing in geomechanics: The main tests**. 1ed. London: Tal

SCHNAID, F.; LEHANE, B.M.; FAHEY, M. In situ test characterisation of unusual geomaterials. **Proc. ISC2 On Geotechnical And Geophysical Site Characterization**. 2004. v. 1, p. 49-73.

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

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Challenges in the Interpretation of the DMT in Tailings. **The 3rd International Conference On The Flat Dilatometer. Dmt'15**. Roma. 2015. p. 1-11.

SCHNEIDER, J. A.; LEHANE, B. M.; SCHNAID, F. Velocity effects on piezocone measurements in normally and over consolidated clays. **Int. Journal Of Physical Modelling In Geomechanics. Ijpmg**. 2007. v. 2, p. 23-34.

SHEN, H.; HAEGEMAN, W.; PEIFFER, H. Design, Use and Interpretation of an Instrumented Flat Dilatometer test (iDMT). **Geotechnical Testing Journal**. 2018. Aceito para publicação.

SILVA, M. F.; WHITE, D. J.; BOLTON, M. D. An analytical study of the effect of penetration rate on piezocone tests in clays. **Int. J. Analyt. and Num. Meth. Geomech.** 2006. n. 6, v. 30, pp. 501-527.

SOSNOSKI, J. **Interpretação de ensaios CPTU e DMT com drenagem parcial**. 2016. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

TOTANI, G.; CALABRESE, M.; MONACO, P. In situ determination of c_h by flat dilatometer (DMT). **Proceedings Of First International Conference On Site Characterisation - ISC '98**. Atlanta. 1998. v. 2, p. 883-888.

US. DOT. **FHWA-SA-91-044**: The flat dilatometer test. Washington. 1992. 102 p.

WHITTLE, A.J.; AUBENY, C.P. The effects of installation disturbance on interpretation of in situ tests in clay. **Predictive Soil Mechanics, Thomas Telford, London**. 1993. p. 742-767.

YU, H. S. In situ testing for geomechanics: James K. Mitchell Lecture. **Int. Conf. On Site Characterization, 2**. Porto. p. 3-38. 2004.

YU, H. S. The First James K. Mitchell Lecture In situ soil testing: from mechanics to interpretation. **Geomechanics And Geoengineering**. 2006. n.3, v. 1, p. 165-195.

YU, H. S.; CARTER, J. P.; BOOKER, J. R. Analysis of the dilatometer test in undrained clay. **Predictive Soil Mechanics**. London, p. 783-795. 1993.

ANEXO – CORREÇÃO DA LEITURA A

Fucino

Segundo Totani, Calabrese e Monaco (1998), o campo experimental Fucino se encontra no centro da Itália e fora estudado através de um extenso programa de investigação da Universidade de L'Aquila, sendo um espesso, e homogêneo, depósito de argila mole lacustre, cimentado e normalmente adensado.

O perfil geotécnico através do ensaio DMT convencional é apresentado na Figura abaixo:

