

EDUARDO SOUZA CÂNDIDO

**ANÁLISE INVERSA DO ENSAIO PRESSIOMÉTRICO UTILIZANDO O MODELO
HIPERBÓLICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C217a
2016 Cândido, Eduardo Souza, 1988-
Análise inversa do ensaio pressiométrico utilizando o
modelo hiperbólico / Eduardo Souza Cândido. – Viçosa, MG,
2016.
xxiii, 177f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.169-177.

1. Mecânica do solo - Modelos matemáticos. 2. Solos -
Deformação e tensões. 3. Resistência dos materiais. 4. Ensaio
de campo. 5. Pressiômetros. 6. Algoritmos genéticos.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22. ed. 624.15136

EDUARDO SOUZA CÂNDIDO

**ANÁLISE INVERSA DO ENSAIO PRESSIOMÉTRICO UTILIZANDO O MODELO
HIPERBÓLICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 05 de fevereiro de 2016.

Prof.^a Izabel Christina D'Almeida Duarte
de Azevedo
(Coorientadora)

Prof.^a Adinele Gomes Guimarães

Prof. Leandro Neves Duarte

Prof. Roberto Francisco de Azevedo
(Orientador)

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos, que não mediram esforços para que eu tivesse essa experiência.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

Agradecimentos

Com enorme satisfação, compartilho a conclusão de mais uma etapa da minha vida. Etapa oferecida por Deus, autor da oportunidade única de vivenciar momentos tão especiais e inesquecíveis em Viçosa.

Agradeço aos meus pais, Sebastião e Creuza, que não mediram esforços para que eu pudesse alcançar os meus objetivos. Muito obrigado por sempre estarem ao meu lado e pelo amor incondicional. Agradeço todos os dias por ter vocês na minha vida.

Aos meus irmãos, Rodrigo e Thiago, minhas cunhadas Danielly e Karina e minhas sobrinhas, Vanessa e Sofia, pelo estímulo, carinho e momentos de alegria.

À minha namorada Rafaela, que compreendendo a minha ausência, fez-se presente e companheira em todos os desafios desta caminhada.

Ao meu grande amigo e orientador Roberto Azevedo, pelos valiosos conselhos e ensinamentos, pela amizade e confiança em mim depositada. Agradeço por ter me acolhido como um filho e sempre estar disposto a me ajudar. Aprendi que para ser um grande professor como você, somente conhecimento não basta. A sua sabedoria, paciência, humildade e otimismo me servem de inspiração para que eu não seja apenas um professor como desejo, mas sim uma grande pessoa como você.

À professora Izabel Azevedo, pela honestidade, profissionalismo e competência. Agradeço por sempre estar preocupada comigo.

Ao professor Enivaldo Minette, pela amizade, ensinamentos e ajuda na interpretação dos ensaios de campo.

Ao amigo e professor Lucas Guimarães pela oportunidade de participar de suas pesquisas, pelos ensinamentos, por me ajudar a dar os primeiros passos na geotecnia e pelos momentos de alegrias e tristezas com o nosso Clube Atlético Mineiro.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Eduardo Marques, Carlos Alexandre, Dario, Paulo Sérgio, Reginaldo o meu muito obrigado pelos conhecimentos transmitidos.

Aos técnicos de laboratório, Paulo (P3), pela imensa ajuda nos ensaios de campo e períodos de descontração. Ao Júlio (Julinho), pelas valiosas experiências de laboratório e gentileza. Aos assistentes de laboratório Dedé e Jonattham, que mesmo não sendo funcionários da UFV, sempre estiveram dispostos a me ajudar.

Ao amigo e técnico de laboratório Paulo Capelão, pela amizade, ensinamentos e companheirismo. Agradeço por abrir as portas de sua casa, fazendo-me sentir como um membro de sua família ao longo destes 7 anos de convivência.

À secretária da pós-graduação Cilene Knauf, exemplo de competência, profissionalismo e alegria. Obrigado pelos períodos de bate-papo e descontração.

Aos funcionários da secretaria do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Eduardo Fontes por sempre estar disposto a me ajudar.

À Ana Carolina Arêdes por me auxiliar nos ensaios de laboratório.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV pelos momentos de descontração, em especial, Tatiana Quintão, Brahmani, Weiner, Emerson, Carol Menezes, Klinger e Prof. Paulo Borges.

Aos amigos de república pelos momentos de alegria e diversão, em especial, Leonardo, Thadeu, Lucas, Gustavo Mira, Madson, Ítalo, Joel, José Geraldo, Rony, Matheus e Gustavo Gentil.

À minha querida Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por me proporcionarem a oportunidade de realizar este trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que contribuíram para este trabalho.

EDUARDO SOUZA CÂNDIDO, filho de Sebastião Cândido Gomes e Creuza Maria de Souza Cândido, nasceu em 27 de dezembro de 1988, em Divinópolis, Minas Gerais.

Em dezembro de 2006, concluiu o Ensino Médio no Centro de Orientação Tecnológica e Educacional do Oeste de Minas (COTEOM), em Divinópolis – MG.

Em março de 2008, iniciou o curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em setembro de 2013. Durante a graduação, teve a oportunidade de realizar estágio no Laboratório de Mecânica dos Resíduos da UFV e de participar de projetos de pesquisa e extensão.

Em março de 2014, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, área de concentração em Geotecnia, atuando na linha de pesquisa “Geotecnia analítica e experimental”.

Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xviii
Resumo	xx
Abstract	xxii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Trabalhos correlatos	4
1.3. Objetivos	8
1.4. Organização	9
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. Ensaio pressiométrico	10
2.1.1. Desenvolvimento histórico.....	10
2.1.2. Tipos de equipamento	13
2.1.3. Pressiômetro de Ménard.....	14
2.1.4. Parâmetros obtidos.....	16
2.1.5. Interpretação do ensaio	17
2.1.5.1. Módulo pressiométrico	19
2.1.5.2. Módulo cíclico.....	20
2.1.5.3. Módulo cisalhante.....	22
2.1.5.4. Pressão limite	22
2.1.5.5. Pressão de fluência	24
2.1.5.6. Tensão horizontal em repouso.....	25
2.2. Análise inversa	26

2.2.1.	Problemas de otimização	27
2.2.2.	Algoritmos genéticos	31
2.2.2.1.	Introdução	31
2.2.2.2.	Definições	33
2.2.2.3.	Fundamentos dos algoritmos genéticos	34
2.2.2.4.	Populações genéticas	38
2.2.2.5.	População inicial	39
2.2.2.6.	Avaliação da população	39
2.2.2.7.	Seleção	41
2.2.2.8.	Operadores genéticos.....	42
2.2.2.9.	Critérios de parada.....	46
2.3.	Modelo constitutivo	46
2.3.1.	Modelo não linear elástico (hiperbólico)	48
2.3.1.1.	Descrição do modelo	48
2.3.1.2.	Variação da curva tensão-deformação com a tensão confinante.....	51
2.3.1.3.	Comportamento inelástico	54
2.3.1.4.	Previsão da curva tensão-deformação.....	55
2.3.1.5.	Variação volumétrica.....	56
2.3.1.6.	Considerações finais sobre o modelo	58
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS		60
3.1.	Considerações gerais	60
3.2.	Ensaio pressiométrico.....	61
3.2.1.	Localização dos ensaios de campo	61
3.2.2.	Pressiômetro de Ménard.....	64
3.2.3.	Saturação do equipamento	66
3.2.4.	Calibrações	67

3.2.4.1.	Calibração por perda de volume	68
3.2.4.2.	Calibração por perda de pressão	70
3.2.5.	Execução dos furos	73
3.2.6.	Realização dos ensaios	75
3.3.	Ensaio de laboratório	79
3.3.1.	Coleta de amostras indeformadas	80
3.3.2.	Caracterização geotécnica	82
3.3.2.1.	Granulometria conjunta	82
3.3.2.2.	Massa específica dos sólidos	85
3.3.2.3.	Limites de Atterberg	86
3.3.3.	Ensaio triaxiais	89
3.3.3.1.	Equipamentos utilizados	89
3.3.3.2.	Procedimento de ensaio	91
3.3.4.	Ensaio de cisalhamento direto	100
3.3.5.	Ensaio de adensamento	104
3.4.	Análise numérica	107
3.4.1.	Programa utilizado	107
3.4.2.	Malha de elementos finitos	108
3.4.3.	Estado de tensão inicial	109
3.4.4.	Modelo hiperbólico	110
3.4.5.	Carregamento horizontal	110
3.5.	Análise inversa	111
3.5.1.	Curva pressiométrica	111
3.5.2.	Procedimento genético	114
3.5.2.1.	Função objetivo	114
3.5.2.2.	Análise preliminar	114

3.5.2.3.	Considerações iniciais.....	115
3.5.2.4.	População inicial	115
3.5.2.5.	População principal	116
3.5.2.6.	População dos descendentes.....	116
3.5.2.7.	População intermediária.....	117
3.5.2.8.	Crêterios de parada.....	117
3.5.2.9.	Considerações finais	118
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		119
4.1.	Ensaio pressiométricos.....	119
4.2.	Ensaio de laboratório.....	124
4.2.1.	Caracterização geotécnica do solo.....	124
4.2.2.	Ensaio triaxiais.....	125
4.2.2.1.	Ensaio CID _{nat}	126
4.2.2.2.	Ensaio CID _{sat}	128
4.2.3.	Ensaio de cisalhamento direto.....	131
4.2.4.	Ensaio de adensamento	134
4.3.	Calibração do modelo hiperbólico	136
4.4.	Análise do ensaio pressiométrico	143
4.4.1.	Estado de tensão inicial.....	143
4.4.2.	Curvas transformadas.....	147
4.4.3.	Análise preliminar	149
4.4.4.	Procedimento genético.....	150
4.4.4.1.	População inicial com 10 indivíduos.....	150
4.4.4.2.	População inicial com 20 indivíduos.....	152
4.4.4.3.	População inicial com 40 indivíduos.....	153
4.4.4.4.	Comparações	155

4.4.4.5. Resultados da análise do ensaio pressiométrico com os parâmetros otimizados.....	160
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	164
5.1. Conclusões	164
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	169

Lista de figuras

Figura 2.1 - Esquema da sonda desenvolvida por Kögler.....	11
Figura 2.2 - Classificação dos diversos tipos de pressiômetros: a) Pré-furo, b) Autoperfurante, c) Com cone e d) Com tudo exterior de revestimento	13
Figura 2.3 - Pressiômetro de Ménard do tipo GC.....	15
Figura 2.4 - Diferentes tipos de pressiômetros de Ménard.	15
Figura 2.5 - Expansão de uma cavidade cilíndrica	16
Figura 2.6 - Curva pressiométrica.....	18
Figura 2.7 - Curva pressiométrica típica e corrigida do ensaio.	19
Figura 2.8 - Curva pressiométrica corrigida.....	20
Figura 2.9 - Curva pressiométrica com laço de descarregamento-recarregamento.....	21
Figura 2.10 - Técnica para obtenção pressão limite.	23
Figura 2.11 - Curva de fluência típica.....	24
Figura 2.12 - Método gráfico de Brandt (1978).	25
Figura 2.13 - Representação de um problema direto	26
Figura 2.14 - Representação de um problema inverso.....	27
Figura 2.15 - Mínimo de $f(x)$ é o mesmo que o máximo de $-f(x)$	28
Figura 2.16 - Tipos de problemas de otimização.....	29
Figura 2.17 - Aplicabilidade em problemas versus eficiência de resolução dos métodos.....	35
Figura 2.18 - Fluxograma de um Algoritmo Genético.....	36
Figura 2.19 - Modelos de tensão-deformação: (a) Linear e elástico, (b) Rígido, perfeitamente plástico, (c) Rígido, endurecimento linear, (d) Elástico, perfeitamente plástico e (e) Elástico, endurecimento linear.....	47
Figura 2.20 - Curva tensão-deformação para o modelo hiperbólico.	49
Figura 2.21 - Modelo Hiperbólico: (a) Curva real e (b) Curva transformada.	50
Figura 2.22 - Aplicação do Modelo Hiperbólico: (a) Curva real e (b) Curva transformada.	51

Figura 2.23 - Recomendação de Duncan e Chang (1970): (a) Curva real e (b) Curva transformada.	51
Figura 2.24 - Variação do modulo tangente inicial com a tensão confinante.	52
Figura 2.25 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.	53
Figura 2.26 - Módulos de elasticidade para o modelo hiperbólico.	54
Figura 2.27 - Módulo de deformabilidade de descarga e recarga.	55
Figura 2.28 - Variação do módulo volumétrico com a tensão confinante.	58
Figura 3.1 - Vista geral do Laboratório de Mecânica dos Resíduos da UFV.	61
Figura 3.2 - Posicionamento dos furos.	62
Figura 3.3 - Posição do tripé na sondagem de simples reconhecimento com SPT.	63
Figura 3.4 - Amostrador utilizado na sondagem com SPT.	63
Figura 3.5 - Resultado da sondagem de simples reconhecimento com SPT para a área estudada.	64
Figura 3.6 - Pressiômetro de Ménard do DEC/UFV.	65
Figura 3.7 - Unidade de controle.	65
Figura 3.8 - Sonda pressiométrica e mangueiras de conexão.	66
Figura 3.9 - Saturação da sonda pressiométrica.	67
Figura 3.10 - Calibração por perda de volume: a) Tubo rígido e sonda pressiométrica e b) Calibração por perda de volume.	68
Figura 3.11 - Calibração por perda de volume.	69
Figura 3.12 - Posicionamento da sonda para calibração por perda de pressão.	71
Figura 3.13 - Calibração por perda de pressão.	71
Figura 3.14 - Curvas de calibração por perda de pressão.	72
Figura 3.15 - Trado utilizado na execução dos furos.	73
Figura 3.16 - Exemplos de curvas pressiométricas influenciadas pelo diâmetro do furo.	74
Figura 3.17 - Comprimento da célula de medição para o pressiômetro do tipo GC	75
Figura 3.18 - Posição e detalhamento da sonda no furo.	76
Figura 3.19 - Sonda pressiométrica inserida no furo.	77

Figura 3.20 - Aplicação de pressão.....	78
Figura 3.21 - Realização de leituras no volumímetro.	78
Figura 3.22 - Retroescavadeira utilizada na abertura da trincheira.	80
Figura 3.23 - Abertura da trincheira em dois patamares.	81
Figura 3.24 - Coleta de amostra indeformada utilizando um tubo de PVC com dimensões de 35 x 40 cm.	81
Figura 3.25 - Preparação da amostra após a coleta.	82
Figura 3.26 - Ensaio de sedimentação.	83
Figura 3.27 - Peneiramento fino.	84
Figura 3.28 - Equipamentos utilizados na determinação da massa específica dos sólidos.....	85
Figura 3.29 - Determinação do limite de liquidez.	87
Figura 3.30 - Determinação do limite de plasticidade.	88
Figura 3.31 - Equipamentos para realização dos ensaios triaxiais.	90
Figura 3.32 - Sistema de ramificações para aplicação simultânea de pressões nas células.	91
Figura 3.33 - Preparação dos corpos de prova.....	92
Figura 3.34 - Preparação do ensaio triaxial.	94
Figura 3.35 - Saturação por percolação.....	95
Figura 3.36 - Cálculo de t_{100} para ensaio com tensão efetiva de 25 kPa.....	97
Figura 3.37 - Fase de cisalhamento do solo.	97
Figura 3.38 - Final do ensaio triaxial.	100
Figura 3.39 - Prensa de cisalhamento direto.	101
Figura 3.40 - Moldagem dos CPs e montagem do ensaio de cisalhamento direto.	102
Figura 3.41 - Fase de adensamento do corpo de prova.	103
Figura 3.42 - Corpo de prova após o ensaio de cisalhamento direto.....	104
Figura 3.43 - Equipamento do Tipo Bishop para ensaios de adensamento unidimensional em solos: a) Vista frontal e b) Vista lateral.....	105
Figura 3.44 - Preparação do ensaio: a) Moldagem do corpo de prova e b) Célula de adensamento de anel fixo.	106

Figura 3.45 - Perfil representativo da área estudada.....	108
Figura 3.46 - Malha de elementos finitos gerada pelo Sigma/W.	109
Figura 3.47 - Resultado típico da análise com o modelo hiperbólico no Sigma/W.	111
Figura 3.48 - Curva pressiométrica corrigida.....	112
Figura 3.49 - Curva pressiométrica transladada.	112
Figura 3.50 - Curva típica para análise inversa.	113
Figura 4.1 - Curvas pressiométricas dos ensaios.	120
Figura 4.2 - Curvas pressiométricas corrigidas.	120
Figura 4.3 - Curva pressiométrica corrigida e curva de Fluência do ensaio PMT01.	121
Figura 4.4 - Obtenção da pressão limite por extrapolação do ensaio PMT01.....	123
Figura 4.5 - Curva granulométrica do solo estudado.....	125
Figura 4.6 - Curvas tensão versus deformação para o ensaio triaxial CID_{nat}	127
Figura 4.7 - Trajetórias de tensões efetivas para o ensaio triaxial CID_{nat}	128
Figura 4.8 - Curvas tensão versus deformação para o ensaio triaxial CID_{sat}	129
Figura 4.9 - Trajetórias de tensões efetivas para o ensaio triaxial CID_{sat}	130
Figura 4.10 - Curvas deformação axial versus variação de volume para o ensaio triaxial CID_{sat}	131
Figura 4.11 - Curvas tensão cisalhante versus deformação horizontal para o ensaio de cisalhamento direto.	133
Figura 4.12 - Curvas deformação vertical versus deformação horizontal específica para o cisalhamento direto.	133
Figura 4.13 - Envoltória de Mohr-Coulomb.	134
Figura 4.14 - Curva de adensamento do solo.	135
Figura 4.15 - Obtenção dos parâmetros K e n para a calibração com o ensaio CID_{sat}	137
Figura 4.16 - Parâmetros K_b e m para 70% da resistência mobilizada.	138
Figura 4.17 - Variação do módulo de deformação volumétrico em relação a deformação axial.	139

Figura 4.18 - Representação das curvas de tensão desviadora e deformação volumétrica pelo modelo hiperbólico calibrado com o ensaio CID_{sat} .	140
Figura 4.19 - Curvas tensão versus deformação transformadas para calibração com o ensaio CID_{nat} .	141
Figura 4.20 - Obtenção dos parâmetros K e n para a calibração com o ensaio CID_{nat} .	142
Figura 4.21 - Representação das curvas de tensão desviadora versus deformação axial pelo modelo hiperbólico calibrado com o ensaio CID_{nat} .	143
Figura 4.22 - Variação do módulo de elasticidade inicial com a tensão confinante.	145
Figura 4.23 - Obtenção do coeficiente de Poisson pelas curvas de variação volumétrica.	146
Figura 4.24 – Isóbaras de tensão vertical in situ (kPa).	146
Figura 4.25 – Isóbaras de tensão horizontal in situ (kPa).	147
Figura 4.26 - Curvas pressiométricas transformadas.	148
Figura 4.27 - Convergência do procedimento genético para a população inicial de 10 indivíduos.	151
Figura 4.28 - Convergência do procedimento genético para a população inicial de 20 indivíduos.	152
Figura 4.29 - Convergência do procedimento genético para a população inicial de 40 indivíduos.	154
Figura 4.30 - Convergência do algoritmo genético variando o tamanho da população inicial.	156
Figura 4.31 - Comparação das curvas pressiométricas PMT01 e PMT03 com a curva hiperbólica gerada pelos parâmetros otimizados.	157
Figura 4.32 - Comparação entre as curvas do ensaio PMT01 e diferentes métodos de calibração.	159
Figura 4.33 - Variação do módulo de elasticidade inicial nas análises utilizando os parâmetros obtidos nas calibrações com os ensaios triaxiais.	160
Figura 4.34 - Região estudada no Sigma/W.	161
Figura 4.35 - Isocurvas de deslocamentos horizontais ao final da aplicação da carga pressiométrica, em metros.	161

Figura 4.36 - Isocurvas de deslocamentos verticais ao final da aplicação da carga pressiométrica, em metros.....	162
Figura 4.37 - Isóbaras de tensões horizontais ao final da aplicação da carga pressiométrica, valores em kPa.	163
Figura 4.38 - Isóbaras de tensões verticais ao final da aplicação da carga pressiométrica, valores em kPa.	163

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Principais conferências sobre o ensaio pressiométrico.....	12
Tabela 2.2 - Principais normas francesa e americana.	12
Tabela 2.3 - Parâmetros para previsão de curvas tensão-deformação.	56
Tabela 4.1 - Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios pressiométricos.	124
Tabela 4.2 - Caracterização geotécnica do solo.	125
Tabela 4.3 - Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais CID_{nat}	126
Tabela 4.4 - Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais CID_{sat}	128
Tabela 4.5 - Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.....	131
Tabela 4.6 - Parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto.	134
Tabela 4.7 - Índices físicos do corpo de prova do ensaio de adensamento.....	135
Tabela 4.8 - Parâmetros E_i e b	136
Tabela 4.9 - Parâmetros obtidos pela calibração tradicional do modelo hiperbólico.	139
Tabela 4.10 - Parâmetros a , b e E_i para a calibração com o ensaio triaxial CID_{nat}	141
Tabela 4.11 - Parâmetros obtidos por meio da calibração utilizando o ensaio triaxial CID_{nat}	142
Tabela 4.12 - Propriedades do solo na profundidade ensaiada.....	144
Tabela 4.13 - Valores de pressão e deslocamento radial das curvas pressiométricas transformadas.....	149
Tabela 4.14 - Conjunto de parâmetros para aplicação do algoritmo genético.	150
Tabela 4.15 - Parâmetros dos melhores indivíduos para população inicial com 10 indivíduos.	151
Tabela 4.16 - Taxa de variação dos parâmetros do indivíduo preliminar para população inicial de 10 indivíduos.....	152
Tabela 4.17 - Parâmetros dos melhores indivíduos para população inicial com 20 indivíduos.	153

Tabela 4.18 - Taxa de variação dos parâmetros do indivíduo preliminar para população inicial de 20 indivíduos.....	153
Tabela 4.19 - Parâmetros dos melhores indivíduos para população inicial com 40 indivíduos.	155
Tabela 4.20 - Taxa de variação dos parâmetros do indivíduo preliminar para população inicial de 40 indivíduos.....	155
Tabela 4.21 - Parâmetros obtidos pelas calibrações (CID_{sat} e CID_{nat}) e pela otimização.	160

CÂNDIDO, Eduardo Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Análise inversa do ensaio pressiométrico utilizando o modelo hiperbólico.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadora: Izabel Christina D'Almeida Duarte de Azevedo.

Os modelos constitutivos têm a função de interpretar e prever o comportamento tensão-deformação-resistência de um determinado material. A calibração dos modelos constitutivos de solos é geralmente feita com resultados de ensaios de laboratório. No entanto, alguns erros nos valores dos parâmetros podem ser causados por possíveis perturbações na amostra. De modo a suprir essas dificuldades, os ensaios de campo podem ser recomendados como alternativa. A estimativa dos parâmetros que definem o comportamento destes modelos por meio de ensaios de campo é muito difícil. Porém, pode-se fazer essa estimativa de forma indireta, ou seja, estima-se um conjunto inicial de parâmetros e com eles tenta-se representar com um modelo algum resultado do ensaio de campo. Caso a concordância não seja boa, estimam-se sucessivamente novos conjuntos de parâmetros até se obter uma concordância aceitável. Este procedimento, conhecido como análise inversa, consiste na formulação de uma função objetivo (FO), que mede o erro entre valores medidos no campo e calculados pelo modelo. Neste sentido, a presente dissertação tem como objetivo retroanalisar uma curva do ensaio pressiométrico utilizando o modelo não linear elástico de Duncan e Chang (1970) e avaliar o emprego de um Algoritmo Genético (AG) na otimização de um conjunto de parâmetros do modelo. O procedimento consistiu na realização de ensaios pressiométricos na área externa do Laboratório de Mecânica dos Resíduos da Universidade Federal de Viçosa, ensaios de laboratório (caracterização geotécnica, adensamento, cisalhamento direto e triaxiais CIDsat e CIDnat), análise numérica e inversa. Para identificar um conjunto de parâmetros do modelo a partir do ensaio pressiométrico, aplicando a análise inversa, foi necessária a utilização de duas ferramentas numéricas. A primeira consistiu em aplicar o Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa Sigma/W desenvolvido pela Geo-Slope International Ltda e a segunda, aplicar o AG com populações iniciais de 10, 20 e 40 indivíduos. Com o trabalho mostrou-se que as calibrações realizadas com os ensaios triaxiais

não representaram bem os pontos experimentais, o procedimento genético se mostrou eficiente na retroanálise da curva pressiométrica estudada, cujo erro da FO foi de apenas 3,75%, e por fim foi proposta a delimitação de um espaço de busca utilizando-se dos parâmetros obtidos pelas calibrações com os ensaios triaxiais como ponto de partida para a análise inversa.

CÂNDIDO, Eduardo Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Inverse analysis of a pressuremeter test using a hiperbolic model.** Advisor: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Advisor: Izabel Christina D'Almeida Duarte de Azevedo.

Constitutive models have the function of interpreting and predicting the stress-strain-strength behavior of a given material. The calibration of constitutive models of soils is usually done with results of laboratory tests. However, some errors in the parameter values can be caused by possible disturbances in the samples. In order to overcome these difficulties, the field tests may be recommended as an alternative. Estimation of the parameters that define the behavior of these models through field tests is very difficult. However, this estimation can be made indirectly, that is, initially a set of parameters is estimated and try to represent with a model the field test results. If the agreement is not good, new sets of parameters are successively estimated to obtain an acceptable agreement. This procedure is known as inverse analysis and consists of formulating an objective function (OF) able to measuring the error between the measured field values and the results calculated by the model. The aim of this dissertation is to do an inverse analysis of a pressuremeter test using the nonlinear elastic model of Duncan and Chang (1970) and evaluate the use of a Genetic Algorithm (GA) to optimize a set of model parameters. The procedure consisted of realizing a pressuremeter test in the outer area of Waste Mechanics Laboratory at the Federal University of Viçosa, laboratory tests (geotechnical characterization, consolidation, direct shear and triaxial CID_{sat} and CID_{nat}), numerical and inverse analysis. In order to identify a set of model parameters from using the pressuremeter test results with the inverse analysis was necessary to use two numerical tools. The first consisted of applying the finite element method using the Sigma/W program developed by Geo-Slope International Ltd and the second, apply the GA with initial populations of 10, 20 and 40 individuals. This work showed that calibrations performed with the triaxial tests did not represent well the experimental points. However, with the genetic procedure proved to be very efficient since the inverse analysis of the pressuremeter curve studied, was able to bring the error of OF to only 3.75%. Finally, it was proposed to defining

a search space for the parameters using the ones obtained by the calibrations with the triaxial tests on saturated and unsaturated soil samples as a starting point for the inverse analysis.

1.1. Generalidades

A interpretação numérica do comportamento mecânico de um material sujeito a esforços externos pode ser feita com o auxílio de modelos constitutivos que procuram representar as principais características do comportamento do material.

Para se modelar o comportamento não linear dos solos, buscou-se a adequação de teorias já desenvolvidas para outros materiais. Assim a utilização de relações constitutivas simples, tais como as fornecidas pela teoria da elasticidade, foram gradualmente sendo substituídas por modelos mais sofisticados baseados na teoria da plasticidade, muito usada para estudar o comportamento de metais.

Os primeiros modelos desenvolvidos eram relativamente simples e de fácil utilização, porém eram imprecisos para reproduzir muitas características do comportamento dos solos observadas na prática. Sua aplicação era justificada pela simplicidade de obtenção de seus parâmetros e, principalmente, pela facilidade de solução e interpretação dos resultados. Com o

passar do tempo, diversos modelos constitutivos foram sendo desenvolvidos (MENDONÇA, 2005).

Segundo Wood (1990), o desenvolvimento e o aprendizado científico alcançados por meio da construção e análise de resultados fornecidos por modelos constitutivos permitiu entender importantes aspectos do comportamento dos solos. Embora, dada a complexidade do comportamento destes materiais, o objetivo não é construir um espelho da realidade, incluindo todos os elementos e particularidades que a compõem, mas sim destacar e tornar possível a investigação daquilo que é decisivo para a análise em questão.

Para que um modelo constitutivo possa ser utilizado em um procedimento numérico, é necessário calibrá-lo, ou seja, encontrar parâmetros apropriados que reproduzam a melhor resposta do modelo em relação aos resultados experimentais disponíveis. Segundo Zentar et al. (2001), estes parâmetros são geralmente avaliados com base em ensaios de laboratório. No entanto, os valores obtidos são influenciados por inevitáveis perturbações que ocorrem durante a extração do solo no campo e o transporte da amostra para o laboratório. De modo a suprir essas dificuldades, os ensaios de campo podem ser recomendados como alternativa.

Nos ensaios laboratoriais, há necessidade de amostras indeformadas, de extração muitas vezes difícil, como por exemplo, a amostragem de solos moles e areias saturadas. Além disso, podem demandar muito tempo de execução e análise, proporcionando custos elevados para as obras. No entanto, o fato do estado de tensão (em termos de tensões totais, pressões neutras e tensões efetivas), do estado de deformação e das condições de drenagem serem claramente bem definidos, faz com que os resultados dos ensaios de laboratório possam ser adequadamente interpretados, o que permite determinar diversos parâmetros e tornar os ensaios laboratoriais a alternativa mais comum para a validação de modelos de comportamento do solo.

No campo, a possibilidade de investigar grandes áreas, obter informações em profundidade, tais como detectar camadas de pequena espessura e fronteiras entre diferentes camadas, e o menor custo e tempo de execução, faz dos ensaios de campo uma alternativa econômica na determinação de parâmetros dos solos. Os ensaios de campo podem ser analisados nas formas empírica e teórica. Na análise empírica, os resultados podem ser obtidos através de correlações estatísticas entre os valores medidos em campo e os valores reais dos parâmetros obtidos por outros processos. Na análise teórica, um modelo matemático dos ensaios é

previamente estabelecido para posterior tratamento e determinação dos parâmetros do solo. Pela sua própria natureza, os ensaios de campo apresentam resultados mais próximos da realidade porque o estado de tensões e condicionantes ambientais dos solos são minimamente alterados.

Segundo Heleno (2011), nos ensaios de campo as questões relativas à amostragem e representatividade são quase totalmente resolvidas. No entanto, estes ensaios impõem, inevitavelmente, mais dificuldades para controlar os esforços aplicados e, principalmente, medir as grandezas necessárias para definir diretamente parâmetros de modelos constitutivos de solos. Por isso, requerem teorias geralmente com hipóteses simplificadoras para serem interpretados indiretamente (ZENTAR ET AL., 2001; LEVASSEUR, 2009). Estas dificuldades levaram a uma experiência bem sucedida, na qual se procurou identificar os parâmetros que definem o comportamento do solo por meio de análises inversas de ensaios de campo (BAROTH E MALECOT, 2010).

A análise inversa (ou retroanálise) permite a identificação de parâmetros por meio da formulação de um problema matemático, geralmente de minimização de uma determinada função, cuja solução fornece o conjunto de parâmetros do modelo que representam a menor diferença entre os valores medidos no campo e os calculados, via de regra, numericamente.

Dentre os ensaios de campo encontra-se o ensaio pressiométrico, que consiste no estudo da expansão de uma cavidade cilíndrica dentro da massa de solo. Segundo Zentar et al. (2001), existem diferentes maneiras de se interpretar os resultados do ensaio pressiométrico, sendo divididas naquelas baseadas nas relações empíricas ou semi-empíricas entre propriedades dos solos e parâmetros pressiométricos; no desenvolvimento teórico de soluções de expansão da cavidade cilíndrica; e, aquelas baseadas em simulações numéricas do ensaio.

Dentro desse contexto, utilizar os resultados das medições diretas possíveis de serem feitas nos ensaios de campo para, por meio de análises inversas, estimar parâmetros de modelos constitutivos de comportamento do solo é um caminho que tem se mostrado promissor (LEDESMA ET AL., 1996; HELENO, 2011).

1.2. Trabalhos correlatos

Bahar et al. (1995) apresentaram uma metodologia para previsão de deslocamentos secundários em estruturas de grande porte utilizando ensaios pressiométricos. Para representar o comportamento dos solos os autores combinaram os modelos não lineares de Maxwell e Kelvin-Voigt em um programa de elementos finitos denominado Press'Ident (Pressuremeter Identification). A simulação numérica dos ensaios pressiométricos de longa duração se ajustou bem aos resultados obtidos por meio do equipamento Diflupress L.D. De modo a estudar a influência dos parâmetros do modelo visco elástico considerado, os autores realizaram uma análise de sensibilidade e observaram que todos os parâmetros, exceto o coeficiente de Poisson, influenciaram na resposta numérica. A metodologia também foi aplicada para prever os deslocamentos secundários de uma usina nuclear. Neste caso utilizaram-se do modelo não linear de Duncan e Chang e do software TENSORS, e observaram que as simulações numéricas representaram bem os deslocamentos medidos in situ.

Hicher e Michali (1996) desenvolveram uma metodologia para identificar parâmetros de um modelo elastoplástico baseado na interpretação de ensaios de campo e laboratório. A metodologia consistiu em utilizar um método de análise inversa para determinar um conjunto de parâmetros usando resultados de ensaios pressiométricos realizados no campo, e resultados de ensaios triaxiais e oedométricos. No estudo utilizou-se o modelo de Hujeux, composto por 13 parâmetros, que foram divididos em dois grupos: 9 parâmetros foram determinados diretamente dos resultados experimentais e outros 4 por meio de um procedimento de otimização. A modelagem numérica do ensaio pressiométrico utilizando o método dos elementos finitos foi executada analisando o problema na condição drenada e acoplada (formulação em termos de poropressão e deslocamento). Os autores analisaram a influência de cada um dos parâmetros nas duas análises e mostraram que somente dois influenciavam significativamente nos resultados. A metodologia foi testada na análise dos deslocamentos verticais de um aterro construído sobre argila mole utilizando o software GEFDYN desenvolvido pela École Centrale de Paris. Nesta análise a determinação dos parâmetros mais influentes foi feita por meio dos ensaios pressiométricos e o restante utilizando os ensaios triaxiais e oedométricos. Os autores obtiveram resultados satisfatórios na representação dos deslocamentos do aterro para diferentes profundidades e propuseram a necessidade de aplicar

a metodologia a outros casos de modo a se obter uma aplicação ideal dos ensaios pressiométricos de acordo com o tipo de solo e fenômeno estudado.

Zentar et al. (2001) apresentaram um procedimento para identificar parâmetros do modelo elastoplástico Cam-Clay Modificado, baseada em técnicas de análise inversa, usando resultados de ensaios pressiométricos em um solo. O estudo foi realizado utilizando dois códigos, o SiDoLo (Simulation and iDentification of constitutive models) e o CESAR-LCPC. O primeiro é reservado ao processo de otimização e o segundo é um código de elementos finitos direcionado a geomateriais, no qual se encontram diversos modelos plásticos e visco plásticos implementados. Primeiramente, os autores testaram o procedimento numérico desenvolvido para o ensaio, verificando quais parâmetros eram mais significantes na resposta numérica. O estudo mostrou que os cálculos eram fortemente afetados pela variação módulo de elasticidade (E), pela tensão de pré-adensamento (p'_{c0}) e pela inclinação da reta do estado crítico no plano p - q (M) e pouco afetado pela variação dos coeficientes de Poisson (ν) e β (obtido por meio da inclinação da reta de descompressão; κ , e reta de compressão, λ). O estudo revelou ainda a dificuldade de se realizar a análise inversa quando os parâmetros estão fortemente correlacionados. Os autores concluíram que os parâmetros E e ν não poderiam ser determinados simultaneamente pelo fato do ensaio ser puramente desviador, o que faz com que a relação tensão-deformação nas paredes do furo seja governada pelo módulo cisalhante (G). Além disso, os parâmetros M e p'_{c0} obtidos foram diferentes daqueles de referência, o que pode ser explicado pelo fato do comportamento do solo ser governado pelas tensões efetivas e o processo ser realizado com informações de tensões totais nas paredes da cavidade. Para solucionar esses problemas os autores passaram a considerar a pressão neutra como informação complementar no cálculo das curvas pressiométricas. Assim propuseram a realização de ensaios de adensamento unidimensional, com leitura de poro pressão para determinar os parâmetros λ , κ , p'_{c0} , e por meio dos ensaios pressiométricos os parâmetros E e M . Por fim, concluíram que o método pode ser generalizado para diferentes ensaios de campo e também para outros modelos constitutivos, desde que os valores determinados dos parâmetros tenham influência significativa sobre os resultados do ensaio calculado por meio do método dos elementos finitos.

Calvello e Finno (2004) avaliaram os benefícios da utilização da análise inversa na determinação de parâmetros do modelo elastoplástico de endurecimento do solo (Hardening-Soil model ou H-S model), composto por seis parâmetros básicos e quatro avançados. O

modelo foi utilizado para representar o comportamento de um solo argiloso durante a execução de uma escavação feita para renovar uma estação do metrô no centro de Chicago (EUA). Para monitorar os deslocamentos da superfície do terreno, utilizou-se de dois inclinômetros dispostos em lados opostos da estação. Para realização do procedimento os autores utilizaram o acoplamento do programa UCODE, responsável por realizar a análise inversa para determinação dos parâmetros, ao software comercial PLAXIS 7.11. O modelo foi inicialmente calibrado utilizando resultados de ensaios de compressão triaxial em quatro camadas de argila, e posteriormente procedeu-se a calibração utilizando os dados dos inclinômetros. Em ambos os casos uma análise de sensibilidade foi realizada de modo a verificar a correlação e relevância de cada um dos parâmetros no processo para cada camada. Os autores observaram uma ótima aproximação dos resultados numéricos às medições de campo quando se realizou a calibração por análise inversa. Esse fato levou a conclusão que a utilização do procedimento inverso é a melhor maneira de se obter boa representação de observações in situ, principalmente quando se têm parâmetros relevantes e não correlacionados.

Levasseur et al. (2008) identificaram parâmetros do modelo de Mohr-Coulomb por meio de análises inversas. Para realizar o estudo utilizou-se resultados de ensaios pressiométricos e deslocamentos horizontais de uma estrutura de estaca prancha em uma escavação. Para simular o problema utilizaram-se do software comercial Plaxis, dentro do qual acoplaram dois procedimentos de otimização. O primeiro utilizou o método do gradiente e o segundo um algoritmo genético. Os autores concluíram que o primeiro método é eficiente apenas se a função objetivo (FO) for relativamente suave ou se o ponto inicial de busca for muito próximo da solução. Na aplicação do segundo método, os autores mostraram que o algoritmo genético é capaz de convergir para as proximidades da solução ótima mesmo que se tenha uma FO complexa. Ainda segundo os autores, a desvantagem na aplicabilidade deste método se dá no elevado custo computacional no início do processo, uma vez que se precisa estudar o comportamento da FO no espaço de busca proposto para que se consiga a eficiência do algoritmo genético.

Yin e Hicher (2008) apresentaram uma metodologia para identificar parâmetros do solo por meio de ensaios de laboratório e campo. Para o estudo utilizaram-se do modelo elasto-viscoplástico EVP-MCC baseado na teoria de Perzyna e no modelo elastoplástico de Cam-Clay Modificado. A análise inicial baseou-se em resultados experimentais obtidos com um

equipamento denominado Pressio-triax que simula um ensaio pressiométrico em câmara triaxial e ainda permite leituras de poropressão. Com a utilização do equipamento os autores realizaram uma análise inversa para identificar parâmetros mecânicos e hidráulicos de uma argila de Saint-Herblain (França) submetida a três taxas de deformação distintas. A metodologia foi validada comparando os resultados numéricos utilizando os parâmetros otimizados e os obtidos por meio dos ensaios de laboratório. Além disso, os parâmetros otimizados foram utilizados para representar outros tipos de ensaios para a mesma amostra de solo. A análise da condição de drenagem e do efeito da taxa de deformação durante um ensaio pressiométrico demonstrou a influência acoplada de consolidação e efeitos viscosos nos resultados dos ensaios. Por fim os autores concluíram que a metodologia proposta é eficiente para identificar parâmetros do solo e que o modelo EVP-MCC poderia descrever adequadamente a influência do tempo no comportamento de solos moles submetidos a diferentes condições de carregamento.

Baroth e Malecot (2010) apresentaram uma análise probabilística da análise inversa de um problema de escavação. Os autores combinaram um algoritmo genético acoplado a um método de elementos finitos com o objetivo de identificar os parâmetros do solo por meio de deslocamentos de uma parede diafragma. Duas etapas foram realizadas, primeiramente foi identificado um conjunto de parâmetros do solo considerando um erro tolerável entre a resposta numérica e as medições de campo. Na segunda etapa aplicou-se a análise inversa para obter um intervalo de confiança para o comportamento de uma parede diafragma. Para o estudo do problema de escavação foi utilizado o modelo de Mohr-Coulomb considerando uma camada de solo homogêneo onde se fez duas análises: primeiramente considerando somente o peso da massa de solo atuando na estrutura e posteriormente um carregamento de 30kN aplicado a uma distância de 1 metro da crista. Os autores concluíram que o procedimento pode ser utilizado para prever os deslocamentos finais de estruturas geotécnicas em serviço considerando camadas de solos homogêneos, e que para camadas altamente heterogêneas o procedimento deverá ser melhorado.

Heleno (2011) realizou uma análise inversa de uma prova de carga utilizando o método dos elementos finitos (MEF) e um algoritmo de otimização com o objetivo de determinar os parâmetros do modelo não linear elástico de Duncan (1980). Para a realização do trabalho foi desenvolvido um programa em elementos finitos intitulado ANINVEC (ANálise INVersa de Ensaio de Campo) escrito em programação orientada a objetos (Delphi). O programa resolve

problemas mecânicos de equilíbrio estático sob condições de tensão e de deformação planas e axissimétricas, utilizando elementos triangulares de deformação constante (Constant Strain Triangle, CST). A prova de carga estudada foi realizada por Lopes (1997) e a calibração do modelo hiperbólico foi feita utilizando resultados de ensaios triaxiais drenados (CID) executados por Almeida (2000). A metodologia proposta pela autora consistiu na definição de uma função objetivo (FO), capaz de comparar o erro entre o deslocamento de campo (δ^{Campo}) e o deslocamento fornecido pelo MEF (δ^{MEF}), e na procura por um mínimo global dessa função utilizando um algoritmo genético. A autora realizou 6 análises divididas em dois grupos com populações compostas de 10, 20 e 40 indivíduos, onde cada grupo apresentava variações distintas para o limite inferior e superior dos parâmetros do modelo. Os resultados mostraram que quanto maior o tamanho da população inicial utilizada no AG menor foi o erro da FO após realizar aproximadamente 30 gerações para cada população inicial considerada. Além disso, a análise realizada por meio da calibração tradicional feita com base nos ensaios de laboratório não apresentou bons resultados quando comparados com os resultados de campo. Por fim concluiu que a análise inversa forneceu parâmetros do modelo hiperbólico com os quais se conseguiu melhorar substancialmente a modelagem da curva carga recalque da fundação obtida na prova de carga.

1.3. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo geral retroanalisar uma curva do ensaio pressiométrico utilizando o modelo elástico não linear de Duncan e Chang (1970).

Os objetivos específicos são:

- avaliar o emprego de um método de otimização baseado na teoria evolutiva de Darwin (Algoritmo Genético) para otimizar um conjunto de parâmetros do modelo constitutivo;
- realizar a calibração do modelo utilizando resultados dos ensaios triaxiais consolidados isotropicamente e drenados na condição natural e saturada;
- analisar o emprego das calibrações na delimitação de um espaço de busca para realização da otimização utilizando o algoritmo genético; e
- com os parâmetros otimizados, analisar as distribuições de tensão e deslocamento que ocorreram no ensaio pressiométrico.

1.4. Organização

Esta dissertação foi dividida em 5 capítulos, contabilizando o presente Capítulo 1 referente a introdução.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta-se uma breve abordagem sobre o ensaio pressiométrico, destacando os tipos de equipamentos e pressiômetros usualmente utilizados e a interpretação do ensaio para obtenção de parâmetros de resistência e compressibilidade. A análise inversa é contextualizada, destacando o método de otimização evolucionista (Algoritmo Genético) utilizado no trabalho. Por último, descreve-se o desenvolvimento e as características principais do modelo não linear elástico de Duncan e Chang (1970).

No Capítulo 3, Materiais e Métodos, são apresentados todos os procedimentos aplicados na realização dos ensaios de campo (pressiométrico) e laboratório, nas análises numéricas e no procedimento genético proposto.

No Capítulo 4, Resultados e Discussão, apresentam-se todos os resultados obtidos nos ensaios de campo e laboratório, as calibrações do modelo não linear elástico (hiperbólico) utilizando os ensaios triaxiais e a análise inversa do ensaio pressiométrico. Além disso, discute-se a delimitação de um espaço de busca para a realização do procedimento genético.

No Capítulo 5, Conclusões, expõem-se algumas conclusões sobre cada uma das etapas realizadas no trabalho e propõem-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

2.1. Ensaio pressiométrico

2.1.1. Desenvolvimento histórico

O conceito de introduzir uma sonda dentro de um furo e expandi-la de modo a medir in situ as propriedades de deformação do solo surgiu pela primeira vez com o engenheiro alemão Kögler que, em 1933, publicou o seu trabalho no qual tinha concebido um aparelho que media a quantidade de gás necessária para expandir a sonda. No entanto, teve dificuldades em calcular o volume injetado e a distribuição de tensões inerente à sua teoria era muito simplificada e não respeitava a condição de equilíbrio. O aparelho idealizado por Kögler, que consistia numa sonda cilíndrica fixada por dois discos metálicos, está ilustrado na Figura 2.1.

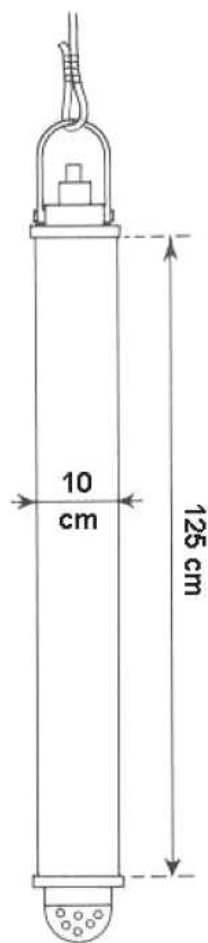


Figura 2.1 - Esquema da sonda desenvolvida por Kögler.

Fonte: Baguelin et al., (1978).

Em 1957, W. Aichom que havia realizado ensaios com o aparelho de Kögler enfatizou que “era muito difícil interpretar os resultados deste ensaio” (BAGUELIN ET AL., 1978). O impacto da sua idealização foi pequeno, entretanto ele foi o ponto de partida para o desenvolvimento dos pressiômetros que vieram em seguida.

Em 1954 um engenheiro recém licenciado Louis Ménard realizava testes de compactação em uma pista de aeroporto nas proximidades de Paris, quando percebeu que medir a resistência do solo por meio da expansão de uma sonda inserida no terreno seria ideal para determinar as propriedades de tensão e de deformação do material. Assim nasceu o projeto do pressiômetro de Ménard, desenvolvido durante o ano seguinte, como projeto final de curso orientado pelo professor Jean Lehuérou Kerisel, na École National des Ponts et Chaussées.

Livros e trabalhos publicados, tais como: Baguelin et al. (1978); Amar et al. (1991); Briaud (1992) e Clarke (1996), fazem referência ao histórico do pressiômetro.

Atualmente o equipamento é reconhecido e utilizado como ferramenta rotineira de investigação geotécnica, sendo particularmente útil na determinação do comportamento tensão-deformação de solos in situ (SCHNAID, 2000).

Segundo Oliva (2009), a temática do pressiômetro e do ensaio pressiométrico têm sido alvo de inúmeros congressos e conferências ao longo dos anos. Os principais estão destacados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Principais conferências sobre o ensaio pressiométrico.

Ano	Local	Nome
1982	Paris, LCPC	Pressuremeter Testing, ISP-1
1986	Universidade do Texas A&M	The Pressuremeter and its Marine Applications, ISP-2
1990	Universidade de Oxford	Pressumeters, ISP-3
1995	Universidade Sherbrooke	The Pressuremeter and its New Avenues, ISP-4
2005	Paris, LCPC	50 years of pressuremeters, ISP-5

Diversos países, destacando-se a França e os Estados Unidos desenvolveram normas nacionais e especificações sobre os ensaios pressiométricos, as principais estão listadas na Tabela 2.2. No Brasil, devido à ausência de normas e especificações nacionais referentes a estes ensaios, utilizam-se as normas francesa e americana que tratam de pressiômetros de pré-furo, os mais encontrados e utilizados no país.

Tabela 2.2 - Principais normas francesa e americana.

Ano	País	Código	Nome
1991	França	NF P 94 110	Sols: reconnaissance et essais, Essai pressiométrique Ménard
2000	França	NF P 94 110-1	Sols: reconnaissance et essais, Essai presiométrique Ménard, Partie 1: essai sans cycle
		NF P 94 110-2	Sols: reconnaissance et essais, Essai presiométrique Ménard, Partie 2: essai avec cycle
1987	EUA	ASTM D4719-87	Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils
2000	EUA	ASTM D4719-00	Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils
2007	EUA	ASTM D4719-07	Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils

2.1.2. Tipos de equipamento

Atualmente existem diversos tipos de pressiômetros (Figura 2.2), os quais diferem principalmente pelo método de instalação da sonda no terreno. Os diferentes equipamentos podem ser divididos em:

- Pressiômetros de pré-furo;
- Pressiômetros autoperfurantes;
- Pressiômetros com cone; e
- Pressiômetros com tubo exterior de revestimento.

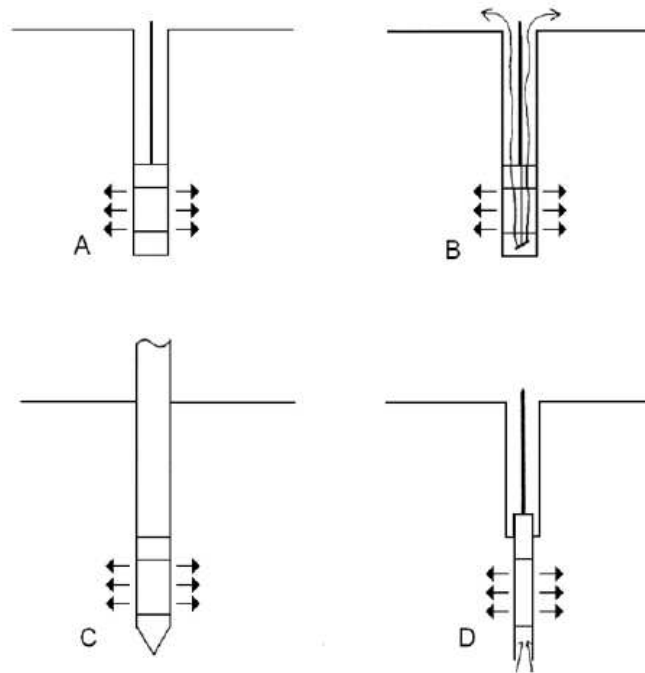


Figura 2.2 - Classificação dos diversos tipos de pressiômetros: a) Pré-furo, b) Autoperfurante, c) Com cone e d) Com tubo exterior de revestimento.

Fonte: Oliva, 2009.

Para utilizar os pressiômetros de pré-furo é necessário a abertura prévia de um furo no terreno, ou seja, é necessário recorrer a um equipamento de perfuração. O modelo mais importante deste tipo de equipamento é o pressiômetro de Ménard, razão pela qual se denomina o ensaio pressiométrico com este tipo de aparelho por Ménard Pressuremeter Test (MPT) ou Preboring Pressuremeter (PBPM).

Os pressiômetros autoperfurante foram desenvolvidos para evitar o pré-furo. Denominados por Selfboring Pressuremeter (SBPMT) este tipo de equipamento possui uma haste de furação com um dispositivo de corte capaz de perfurar o solo até a profundidade de ensaio.

O pressiômetro com cone ou cone pressiométrico pode ser cravado no local ou penetrado por pressão. Segundo Schnaid (2000) este equipamento combina a robustez do cone com a habilidade do pressiômetro em fornecer medidas completas do comportamento tensão-deformação do solo.

Por último têm-se os pressiômetros com tubo exterior de revestimento, também chamados de Push-in Pressuremeter (PIP), que consistem na cravação, por pressão, de um tubo exterior a partir de um furo já existente.

Como será utilizado somente o pressiômetro de pré-furo nesta dissertação, será descrito a seguir as principais características e parâmetros obtidos com esse tipo de equipamento.

2.1.3. Pressiômetro de Ménard

O protótipo desenvolvido por Ménard (1955) difere do equipamento documentado por Kögler basicamente no que diz respeito à sonda pressiométrica, que, em vez de ser uma única câmara longa, é composta por três câmaras superpostas, sendo uma central de medição, uma inferior e outra superior, chamadas de célula de guarda. As células de guarda protegem a célula central dos efeitos causados pelo comprimento finito do aparelho, confinando e induzindo-a a expandir apenas na direção radial. Assim, pode-se considerar que a sonda carrega o solo com uma carga radial, horizontal e uniforme, e, como consequência, cria em torno da célula central uma condição de equilíbrio axissimétrico. Esta condição simplifica e facilita enormemente a interpretação desse ensaio.

Segundo Araujo (2001) os pressiômetros de Ménard são classificados em três tipos, sendo:

- Tipo E: foi o primeiro a ser criado e não é fabricado nem vendido atualmente;
- Tipo GC: o mais utilizado e tem seu uso destinado a ensaios em solos (Figura 2.3); e
- Tipo GB: Existem poucos em utilização no mundo e são utilizados para ensaios em rocha.



Figura 2.3 - Pressiômetro de Ménard do tipo GC.

Fonte: APAGEO, 2016.

A principal diferença construtiva dos pressiômetros do tipo GC está no fato de estes não possuírem três células independentes (uma central e duas de guarda), mas sim de uma única célula separada e devidamente contida e localizada no interior de um recobrimento ao longo do corpo da sonda (Figura 2.4). Os vazios nas extremidades da célula central formam as células de guarda (ARAUJO, 2001).

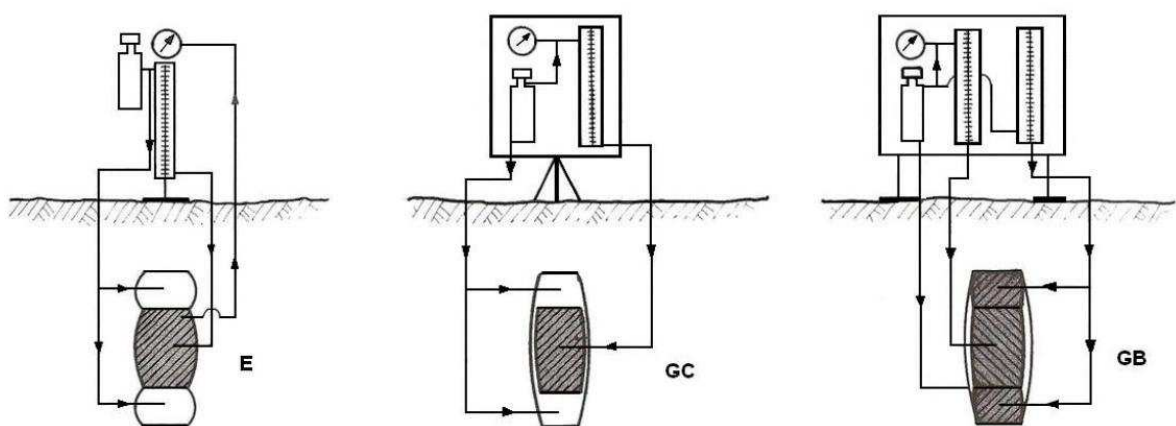


Figura 2.4 - Diferentes tipos de pressiômetros de Ménard.

Fonte: Adaptado de Baguelin et al., 1978.

2.1.4. Parâmetros obtidos

As análises realizadas nos ensaios pressiométricos de pré-furo, para obtenção de parâmetros de engenharia, são conduzidas, assumindo-se que os distúrbios gerados nas paredes do pré-furo provenientes das operações de escavação e inserção da sonda são mínimos e não afetam as propriedades do solo.

O ensaio pressiométrico é analisado mediante os conceitos da expansão de uma cavidade cilíndrica infinita no interior do solo (Figura 2.5).

Segundo Dourado (2005) a expansão dessa cavidade na massa de solo pode ser interpretada através dos conceitos fundamentais das Teorias da Elasticidade (Lamé, 1852) e da Plasticidade (Bishop et al., 1945), e está abordada com maiores detalhes em Baguelin et al. (1978), Briaud (1992) e Clarke (1995).

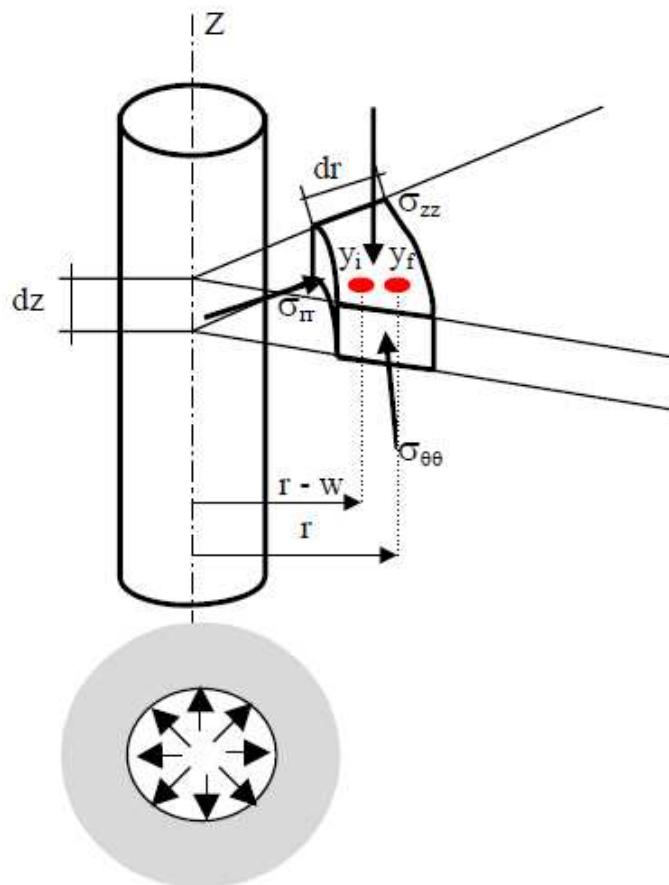


Figura 2.5 - Expansão de uma cavidade cilíndrica.