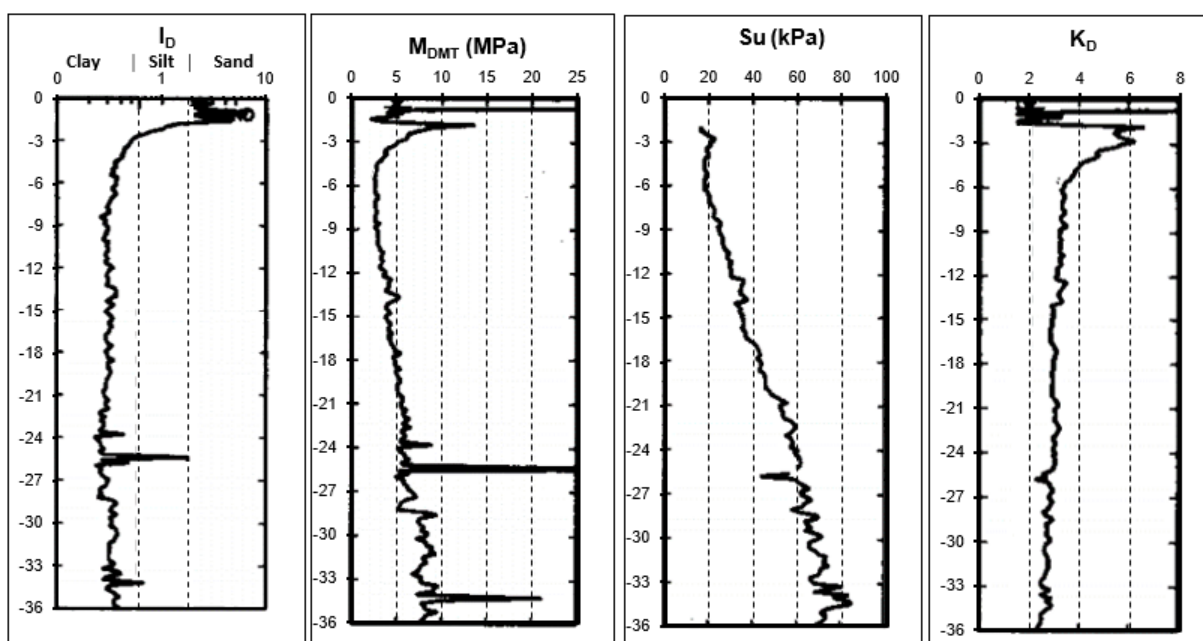


Figura 93: Perfil geotécnico campo experimental Fucino.

Os perfis de dissipação para 5, 10 e 15m, obtidos através do ensaio DMT são apresentados abaixo.

5m:

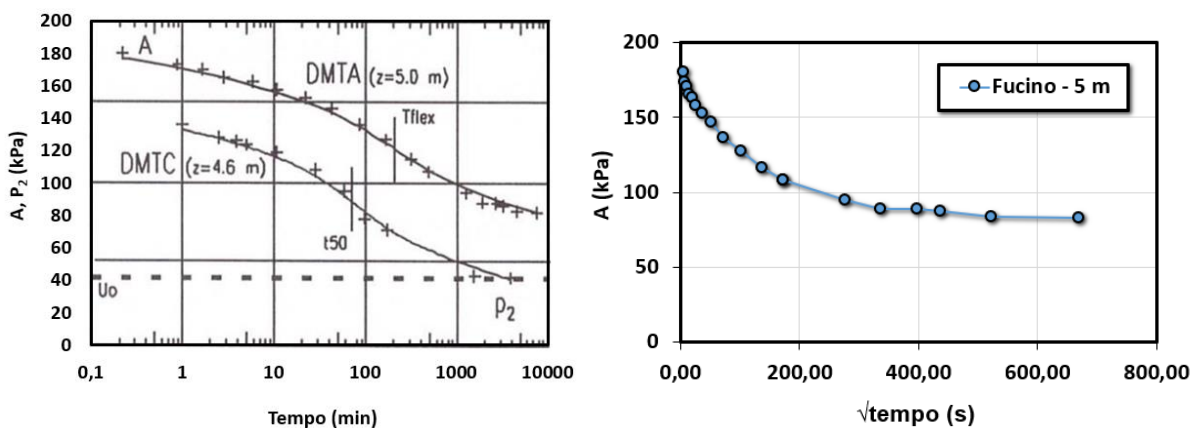


Figura 94: Perfil de dissipação para 5m.

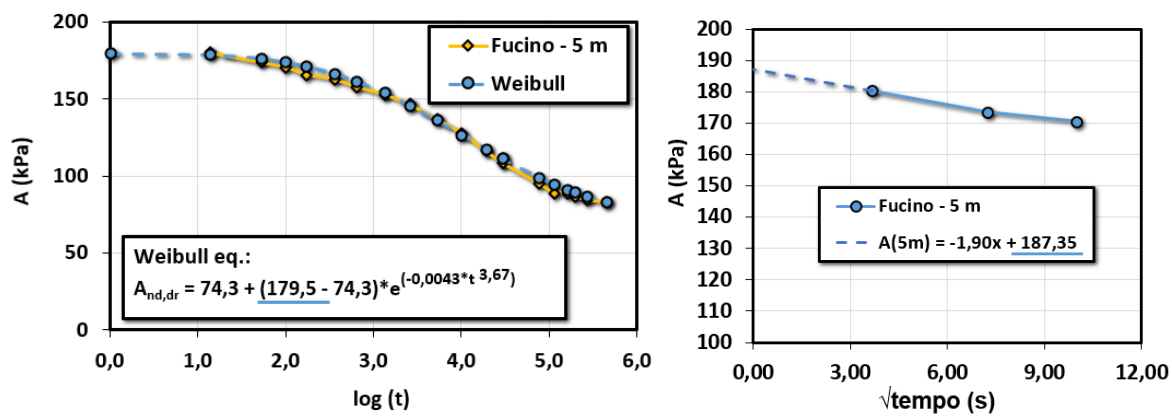


Figura 95: Correções das leituras A em 5m.