Fonte: Silva, 2001.

Deste ensaio obtém-se uma relação entre a pressão lateral aplicada no solo (tensão radial σ_r na parede da cavidade) e o respectivo incremento do raio da cavidade relativamente ao seu raio inicial $\Delta R_o/R_o$ (deformação circunferencial $\varepsilon_{\theta\theta}$ na parede da cavidade), ou seja, o ensaio fornece uma curva tensão-deformação in situ para o solo na profundidade ensaiada.

A interpretação das curvas pressão-volume (P-V) provenientes do ensaio permitem a obtenção de uma característica de deformabilidade e uma característica de resistência do solo, sendo estas denominadas de módulo pressiométrico (ou módulo de deformação) e pressão limite, respectivamente.

Além dessas informações, outros parâmetros podem ser obtidos das curvas pressiométricas tais como os módulos cíclico e cisalhante, pressão de fluência e tensão horizontal em repouso.

No entanto estas informações não correspondem a características mecânicas intrínsecas do solo, uma vez que dependem, não só do tipo de material como também do equipamento utilizado, do modo de realização do furo e do operador do aparelho.

2.1.5. Interpretação do ensaio

O ensaio pressiométrico pode ser considerado um ensaio de tensão controlada uma vez que tensões conhecidas são aplicadas e simultaneamente registros de variações volumétricas são contabilizados.

De posse desses registros, para cada ensaio (ou profundidade) uma curva pressão versus volume pode ser traçada conforme a apresentada na Figura 2.6.

A fase I (trecho AB) corresponde à parte inicial do ensaio, trecho onde a sonda inicialmente em repouso começa a se expandir até encostar às paredes do furo. O ponto B é associado ao estado de tensão inicial do solo.

Na fase II (trecho BC) verifica-se um trecho linear denominado de pseudoelástico, no qual o material se encontra em um regime de pequenas deformações e pode-se então aplicar os conceitos da Teoria da Elasticidade para determinar parâmetros de deformabilidade do solo. Segundo Silva (2001), na realidade o solo não apresenta um comportamento puramente elástico nesta fase, uma vez que este só ocorre para deformações inferiores à ordem de 10^{-2} , que não são captadas pelo pressiômetro de Ménard; daí o nome de trecho pseudoelástico.

Na fase III (trecho CD) entra-se no regime de grandes deformações. As deformações deixam de ser diretamente proporcionais as pressões aplicadas e o material apresenta um comportamento elastoplástico. Nesta fase pode-se determinar a pressão limite ou pressão de ruptura do solo, sendo esta usada para calcular parâmetros de resistência do material.

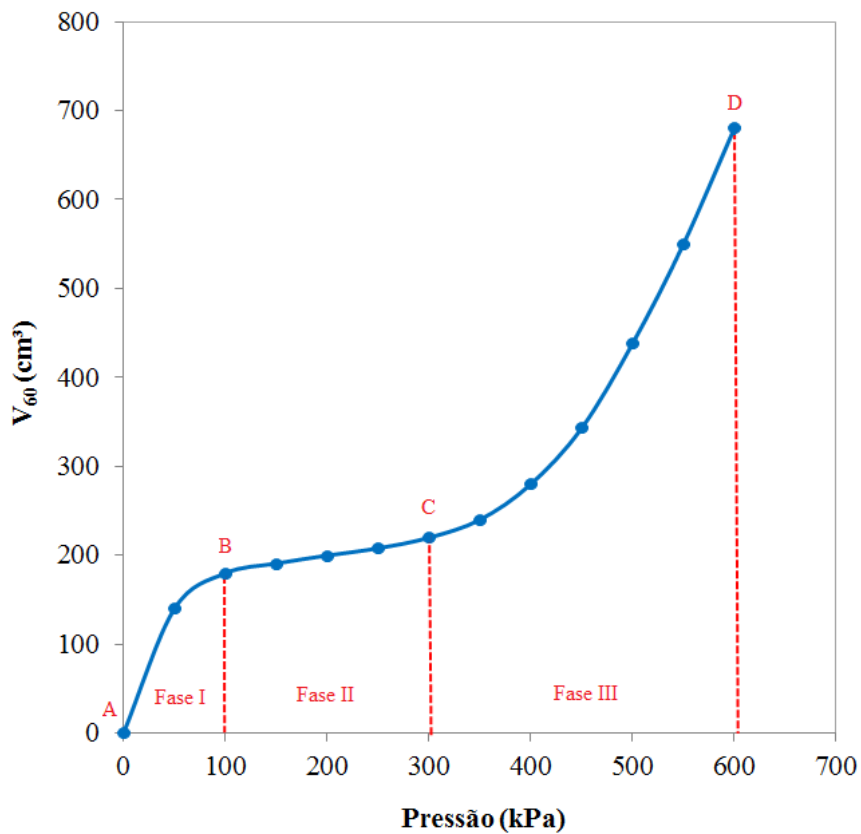


Figura 2.6 - Curva pressiométrica.

Como destacado anteriormente, as curvas obtidas nos ensaios devem ser corrigidas considerando as perdas de pressão. Na Figura 2.7 apresenta-se uma curva após o ensaio (típica) e após a correção (corrigida), e a partir desta pode-se calcular os diversos parâmetros de resistência e deformabilidade apresentados neste capítulo.

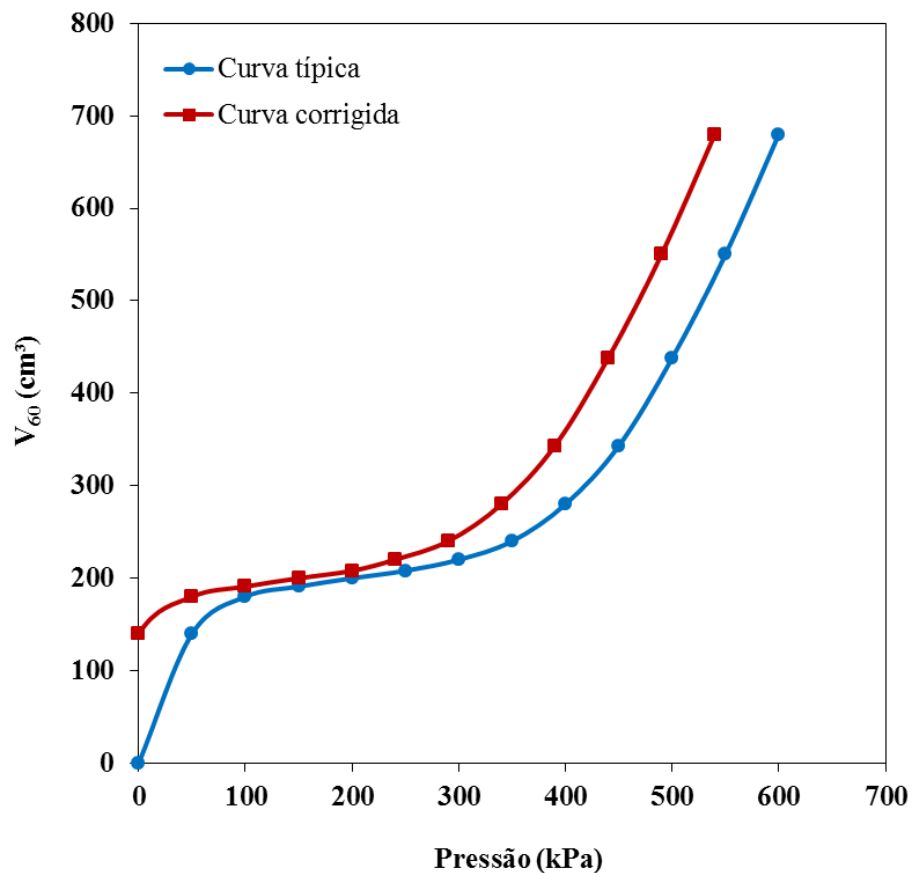


Figura 2.7 - Curva pressiométrica típica e corrigida do ensaio.

A seguir são apresentados os principais parâmetros obtidos diretamente dos ensaios pressiométricos de pré-furo com tensão controlada, em especial o ensaio pressiométrico de Ménard, segundo as normas francesa (NF P 94-110/00) e americana (ASTM D-4719/87).

2.1.5.1. Módulo pressiométrico

O módulo de deformação pressiométrico (E_p) é calculado através do trecho linear da curva pressiométrica corrigida (Figura 2.8), de acordo com a Equação 2.1.

$$E_p = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot V_m \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (2.1)$$

sendo:

ν : coeficiente de Poisson;

V_m : volume médio da cavidade, ou seja, $V_s + (V_1 + V_2) / 2$;

V_s : volume da sonda pressiométrica;

V_1 : volume inicial do trecho pseudoelástico;

V_2 : volume final do trecho pseudoelástico;

P_1 : pressão inicial do trecho pseudoelástico;

P_2 : pressão final do trecho pseudoelástico;

ΔP : variação de pressão ($P_2 - P_1$) no trecho pseudoelástico; e

ΔV : variação de volume ($V_2 - V_1$) no trecho pseudoelástico.

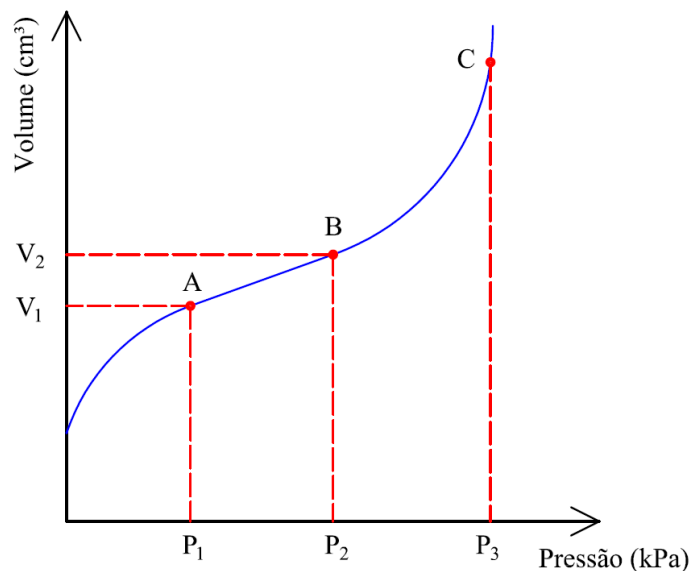


Figura 2.8 - Curva pressiométrica corrigida.

Ménard (1975) recomenda que um valor constante de ν igual a 0,33 seja adotado para qualquer tipo de solo no cálculo do módulo pressiométrico. Segundo Briaud (1992), para argilas saturadas carregadas em condições não drenadas, ensaio rápido, este valor não é recomendado, neste caso adota-se um valor médio de 0,50.

2.1.5.2. Módulo cíclico

Um ensaio pressiométrico cíclico consiste em realizar um ciclo de descarregamento-recarregamento no final do trecho linear da curva pressiométrica quando o solo inicia a deformação plástica. Desta maneira obtém-se o módulo cíclico (E_r), considerando o laço de

descarregamento apresentado na Figura 2.9 e o módulo cíclico E_a , que é a média dos ciclos repetitivos de descarregamento-recarregamento quando mais de um laço for efetuado na curva.

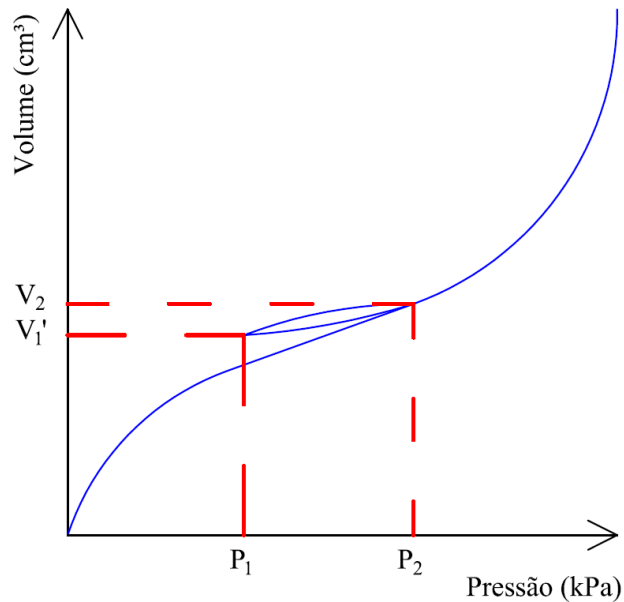


Figura 2.9 - Curva pressiométrica com laço de descarregamento-recarregamento.

O princípio de cálculo do módulo cíclico (E_r) é o mesmo do cálculo de E_p (MÉNARD, 1975). Desta maneira tem-se a Equação 2.2.

$$E_r = k \cdot \left(\frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1'} \right) \quad (2.2)$$

sendo:

$$k = 2,66 \times [V_s + (V_1' + V_2)/2], \text{ o volume médio de inflação da sonda.}$$

Ménard (1975) afirma que esses ciclos são recomendados principalmente quando a investigação do solo está relacionada a fundações sujeitas a carregamentos cíclicos ou vibrações.

Segundo Cavalcante (1997) este módulo representa melhor o comportamento quase elástico do solo, pelo fato dele ser determinado numa zona teoricamente livre dos efeitos da execução do pré-furo e de instalação da sonda.

2.1.5.3. Módulo cisalhante

O módulo cisalhante pressiométrico (G), ou módulo de elasticidade transversal do solo é obtido segundo a Equação 2.3 proposta por Lamé (1852).

$$G = \frac{\Delta P}{\Delta V/V_m} \quad (2.3)$$

sendo:

ΔV : variação de volume ($V_2 - V_1$) no trecho pseudoelástico devido ao aumento de pressão ΔP ($P_2 - P_1$); e

V_m : volume inicial da sonda acrescido do volume médio expandido.

Da mesma forma que o módulo pressiométrico (E_p), o módulo cisalhante (G) é determinado no trecho pseudoelástico da curva pressiométrica corrigida. A relação entre os módulos é dada pela Equação 2.4.

$$G = \frac{E_p}{2(1 + \nu)} \quad (2.4)$$

O valor do coeficiente de Poisson recomendado por Ménard é de 0,33. Assim a expressão pode ser reescrita pela Equação 2.5.

$$G = \frac{E_p}{2,66} \quad (2.5)$$

2.1.5.4. Pressão limite

A pressão limite (P_L) pode ser definida como sendo o valor da pressão sob a qual a cavidade cilíndrica atinge uma expansão infinita. Como a expansão infinita não pode ser alcançada durante o ensaio, a pressão limite foi definida por Ménard (1975) como sendo a pressão alcançada quando a cavidade do solo tiver duas vezes o seu tamanho inicial.

Ela pode ser determinada diretamente da curva pressiométrica, como a abscissa da assíntota da curva (Figura 2.8). Entretanto é mais usual considerar como a pressão correspondente a um aumento de volume (ΔV) igual ao volume inicial do furo (V_0), ou seja, $\Delta V/V_0 = 1$. Ménard (1975) afirma que $\Delta V/V_0$ pode ser considerado como a pressão necessária quando o volume lido corrigido alcançar 700 cm³.

No entanto, nem sempre é possível alcançar o valor de P_L , assim deve-se usar alguma técnica de extrapolação sugerida na literatura para obtenção da pressão limite.

A norma americana ASTM D4719 (1987) apresenta uma técnica para obtenção de P_L que consiste em plotar as três últimas leituras correspondentes à fase plástica numa escala P versus $\text{Log}_10 V$. Os pontos plotados devem formar uma linha reta de acordo com a Figura 2.10, o prolongamento da reta até a ordenada correspondente ao dobro do volume inicial da cavidade, ou seja, $V = V_s + 2V_1$, fornecerá a pressão limite P_L . Considerando V_s o volume da sonda e V_1 o volume do início da fase pseudoelástica.

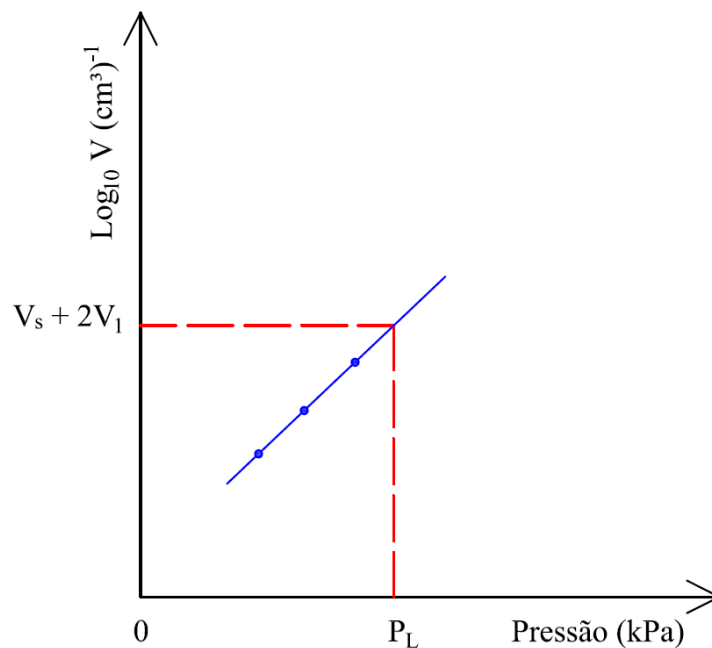


Figura 2.10 - Técnica para obtenção pressão limite.

A pressão limite pode também ser estimada de forma que a pressão de fluência P_F (ou pressão no final da fase elástica) seja igual a 1/2 ou a 2/3 da pressão limite para argilas e areias, respectivamente.

A pressão limite efetiva (P'_L) é o parâmetro relativo à resistência do solo e é definida de acordo com a Equação 2.6.

$$P'_L = P_L - \sigma_{ho} \quad (2.6)$$

sendo:

σ_{ho} : tensão horizontal total em repouso.

2.1.5.5. Pressão de fluência

A pressão de fluência (P_F) ou pressão de creep é a pressão correspondente ao ponto (P_F , V_F) no final do trecho linear da curva pressiométrica, ou seja, é a pressão correspondente ao início do escoamento do solo. O valor de P_F é derivado da curva de fluência que é obtida plotando-se a variação de volume ocorrido entre as leituras de 30 e 60 segundos versus a pressão bruta aplicada.

O ajuste dos pontos fornece três segmentos correspondentes a três fases do ensaio. A pressão de fluência (P_F) corresponde à pressão localizada no ponto de transição da fase elástica para a fase plástica.

A Figura 2.11 mostra um exemplo de curva de fluência obtida no ensaio pressiométrico de Ménard. Mesmo que a pressão de fluência não seja usada diretamente como um parâmetro de projeto, ela é usada para verificar a qualidade do ensaio ou estimar a pressão limite (P_L) quando este valor não for possível de ser calculado diretamente.

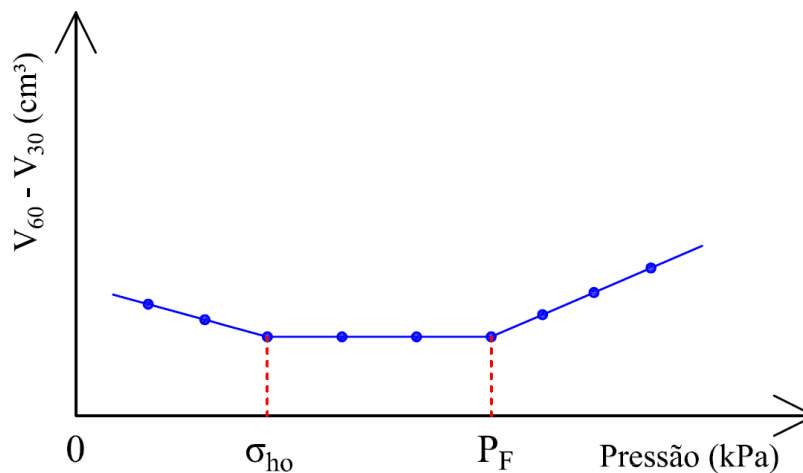


Figura 2.11 - Curva de fluência típica.

Além disso, a curva de fluência tem a finalidade de evitar ambiguidades na definição dos limites do trecho linear da curva pressiométrica, auxiliando na determinação da pressão de fluência e na estimativa da pressão horizontal inicial.

A pressão de fluência efetiva (P_F') é definida de acordo com a Equação 2.7.

$$P_F' = P_F - \sigma_{ho} \quad (2.7)$$

sendo:

σ_{ho} : tensão horizontal total em repouso.

2.1.5.6. Tensão horizontal em repouso

A tensão horizontal em repouso (σ_{ho}) pode ser encontrada na parte inicial da curva pressiométrica (próxima ao ponto A da Figura 2.8) no ponto de máxima curvatura. Segundo Dourado (2005), a determinação deste ponto é relativamente fácil se o furo for bem executado e difícil se as paredes do furo forem perturbadas durante o processo de perfuração.

Devido a subjetividade na determinação deste ponto de máxima curvatura, diversos métodos foram sugeridos para determinação da tensão horizontal inicial a partir de dados fornecidos pelo ensaio pressiométrico.

Baguelin et al. (1978) apresenta um método que faz uso da curva de fluência (Figura 2.11). A tensão horizontal em repouso corresponde a pressão localizada no ponto de transição da fase de recompressão para a fase elástica, ou seja, quando a curva atinge o seu valor mínimo estável.

Brandt (1978) propôs um método gráfico para a obtenção da tensão horizontal em repouso que consiste em traçar uma reta passando pelo trecho de recompressão, tangenciando o ponto de máxima curvatura e outra pelo trecho linear elástico (Figura 2.12) na curva pressiométrica corrigida. O ponto de intercessão das retas tem como abscissa a tensão horizontal em repouso σ_{ho} .

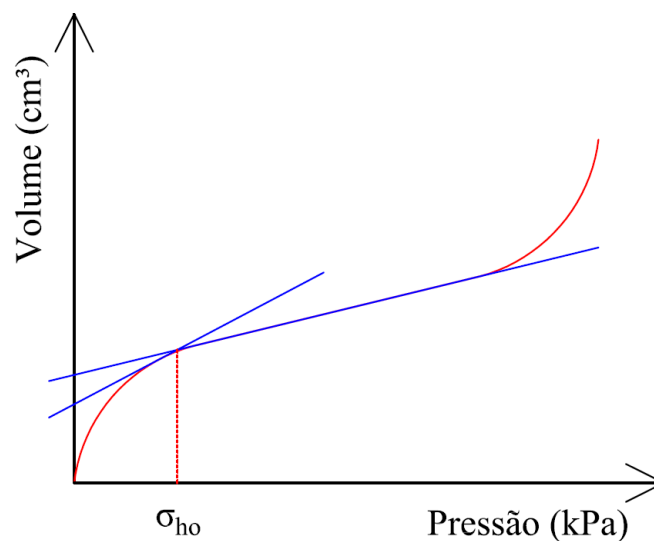


Figura 2.12 - Método gráfico de Brandt (1978).

Nos ensaios com o pressiômetro de Ménard, devido a realização do pré-furo aspectos como amolgamento gerado no solo, alívio de tensões e outros, tornam a determinação de tensão horizontal em repouso mais subjetiva. Assim, verifica-se que o pressiômetro de pré-furo não é o equipamento ideal para se obter este parâmetro.

Segundo Araujo (2001) evidências tem apontado que o pressiômetro autoperfurante é o ensaio com maior potencial para avaliação satisfatória desse índice, porém possuindo ainda limitações em solos residuais devido aos efeitos de sucção gerados na presença de água durante o processo de instalação desses tipos de sondas. Dourado (2005) afirma que σ_{ho} pode ser obtida diretamente apenas em ensaios com pressiômetros autoperfurante, o qual elimina perturbações devido ao seu processo de instalação.

2.2. Análise inversa

O processo de análise inversa (ou retroanálise) pode ser definido como uma técnica de determinação de parâmetros por meio do estudo de problemas inversos.

Um problema é considerado direto quando se deseja calcular a resposta (R) de um sistema (S), composto por um modelo matemático (M) e parâmetros (P) conhecidos, submetido a ações (A) como apresentado na Figura 2.13.

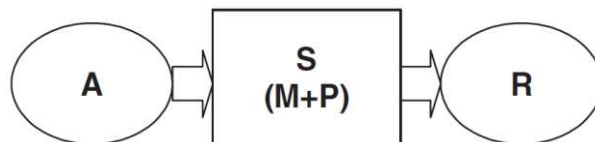


Figura 2.13 - Representação de um problema direto.

Fonte: Yin and Hicher, 2008.

Se alguma parte do sistema (S) não é conhecida, tem-se então um problema inverso (Figura 2.14). Caso não disponha de informações sobre os parâmetros, por exemplo, deve-se buscar informações complementares sobre a resposta de forma a determinar os parâmetros do sistema.

Nesse caso estabelece-se uma relação entre a resposta do modelo e os parâmetros a estimar, ou seja, define-se o modelo matemático de forma que os parâmetros a identificar sejam as incógnitas e a resposta do modelo seja um dado.

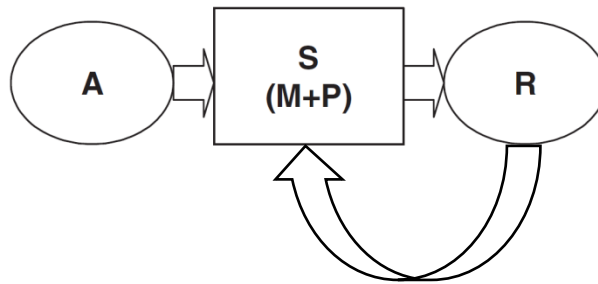


Figura 2.14 - Representação de um problema inverso.

Fonte: Yin and Hicher, 2008.

A determinação de parâmetros de um modelo constitutivo por meio da solução de um problema inverso utilizando resultados de ensaios de campo, objeto desta dissertação, consiste em encontrar um conjunto de parâmetros (m) que minimize a diferença entre os dados experimentais e os resultados numéricos fornecidos pela simulação do ensaio de campo. Este problema é definido por uma função (função objetivo) que avalia, para um dado conjunto de parâmetros, a diferença entre os resultados do modelo e os dados experimentais (ZENTAR ET. AL, 2001).

Nesse contexto, encontrar um conjunto de parâmetros que minimize a função objetivo significa encontrar parâmetros ditos ótimos, ou seja, procura-se otimizar os parâmetros do modelo constitutivo estudado de forma que a função objetivo seja a menor possível.

2.2.1. Problemas de otimização

Os problemas de otimização podem ser entendidos como problemas de maximização ou minimização de uma função com um ou mais parâmetros num determinado domínio, sendo que, geralmente, existe um conjunto de restrições nos parâmetros.

Conforme se apresenta na Figura 2.15, se um ponto x^* corresponde ao valor mínimo da função $f(x)$, o mesmo ponto também corresponde ao valor máximo da função negativa, $-f(x)$. Assim, sem perda de generalidade, a otimização pode ser entendida no sentido de minimização, uma vez que o máximo de uma função pode ser encontrado buscando-se o mínimo da mesma função com sinal negativo (RAO, 2009).

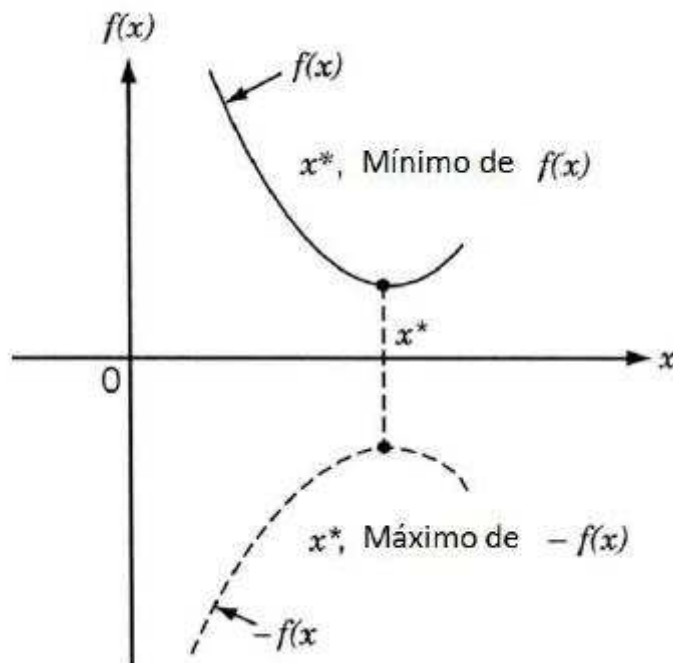


Figura 2.15 - Mínimo de $f(x)$ é o mesmo que o máximo de $-f(x)$.

Fonte: Rao, 2009.

Nos processos de otimização pretende-se determinar o conjunto de parâmetros que definam uma dada realidade, escolhendo os métodos de minimização adequados para o problema formulado. Dada a complexidade da maior parte dos problemas, torna-se muito difícil resolvê-los através de métodos analíticos. Por essa razão têm sido desenvolvidos métodos iterativos que procuram encontrar uma solução aproximada do problema a resolver (CORREIA, 2010).

Segundo Velloso (2000), alguns aspectos básicos dos problemas de estimativa de parâmetros devem ser considerados na escolha do método de otimização:

- Número relativamente pequeno de parâmetros, raramente mais do que dez;
- Função objetivo altamente não linear, cujo cálculo é frequentemente muito demorado;
- e
- Número pequeno de restrições, muitas das vezes nenhuma. As restrições geralmente são de fronteiras (limite superior e inferior).

Os problemas de otimização podem ser classificados em três categorias (Heleno, 2011): classificação baseada na existência de restrições, na natureza das equações envolvidas e baseada na natureza determinística das variáveis.

Na classificação baseada na existência de restrições tem-se que qualquer problema pode ser classificado como restrito ou irrestrito. Na presença de restrições, a solução estará sujeita a certas condições, tais como apresentar resultados dentro de certo intervalo de valores, apresentar valor menor ou maior que determinado valor especificado e outras. Guimarães (2008) afirma que existem problemas de programação em que se deseja otimizar apenas uma função sem restrições, tendo assim um problema de programação irrestrita. E caso o problema tenha restrições, tem-se um problema de programação restrita, onde os problemas podem ser divididos quanto à forma das restrições, sendo estas aparecendo como equações (restrições de igualdade), inequações (restrições de desigualdade) ou equações e inequações (restrições mistas) conforme se apresenta na Figura 2.16.

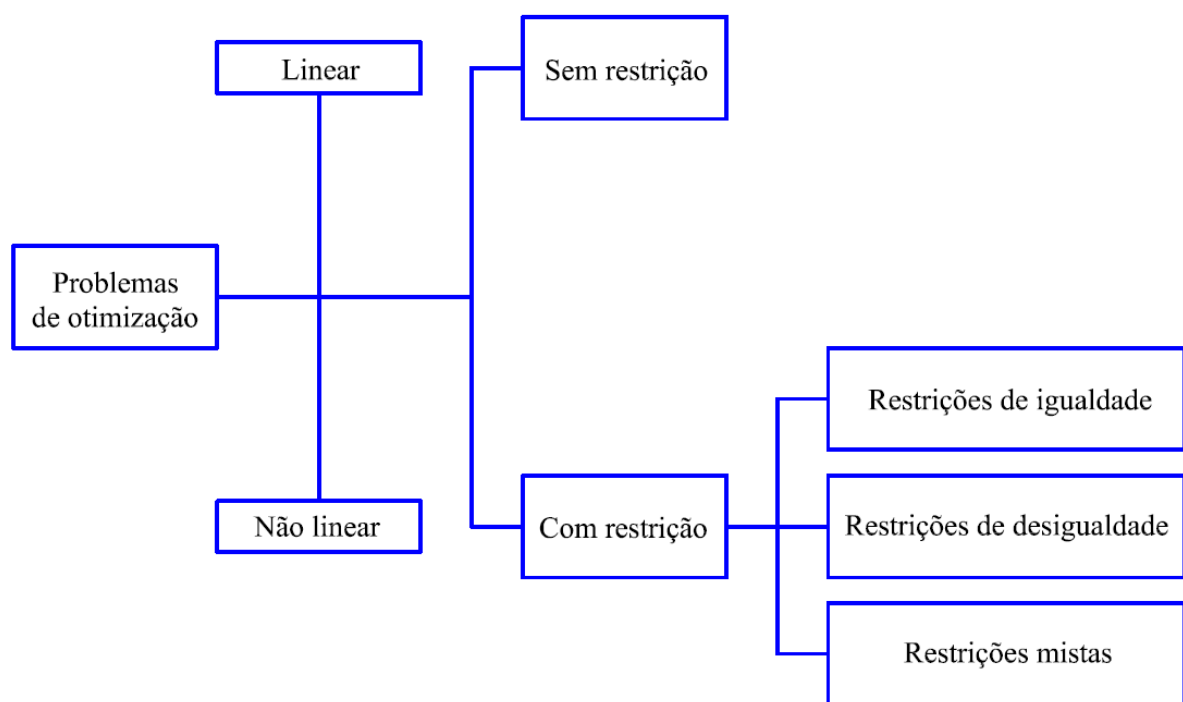


Figura 2.16 - Tipos de problemas de otimização.

Fonte: Adaptado de Guimarães, 2008.

Na classificação baseada na natureza das equações envolvidas a relação entre a função objetivo e as restrições determinará os tipos de procedimentos a serem adotados na resolução do problema. Segundo Guimarães (2008), caso a função objetivo e as restrições sejam funções

lineares dos parâmetros, o problema de otimização é conhecido como de programação linear. Quando a função objetivo ou pelo menos uma das restrições é uma função não linear dos parâmetros o problema pode ser considerado de programação não linear.

A classificação baseada na natureza determinística das variáveis define os problemas de programação matemática como determinísticos ou probabilísticos. Segundo Bastos (2004), os métodos determinísticos geram uma sequência determinística de possíveis soluções utilizando, muitas vezes, pelo menos a primeira derivada da função objetivo em relação às variáveis estudadas.

Segundo Holtz (2005) os métodos determinísticos apresentam teoremas que garantem a convergência para uma solução ótima que não é necessariamente a solução ótima global. Como nesses métodos a solução encontrada é extremamente dependente do ponto de partida fornecido, pode-se convergir para um ótimo local, por isso não possuem bom desempenho em otimizar funções multimodais.

Já os métodos probabilísticos utilizam somente a avaliação da função objetivo e introduzem no processo de otimização dados e parâmetros estocásticos. São considerados métodos de ordem zero, uma vez que não utilizam a derivada da função objetivo.

Segundo Bastos (2004) as principais vantagens dos algoritmos probabilísticos em relação aos algoritmos determinísticos consistem no fato da função objetivo e as restrições não precisarem necessariamente ter uma representação matemática; não requerem que a função objetivo seja contínua ou diferenciável; trabalham adequadamente, tanto com parâmetros contínuos quanto com discretos, ou ainda com uma combinação deles; não necessitam de formulações complexas ou reformulações para o problema; não há restrição alguma quanto ao ponto de partida dentro do espaço de busca da solução; realizam buscas simultâneas no espaço de possíveis soluções através de uma população de indivíduos e otimizam um grande número de variáveis, desde que a avaliação da função objetivo não tenha um custo computacional demasiadamente alto.

Holtz (2005) destaca, no entanto, que a maior desvantagem em relação aos métodos determinísticos é o tempo de processamento.

De forma a suprir essa desvantagem, surgiu na década de 50 a computação evolucionária, composta por algoritmos evolucionários que formam uma classe de métodos de otimização

probabilísticos que são inspirados por alguns princípios baseados em mecanismos evolutivos encontrados na natureza, como o cruzamento e a seleção natural.

De acordo com os objetivos propostos, o presente trabalho se concentrará nos estudos relativos ao método de otimização evolucionista denominado Algoritmo Genético, detalhado a seguir.

2.2.2. Algoritmos genéticos

2.2.2.1. Introdução

Já na Grécia antiga os filósofos buscavam explicações para a origem das espécies, como pode ser notado na mitologia. Platão dizia que as formas eram imitações imperfeitas das formas perfeitas transcendentais. Mas não se admitia evolução, apenas uma variação estática entre as espécies, conceito adotado pela teologia cristã (WIDMAIER, 2005).

Segundo Carvalho (1997), até o fim do século 19, os naturalistas acreditavam que cada espécie havia sido criada separadamente por um ser supremo ou através de geração espontânea. Neste período surgiu o primeiro trabalho com grande influência na biologia realizado pelo naturalista Carolus Linnaeus sobre a classificação biológica de organismos (taxonomia), que despertou o interesse pela similaridade entre certas espécies, levando a acreditar na existência de uma certa relação entre elas. Outros importantes trabalhos surgiram nesta época, tais como os de Jean Baptiste Lamarck em 1809, que afirmou que todas as espécies descendiam de outras espécies e que elas evoluíam pelo uso e desuso de órgãos; e de Thomas Robert Malthus em 1798, que propôs que fatores ambientais tais como doenças e carência de alimentos, limitavam o crescimento de uma população.

Com base nesses e em outros estudos, Charles Darwin e Alfred Russel Wallace desenvolveram simultaneamente a teoria da evolução através da seleção natural.

Depois de mais de 20 anos de observações, experimentos e influenciado pelo ensaio de Malthus em 1798, Charles Darwin apresentou em 1859 a sua famosa obra “On the Origin of Species by Means of natural Selection” com a sua teoria completa; sustentada por muitas evidências colhidas durante suas viagens a bordo do Beagle de 1831 a 1836.

Os princípios básicos das ideias de Darwin dizem que os indivíduos de uma mesma espécie apresentam variações em todos os genes, não sendo idênticos entre si, e que apresentam grande capacidade de reprodução, produzindo muitos descendentes. Entretanto, apenas alguns dos descendentes chegam à idade adulta.

Darwin afirma ainda que há grande "luta" pela vida entre os descendentes, pois apesar de nascerem muitos indivíduos poucos atingem a idade adulta, o que mantém constante o número de indivíduos na espécie. Nessa busca pela sobrevivência, organismos com variações favoráveis (mais adaptados) às condições do ambiente onde vivem têm maiores chances de sobreviver, quando comparados aos organismos com variações menos favoráveis.

Dessa forma, os organismos mais adaptados têm maiores chances de deixar descendentes. Como há transmissão de caracteres de pais para filhos, estes apresentam essas variações vantajosas. Assim, ao longo das gerações, a atuação da seleção natural sobre os indivíduos mantém ou melhora o grau de adaptação destes ao meio.

Como citado por Widmaier (2005), a teoria de Darwin e Wallace apresentava algumas lacunas, pois não explicava o mecanismo de transmissão das características dos indivíduos para sua prole. Assim, em 1866 o monge austríaco Gregor Mendel percebeu em seu cultivo de ervilhas que uma geração de plantas pode passar certas características às outras gerações, estabelecendo assim as leis da hereditariedade, conhecidas como Lei da segregação e Lei da segregação independente.

No início do século 20, o americano Thomas Morgan demonstrou ao estudar as moscas das frutas (*drosófilas*) que os cromossomos contêm os genes, unidade básica da herança genética. Segundo King (1974), Stansfield (1974) e Gardner et. al (1991), as leis de Mendel e outros conhecimentos forneceram as bases teóricas para a genética moderna e a heterogeneidade, pois a moderna teoria da evolução combina a genética e as ideias de Darwin e Wallace sobre a seleção natural, criando o princípio básico de Genética Populacional, conhecida como “Neo-Darwinismo” ou Síntese Moderna, onde a variabilidade entre indivíduos em uma população de organismos que se reproduzem sexualmente é produzida pela mutação e pela recombinação genética.

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são algoritmos de busca fundamentados no processo da seleção natural proposto por Charles Darwin e nos mecanismos da genética. Foram inicialmente propostos por John Holland nos anos 70 e o primeiro livro lançado em 1975 com

o título “Adaptation in Natural and Artificial Systems”. Segundo Guimarães (2008), o principal objetivo de Holland não foi desenvolver algoritmos para solucionar problemas específicos, mas dedicar-se ao estudo formal do fenômeno da evolução, como ocorre na natureza, e desenvolver maneiras de importá-lo aos sistemas de computação.

2.2.2.2. Definições

Para a utilização de um AG são necessárias algumas definições adicionais que são particulares a esse tipo de algoritmo. Como a Computação Evolucionária é baseada em mecanismos evolutivos encontrados na natureza, muitos termos adotados pelos AGs baseiam-se na Genética, tais como:

- Cromossomo ou genoma: cadeia de caracteres representando alguma informação relativa às variáveis do problema. O cromossomo é normalmente um vetor ou uma cadeia de bits (cadeia de bits é a estrutura mais tradicional, porém nem sempre é a melhor), onde cada cromossomo representa uma solução do problema;
- Genótipo: representa a informação contida no cromossomo;
- Fenótipo: representa um indivíduo no espaço de busca original, ou seja, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo. É o cromossomo decodificado;
- Indivíduo: é um membro da população, formado pelo cromossomo e sua aptidão;
- Gene: unidade básica do cromossomo, ou seja, é um elemento do vetor que representa o cromossomo;
- Alelo: em biologia representa uma das formas alternativas de um gene. Nos AGs representa os valores que o gene pode assumir;
- Epistasia: interação entre genes do cromossomo, ou seja, quando um gene influencia o valor do outro. A solução de problemas com alta epistasia são difíceis de se resolver;
- População: conjunto de indivíduos ou cromossomos;

- Codificação: é a maneira como os genes dos indivíduos são representados. Ela pode ser feita utilizando a forma binária, codificação de valor (números reais ou inteiros) e permutação;
- Geração: ordem evolutiva das diferentes populações ou número de iterações que o AG executa;
- Operações genéticas: conjunto de operações que o AG realiza sobre cada um dos cromossomos;
- Função objetivo: é a função que se quer otimizar. Ela contém informação numérica do desempenho de cada cromossomo na população, ou seja, é dada uma nota que mede quão boa é a solução codificada. Nela estão representadas as características do problema que o AG precisa para realizar seu objetivo, sendo expressa como:

$$J = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.8)$$

onde $x_1, x_2, \dots, x_n$ são as variáveis que o algoritmo procura determinar para otimizar J . Esta função é normalmente calculada para cada cromossomo da população; e

- Espaço de busca: é o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. Deve ser caracterizado pelas funções de restrição, que definem as soluções de forma viável ao problema a ser resolvido.

2.2.2.3. Fundamentos dos algoritmos genéticos

Por meio de um processo iterativo os Algoritmos Genéticos transformam uma população de candidatos, cada um com um valor associado de adaptabilidade (aptidão), numa nova geração de indivíduos usando os princípios Darwinianos de reprodução e sobrevivência dos mais aptos, pela aplicação de operações genéticas tais como recombinação e mutação.

Cada indivíduo na população representa uma possível solução para um dado problema. O que o AG faz é procurar aquela que seja muito boa ou a melhor para o problema estudado pela criação genética de populações de indivíduos cada vez mais aptos à minimização da função objetivo.

Castro (2001) destaca que é impossível mapear todos os problemas existentes dentro de um eixo ordenado, entretanto, com uma representação abstrata desta forma e a adoção da eficiência com que os métodos resolvem cada problema individualmente, seria possível determinar curvas indicativas da aplicabilidade versus eficiência dos métodos disponíveis (Figura 2.17).

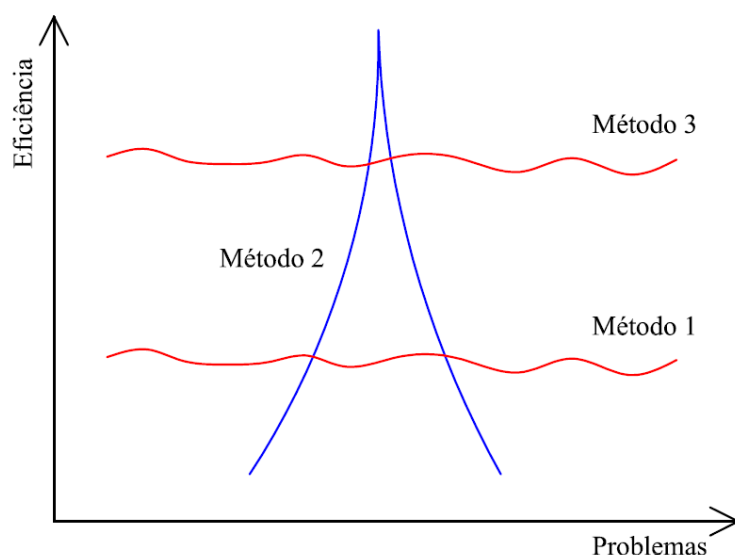


Figura 2.17 - Aplicabilidade em problemas versus eficiência de resolução dos métodos.

Fonte: Adaptado de Castro, 2001.

Na Figura 2.17 anterior encontram-se três tipos extremos de métodos, sendo eles:

- Método 1: pouco eficiente para a totalidade dos problemas existentes;
- Método 2: altamente eficiente para uma pequena faixa de problemas, entretanto, pouco eficiente ou nem aplicável para a maior parte deles; e
- Método 3: razoavelmente eficiente para a totalidade dos problemas existentes.

Baseado nisso, pode-se dizer que os AGs se aproximam da terceira classe de métodos, não sendo mais eficientes que aqueles projetados especificamente para um determinado problema estudado. No entanto, perturbações no problema original trariam quase nenhum prejuízo aos AGs, mas possivelmente, a inutilidade de outros métodos.

Embora a metodologia aplicada nos AGs para obter uma população de possíveis soluções seja probabilística, não se pode considerar sua atuação como uma simples busca aleatória, uma vez

que as informações disponíveis são inteligentemente exploradas de forma a buscar novos indivíduos ou soluções capazes de melhorar o resultado obtido.

Basicamente o procedimento se baseia em gerar uma população inicial, formada por um conjunto de cromossomos gerados de forma aleatória ou não, de possíveis candidatos a solução. Essa população é avaliada quanto a sua capacidade de representar satisfatoriamente o problema estudado, sendo a cada cromossomo fornecido um valor representativo a sua capacidade avaliada (aptidão). Os indivíduos com maiores valores de aptidão são selecionados (seleção natural) e geram, por meio de operadores genéticos, uma população de descendentes. Essa nova população também é avaliada e juntamente com os pais são ordenados e uma nova população, denominada principal, é selecionada e o processo segue até que se consiga obter uma solução que atenda aos critérios de parada previamente definidos; conforme se apresenta na Figura 2.18.

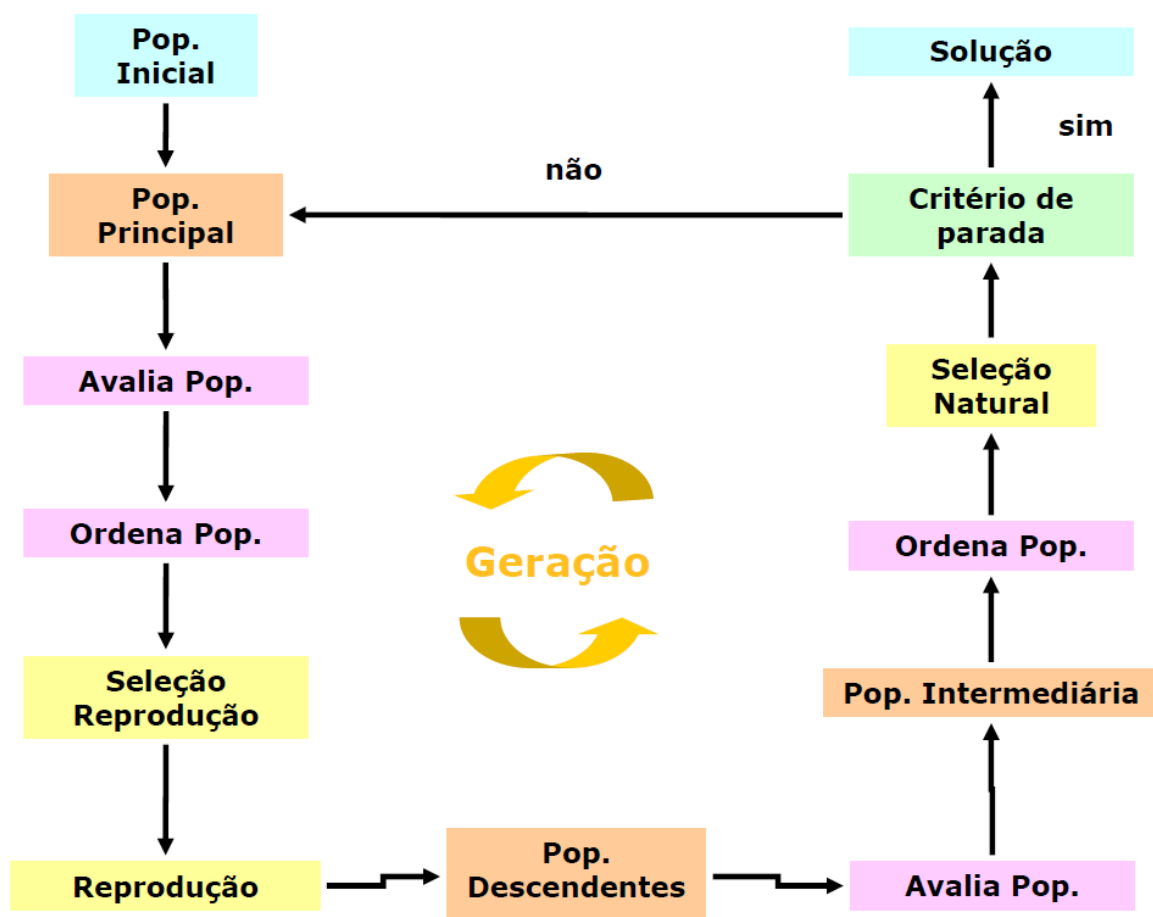


Figura 2.18 - Fluxograma de um Algoritmo Genético.

Fonte: Guimarães, 2008.

Os AGs podem ser empregados em inúmeras áreas, tais como em reconhecimento de crimes, jogos, trajetórias de robôs, desenho de aeronaves, otimização estrutural e de funções, simulação de modelos biológicos e outras. No entanto, assim como todo e qualquer algoritmo ele apresenta vantagens e desvantagens de sua aplicação.

Silva (2001) destaca que os AGs têm sido empregados em problemas complicados de otimização em que, muitas vezes, os demais métodos falham. Dentre as principais vantagens pode-se citar:

- Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou uma combinação deles;
- Realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Otimizam um grande número de variáveis;
- Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Adaptam-se bem à computação paralela;
- Trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- São fáceis de serem implementados em computadores;
- São robustos e aplicáveis a uma grande variedade de problemas; e
- São mais resistentes a se prenderem a ótimos locais.

No entanto, apesar das inúmeras vantagens, os AGs não são eficientes para muitos problemas e algumas desvantagens na sua aplicação podem ser citadas, tais como:

- Dificuldade de achar um ótimo global se o espaço de busca não for amplo;
- Requerem um grande número de avaliações da função objetivo; e
- Grandes possibilidades de configurações podendo complicar a resolução.

2.2.2.4. Populações genéticas

Na natureza, quando uma população de indivíduos evolui por várias gerações, características individuais que são úteis para a sobrevivência tendem a serem passadas para as gerações futuras, pois os indivíduos que as possuem têm maior chance de sobreviver e portanto de se reproduzir.

Essas características ficam armazenadas nos cromossomos, compostos por cadeias de DNA, que estão presentes em cada uma das células dos seres vivos. Os cromossomos por sua vez são constituídos por genes, que são responsáveis pela codificação de determinada proteína, ou seja, cada gene codifica uma determinada configuração ou característica.

Nos AGs tradicionais assume-se que cada indivíduo seja constituído por um único cromossomo, o que permite a utilização dos termos indivíduo ou cromossomo como sendo sinônimos.

No procedimento básico de um AG o conjunto de indivíduos formam as chamadas populações genéticas durante o processo, sendo esta composta pela população inicial, população principal, população dos descendentes e população intermediária.

A população inicial é a precursora de todas as populações, podendo ser gerada de diversas maneiras como será descrito no próximo item desta dissertação. A população principal é passada de geração em geração e nela se encontra os indivíduos mais adaptados ao meio. A população dos descendentes se origina a partir da atuação dos operadores genéticos (crossover e mutação). A população intermediária é formada pelo conjunto da população principal e dos descendentes, sendo o procedimento de seleção aplicado a esse conjunto com o objetivo de criar uma nova população principal.

O tamanho de cada população é uma variável do algoritmo genético. Porém, muitos pesquisadores têm apontado para uma correlação entre o tamanho da população e do cromossomo. Assim, quanto maior o cromossomo maior deverá ser a população para que se consiga no espaço de busca estudado convergir para resultados satisfatórios.

2.2.2.5. População inicial

A representação do espaço de busca é dada pela geração ou inicialização da população inicial de indivíduos ou cromossomos. Essa geração pode ser feita de forma aleatória, determinística ou aleatória com nicho.

A geração aleatória é a mais comum, e faz uso de geradores de números aleatórios para inicialização da população. Na geração determinística os indivíduos são gerados segundo uma determinada heurística, introduzindo logo de início, um ou mais indivíduos interessantes, como por exemplo, soluções aproximadas conhecidas contendo algum tipo de informação prévia. Na inicialização aleatória com nicho os indivíduos da população são gerados de forma que possam ser divididos em espécies, ou seja, com características semelhantes.

Na maior parte das aplicações utiliza-se a geração da população inicial por meio dos métodos aleatório ou determinístico.

Uma alternativa interessante e muito usual é a geração de indivíduos obedecendo a condições de contorno inicialmente estabelecidas. Nesse caso, o conhecimento prévio do problema a ser otimizado proporcionará a aplicação de condições de contorno, e quanto mais restritas forem estas, mais rápida será a convergência, pois os valores gerados aleatoriamente estarão mais próximos da solução desejada.

Caso se tenha conhecimento de indivíduos interessantes obtidos por outros métodos de otimização, uma boa alternativa será a inserção destes na população inicial utilizada no AG. Isso fará com que a solução gerada seja tão boa quanto à obtida pelos outros métodos. A esse procedimento se dá o nome de seeding.

2.2.2.6. Avaliação da população

Na biologia, aptidão significa a capacidade de sobreviver aos predadores, ao clima, de se alimentar, superar a todos os obstáculos e de se reproduzir. Em resumo, o quão o indivíduo está adaptado ao seu meio.

Nesse sentido, avaliar a aptidão de um indivíduo (cromossomo) significa fornecer uma medida qualitativa, indicando se este indivíduo está ou não próximo da solução desejada.

Quanto mais próximo do valor objetivo (máximo ou mínimo), mais adaptado ele está e maiores as suas chances de sobrevivência, ou seja, de passar para as próximas gerações.

A avaliação é feita por uma função de desempenho, que em problemas de otimização está intimamente ligada à função objetivo cujo extremo global deseja-se obter. Em alguns problemas, a função objetivo pode ser bastante complicada demandando alto custo computacional. Segundo Guimarães (2008) alguns cuidados devem ser tomados para que cromossomos idênticos não sejam avaliados mais de uma vez, reutilizando a avaliação efetuada, tais como:

- evitar gerar cromossomos idênticos na população inicial;
- verificar se foi aplicada a reprodução nos pais, pois caso contrário, os filhos serão iguais aos pais;
- observar se o filho é igual a um dos pais;
- manter a população com todos os cromossomos distintos entre si, o que também ajuda na manutenção da diversidade; e
- antes de avaliar o filho, verificar se já existe um cromossomo igual a este filho na população.

Deve-se destacar ainda que na utilização de AGs pode ocorrer uma rápida convergência para um ótimo local, porém não o esperado ótimo global. Este problema é denominado convergência prematura, podendo ocorrer devido a população reduzida ou a má distribuição da população inicial, em torno do ponto sub-ótimo. Ou seja, um indivíduo próximo de um ótimo local, possui um valor de aptidão superior aos demais indivíduos da população gerando assim um número excessivo de filhos que dominam a população, enquanto os outros indivíduos desaparecem.

A convergência prematura pode ser combatida limitando o número de filhos por cromossomos. Essa limitação pode ser realizada através dos processos de escalonamento da aptidão, ordenamento e outras técnicas de seleção.

2.2.2.7. Seleção

O processo de seleção é responsável por fazer com que, após muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos cada vez mais aptos ao meio.

Segundo Silva (2005) a seleção é um dos procedimentos mais importantes de qualquer AG, uma vez que ele é o foco central da técnica dos algoritmos genéticos para incorporar ao algoritmo os conceitos da Seleção Natural de Darwin. Ou seja, deve-se assegurar que os melhores indivíduos tenham uma maior probabilidade de seleção para assim se obter um aumento progressivo da aptidão média das populações durante o processo evolutivo. Convergindo estes indivíduos para a resposta desejada do problema.

Alguns métodos têm sido propostos para realização da seleção, sendo alguns deles apresentados a seguir.

Método da roleta

Neste método os indivíduos são selecionados para a próxima geração utilizando uma roleta, na qual cada espaço da mesma será composta proporcionalmente pelos valores de aptidão de cada indivíduo. Assim, os indivíduos mais adaptados ocuparão maior espaço na roleta e consequentemente terão maiores chances de serem selecionados.

A prática consiste em gerar um número aleatório no intervalo entre zero e a soma das aptidões dos indivíduos da população por um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e o indivíduo que possuir em seu intervalo o valor gerado, será selecionado. O intervalo é delimitado por ponteiros fictícios, tais como as utilizadas em roletas de jogos de azar.

Torneio

O procedimento consiste em selecionar aleatoriamente, com probabilidades iguais, algumas soluções para compor a população intermediária.