10m:

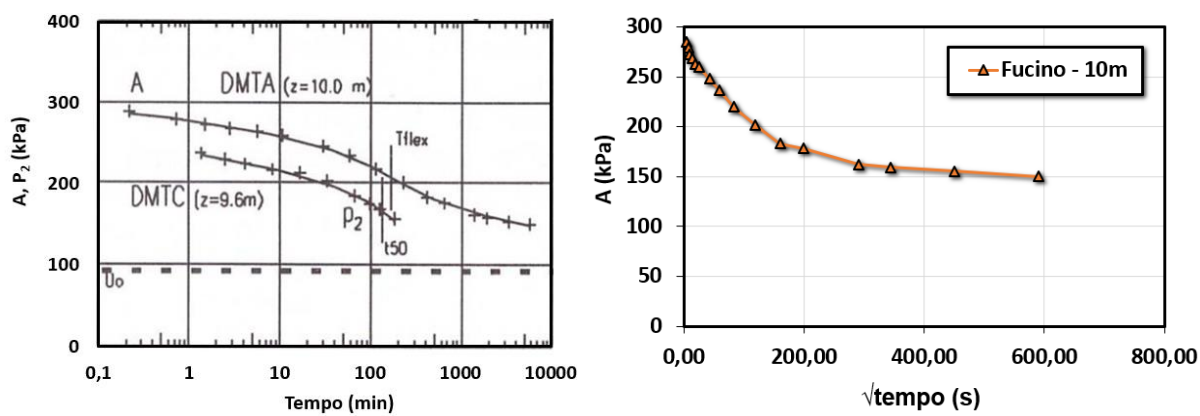


Figura 96: Perfil de dissipação para 10m.

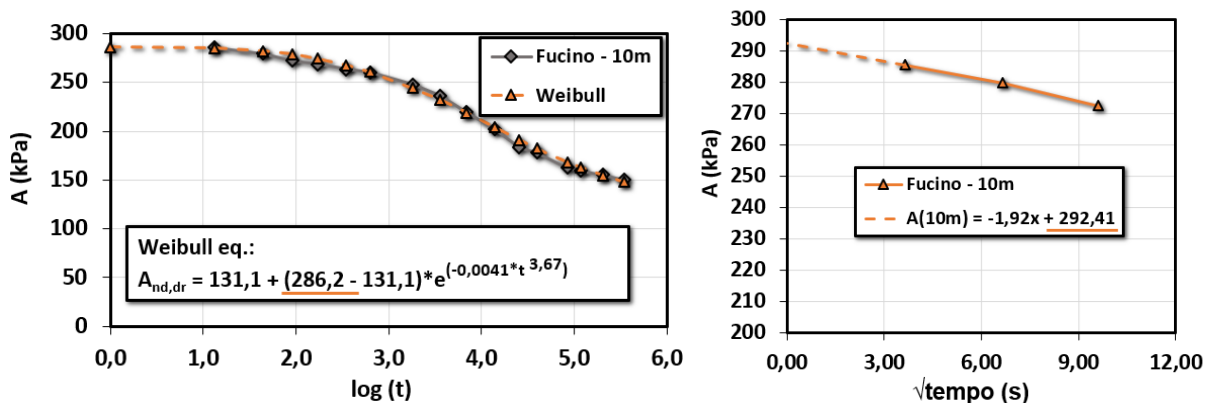


Figura 97: Correções das leituras A em 10m.

15m:

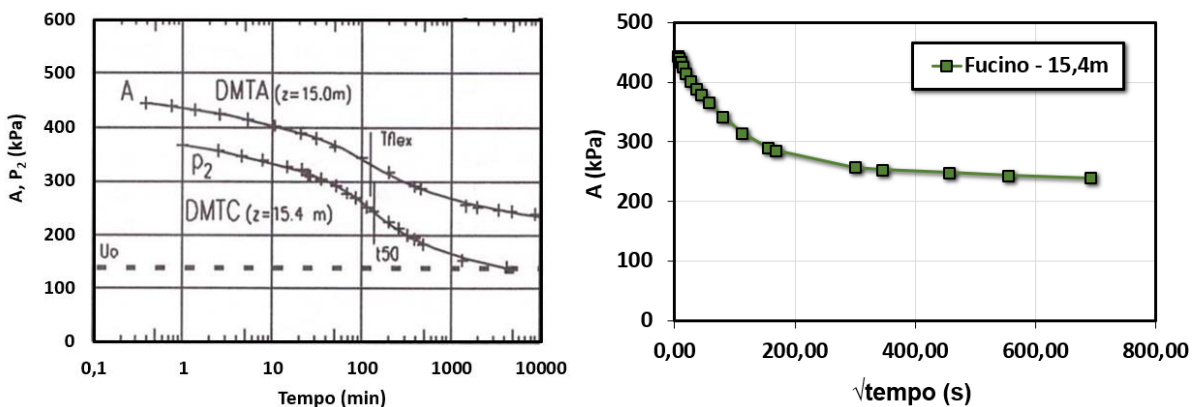


Figura 98: Perfil de dissipação para 15m.