Amostragem estocástica

O procedimento é o mesmo utilizado na roleta, a diferença consiste em considerar as ponteiros da roleta igualmente espaçadas. Neste caso, a roleta será girada uma única vez e o número de ponteiros será igual ao número de indivíduos a serem selecionados.

Classificação

A classificação surgiu para suprir uma deficiência do método da roleta, pois a mesma tem problemas quando há grandes diferenças entre os valores de aptidão. Assim, nesse método primeiramente é feita uma classificação e coloca-se aptidão igual a 1 ao primeiro, 2 ao segundo e assim sucessivamente até N (número de indivíduos da população). A partir daí todos os indivíduos têm chances de serem selecionados. A desvantagem na sua utilização consiste no fato de que os indivíduos mais adaptados não irão se destacar muito em relação aos demais.

2.2.2.8. Operadores genéticos

Os operadores genéticos são os responsáveis pelas modificações sofridas pelos indivíduos de uma população. O objetivo básico de um operador genético é produzir novos cromossomos que possuam propriedades genéticas superiores às encontradas nos pais.

Um algoritmo de otimização global deve ser capaz de explorar pontos inteiramente novos dentro do espaço de busca, bem como intensificar a busca em determinadas regiões consideradas promissoras. Esse mecanismo de diversificação e intensificação (exploration e exploitation) é usualmente obtido nos AGs pela correta aplicação dos operadores de recombinação (crossover) e mutação.

Recombinação ou crossover

O processo de recombinação é um processo sexuado, ou seja, envolve mais de um indivíduo, responsável por realizar a troca de fragmentos entre pares de cromossomos; ação conhecida também como crossover.

Existem vários operadores para aplicação do processo, sendo estes divididos em convencionais, heurísticos (ou direcionais) e aritméticos.

Os métodos convencionais incluem o procedimento Uniforme e o N Pontos, sendo estes normalmente aplicados em cadeias de bits. Os operadores heurísticos promovem a recombinação utilizando informações de aptidão para realizar uma extrapolação linear entre os pais.

A partir de adaptações dos operadores utilizados para representação binária criou-se uma série de operadores para representação real, que funcionam bem na representação binária, mas na representação real eles basicamente trocam valores dos genes; não criando, portanto informações novas. Dessa constatação, passou-se a utilizar operadores aritméticos, que realizam algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais tais como os apresentados a seguir.

- **Crossover média:** os genes do cromossomo filho são obtidos pela média aritmética dos genes dos cromossomos pais.

$$p'_i = (p_{1i} + p_{2i})/2 \quad (2.9)$$

onde p'_i é um gene do cromossomo filho, p_{1i} e p_{2i} são genes dos cromossomos pais.

- **Crossover média geométrica:** os genes do cromossomo filho são obtidos pela média geométrica dos genes dos cromossomos pais.

$$p'_i = \sqrt{p_{1i} p_{2i}} \quad (2.10)$$

onde p'_i é um gene do cromossomo filho e p_{1i} e p_{2i} são genes dos cromossomos pais.

- **Crossover BLX - α ou Blend - α :** o procedimento consiste em gerar um gene do cromossomo filho (p'_i) utilizando dois genes dos cromossomos pais (p_{1i} e p_{2i}). Neste operador são gerados dois cromossomos filhos a partir de dois cromossomos pais por meio da expressão:

$$p'_i = p_{1i} + \beta(p_{2i} - p_{1i}) \quad (2.11)$$

onde p'_i é um gene do cromossomo filho, p_{1i} e p_{2i} genes dos cromossomos pais e $\beta \in U(-\alpha, 1+\alpha)$ e $0 \leq \alpha \leq 1$. Assim, para um dado valor de α o parâmetro β assumirá dois valores. Para $\alpha = 0$ os genes gerados estarão limitados aos valores dos genes dos pais, assim pode-se dizer que o parâmetro α tem a finalidade de estender esse intervalo fazendo com que não haja perda de diversidade por meio do balanceamento da tendência de gerar filhos no centro do intervalo. Segundo Guimarães (2008), este método tem sido usado com sucesso em muitos trabalhos e tem sido o operador mais utilizado para representação real.

- **Crossover aritmético:** o procedimento consiste em gerar um gene do cromossomo filho (p'_i) utilizando dois genes dos cromossomos pais (p_{1i} e p_{2i}). No entanto, diferentemente do método anterior, esse operador não permite a obtenção de cromossomos filhos fora dos limites impostos pelos cromossomos pais, conforme expressão a seguir:

$$\begin{aligned} p'_{1i} &= \beta p_{1i} + (1 - \beta) p_{2i} \\ p'_{2i} &= \beta p_{2i} + (1 - \beta) p_{1i} \end{aligned} \quad (2.12)$$

onde p'_{1i} e p'_{2i} são genes dos cromossomos filhos, p_{1i} e p_{2i} são genes dos cromossomos pais e $\beta \in [0, 1]$.

- **Crossover linear:** dois cromossomos pais dão origem a três cromossomos filhos. Portanto, três cromossomos serão gerados sendo os dois melhores selecionados para se manter como filhos.

$$\begin{aligned} p'_{1i} &= 0,5 p_{1i} + 0,5 p_{2i} \\ p'_{2i} &= 1,5 p_{1i} - 0,5 p_{2i} \\ p'_{3i} &= -0,5 p_{1i} + 1,5 p_{2i} \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde p'_{1i} , p'_{2i} e p'_{3i} são genes dos cromossomos filhos, p_{1i} e p_{2i} são genes dos cromossomos pais.

Mutação

A mutação tem a função de realizar modificações nas soluções obtidas pelo operador crossover de forma a evitar a estagnação delas em uma única região do espaço de busca. Com

isso é possível explorar o espaço de maneira mais completa e vasta, evitando que o algoritmo fique preso a ótimos locais e que alguma informação genética se perca ao longo do processo.

O operador mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação (T_m). Assim, definido o valor da T_m , um procedimento prático muito utilizado consiste em disparar um número aleatório, entre 0 e 1, para cada gene do indivíduo e avaliar se o número gerado é menor ou igual a taxa de mutação estabelecida. Caso seja menor que a T_m , um novo valor para o gene é determinado, alterando assim o indivíduo estudado; caso contrário, não se altera o gene.

Na utilização de notação binária, o operador simplesmente inverte o valor do gene, caso seja 0 o gene passa a ter valor 1 e vice versa.

A aplicação da mutação em um determinado gene pode ser realizada por diversos métodos em representação real, tais como os apresentados a seguir:

- **Mutação uniforme:** substitui o valor de um gene por um valor aleatório uniforme selecionado dentro de um intervalo de valores pré-determinado;
- **Mutação Gaussiana:** substitui o valor de um gene por um valor aleatório de acordo com uma distribuição Gaussiana;
- **Mutação não uniforme:** a mutação é feita segundo uma probabilidade dinâmica, isto é, uma probabilidade que diminui conforme o número de gerações aumenta. Neste caso o operador evita a estagnação da população nos estágios iniciais do AG e permite um aprimoramento das soluções nos estágios finais da evolução;
- **Mutação não uniforme múltipla:** a mutação é feita utilizando a mutação não uniforme em todos os genes do cromossomo selecionado; e
- **Mutação Creep:** consiste em somar ao valor de um gene um valor gerado a partir de uma distribuição normal com média zero e desvio padrão baixo. Uma alternativa é multiplicar o valor do gene por um número aleatório próximo a 1. Este operador é aplicado no caso da representação real e não gera grande perturbação nas populações. Isto permite que seja usado com taxas de mutação mais elevadas. O efeito da mutação creep auxilia na busca local

(exploração), pois parte da ideia de que se um cromossomo está perto de um valor ótimo uma pequena alteração pode levá-lo ao ótimo (MENDONÇA, 2004).

Elitismo

O elitismo é uma técnica que visa preservar o melhor indivíduo já encontrado no processo de busca, ele evita que indivíduos mais adaptados sejam perdidos após as operações de crossover e mutação. Assim, ele tem a função de manter na população subsequente o melhor indivíduo da população anterior; sendo muito utilizado nos AGs tradicionais.

2.2.2.9. Critérios de parada

Nos AGs tradicionais observa-se a necessidade de definir critérios para o fim da busca. Normalmente são utilizados critérios baseados no andamento da solução usando valores da função objetivo para o melhor indivíduo, a diversidade e o número de gerações como referências.

Os principais critérios utilizados consideram que a busca deve cessar quando se atinge um dado número de gerações ou avaliações, quando se encontra a solução (se esta for conhecida), quando se verifica perda de diversidade ou quando não há melhora significativa na solução durante um dado número de gerações.

2.3. Modelo constitutivo

O estudo da deformabilidade dos solos é complexo porque envolve a coexistência de deformações reversíveis (elásticas) e irreversíveis (plásticas) que podem variar em função da trajetória de tensões, mineralogia, tempo, temperatura e outros.

Portanto, para se definir de forma mais realística o comportamento dos solos e rochas é necessário que se tenha conhecimento das teorias da elasticidade e plasticidade (PESSOA, 2011).

Na Figura 2.19 apresentam-se algumas das diversas idealizações utilizadas para representar o comportamento tensão-deformação dos solos.

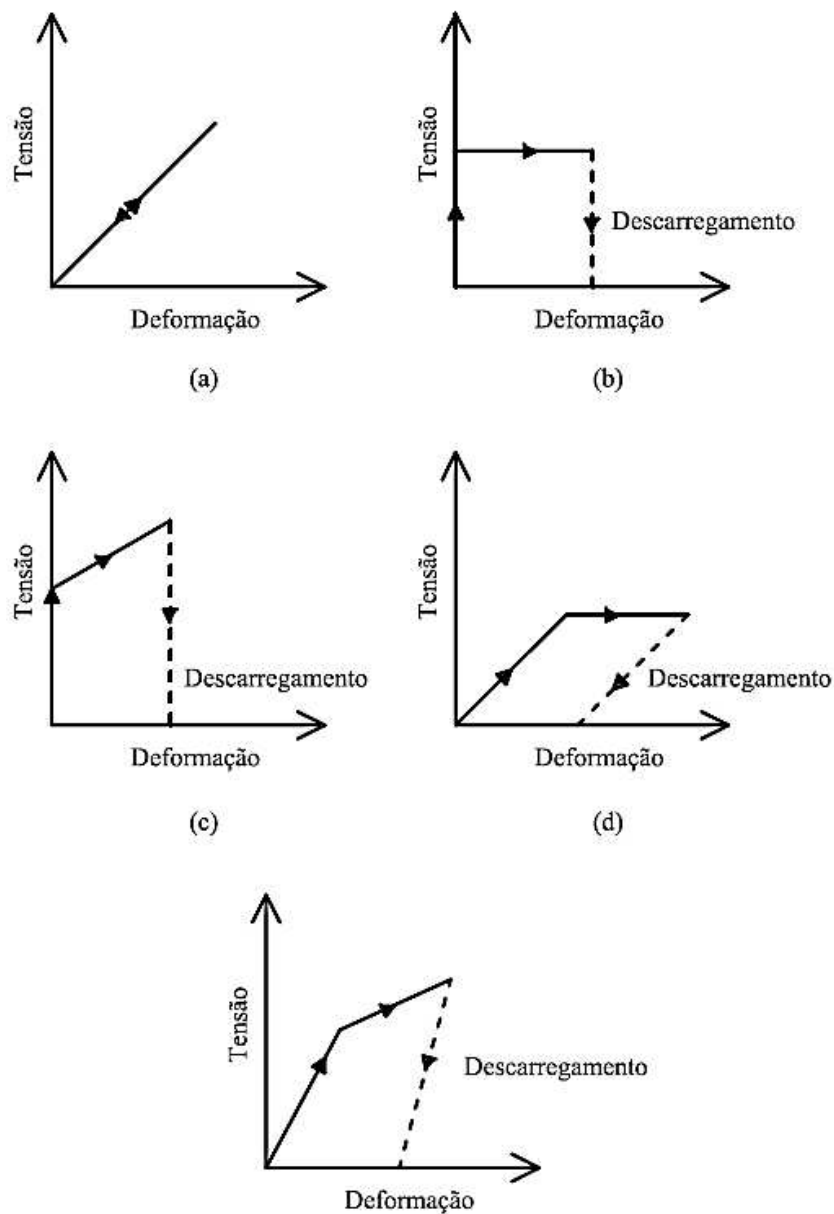


Figura 2.19 - Modelos de tensão-deformação: (a) Linear e elástico, (b) Rígido, perfeitamente plástico, (c) Rígido, endurecimento linear, (d) Elástico, perfeitamente plástico e (e) Elástico, endurecimento linear.

Essas teorias permitem, por meio de equações, representar o comportamento de um dado material. Estas equações são denominadas equações constitutivas, leis constitutivas ou modelos constitutivos.

Os modelos constitutivos utilizados em Mecânica dos Solos variam desde o mais simples, linear elástico, até os mais complicados que envolvem plasticidade não associada com endurecimento cinemático, viscosidade, temperatura, etc. (DESAI e SIRIWARDANE, 1984 apud BURNIER, 2006).

Ibañez (2003) divide os modelos constitutivos em quatro grandes grupos: modelos constitutivos básicos, elasto-plásticos clássicos, elasto-plásticos avançados e modelos para solos não saturados e estruturados.

Os modelos constitutivos básicos são fundamentados na teoria da elasticidade e são divididos por Ibañez (2003) em modelos elásticos (elástico linear, não linear e hiperelástico), hipoeásticos e quase-lineares (bi-linear, K-G, hiperbólico, EC-K₀).

A seguir será descrito o modelo elástico não linear (hiperbólico) que será utilizado nesse trabalho.

2.3.1. Modelo não linear elástico (hiperbólico)

O modelo hiperbólico é originalmente atribuído a Kondner e Zelasko (1963) e, a partir deste trabalho, quatro versões do modelo foram apresentadas por Duncan e Chang (1970), Kulhawy e Duncan (1972), Herrmann (1978) e Duncan (1980).

O modelo foi desenvolvido para estudo de ensaios triaxiais não drenados e era baseado em apenas dois parâmetros e na hipótese do coeficiente de Poisson ser igual a 0,5. Atualmente, o modelo hiperbólico tem sido utilizado para representar o comportamento tensão-deformação-resistência de solos que podem variar desde argilas, areias até pedregulhos, em condições de carregamento drenado e não drenado.

Este modelo simula a não linearidade do comportamento tensão-deformação do solo e a sua dependência do nível de tensões. Nas condições comportamentais do material de campo em que o modelo hiperbólico se adapta, pode-se dizer que é vantajoso usar este modelo, seja por sua simplicidade, seja pelo fato dos seus parâmetros poderem ser obtidos por meio de ensaios triaxiais (ALMEIDA, 2010).

2.3.1.1. Descrição do modelo

Kondner e Zelasko (1963) propuseram que a curva tensão-deformação deveria ser aproximada por uma hipérbole (Figura 2.20) da forma representada pela Equação 2.14.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (2.14)$$

sendo:

σ_1 e σ_3 : tensões principais maior e menor, respectivamente;

ε_a : deformação axial; e

a e b: constantes determinadas experimentalmente de acordo com a tensão confinante (σ_3).

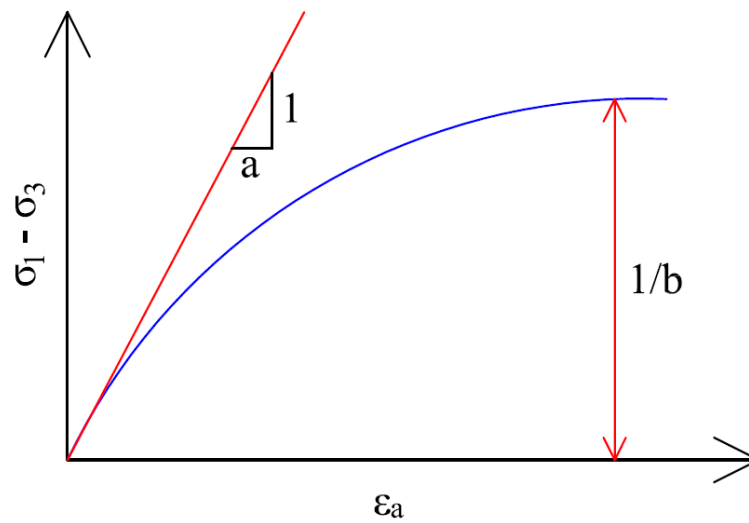


Figura 2.20 - Curva tensão-deformação para o modelo hiperbólico.

Derivando a equação da hipérbole chega-se a Equação 2.15.

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_a} = \frac{1}{a + b\varepsilon_a} - \frac{b\varepsilon_a}{(a + b\varepsilon_a)^2} = \frac{a}{(a + b\varepsilon_a)^2} \quad (2.15)$$

Para $\varepsilon_a = 0$, tem-se que.

$$\left[\frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_a} \right]_{\varepsilon_a=0} = \frac{1}{a} = E_i \quad (2.16)$$

Por outro lado, o limite da Equação 2.14 quando ε_a tende ao ∞ é:

$$\lim_{\varepsilon_a \rightarrow \infty} \sigma_1 - \sigma_3 = \lim_{\varepsilon_a \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} = \frac{1}{b} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (2.17)$$

Com as expressões anteriores, a hipérbole (Figura 2.20) pode ser matematicamente descrita pela Equação 2.18.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon_a}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \quad (2.18)$$

sendo:

E_i : modulo de Young inicial; e

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: assíntota da curva hiperbólica, naturalmente associada à resistência do solo.

Kondner e Zelasco (1963) mostraram que os valores dos coeficientes a e b podem ser obtidos transformando a equação da hipérbole (Equação 2.18) em uma relação linear conforme se apresenta na Equação 2.19.

$$\frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{1}{E_i} + \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \varepsilon_a \quad (2.19)$$

A partir do traçado da curva transformada apresentada na Figura 2.21(b) pode-se obter os valores dos parâmetros a e b.

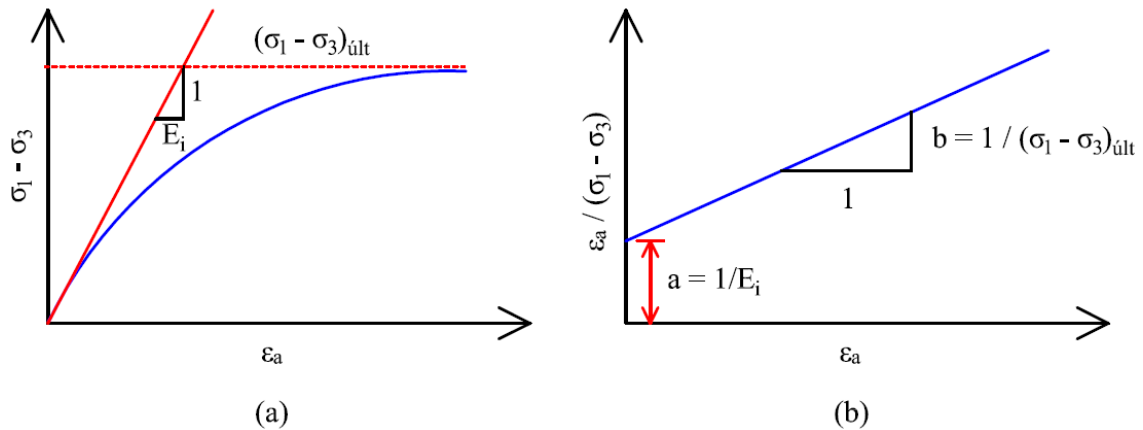


Figura 2.21 - Modelo Hiperbólico: (a) Curva real e (b) Curva transformada.

Quando se utiliza resultados experimentais (ensaio de compressão triaxial convencionais) os pontos muitas vezes não são perfeitamente ajustados pela reta da curva transformada. Solos rígidos tendem a apresentar uma concavidade voltada para cima, enquanto que solos moles fornecem uma concavidade na direção oposta.

Nos casos em que o trecho inicial da curva tensão-deformação é linear, a curva transformada tende a ser horizontal neste trecho (Figura 2.22).

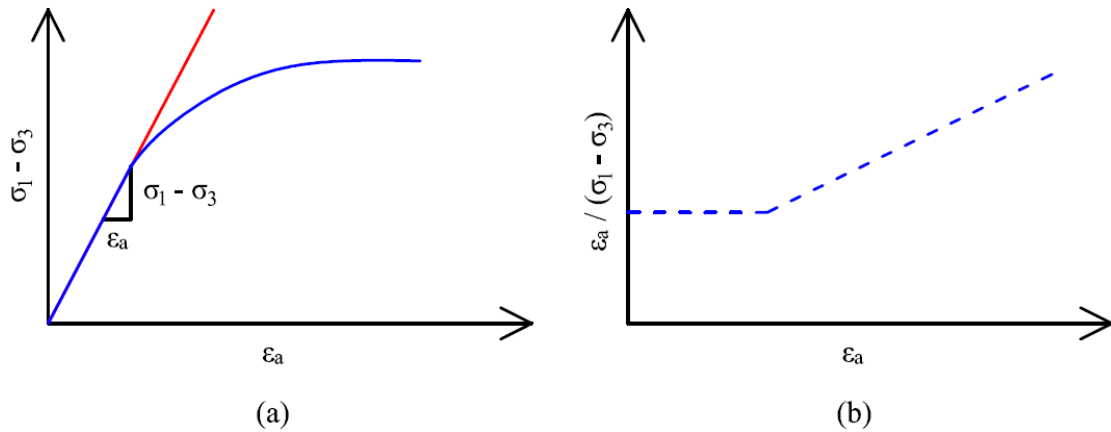


Figura 2.22 - Aplicação do Modelo Hiperbólico: (a) Curva real e (b) Curva transformada.

Duncan e Chang (1970) recomendaram, após a realização de diversos ensaios em diferentes tipos de solos, que a reta do gráfico transformado poderia ser definida a partir de pontos correspondentes a 70% e 95% da resistência mobilizada (Figura 2.23) nos casos em que os pontos estejam muito dispersos ou não se disponha de ferramenta adequada para ajuste dos mesmos.

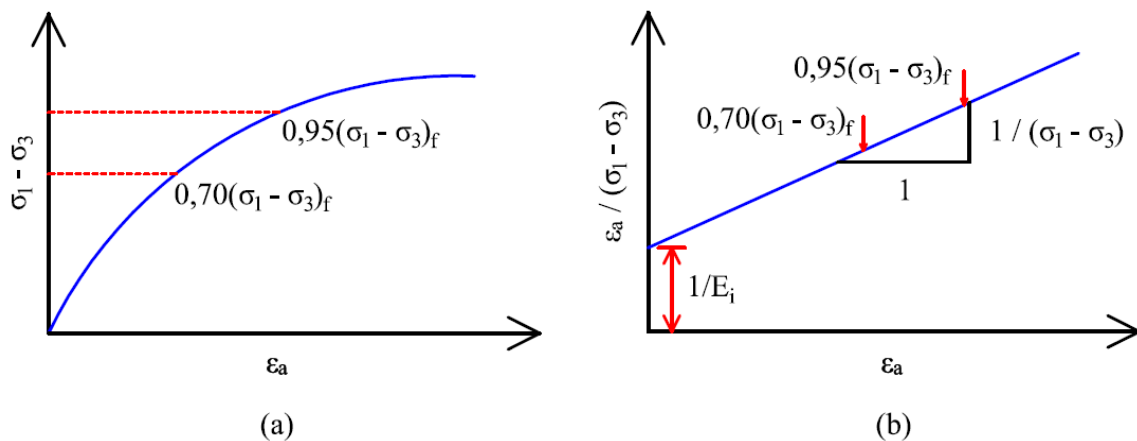


Figura 2.23 - Recomendação de Duncan e Chang (1970): (a) Curva real e (b) Curva transformada.

2.3.1.2. Variação da curva tensão-deformação com a tensão confinante

Os solos apresentam curvas tensão-deformação que variam em função do confinamento ao qual estão submetidos. Assim, uma primeira modificação da versão proposta por Kondner e

Zelasco (1963) surgiu com Duncan e Chang (1970), onde se incorporou na formulação básica do modelo a razão de ruptura (R_f), a relação proposta por Janbu (1963) para a variação do módulo inicial com a tensão de confinamento e manteve-se a consideração de coeficiente de Poisson constante.

A variação do módulo de elasticidade inicial (E_i) com a tensão confinante (σ_3) é representada pela Equação 2.20 sugerida por Janbu (1963).

$$E_i = \frac{1}{a} = K \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2.20)$$

sendo:

K e n : parâmetros adimensionais do material; e

P_a : pressão atmosférica, utilizada para normalização das unidades.

Os parâmetros adimensionais K e n são obtidos por meio dos valores do módulo de elasticidade inicial (E_i) e da tensão confinante (σ_3) correspondente, desenhados em escala logarítmica para o conjunto de ensaios realizados, conforme apresentado na Figura 2.24.

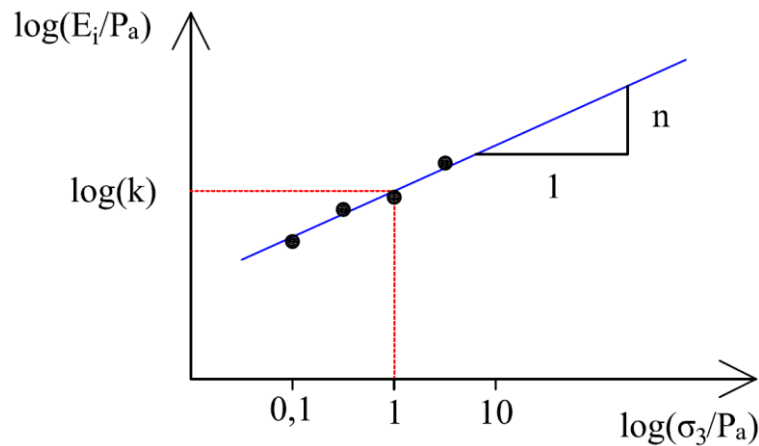


Figura 2.24 - Variação do módulo tangente inicial com a tensão confinante.

A tensão desviadora última, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$, pode ser relacionada com a resistência do solo, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, por meio da razão de ruptura (R_f) conforme Equação 2.21.

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (2.21)$$

A razão de ruptura varia para cada tipo de ensaio considerado. No entanto, para fins práticos recomenda-se utilizar um valor médio. Segundo Gerscovich (2010), em geral, o valor de R_f situa-se entre 0,7 e 0,95.

A resistência do solo pode ser representada pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb de acordo com a Figura 2.25 e a Equação 2.22.

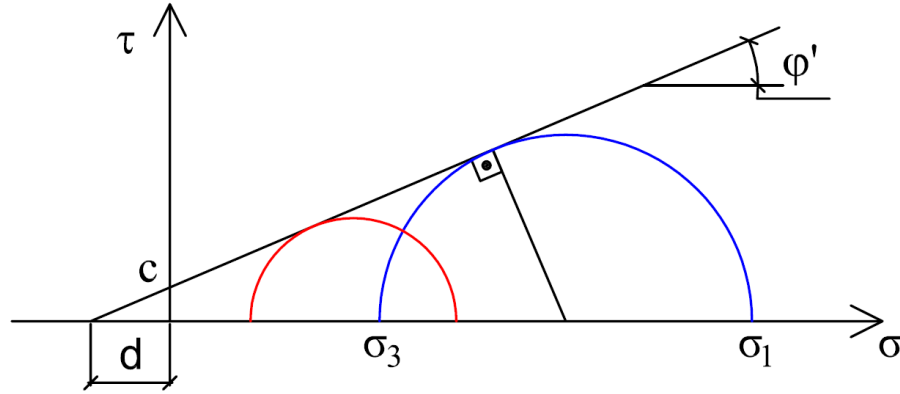


Figura 2.25 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

Da Figura 2.25 têm-se as relações:

$$\tan \phi' = \frac{c}{d}$$

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{d + \sigma_3 + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)}$$

Logo, a resistência do solo é dada pela Equação 2.22.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2(c \cdot \cos \phi' + \sigma_3 \cdot \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')} \quad (2.22)$$

Assim, tem-se que o parâmetro b da Equação 2.14 é igual a:

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} = \frac{R_f (1 - \sin \phi')}{2(c \cdot \cos \phi' + \sigma_3 \cdot \sin \phi')} \quad (2.23)$$

2.3.1.3.

Comportamento inelástico

A trajetória de tensões do ponto O ao A da Figura 2.26 é governada pelo módulo de elasticidade tangente. Considerando a tensão confinante (σ_3) constante, tem-se que este módulo de elasticidade tangente (E_t) pode ser obtido derivando a Equação 2.14 com relação a deformação axial conforme a Equação 2.24.

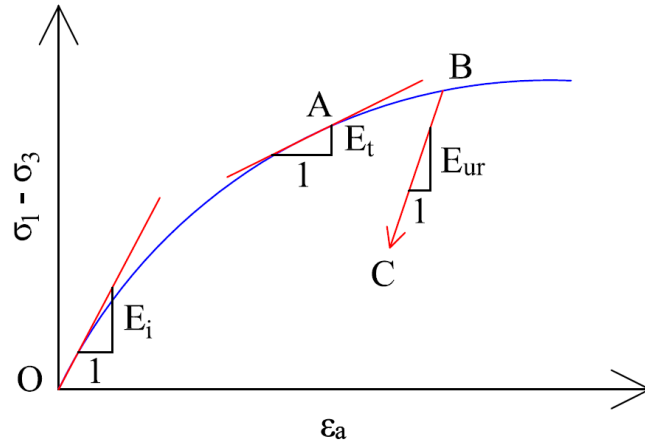


Figura 2.26 - Módulos de elasticidade para o modelo hiperbólico.

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_a} = \frac{1}{a + b\varepsilon_a} - \frac{b\varepsilon_a}{(a + b\varepsilon_a)^2} = \frac{a + b\varepsilon_a}{(a + b\varepsilon_a)^2} - \frac{b\varepsilon_a}{(a + b\varepsilon_a)^2} = \frac{a}{(a + b\varepsilon_a)^2} = E_t \quad (2.24)$$

Obtendo-se o valor de ε_a da Equação 2.14 e substituindo o valor obtido na Equação 2.24, tem-se a Equação 2.25.

$$E_t = \frac{1}{a} [1 - b(\sigma_1 - \sigma_3)]^2 \quad (2.25)$$

A substituição das Equações 2.20 e 2.23 na Equação 2.25 conduz à expressão a seguir.

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\phi')}{2(c \cdot \cos\phi' + \sigma_3 \cdot \sin\phi')} \right]^2 \cdot K \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2.26)$$

No entanto, se a amostra é descarregada em algum instante do ensaio, conforme a trajetória de tensões do ponto B ao C (Figura 2.26) os resultados indicam um módulo de descarregamento (E_{ur}) maior do que o módulo de carregamento, como mostrado na Figura 2.27. Com isso verifica-se o comportamento inelástico, uma vez que somente parte da deformação é recuperada no descarregamento. Durante o recarregamento a curva de tensão-deformação é

diferente no descarregamento (histerese), Figura 2.27. Neste trecho o modelo hiperbólico aproxima o comportamento como elástico e linear; mantendo o mesmo módulo E_{ur} como mostrado a seguir.

$$(E_{ur})_{\text{descarregamento}} = (E_{ur})_{\text{recarregamento}}$$

Assim, com base em ensaios em areia Duncan e Chang (1970) propuseram a seguinte relação (Equação 2.27) para estimar o módulo de descarregamento-recarregamento:

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2.27)$$

Sendo, em geral n o mesmo valor utilizado na Equação 2.20 e K_{ur} maior do que K .

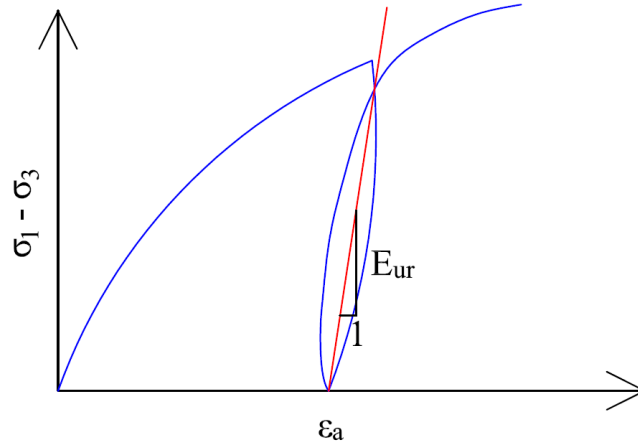


Figura 2.27 - Módulo de deformabilidade de descarga e recarga.

2.3.1.4. Previsão da curva tensão-deformação

A partir da definição dos parâmetros do modelo hiperbólico (Tabela 2.3) a previsão da curva tensão-deformação para diferentes valores de tensão confinante (σ_3) pode ser feita por meio da Equação 2.28.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_a}{\frac{1}{K \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n} + \frac{\epsilon_a}{\left[\frac{2(c \cdot \cos \phi' + \sigma_3 \cdot \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')} \right] R_f}} \quad (2.28)$$

Tabela 2.3 - Parâmetros para previsão de curvas tensão-deformação.

Parâmetro	Função
K, n	Relaciona E_i com σ_3
c, ϕ	Relaciona $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ com σ_3
R_f	Razão de ruptura: relaciona $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ com $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$

2.3.1.5. Variação volumétrica

Nos trabalhos de Kondner (1963) e Duncan e Chang (1970) o coeficiente de Poisson foi admitido constante, o que é indesejável porque a maioria dos solos apresenta variação volumétrica dependente da pressão de confinamento e do nível de tensão desviadora. Neste sentido, Duncan (1980) propôs uma nova formulação do modelo hiperbólico na qual a variação de volume foi calculada por meio do módulo de variação volumétrica do solo (B) que varia de acordo com a Equação 2.29.

$$B = K_b \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (2.29)$$

Na qual K_b e m são parâmetros do solo.

Segundo a teoria da elasticidade, o módulo de deformação volumétrica (B) é igual a:

$$B = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3\varepsilon_v} \quad (2.30)$$

No ensaio triaxial convencional, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_r = 0$, a deformação volumétrica, ε_v , é dada pela Equação 2.31.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \quad (2.31)$$

sendo:

ε_a : deformação axial; e

ε_r : deformação radial.

Porém, como $\varepsilon_r = -\nu\varepsilon_a$, tem-se:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a(1 - 2\nu) \rightarrow \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} = (1 - 2\nu) \quad (2.32)$$

Como no ensaio triaxial convencional, $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3 = 0$, a Equação 2.30 fica:

$$B = \frac{\Delta\sigma_1}{3\Delta\varepsilon_v} = \frac{\Delta\sigma_d}{3\Delta\varepsilon_v} = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{3\Delta\varepsilon_v} \quad (2.33)$$

Ou, como B é constante, logo:

$$B = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{3\varepsilon_v} \quad (2.34)$$

Por outro lado, tem-se que:

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_a} \quad (2.35)$$

Logo, inserindo as Equações 2.32 e 2.35 na Equação 2.33 chega-se ao módulo de deformação volumétrica:

$$B = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{3\varepsilon_v} = \frac{E_t}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.36)$$

Portanto, apesar do módulo de variação volumétrica (B) só variar com a tensão confinante e ser independente do nível de tensão $(\sigma_1 - \sigma_3)$, a relação entre a deformação volumétrica e a deformação axial é não linear, porque E_t varia com o nível de tensão desviadora. Por outro lado, como B é constante, para um mesmo acréscimo de tensão normal média, a deformação volumétrica do solo é independente do nível de tensão desviadora, como se observa experimentalmente.

Com base na Equação 2.36 é possível calcular o valor de B em qualquer ponto da curva tensão-deformação do ensaio triaxial. Porém, após a análise de diferentes solos, Duncan et al. (1980) propuseram que o valor de B fosse calculado de acordo com as seguintes recomendações:

- se a curva de variação de volume não atingir uma tangente horizontal antes de mobilizar 70% da resistência do solo, deve-se calcular B no ponto correspondente a 70% da resistência; e
- se a curva de variação de volume atingir uma tangente horizontal antes de mobilizar 70% da resistência do solo, usar o ponto na curva de variação de volume em que a curva torna-se horizontal.

Os módulos de variação volumétrica devem ser calculados para diferentes níveis de tensão confinante. Em geral, B cresce com a tensão confinante. A Figura 2.28 ilustra como se obtém os parâmetros K_b e m que determinam a relação entre o módulo de deformação volumétrica e a tensão confinante (Equação 2.29).

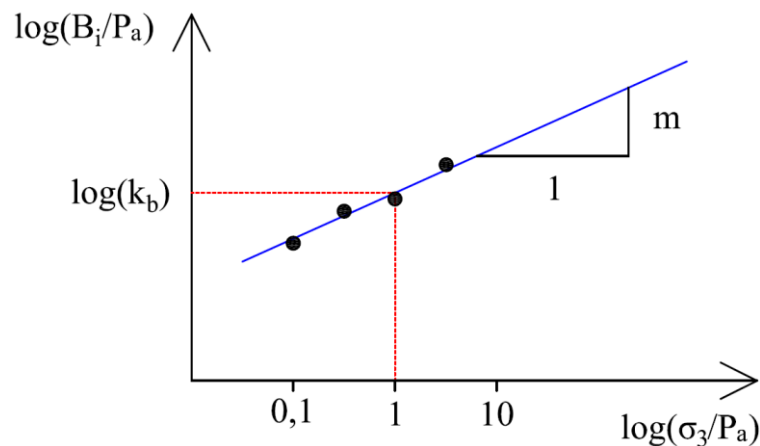


Figura 2.28 - Variação do módulo volumétrico com a tensão confinante.

2.3.1.6. Considerações finais sobre o modelo

Ibañez (2003) cita diversas vantagens e desvantagens na utilização do modelo hiperbólico. Como vantagens, citam-se a simplicidade matemática de sua formulação, o sucesso de sua aplicação em muitos problemas práticos da engenharia geotécnica, o fato dos parâmetros do modelo terem significado físico e possíveis de serem determinados em laboratório por meio de ensaios triaxiais convencionais, a grande disponibilidade na literatura de valores dos parâmetros para diversos tipos de solo, sob condição drenada e não drenada, que auxilia na interpretação da coerência dos valores determinados em laboratório no caso de solos similares, e a facilidade de ser implementado em programas computacionais, etc.

Ainda segundo Ibañez (2003), por ser baseado em uma idealização do comportamento real dos solos, o modelo apresenta significativas restrições tais como o fato de não considerar a influência da tensão principal intermediária σ_2 , a obtenção de resultados não realistas nas análises de tensões em maciços controlados por regiões que já apresentaram rupturas devido ao fato do modelo ser baseado na lei de Hooke generalizada sob forma incremental, as relações hiperbólicas não conseguem simular o fenômeno de amolecimento do solo na fase pós-pico, nem situações de variação de volume causadas por variações das tensões cisalhantes (dilatância). Considerações especiais devem ser tomadas de maneira a modelar o descarregamento, necessitando-se a adoção de algum critério para distinguir as situações de carregamento e de descarregamento / recarregamento do material.

Duncan et al. (1980) deixam claro que os parâmetros de calibração do modelo não são propriedades fundamentais do solo, sendo dependentes da densidade, do teor de umidade, das variações de tensões usadas durante os ensaios e das condições de drenagem dos solos. Dessa maneira, o solo deve ser submetido a ensaios de laboratório nas mesmas condições em que será submetido em campo.

Em resumo, o modelo hiperbólico apresenta 8 parâmetros: K , K_{ur} , n e R_f definem a variação do módulo de elasticidade com a tensão de confinamento, o nível de tensão e a trajetória de tensão (carregamento-descarregamento-recarregamento); c e φ' para definir ruptura; e , K_b e m que definem a variação do módulo de expansão volumétrica com a tensão de confinamento e o nível de tensões. Para obtê-los são necessários, no mínimo, dois ensaios de compressão triaxial consolidados drenados (CID) com medição de variação de volume e pelo menos um ciclo de descarregamento-recarregamento.

3.1. Considerações gerais

Neste capítulo serão apresentadas as características do local estudado e os procedimentos adotados nos ensaios de campo e laboratório, e nas análises numérica e inversa para determinação dos parâmetros.

Todos os ensaios descritos a seguir foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Resíduos (LMR) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV), conforme se apresenta na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Vista geral do Laboratório de Mecânica dos Resíduos da UFV.

3.2. Ensaios pressiométricos

3.2.1. Localização dos ensaios de campo

Na parte externa do LMR foram realizados cinco ensaios pressiométricos e uma sondagem SPT conforme o esquema apresentado na Figura 3.2.

A sondagem de simples reconhecimento com SPT foi realizada em conformidade com a ABNT NBR 6484:2001 que prescreve o método de execução deste tipo de ensaio.

Após a limpeza, procedeu-se a instalação do tripé na área de execução dos ensaios conforme se apresenta na Figura 3.3.

A partir da delimitação do ponto de realização da sondagem SPT, utilizou-se de um trado concha para fazer um furo até a profundidade de 1 metro e a partir deste procedeu-se a cravação do amostrador padrão (Figura 3.4) através do impacto de um martelo de 65 kg caindo de uma altura de 75 cm.

O amostrador foi cravado por 45 cm e anotou-se o número de golpes necessários para cravação de cada 15 cm. O índice de resistência à penetração (N_{SPT}) consiste no número de golpes necessários para cravação dos 30 cm finais do amostrador.

Depois de cravados os 45 cm, procedeu-se a perfuração dos 55 cm restantes utilizando-se de um trado. A cada metro de perfuração, a partir de 1 m de profundidade, foram coletadas amostras deformadas dos solos por meio do amostrador padrão para análises posteriores.

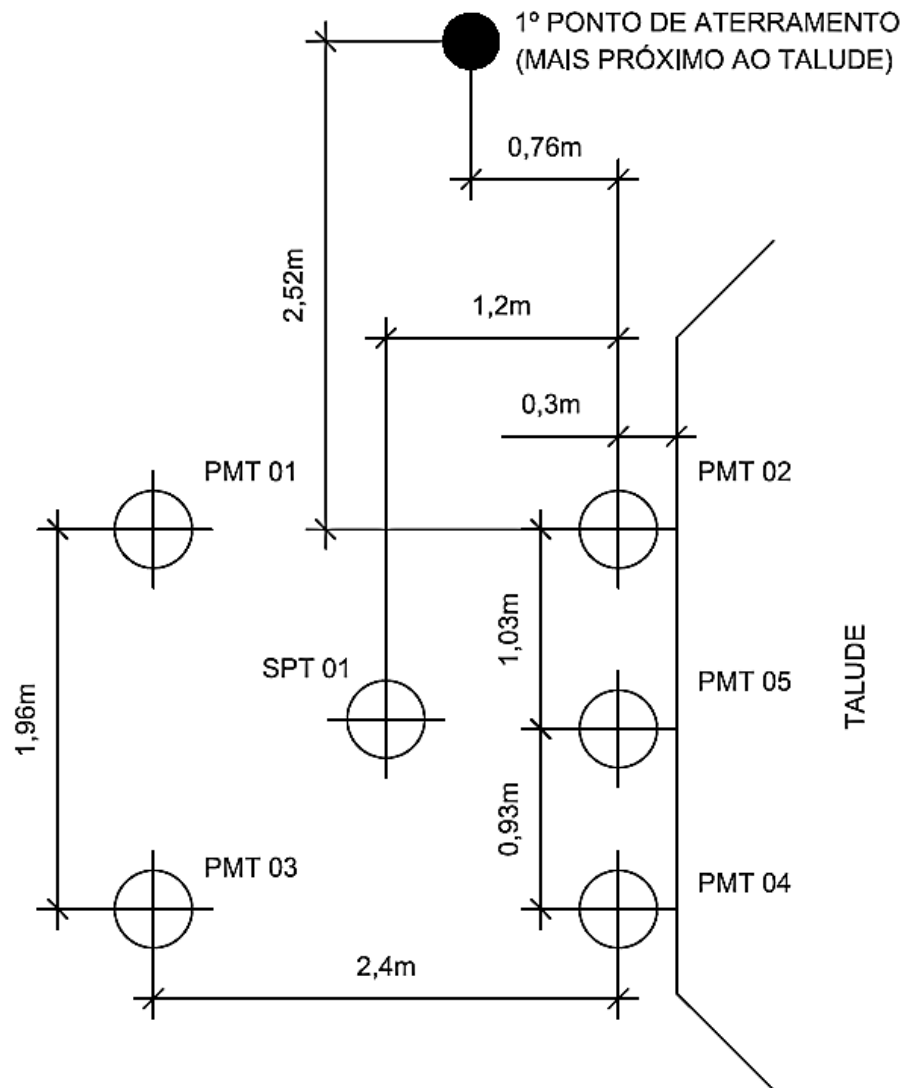


Figura 3.2 - Posicionamento dos furos.



Figura 3.3 - Posição do tripé na sondagem de simples reconhecimento com SPT.



(a)



(b)

Figura 3.4 - Amostrador utilizado na sondagem com SPT.

Com o número de golpes e a identificação do material para cada metro ensaiado, realizada conforme a ABNT NBR 7250:1982, elaborou-se o relatório de campo para a área estudada como apresentado na Figura 3.5.

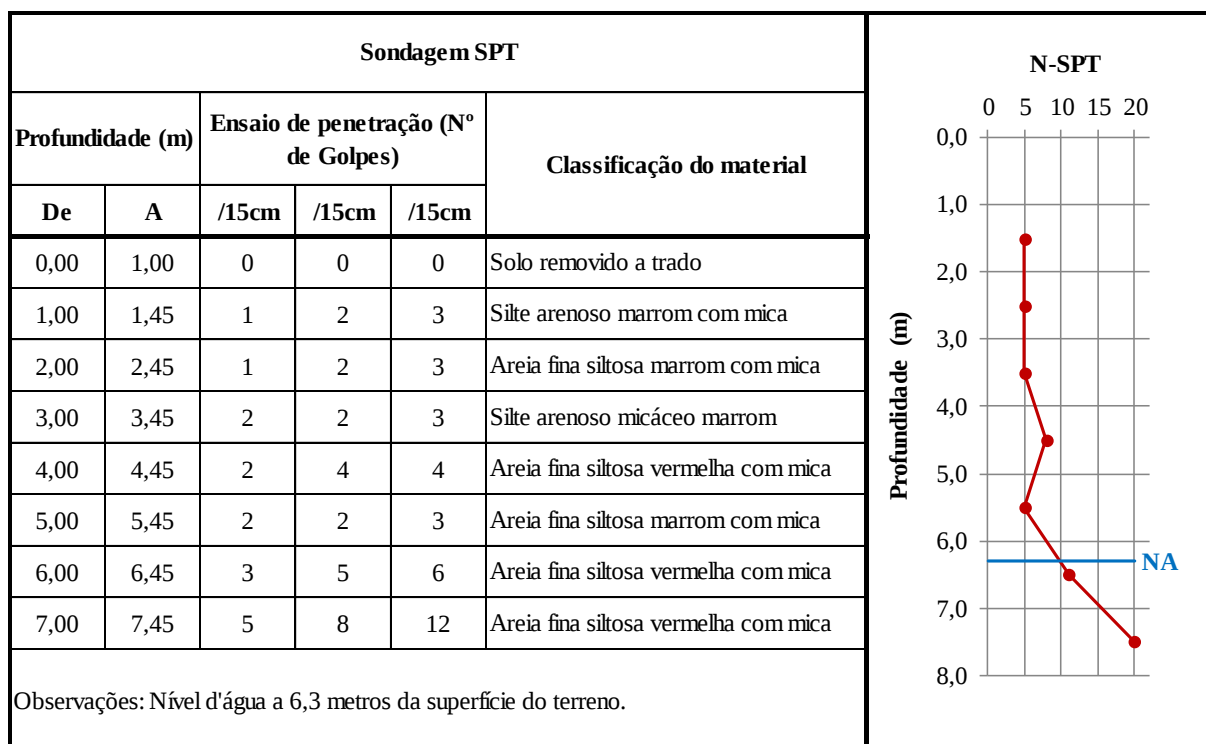


Figura 3.5 - Resultado da sondagem de simples reconhecimento com SPT para a área estudada.

3.2.2. Pressiômetro de Ménard

Os ensaios pressiométricos foram realizados com um pressiômetro de Ménard do tipo GC (Figura 3.6), fabricado pela empresa francesa APAGEO SEGELM. O pressiômetro pertence ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (DEC/UFV).

Basicamente o equipamento é composto pela unidade de controle (caixa de monitoramento), sonda pressiométrica, mangueiras de conexão e fonte de pressão.

A unidade de controle se instala em um contêiner fechado (Figura 3.7) apoiado em um tripé removível. O equipamento é responsável pela aplicação incremental de pressões e medição, por meio de um volumímetro, das deformações geradas no solo quando variações volumétricas ocorrerem na célula central do pressiômetro.



Figura 3.6 - Pressiômetro de Ménard do DEC/UFV.



Figura 3.7 - Unidade de controle.

A sonda pressiométrica do tipo GC (Figura 3.8) apresenta um corpo cilíndrico metálico e três células superpostas. Conhecida também como sonda de células encamisadas, a sonda apresenta um diâmetro nominal de 63 mm.



Figura 3.8 - Sonda pressiométrica e mangueiras de conexão.

As mangueiras de conexão ligam a caixa de monitoramento e a sonda pressiométrica, sendo capazes de injetar água e gás dentro da sonda. Quando se utiliza elevadas pressões as mangueiras podem sofrer uma sensível expansão. Esse fenômeno pode levar a uma perda de volume, sendo necessário calibrar o equipamento de forma que os resultados possam ser corrigidos ao término do ensaio.

A fonte de pressão do equipamento consiste em um cilindro contendo gás nitrogênio (N_2) comprimido, conforme apresentado na Figura 3.6. A fonte é ligada a unidade de controle por meio de um mangote capaz de resistir a elevadas pressões, sendo controlado por válvulas reguladoras na própria fonte (tanque) e na entrada da unidade controladora, além de possuir sistemas de engate rápido para ser acoplado ao painel de controle.

Os procedimentos descritos a seguir basearam-se nas recomendações das normas ASTM D4719-87 e NF P94-110-91

3.2.3. Saturação do equipamento

O processo de saturação do equipamento tem por objetivo preencher com água toda a unidade de controle, tubulação e sonda, além de eliminar ao máximo as bolhas de ar existentes e verificar possíveis vazamentos.

Para realização desse procedimento a sonda foi colocada na vertical e na posição contrária a sua inserção no furo (cabeça para baixo) como pode ser visualizado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Saturação da sonda pressiométrica.

Com o dreno aberto, aplicou-se uma pressão de aproximadamente 25 kPa e deixou-se a água drenar até que não fosse observada a ocorrência de bolhas de ar saindo do sistema.

Deve-se salientar que esse procedimento é crucial para o sucesso do ensaio, pois a existência de bolhas de ar no sistema levará, para elevados níveis de pressão, a variações volumétricas que não correspondem as geradas no solo devido a dissolução das bolhas de ar.

3.2.4. Calibrações

Após o término da saturação do sistema foi necessário promover a calibração por perda de volume e por perda de pressão.

Como abordado anteriormente, a aplicação de elevadas pressões pode provocar a expansão da tubulação e dispositivos de conexão, ocasionando uma perda de volume. Além disso, a bainha de recobrimento e a membrana oferecem uma resistência à expansão, fazendo com que sejam

aplicadas pressões superiores às necessárias para compensar a rigidez das mesmas; provocando então uma perda de pressão.

Portanto, promover as calibrações foi muito importante para que ao término dos ensaios fossem realizadas as correções das curvas pressiométricas obtidas.

3.2.4.1. Calibração por perda de volume

A calibração por perda de volume foi realizada inserindo a sonda dentro de um tubo de aço (Figura 3.10b), considerado indeformável, e aplicando-se incrementos de pressão de forma a obter uma curva pressão versus volume.

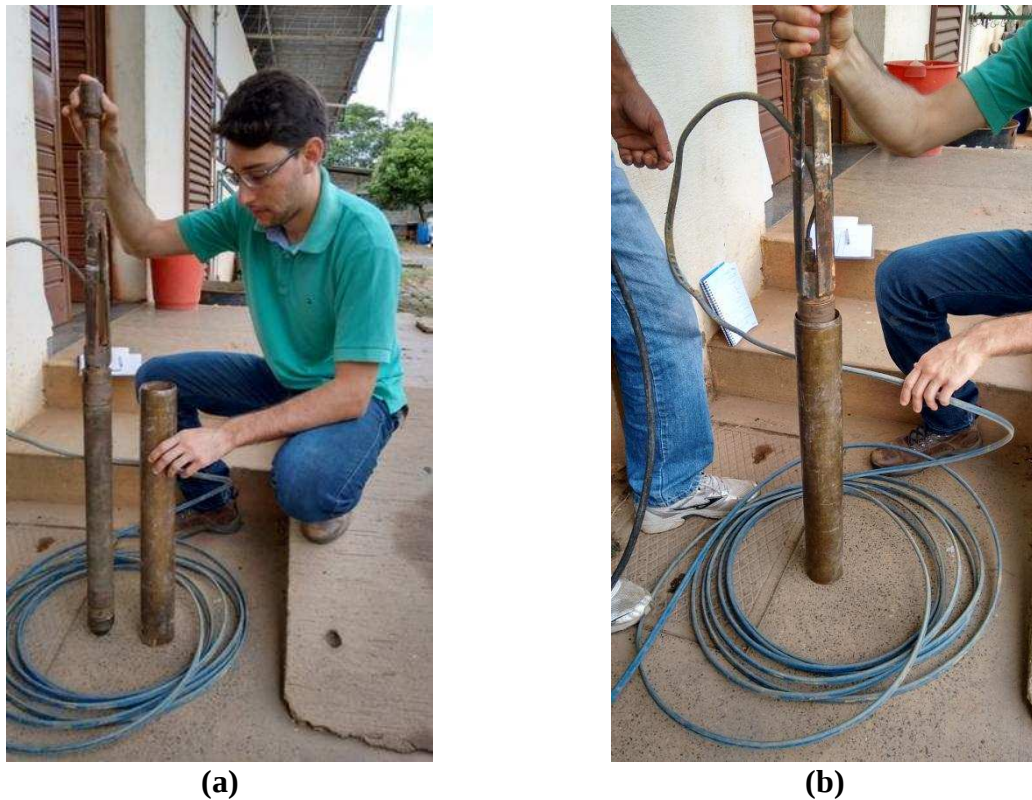


Figura 3.10 - Calibração por perda de volume: a) Tubo rígido e sonda pressiométrica e b) Calibração por perda de volume.

A calibração foi realizada aplicando incrementos de pressão iniciais de 100 kPa em 5 estágios para melhor definição do trecho inicial da curva pressão versus volume. Em seguida aplicou-se mais 5 estágios de pressão com incrementos de 250 kPa.

A cada incremento de pressão realizou-se a leitura da variação de volume no volumímetro após 60 segundos de aplicação (V_{60}). O resultado do ensaio é apresentado na forma de uma curva conforme se apresenta na Figura 3.11.

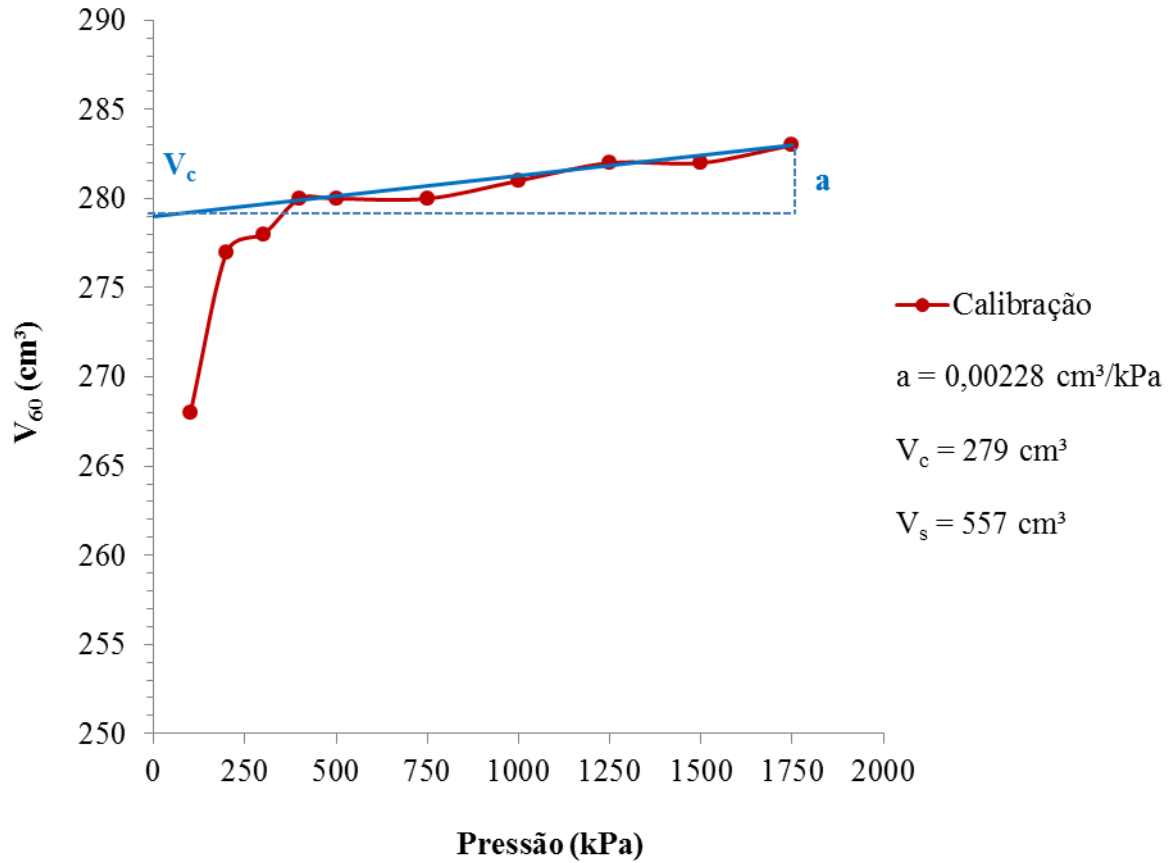


Figura 3.11 - Calibração por perda de volume.