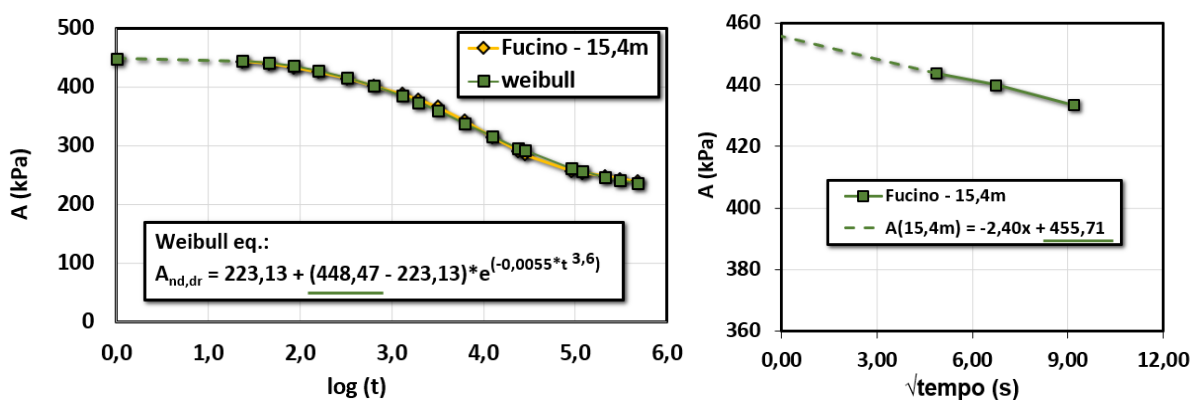


Figura 99: Correções das leituras A em 15m.

Mina Santa Barbara

Segundo Totani, Calabrese e Monaco (1998), em 1994 foram realizados 3 ensaios DMT convencionais e um ensaio de dissipação através do monitoramento da queda das leituras A em um grande depósito sedimentar argiloso localizada na mina a céu aberto Santa Barbara, centro da Itália. Neste depósito um considerável processo de adensamento, que fora monitorado por um longo período através de piezômetros, continuava ocorrendo. A Figura abaixo ilustra o perfil do depósito.

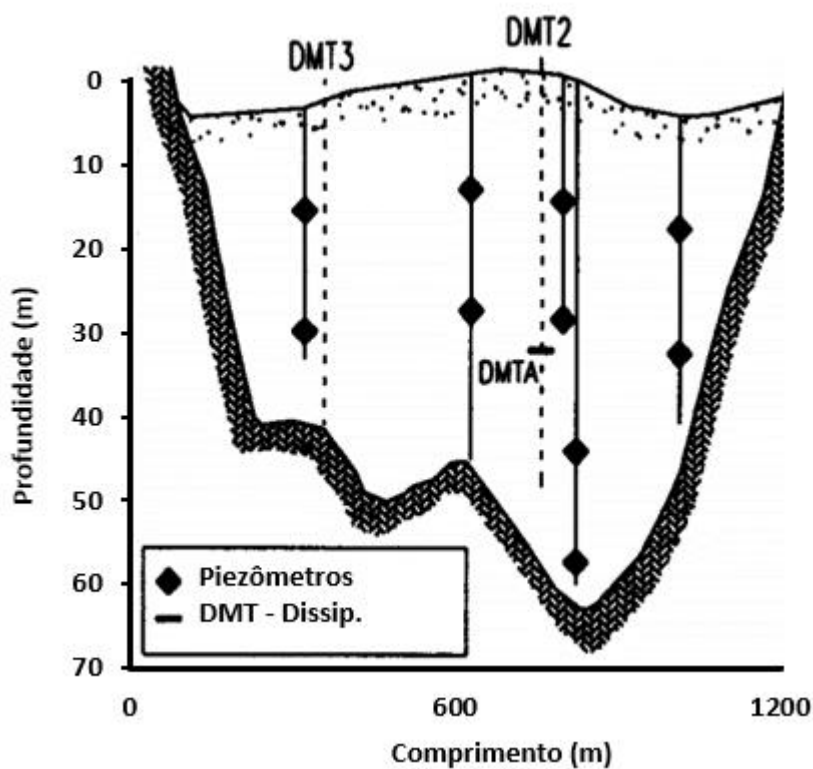


Figura 100: Perfil do depósito da Mina Santa Bárbara.

O perfil geotécnico obtido através do ensaio DMT 3, é apresentado na Figura abaixo.