Além de mensurar a perda de volume devido a expansão das tubulações, compressibilidade da água, membranas e recobrimentos de borracha, a calibração serve também para determinar o volume inicial da célula central ou da sonda (V_s) e o coeficiente de expansão do aparelho (a).

O coeficiente de expansão do aparelho será a inclinação do trecho linear apresentado na Figura 3.11 e o volume da sonda é dado pela seguinte expressão:

$$V_s = \frac{\pi d_i^2 l_s}{4} - V_c \quad (3.1)$$

onde:

d_i : diâmetro interno do tubo rígido (7,2 cm);

l_s : comprimento da célula central (20,5 cm); e

V_c : volume correspondente ao prolongamento da linha reta que melhor se ajusta aos pontos finais da curva de calibração.

Conforme destacado por Araujo (2001) a calibração por perda de volume só é considerada em ensaios onde serão aplicadas elevadas pressões (por exemplo, ensaios realizados em rochas) e que estas perdas são usualmente negligenciadas quando se obtêm valores de módulos pressiométricos inferiores a 100 MPa.

Segundo a ASTM D4719:1987 o sistema não apresenta vazamentos, bolhas de ar e podem ser desprezadas as correções por perdas de volume quando a diferença entre o volume máximo obtido na calibração e o volume V_c for inferior a 0,1% do volume nominal da célula central (medição) para uma pressão de 100 kPa.

Neste trabalho não se fez correções quanto a perdas de volume, uma vez que o solo ensaiado não exigiu a aplicação de elevados níveis de pressão.

3.2.4.2. Calibração por perda de pressão

Como abordado anteriormente, a bainha de recobrimento e a membrana oferecem uma resistência à expansão, que aumenta à medida que estas são infladas. Portanto, a pressão aplicada ao solo é menor do que a pressão aplicada à sonda pressiométrica.

Desta forma, as curvas obtidas no ensaio devem ser corrigidas de modo a descontar a rigidez dos elementos e assim considerar a pressão real aplicada ao solo.

Baguelin et al. (1978) aconselham que, previamente à calibração, se expanda e retraia a sonda de quatro a cinco vezes elevando o volume até aproximadamente 700 cm³, para que os resultados da calibração sejam consistentes.

A calibração foi realizada colocando-se a sonda ao ar livre, na posição vertical e com o centro da célula central no mesmo nível da parte intermediária do volumímetro, conforme se apresenta na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Posicionamento da sonda para calibração por perda de pressão.

Após o posicionamento correto da sonda, procedeu-se a calibração aplicando incrementos de 25 kPa e anotou-se as variações volumétricas aos 15, 30 e 60 segundos (Figura 3.13b), após a estabilização da pressão aplicada.



(a)



(b)

Figura 3.13 - Calibração por perda de pressão.

A sonda pressiométrica deve ser calibrada sempre que novos recobrimentos e membranas forem utilizados. Além disso, as calibrações devem ser realizadas também, antes do primeiro e após o último ensaio do dia.

Baguelin et al. (1978) recomendam que a cada 20 ensaios deve-se fazer uma calibração quando se esteja utilizando um mesmo conjunto membrana e bainha de recobrimento e, a cada 10 ensaios quando a rigidez do mesmo é representativa em relação à obtenção das pressões limites.

Neste trabalho foi realizado um conjunto de 4 calibrações antes do início dos ensaios, sendo destas obtida uma curva média que por meio de sua equação de regressão foi possível promover a correção das curvas pressiométricas.

Plotando os valores de pressão em função do volume lido aos 60 segundos (V_{60}) tem-se as curvas de calibração apresentadas na Figura 3.14.

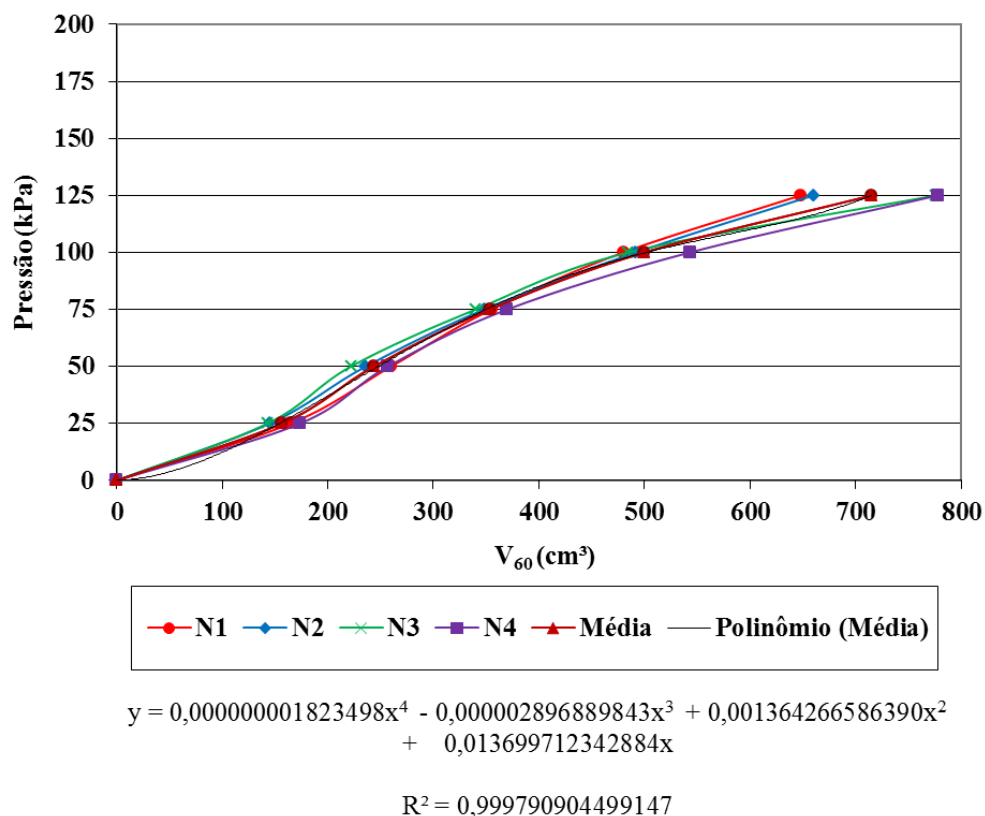


Figura 3.14 - Curvas de calibração por perda de pressão.

3.2.5. Execução dos furos

A obtenção de ensaios pressiométricos de boa qualidade passa, inevitavelmente, por manter a verticalidade e o mínimo de perturbações nas paredes da cavidade.

Nesse sentido, a utilização de equipamentos adequados para execução dos furos é de suma importância. Por se tratar de um solo não saturado com um valor de coesão possivelmente elevado, utilizou-se um trado do tipo Holandês (Figura 3.15) para a execução dos furos.



Figura 3.15 - Trado utilizado na execução dos furos.

Além dos fatores citados acima, o diâmetro do furo também influencia no resultado dos ensaios. Se o diâmetro do furo for muito maior que o da sonda, o início teórico do ensaio ou o volume no qual a sonda encosta nas paredes do furo, será muito elevado, e conseqüentemente a pressão limite (P_L) dificilmente será alcançada. Na prática, o valor de P_L raramente é obtido durante o ensaio, sendo necessária a utilização de métodos de extrapolação; mesmo em furos bem executados.

Na situação oposta, quando o furo é muito pequeno torna-se difícil descer a sonda, a curva pressiométrica não exhibe a fase pseudoelástica e os resultados só poderão ser usados parcialmente.

A norma ASTM D4719:1987 estabelece que o diâmetro do furo deve variar entre 3% e 20% o diâmetro da sonda (D_s), como apresentado a seguir:

$$1,03D_s < \text{Diâmetro do furo} < 1,20D_s$$

Como o diâmetro nominal é de 63 mm, logo os furos realizados devem satisfazer às seguintes dimensões:

$$64,9 \text{ mm} < \text{Diâmetro do furo} < 75,6 \text{ mm}$$

Na Figura 3.16 apresentam-se os problemas relativos à má execução dos furos.

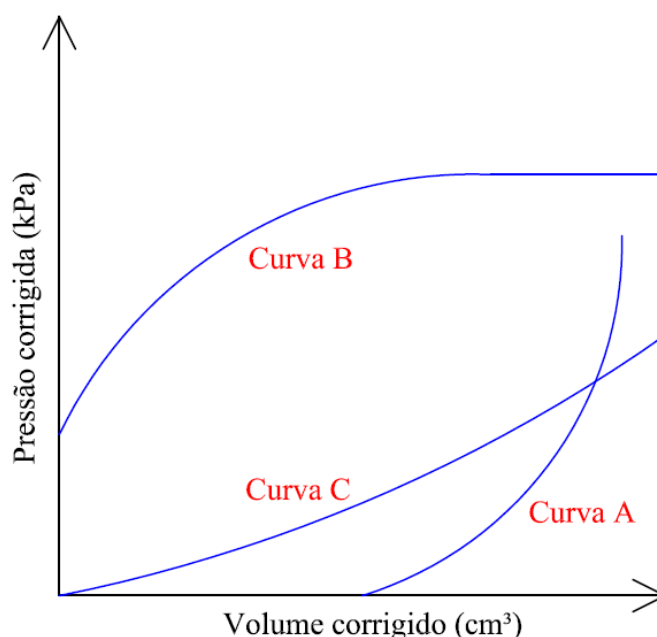


Figura 3.16 - Exemplos de curvas pressiométricas influenciadas pelo diâmetro do furo.

Fonte: Adaptado de Silva, 2001.

A curva A representa a situação em que o diâmetro da cavidade cilíndrica é muito superior em relação ao diâmetro da sonda, ou seja, excede ao limite de $1,20D_s$ como proposto anteriormente.

Na curva B tem-se a situação em que o diâmetro do furo é muito menor do que o recomendado, ou seja, inferior a $1,03D_s$. Logo, é necessário forçar a inserção da sonda no furo ocasionando uma pressão horizontal inicial na membrana antes mesmo da expansão da sonda.

Na curva C apresenta-se um caso de profunda alteração do arranjo estrutural na cavidade cilíndrica, levando a obtenção de uma curva incapaz de fornecer qualquer informação, a não ser a de que o ensaio esteja errado.

3.2.6. Realização dos ensaios

Como pode ser visto na Figura 3.2, foram executados 5 furos para realização dos ensaios pressiométricos. Em cada furo fez-se 1 ensaio na profundidade de 1,5 metros contados a partir da superfície do terreno. O número de ensaios fora definido de modo a verificar o comportamento do material nas regiões próximas e afastadas do talude.

Como a sonda utilizada neste trabalho apresenta comprimento de 60 cm, sendo dividida em três partes com aproximadamente 20 cm cada (1 célula central + 2 células de guarda), como apresentado na Figura 3.17, então para que o ensaio fosse realizado exatamente na profundidade estipulada inicialmente (1,5 m) seria necessário que os furos fossem executados até a cota de 1,80 m conforme esquema apresentado na Figura 3.18.

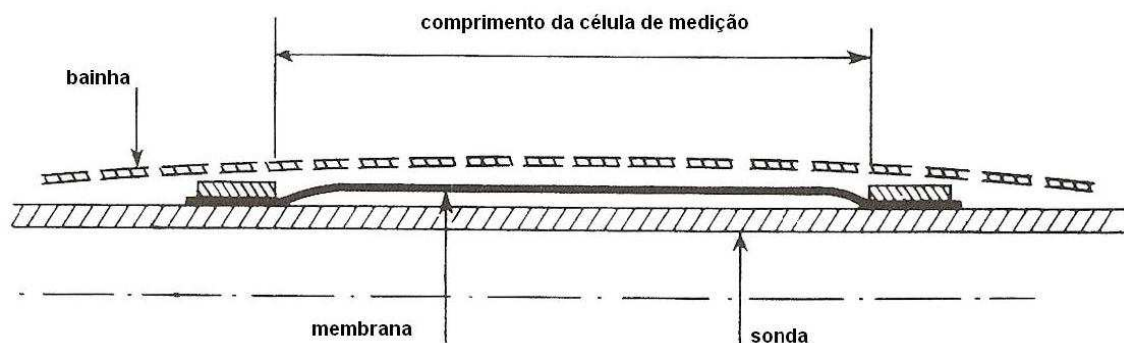


Figura 3.17 - Comprimento da célula de medição para o pressiômetro do tipo GC.

Fonte: Adaptado de Baguelin et al., 1978.

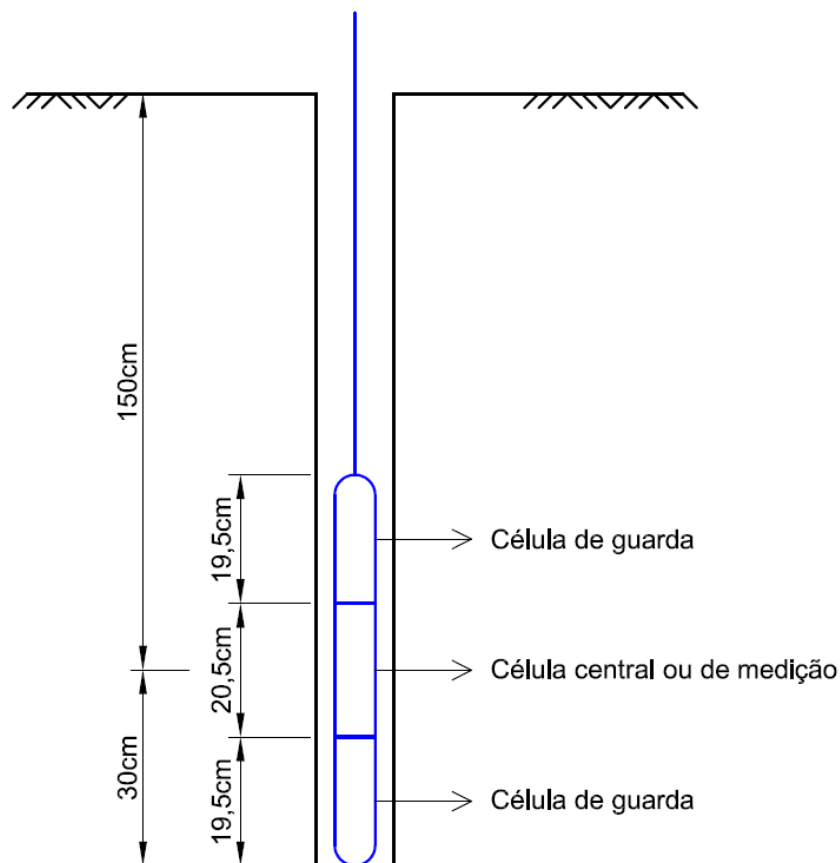


Figura 3.18 - Posição e detalhamento da sonda no furo.

Em função do tipo de ensaio e características do terreno, torna-se necessário adaptar alguns dos componentes do equipamento, tais como o comprimento da tubulação, a sensibilidade dos manômetros, o tipo de membrana e recobrimento (bainha), e o tipo de gás.

O comprimento da tubulação deve ser grande o suficiente para atender às profundidades ensaiadas, porém a utilização de elevados comprimentos poderá gerar problemas na saturação do sistema e de correções de volume.

Para definir os intervalos de pressão a serem aplicados deve-se estimar a resistência do solo e assim definir os manômetros que serão utilizados com a finalidade de obter uma sensibilidade e acurácia adequadas para o solo ensaiado.

O tipo de membrana e o uso do recobrimento dependem do valor da pressão que deve ser atingido durante o ensaio e do tipo de solo. Nesse sentido, Baguelin et al. (1978) referem que em solos moles a sensibilidade das medições decresce com o aumento de resistência do material que constitui a membrana e a bainha.

Segundo Oliva (2009) o tipo de gás usado nas células de guarda pode ser ar comprimido ou dióxido de carbono para a maioria dos ensaios em que a pressão não ultrapassa os 2000 kPa, ou nitrogênio para os ensaios que atinjam elevadas pressões.

Após a finalização do furo e feitas às observações acima, inseriu-se cuidadosamente a sonda pressiométrica no furo conforme se apresenta na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Sonda pressiométrica inserida no furo.

Antes de aplicar o primeiro valor de pressão foi necessário registrar uma leitura “zero”, sendo esta uma leitura do volume quando o manômetro registra a pressão atmosférica. Além disso, deve-se verificar a diferença de pressão entre as células de guarda e a central, ajustando-se esta diferença de acordo com a profundidade do ensaio.

Feitos os ajustes, incrementos de pressão foram aplicados por meio do controlador acoplado à unidade de controle (Figura 3.20) por um período de 1 minuto cada.

Durante esse período de tempo a sonda pressiométrica foi sendo inflada, e sua variação de volume pode ser contabilizada por meio de leituras realizadas no volumímetro aos 15, 30 e 60 segundos, conforme se apresenta na Figura 3.21.



Figura 3.20 - Aplicação de pressão.



Figura 3.21 - Realização de leituras no volumímetro.

Os incrementos de pressão foram aplicados até atingir uma variação de volume de aproximadamente 700 a 760 cm³ (limite do volumímetro) ou até que se tenha obtido um número de pontos suficientes para uma boa definição da curva pressiométrica.

Diversos autores indicam um número ideal de incrementos de pressão a serem aplicados. Baguelin et al. (1978) recomendam que sejam aplicados pelo menos 8 incrementos de pressão para que existam pontos suficientes para traçar a curva e para que o ensaio não seja muito rápido. Como número ideal, os mesmos autores indicam 10 incrementos, onde cada incremento corresponda a um décimo da pressão limite estimada.

A norma francesa NF P94 110-1:2000 determina que um ensaio possa ser finalizado após a injeção de 600 cm³ desde que a seguinte condição seja satisfeita:

$$D_{eq} < 1,08D_s$$

sendo:

D_{eq} : o diâmetro do equipamento de execução dos furos; e

D_s : o diâmetro da sonda.

Ao se aproximar do limite de leitura no volumímetro, fechou-se rapidamente a válvula de controle do mesmo de forma a evitar o esgotamento da água e a entrada de ar na tubulação.

Neste trabalho foram aplicados incrementos de pressão de 50 kPa (0,5 bar), no mínimo 10 estágios de pressão e variações volumétricas em torno de 740 cm³ para todos os ensaios realizados, atendendo assim às recomendações anteriormente citadas.

3.3. Ensaio de laboratório

Neste item são apresentados os equipamentos e procedimentos utilizados na campanha de ensaios laboratoriais para caracterização e obtenção de parâmetros geotécnicos do material estudado.

As características físicas e de reconhecimento do solo foi obtida por meio do ensaio de caracterização geotécnica completa, compreendendo os ensaios de granulometria conjunta, massa específica dos solos, limites de Atterberg e determinação do teor de umidade higroscópico.

Os parâmetros de resistência foram determinados através da realização de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais nas condições saturada e natural, e os parâmetros de compressibilidade foram obtidos por meio do ensaio de adensamento unidimensional.

Os procedimentos descritos são baseados em normas brasileiras, americanas e algumas literaturas amplamente difundidas no meio geotécnico.

3.3.1. Coleta de amostras indeformadas

As amostras foram coletadas na mesma área do LMR/UFV onde foram feitos os ensaios pressiométricos (Figura 3.1). A amostragem foi realizada por meio da abertura de uma trincheira seguindo as recomendações da ABNT NBR 9604:1986 que especifica a abertura de poços e trincheiras de inspeção em solos para retirada de amostras deformadas e indeformadas.

Após finalizar os ensaios de campo delimitou-se o posicionamento correto para retirar os blocos de amostras indeformadas e para abertura da trincheira. Para sua execução utilizou-se de uma retroescavadeira (Figura 3.22) gentilmente cedida pela Diretoria de Manutenção de Estruturas Urbanas e Meio Ambiente (DMU) da UFV. A trincheira foi aberta em dois patamares, um de trabalho e outro de coleta (Figura 3.23).



Figura 3.22 - Retroescavadeira utilizada na abertura da trincheira.



Figura 3.23 - Abertura da trincheira em dois patamares.

Como os ensaios foram realizados a uma profundidade de 1,5 metros contados a partir da superfície do terreno e o tubo de PVC, utilizado para coletar a amostra, possui 40 centímetros de altura, logo a coleta se iniciou a partir da profundidade de 1,30 m de forma que o centro do tubo se posicionasse exatamente no mesmo plano das forças aplicadas no pressiômetro como mostrado na Figura 3.24.



(a)



(b)

Figura 3.24 - Coleta de amostra indeformada utilizando um tubo de PVC com dimensões de 35 x 40 cm.

De forma a manter a umidade e evitar distúrbios no material, assim que coletado (Figura 3.25), o bloco foi cuidadosamente colocado em um carrinho de mão, parafinado e levado à câmara úmida.



(a)



(b)

Figura 3.25 - Preparação da amostra após a coleta.

Com o bloco coletado foram realizados todos os ensaios de caracterização e especiais que serão descritos a seguir.

3.3.2. Caracterização geotécnica

O conhecimento do material estudado será feito por meio de ensaios e procedimentos amplamente empregados no meio geotécnico, tais como os ensaios de granulometria, massa específica dos sólidos e Limites de Atterberg.

3.3.2.1. Granulometria conjunta

A curva granulométrica foi obtida com a secagem prévia do material (ABNT NBR 6457:1986) e seguindo as recomendações da ABNT NBR 7181:1984.

Basicamente a curva granulométrica foi obtida por meio de dois processos: peneiramento e sedimentação. O peneiramento permite a determinação da fração de solos com diâmetros superiores a 0,075 mm, e, para diâmetros inferiores a este, utiliza-se do ensaio de sedimentação.

Após a secagem e a determinação da umidade higroscópica, passou-se o solo destorroado em um conjunto de peneiras com aberturas superiores a 2 mm (#10). Usou-se, para isso, um almofariz para destorroar alguns torrões existentes no solo.

Como todo o solo estudado passou na peneira de 2 mm, fez-se apenas o peneiramento fino e a sedimentação. Do material passante tomou-se 70 g e transferiu para um béquer para ser misturado com 125 ml de defloculante (hexametáfosfato de sódio) e deixado em descanso por 24 horas.

Após esse prazo, o solo e o defloculante foram colocados em uma proveta (Figura 3.26), com água destilada até 1000 ml, e procedeu-se a uma agitação manual por cerca de 1 minuto. A partir daí fez-se leituras de densidade utilizando um densímetro e, por meio da Lei de Stokes, correlacionou-se a velocidade de queda das partículas com o diâmetro das mesmas. Dessa forma, obteve-se curva granulométrica da fração do solo com diâmetros inferiores a 0,075 mm.



Figura 3.26 - Ensaio de sedimentação.

Para determinar a curva granulométrica da fração entre 0,075 e 2 mm fez-se o peneiramento fino. Após finalizar a sedimentação, o material da proveta foi lavado na peneira #200 (0,075 mm), conforme se apresenta na Figura 3.27a. O material retido nessa peneira foi seco em estufa e após 24 horas fez-se o peneiramento desse material fazendo-o passar por um conjunto de peneiras entre o diâmetro 0,075 e 2 mm (Figura 3.27b) utilizando um agitador mecânico (Figura 3.27c)

Após a agitação, o material foi pesado em uma balança com precisão de 0,01 g (Figura 3.27d) anotando-se o peso retido acumulado em cada uma das peneiras. Com esses resultados e com o conhecimento da fração menor que 0,075 mm, determinada pela sedimentação, obteve-se a curva granulométrica completa do solo.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.27 - Peneiramento fino.

3.3.2.2. Massa específica dos sólidos

O ensaio para obtenção da massa específica dos sólidos foi realizado segundo a ABNT NBR 6508:1984.

Do material seco ao ar tomou-se cerca de 500 g da parte passante na peneira #40 (4,8 mm) e determinou-se o teor de umidade. Com cerca de 75 g de solo úmido e o teor de umidade determinou-se a massa de solo seco (M_1) utilizada no ensaio com picnômetro de 500 cm³.

Essa quantidade de solo foi deixada imersa com água destilada durante 24 horas e posteriormente o material foi colocado no dispersor (Figura 3.28a) por pelo menos 15 minutos.

Após a dispersão, o solo foi colocado no picnômetro (Figura 3.28b) com água até a linha de referência e este deixado em banho-maria por cerca de 30 minutos de forma a remover as bolhas de ar aderidas às partículas.



(a)



(b)

Figura 3.28 - Equipamentos utilizados na determinação da massa específica dos sólidos.

Após o picnômetro ficar em repouso e atingir a temperatura ambiente, o conjunto (M_2) foi pesado e anotou-se a temperatura do fluido. O conjunto foi então esfriado e aquecido de forma que se pudesse determinar pelo menos 5 valores de M_2 com diferentes temperaturas entre 5 e 40 °C. De posse da curva de calibração do picnômetro tinha-se o valor de M_3 , correspondente ao peso do picnômetro somente com água até a linha de referência, para a temperatura requerida.

Dessa forma, utilizando a Equação 3.2 foi possível determinar a massa específica dos sólidos para a temperatura analisada.

$$\rho_s = \frac{M_1}{M_1 + M_3 - M_2} \times \rho_w \quad (3.2)$$

onde:

ρ_s : massa específica dos sólidos; e

ρ_w : a massa específica da água.

Para cada temperatura obteve-se um valor de ρ_s e o resultado de um ensaio será dado pela média de pelo menos 5 determinações.

O resultado final da massa específica do solo é obtido pela média de pelo menos dois ensaios completos, realizados preferencialmente em diferentes picnômetros.

3.3.2.3. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg ou limites de consistência foram realizados em conformidade com a ABNT NBR 6459:1984 (Determinação do limite de liquidez) e ABNT NBR 7180:1984 (Determinação do limite de plasticidade).

Para a realização desses ensaios o solo foi seco ao ar, destorroado e passado na peneira de diâmetro 0,42 mm; sendo tomado cerca de 200 g do material passante.

A determinação do Limite de Liquidez (LL) foi feita utilizando o aparelho de Casagrande (Figura 3.29a). Inicialmente colocou-se a massa de solo em uma cápsula de porcelana para que fosse adicionada água destilada de forma incremental e com o auxílio de uma espátula essa massa de solo foi homogeneizada até atingir uma consistência que, depois de colocada na concha (Figura 3.29b) e feito um rasgo com um cinzel (Figura 3.29c), as bordas inferiores se unissem ao longo de 13 mm de comprimento após a aplicação de 35 golpes (Figura 3.29d). Em seguida, o solo é retirado da concha e uma pequena quantidade de material é coletado nas bordas que se uniram para determinação do teor de umidade; obtendo assim o primeiro ponto do ensaio.

A amostra foi sendo umedecida, homogeneizada e o procedimento acima foi realizado até que pelo menos mais três pontos fossem obtidos no intervalo de 15 a 35 golpes e uma reta de melhor ajuste pudesse ser obtida. O limite de liquidez é dado pelo ponto correspondente a 25 golpes retirado dessa reta.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.29 - Determinação do limite de liquidez.

A determinação do Limite de Plasticidade (LP) seguiu o mesmo princípio de preparação da amostra e umedecimento (Figura 3.30a) que o descrito no procedimento anterior.

No entanto, tomou-se uma pequena bola de solo (Figura 3.30b) que foi rolada sobre a placa de vidro e pressionada com a palma da mão para que se formasse um cilindro com diâmetro de 3 mm e comprimento de 100 mm (Figura 3.30c), comparando-se com um gabarito de verificação. Neste ponto, continuando-se o ensaio, o material se fragmenta (Figura 3.30d).

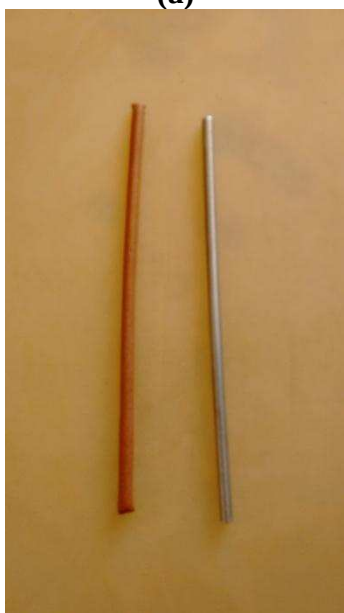
Os fragmentos são recolhidos e utilizados para determinar o teor de umidade. O resultado é a média de pelo menos três determinações, desde que nenhum deles se afaste mais que 5% dessa média.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.30 - Determinação do limite de plasticidade.

3.3.3. Ensaios triaxiais

Para realização dos ensaios triaxiais fez-se uso da norma americana ASTM D7181:2011 e das recomendações de Head (1998), uma vez que não há no Brasil normatização para estes tipos de ensaios.

Foram realizados ensaios consolidados isotropicamente e drenados na condição saturada (CID_{sat}) e natural (CID_{nat}), sendo cada envoltória de ruptura determinada por 4 corpos de prova (CPs) com tensões confinantes de 25, 50, 75 e 100 kPa.

3.3.3.1. Equipamentos utilizados

Para execução dos ensaios foi utilizado um sistema composto por equipamentos da ELE International e adaptações realizadas dentro do próprio laboratório.

Os equipamentos da ELE são compostos por 4 partes principais, sendo elas:

- Painel de controle principal;
- Prensa triaxial;
- Medidor de variação de volume; e
- Sistema de aquisição de dados e Software DS7.