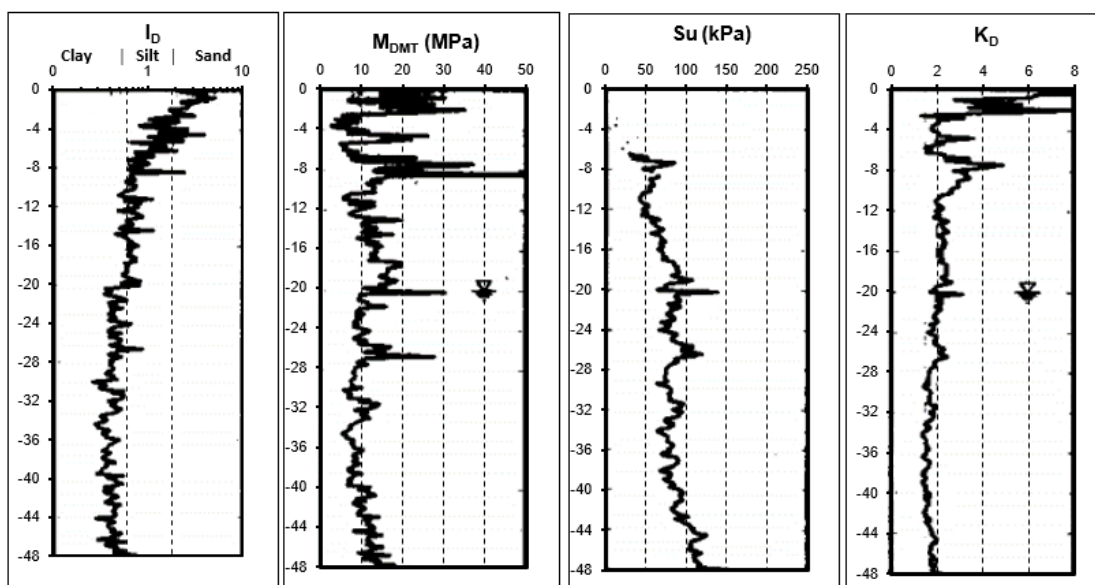


Figura 101: Perfil geotécnico da Mina Santa Bárbara.

Os perfis de dissipação para 33,2m, obtido através do ensaio DMT 3, é apresentado abaixo.

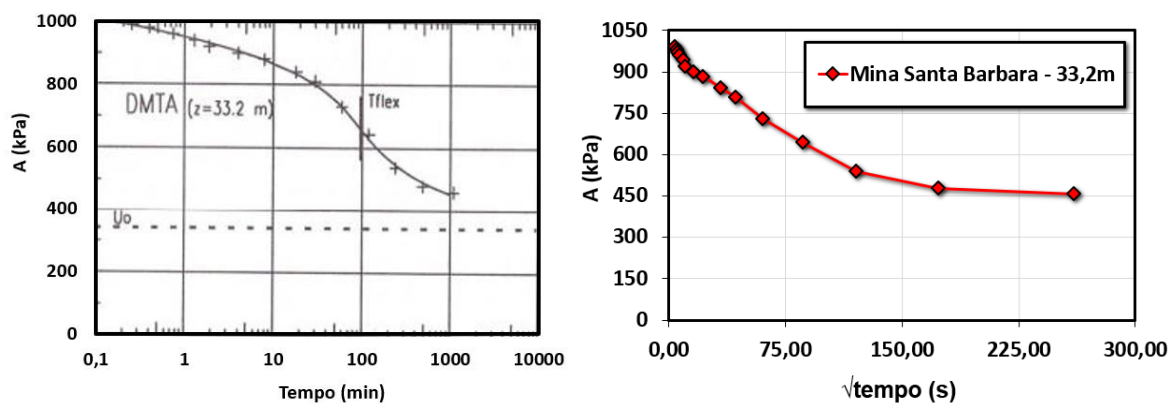


Figura 102: Perfil de dissipação para 33,2m.

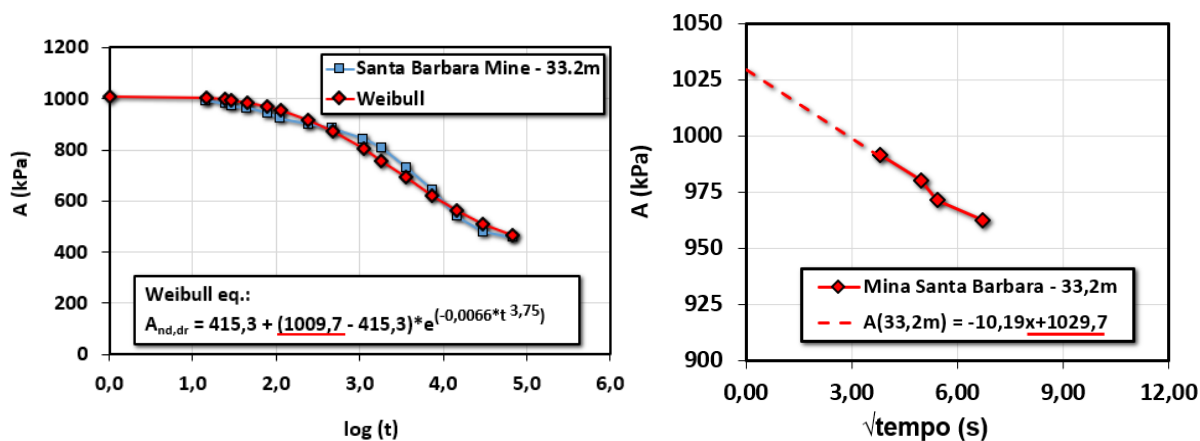


Figura 103: Correções das leituras A em 33,2m.

Parma

Segundo Totani, Calabrese e Monaco (1998), em 1997 foi realizado um programa de investigação de solos abrangente, incluindo muitos ensaios DMT convencionais e monitoramento de dissipação através das quedas de A . Os ensaios foram executados próximo à Parma, norte da Itália, ao longo do Rio Pó, local onde seria construída uma nova, e importante, ferrovia.

O perfil geotécnico apresentado é característico de silte fortemente pré-adensado com camadas frequentes de areia.

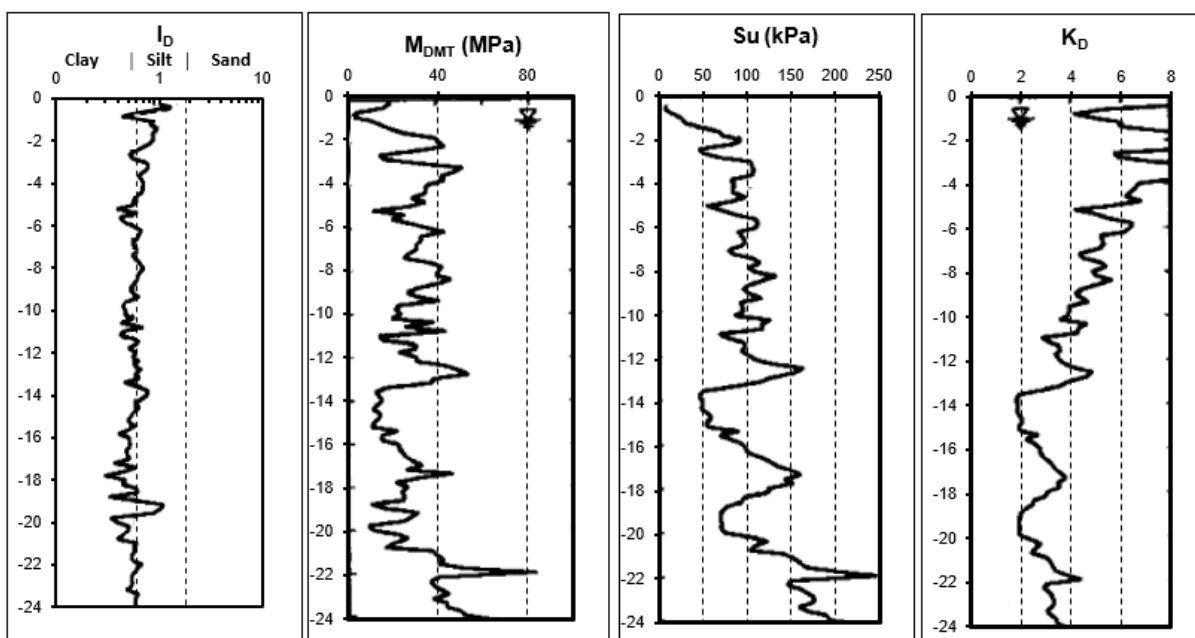


Figura 104: Perfil geotécnico analisado em Parma.

Os perfis de dissipação para 17,2m, obtido através do ensaio DMT, é apresentado abaixo.

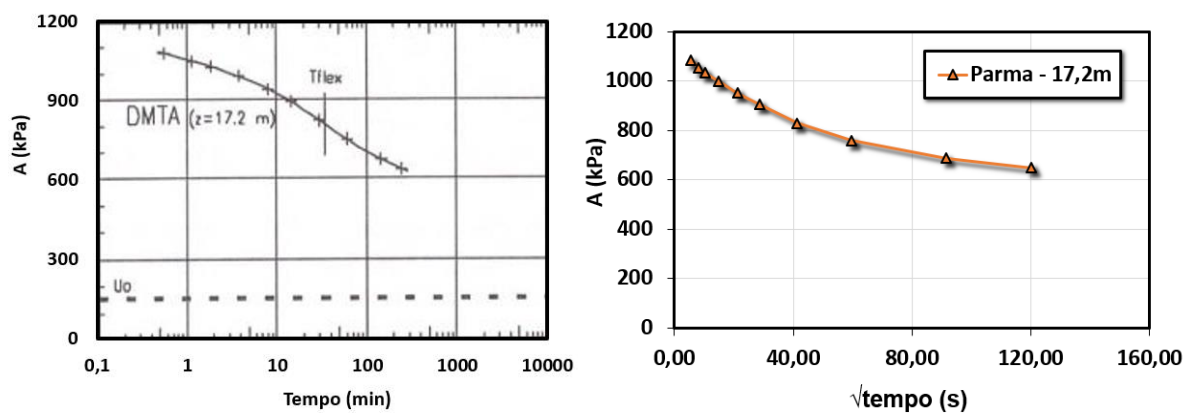


Figura 105: Perfil de dissipação para 17,2m.

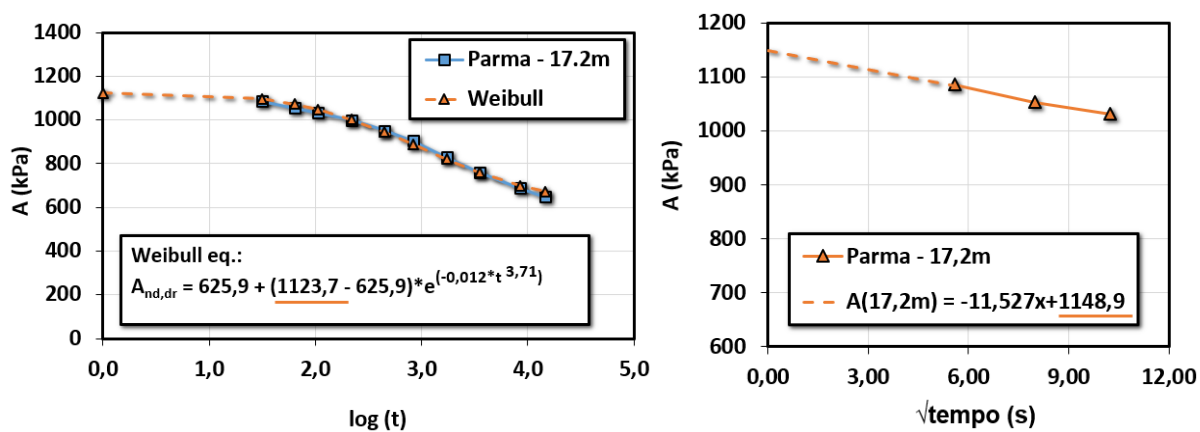


Figura 106: Correções das leituras A em 17,2m.

Tubarão

Na Figura abaixo é apresentado o perfil geotécnico obtido no campo experimental de Tubarão através do ensaio DMT convencional.

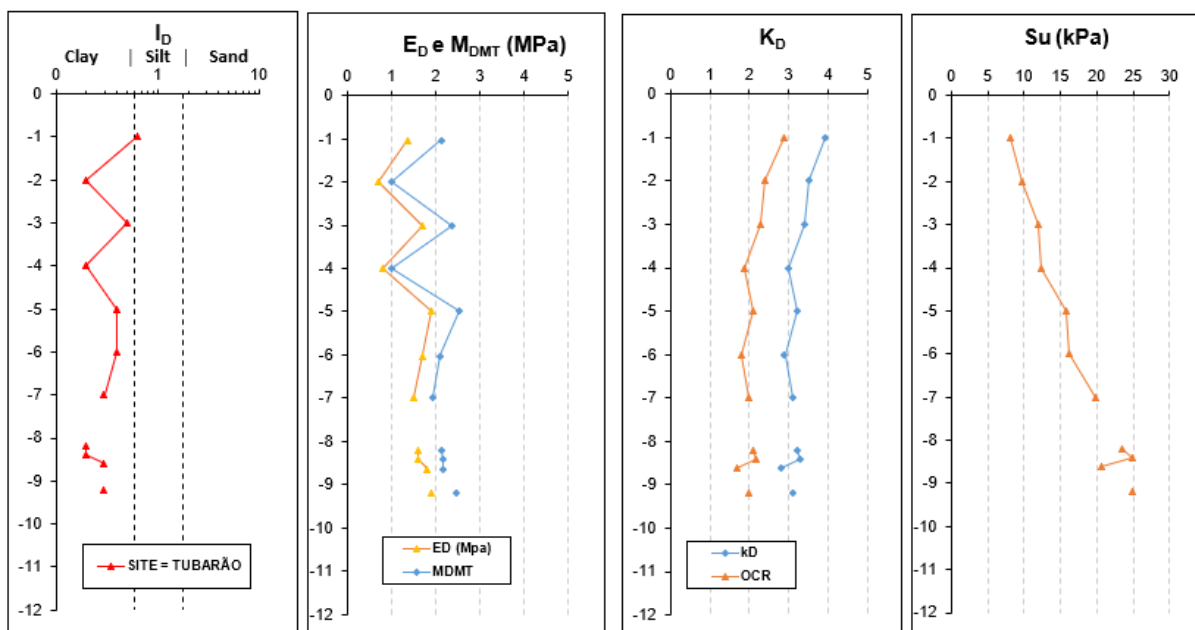


Figura 107: Perfil geotécnico obtido no campo experimental de Tubarão.

Nas profundidades de 8 e 9 m foram realizados o ensaio DMT especial com dissipação completa, onde a correção das leituras A através dos métodos Expedito e Weibull são apresentadas abaixo.

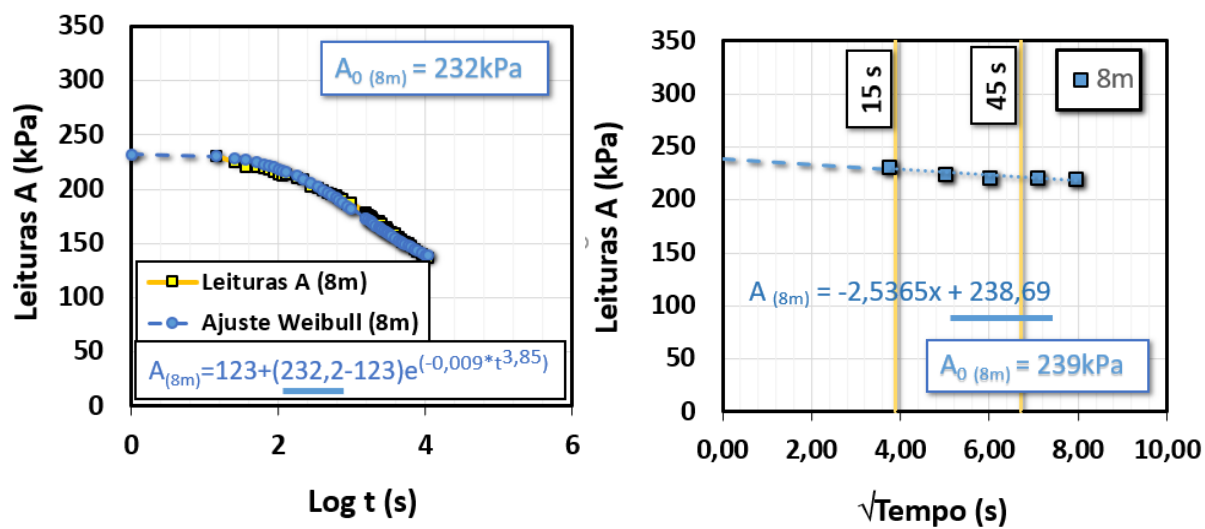


Figura 108: Correções das leituras A em 8m.

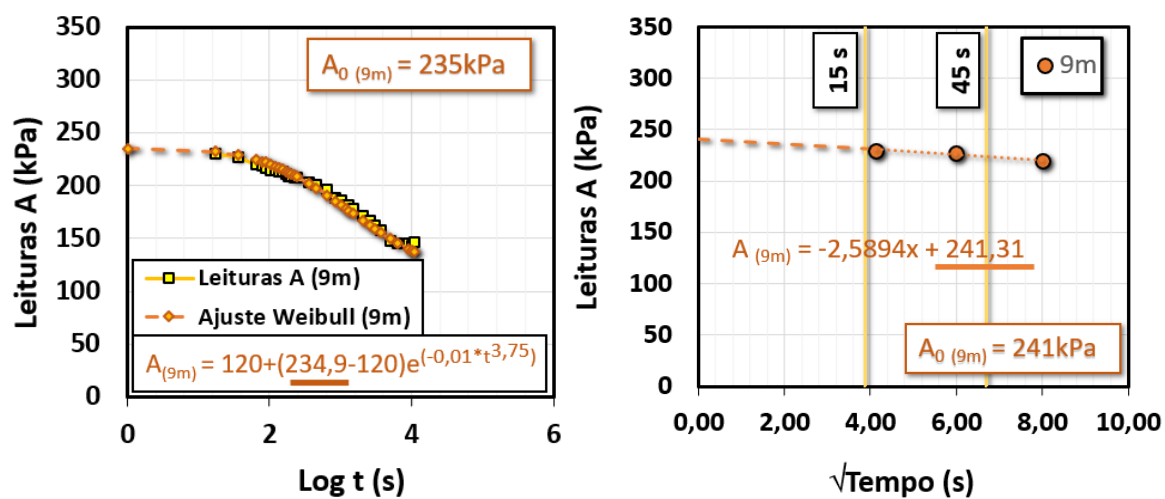


Figura 109: Correções das leituras A em 9m.