O painel de controle (Figura 3.31a), modelo Tri-Flex 2, é composto de reguladores e manômetros de pressão, manômetros de vácuo e por três interfaces água-ar responsáveis pela aplicação de pressões nas tubulações e células.

A prensa triaxial (Figura 3.31b), modelo Digital Tritest 50, tem capacidade de 50 kN e permite a aplicação de velocidades entre 0,00001 até 9.99999 mm/min.

O medidor de variação de volume (Figura 3.31c) permite a leitura de variações volumétricas de até 80 cm³ e possui uma capacidade máxima de trabalho de 1700 kPa. O medidor apresenta ainda válvulas reversíveis que permite aumentar a sua capacidade de leitura.

O sistema de aquisição de dados (Figura 3.31d), modelo ADU MM700 Series, possui 8 canais de conexão, sendo expansível para 32, e permite a realização de vários testes

simultaneamente. O ADU trabalha em conjunto com o software DS7, programa habilitado para realização de ensaios triaxial, permeabilidade, adensamento, cisalhamento direto e CBR.

Além desses, foi desenvolvido um sistema de ramificações (Figura 3.32) que conectado ao painel de controle principal permite a saturação dos CPs por percolação e contrapressão de forma simultânea. O controle das pressões aplicadas é feito com o uso de transdutores de pressão ligados a cada uma das linhas da ramificação, sendo estas linhas responsáveis pela distribuição e leituras de tensão confinante, contra pressão e poropressão.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.31 - Equipamentos para realização dos ensaios triaxiais.

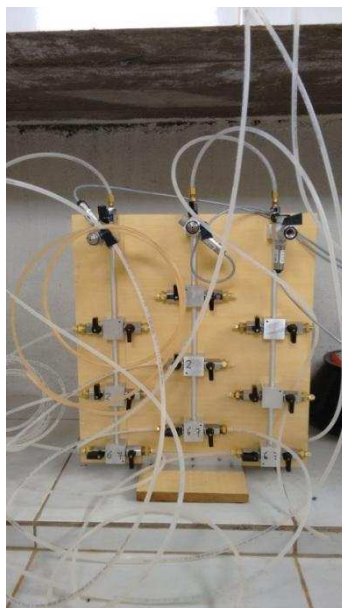


Figura 3.32 - Sistema de ramificações para aplicação simultânea de pressões nas células.

3.3.3.2. Procedimento de ensaio

Basicamente o ensaio triaxial CID_{sat} consiste na fase de saturação (percolação e contrapressão), adensamento e cisalhamento.

No caso de ensaios drenados, porém não saturados (CID_{nat}), a fase de saturação inexistente compreendendo somente a fase de adensamento e cisalhamento.

A seguir será feita uma abordagem geral sobre os procedimentos adotados na realização dos ensaios.

Moldagem dos corpos de prova

Para cada envoltória de resistência foram moldados 4 CPs, sendo estes extraídos da amostra indeformada coletada na área de estudo.

Para isso, extraia-se um paralelepípedo do bloco (Figura 3.33a) e este era colocado sobre uma placa de vidro para que por meio de um top cap apoiado sobre o topo e uma referência vertical fossem moldados CPs com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro (Figura 3.33b).

Após a moldagem, as dimensões do CP foram verificadas com um paquímetro de resolução de 0,01 mm, seu peso foi medido em uma balança com precisão de 0,01 g e determinou-se o teor de umidade.

Com essas informações, pode-se calcular os índices físicos no início do ensaio.



(a)



(b)

Figura 3.33 - Preparação dos corpos de prova.

Montagem do ensaio

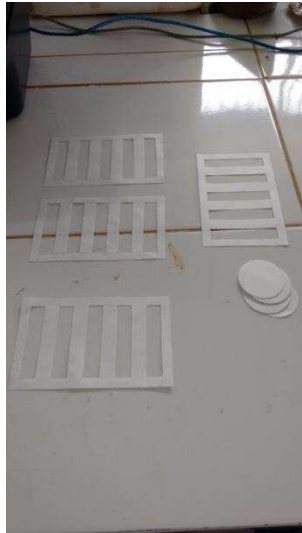
Inicialmente foi feita uma análise de todas as linhas da base da célula, top cap e do sistema para verificar algum entupimento. Posteriormente, fez-se percolar água para promover a saturação e expulsão de bolhas de ar das tubulações.

Após a saturação, a montagem consistiu das seguintes atividades:

- Prepararam-se papéis filtro para serem colocados no topo, base e lateral dos corpos de prova. A utilização do papel filtro na lateral teve como objetivo acelerar o processo de saturação (Figura 3.34a);
- Sobre o pedestal da célula colocou-se uma pedra porosa e um papel filtro circular, ambos saturados (Figura 3.34b);

- Sobre o papel filtro apoiou-se o CP e neste colocou o papel filtro lateral e uma combinação papel filtro e pedra porosa em seu topo (Figura 3.34c);
- Em seguida, de posse de um tubo capaz de promover um pequeno vácuo (Figura 3.34d), o CP foi envolto por uma membrana de látex com espessura de 0,03 mm, diâmetro de 50 mm e comprimento de 200 mm. A membrana foi presa por anéis de borracha (orings) colocados no pedestal e no top cap (Figura 3.34e);
- O top cap foi ligado na base da célula e uma bilha fora colocada no mesmo a fim de promover o contato do pistão com o CP. Finalizada a preparação do CP a célula foi preenchida com água e colocada sobre a bancada (Figura 3.34f); e
- Cada célula com 1 CP foi então conectada às mangueiras e estas ligadas às ramificações correspondentes. A partir deste momento pode-se iniciar o processo de saturação por percolação.

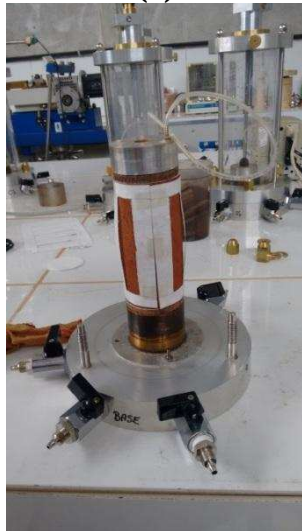
Na realização de ensaios CID_{nat} os procedimentos descritos acima se alteram no sentido da não saturação do CP e não colocação de papel filtro lateral.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.34 - Preparação do ensaio triaxial.

Saturação dos corpos de prova

A etapa de saturação se divide em duas fases, sendo a saturação por percolação e a por contrapressão.

A saturação por percolação (Figura 3.35) teve como finalidade saturar o solo pela retirada de ar do corpo de prova. Para isso, fez-se passar água no sentido da base para o topo até se verificar que não saiam mais bolhas de ar do corpo de prova.



Figura 3.35 - Saturação por percolação.

Na segunda fase procedeu-se a saturação por contrapressão. Nessa fase, além de saturar o corpo de prova, as bolhas de ar existentes entre a amostra e a membrana e nas tubulações são dissolvidas.

O processo consistiu em aplicar incrementos simultâneos de 25 kPa de tensão confinante e contrapressão, sendo a tensão de confinamento mantida sempre com um valor de 5 kPa a mais em relação ao valor de contrapressão; sendo esta aplicada pelo topo e pela base de modo a aumentar a eficiência do processo.

A cada incremento de tensão confinante fez-se a verificação da saturação do corpo de prova utilizando o parâmetro B de Skempton, conforme expressão a seguir.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (3.3)$$

onde:

Δu : é o excesso de poropressão gerado, lido por um transdutor conectado a base da célula, e

$\Delta \sigma_3$: o acréscimo de tensão confinante aplicado.

Os corpos de prova foram levados para etapa de adensamento quando apresentavam um valor de B de pelo menos 95%, o que foi obtido com tensões de confinamento de aproximadamente 275 kPa.

Adensamento

Após a saturação, iniciou-se a fase de adensamento. Para obter a tensão efetiva de ensaio o valor da tensão confinante era aumentado e o valor da contrapressão se mantinha inalterado, de forma a não provocar a dessaturação do corpo de prova.

Assim, basicamente o procedimento consistia em fechar todas as válvulas da base, exceto a de poropressão, e aumentar a tensão confinante para o valor desejado. Após aumentar a tensão confinante, a válvula era aberta e um excesso de poropressão gerado. A fase de adensamento se iniciava a partir do momento de abertura da válvula ligada ao topo do corpo de prova e o acionamento do software para coleta dos valores de variação de volume em função do tempo.

A etapa de adensamento se manteve por pelo menos 24 horas e com os dados obtidos plotou-se uma curva variação de volume (cm^3) versus raiz do tempo (min), conforme se apresenta na Figura 3.36.

A curva de adensamento, além de fornecer informações para correção da altura e área do CP ao fim dessa fase, permite também o cálculo da velocidade de ensaio na fase de cisalhamento, conforme apresentado por Head (1998) e descrito a seguir.

Na curva deve-se prolongar o trecho retilíneo inicial até interceptar a reta horizontal correspondente ao final das variações volumétricas. O ponto de interseção corresponde à raiz de t_{100} , que é o tempo para ocorrência de 100% do adensamento primário. O valor de t_{100} foi utilizado para calcular a velocidade de cisalhamento como será visto no próximo item.

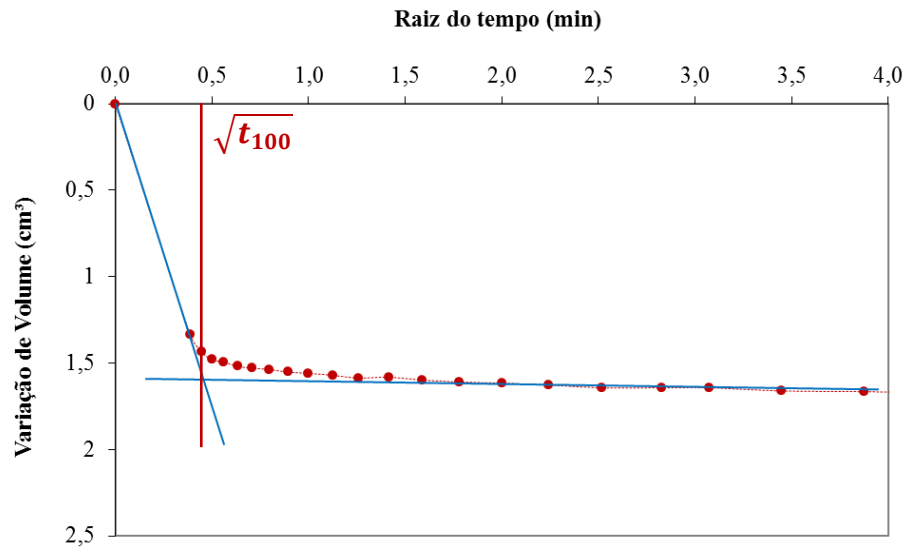


Figura 3.36 - Cálculo de t_{100} para ensaio com tensão efetiva de 25 kPa.

Cisalhamento

A última etapa do ensaio compreende a fase de cisalhamento do CP (Figura 3.37). Ao finalizar a coleta de dados do adensamento abriu-se a válvula de contrapressão conectada à base do CP, pois o cisalhamento ocorreu permitindo a drenagem pelo topo e pela base, diminuindo assim a altura de drenagem e evitando a geração de excessos de poropressão nessa fase.



Figura 3.37 - Fase de cisalhamento do solo.

A velocidade de ensaio foi definida considerando a recomendação de Head (1998) segundo a qual a velocidade máxima de ensaio é dada pela seguinte expressão:

$$V_{\text{máx}} = \frac{\varepsilon_r L}{100t_r} \quad (3.4)$$

onde:

$V_{\text{máx}}$: velocidade máxima de cisalhamento (mm/min);

ε_r : deformação axial estimada na ruptura (%);

L: altura do corpo de prova (mm); e

t_r : tempo mínimo de ruptura (min).

Head (1998) propõe que o cálculo do tempo de ruptura para ensaios drenados seja dado pela seguinte equação:

$$t_r = \left[\frac{5r^2}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{\eta} \right] t_{100} \quad (3.5)$$

onde:

r: relação entre altura (L) e diâmetro (D); e

λ e η : constantes dependentes das condições de drenagem.

Para $r = 2$, como é caso destes ensaios, tem-se:

$$t_r = \left[\frac{20}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{\eta} \right] t_{100} \quad (3.6)$$

onde:

$20\lambda/\pi\eta$: fator igual a 8,5 em ensaios drenados pelo topo e pela base.

Logo, o tempo de ruptura mínimo será:

$$t_r = 8,5t_{100} \quad (3.7)$$

Head (1998) recomenda ainda adotar um valor mínimo de t_r igual a 120 minutos. Neste trabalho, como todos os valores de t_r foram inferiores a este valor, adotou-se t_r igual a 120 minutos.

Considerando que a ruptura se daria para uma deformação axial de 4%, tem-se que a velocidade máxima a ser utilizada nos ensaios seria de aproximadamente 0,033 mm/min. Portanto, qualquer velocidade inferior a esta poderia ser escolhida.

Como a velocidade deve ser lenta o suficiente para que permita a equalização dos excessos de poropressão no corpo de prova, optou-se por utilizar uma velocidade igual a 0,0147 mm/min, sendo esta amplamente utilizada com sucesso em inúmeros ensaios drenados realizados no Laboratório de Mecânica dos Resíduos da UFV.

Todos os CPs foram cisalhados (Figura 3.38a) até 20% de deformação axial, o que acarretava em um ensaio com aproximadamente 23 horas de duração. Ao término, o CP era retirado da célula (Figura 3.38b), colocado na balança para ser pesado (Figura 3.38c) e levado à estufa (Figura 3.38d) para que após 24 horas seu peso seco fosse determinado e assim calcular o teor de umidade ao término do ensaio.

Com as trajetórias de tensões dos ensaios traçou-se uma reta de melhor ajuste pelos valores máximos das mesmas e com a inclinação desta (β) e o valor da interseção no eixo das ordenadas (d) foi possível determinar os parâmetros de resistência (c e ϕ') do solo pelas seguintes expressões:

$$\text{sen } \phi' = \tan \beta$$

$$c = \frac{d}{\cos \phi'} \quad (3.8)$$



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.38 - Final do ensaio triaxial.

3.3.4. Ensaio de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram executados em conformidade com a norma americana ASTM D3080:2011 e recomendações propostas por Head (1998), uma vez que não há no Brasil norma específica para esse tipo de ensaio.

A prensa utilizada consiste de um equipamento da marca PAVITEST, fabricado pela CONTENCO, composto de um sistema eletrônico de conversão de dados analógicos para

digitais, com comunicação serial, da célula de carga e dos transdutores de deslocamento, conforme se apresenta na Figura 3.39.



Figura 3.39 - Prensa de cisalhamento direto.

Os parâmetros de resistência (c e ϕ') foram obtidos moldando-se (Figura 3.40a) corpos de prova com dimensões 5 x 5 x 2 cm, com o auxílio de um anel metálico biselado (Figura 3.40b), sendo ensaiados na condição natural.

Basicamente o ensaio se divide nas etapas de adensamento e cisalhamento. Na primeira, após o material ser colocado em uma caixa rígida ou caixa de cisalhamento (Figura 3.40c), constituída de duas semicaixas (superior e inferior) aplicou-se uma tensão normal utilizando-se de pesos colocados no pendural da prensa, que está diretamente ligado no topo do corpo de prova (Figura 3.40d). Após cada aplicação obteve-se uma curva de adensamento, que será utilizada para determinar a velocidade máxima de deslocamento da caixa de cisalhamento, conforme proposto por Head (1998).

Na segunda etapa, mantendo-se a tensão normal aplicada foi feito um leve afastamento entre a parte inferior e superior da caixa de cisalhamento e ligou-se a prensa para que forças horizontais fossem aplicadas em uma das semicaixas provocando seu deslocamento em relação à outra metade, ocorrendo assim o cisalhamento do solo. Por meio de uma célula de carga e transdutores de deslocamentos colocados na direção horizontal e vertical foram

coletadas medidas de forças cisalhantes, deformações horizontais e verticais do corpo de prova. Com essas leituras, obtiveram-se curvas tensão cisalhante versus deformação horizontal e deformação volumétrica versus deformação horizontal.

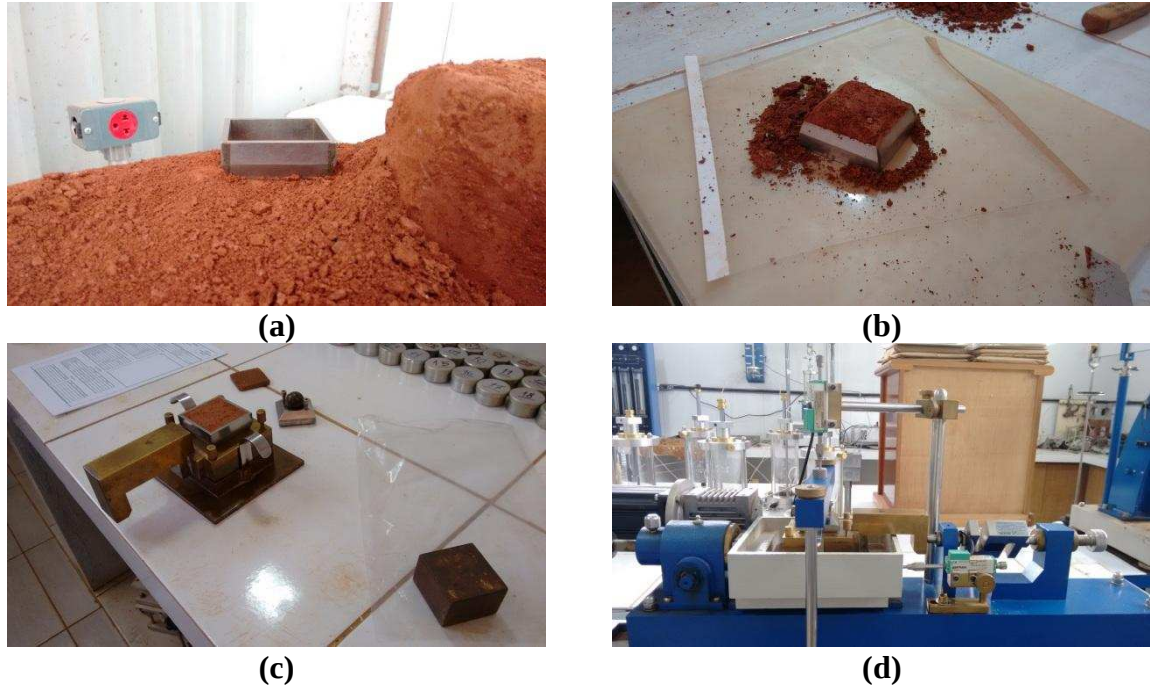


Figura 3.40 - Moldagem dos CPs e montagem do ensaio de cisalhamento direto.

O procedimento acima deve ser realizado em pelo menos três corpos de prova para que os pontos de tensão cisalhante máxima em função da tensão normal aplicada possam ser ajustados pela envoltória de Mohr-Coulomb. Neste trabalho, a envoltória foi obtida por meio da realização de 4 ensaios com tensões normais de 25, 50, 75 e 100 kPa e cisalhados com uma velocidade definida conforme procedimento proposto por Head (1998) e apresentado a seguir.

Por meio do gráfico de variação de altura (mm) versus raiz do tempo (minutos) da fase de adensamento, prolonga-se um trecho retilíneo inicial até encontrar a horizontal correspondente ao trecho final (estabilização das variações de altura). O ponto de interseção fornece a raiz de t_{100} em minutos (Figura 3.41).

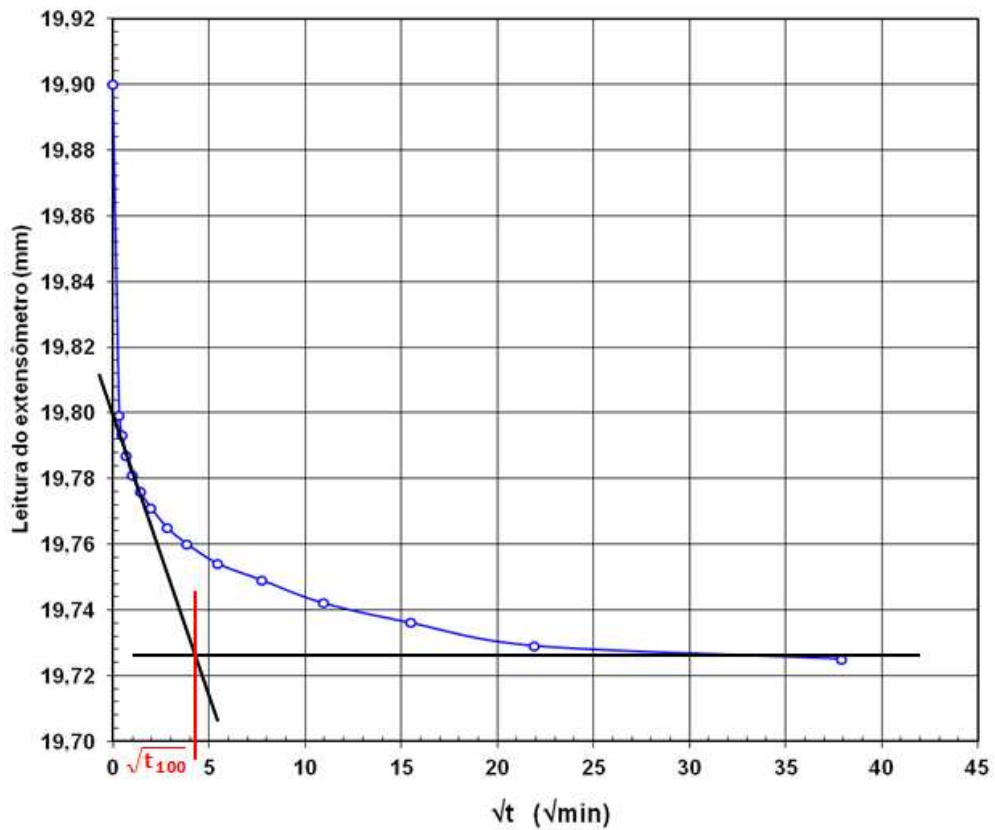


Figura 3.41 - Fase de adensamento do corpo de prova.

O valor de t_{100} é utilizado para definir a velocidade de cisalhamento utilizando a equação empírica proposta por Head (1998).

$$t_r = 12,7 \cdot t_{100} \quad (3.9)$$

onde:

t_r : tempo necessário para ruptura; e

t_{100} : tempo para ocorrência de 100% do adensamento primário, em minutos.

Com o valor de t_r pode-se calcular a velocidade de ruptura utilizando a seguinte expressão:

$$v = \frac{d_r}{t_r} \quad (3.10)$$

onde:

v : velocidade de ensaio em mm/min;

d_r : deslocamento para mobilizar a resistência de pico em mm; e

t_r : tempo de ruptura em minutos.

Devido aos baixos valores de t_{100} obtidos da fase de adensamento dos corpos de prova ensaiados, as velocidades calculadas excederam aos valores usualmente empregados nos ensaios de cisalhamento para a maioria dos solos.

Assim, como as velocidades calculadas são as máximas a serem empregadas, optou-se por utilizar uma velocidade de 0,1 mm/min na fase de cisalhamento dos quatro corpos de prova, atendendo assim aos limites estabelecidos.

Ao final do ensaio o corpo de prova foi extraído da caixa de cisalhamento (Figura 3.42) e o seu teor de umidade foi determinado.

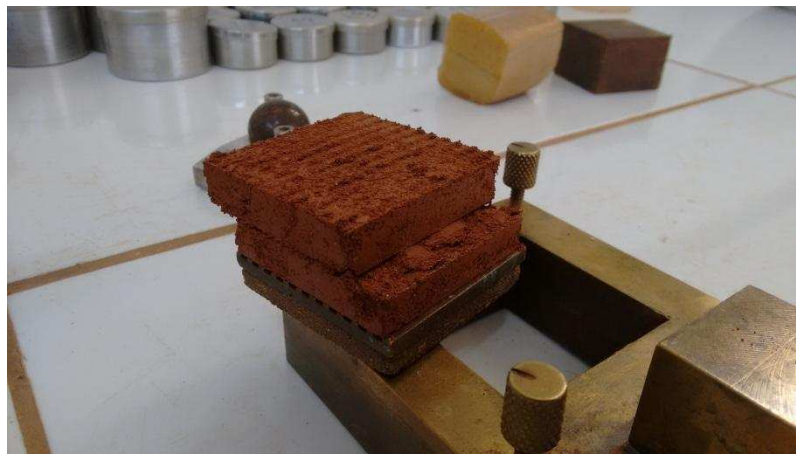


Figura 3.42 - Corpo de prova após o ensaio de cisalhamento direto.

3.3.5. Ensaio de adensamento

Os parâmetros de compressibilidade foram obtidos por meio do ensaio de adensamento unidimensional normatizado pela ABNT NBR 12007:1990.

O equipamento utilizado consiste de uma prensa do Tipo Bishop da marca PAVITEST, fabricado pela CONTENCO, conforme se apresenta na Figura 3.43. Nessa prensa, a carga axial é transmitida ao corpo de prova por meio de pesos previamente calculados e colocados em um braço de alavanca capaz de aumentar em 10 vezes a tensão no topo do corpo de prova.



(a)



(b)

Figura 3.43 - Equipamento do Tipo Bishop para ensaios de adensamento unidimensional em solos: a) Vista frontal e b) Vista lateral.

O ensaio foi realizado com a amostra na condição natural, sendo o CP moldado em um anel biselado com diâmetro de 7,12 cm e altura de 2 cm (Figura 3.44a) e montado na célula de adensamento do tipo anel fixo (Figura 3.44b).

Os estágios de carregamento aplicados foram de 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa. Para cada um desses estágios fez-se leituras, utilizando um extensômetro com resolução de 0,001 mm, da altura ou variação de altura do CP imediatamente antes do carregamento (tempo zero) e a seguir em intervalos de tempo de 7,5s; 15s; 30s; 1min; 2min; 4min; 8min; 15min; 30min; 1h; 2h; 4h; 8h e 24h contados a partir do momento de aplicação da carga.

A cada estágio obteve-se uma curva altura do corpo de prova (mm) versus raiz ou logaritmo do tempo (min). Essas curvas permitem o cálculo do coeficiente de adensamento (C_v) pelos métodos de Casagrande e Taylor, nos quais a altura do CP é plotada em função do logaritmo e raiz quadrada do tempo, respectivamente. Isso permite que ao final do ensaio se tenha uma curva com os diversos valores de coeficiente de adensamento para a faixa de tensões aplicadas.



(a)



(b)

Figura 3.44 - Preparação do ensaio: a) Moldagem do corpo de prova e b) Célula de adensamento de anel fixo.

Para obter a tensão de pré-adensamento do solo, utiliza-se também das informações dos estágios de carregamento. Por meio delas é possível calcular a variação do índice de vazios ao fim de cada estágio utilizando informações relativas à variação da altura do CP conforme apresentado a seguir.

De posse de dados da amostra, tais como teor de umidade inicial, peso específico natural e peso específico dos grãos foi possível determinar o índice de vazios inicial e a altura de sólidos do CP pelas seguintes expressões:

$$e_i = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

$$H_s = \frac{H_i}{1 + e_i}$$
(3.11)

onde:

e_i : índice de vazios inicial do corpo de prova;

γ_s : peso específico dos grãos (kN/m³);

γ_d : peso específico aparente seco inicial (kN/m³);

H_s : altura de sólidos (mm); e

H_i : altura inicial do corpo de prova (mm).

Com as informações acima pode-se calcular o índice de vazios ao final de cada um dos estágios de carregamento utilizando a Equação 3.12.

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad (3.12)$$

onde:

e : índice de vazios ao final do estágio de pressão;

H_s : altura de sólidos (mm); e

H : altura do corpo de prova ao final do estágio (mm).

Após finalizar todos os carregamentos, procedeu-se o descarregamento retirando os pesos em estágios e calculando também as variações do índice de vazios como mostrado anteriormente.

Sendo assim, conhecendo os índices de vazios inicial e final relativos a cada estágio (carregamento e descarregamento), pode-se plotar uma curva índice de vazios versus logaritmo da pressão (kPa) (curva de compressibilidade). Por meio dessa, determinam-se os índices de compressão (C_c), recompressão (C_r) e a tensão de pré-adensamento ($\sigma_{p.a}$), seja pelo método de Casagrande ou Pacheco Silva.

3.4. Análise numérica

3.4.1. Programa utilizado

As análises numéricas foram realizadas utilizando o programa Sigma/W do pacote GeoStudio 2007 desenvolvido pela Geo-Slope International Ltda.

O Sigma/W é um programa que utiliza o método dos elementos finitos para análises de tensões e deformações em estruturas de terra. O programa se baseia na teoria de pequenas

deformações e realiza análises bidimensionais, considerando a hipótese de estado plano de deformações ou de problemas axissimétricos.

O programa apresenta alguns modelos constitutivos implementados, tais como o linear elástico, elástico perfeitamente plástico, não linear elástico e outros. As análises realizadas neste trabalho foram feitas utilizando o modelo não linear elástico (hiperbólico) proposto por Duncan e Chang (1970).

3.4.2. Malha de elementos finitos

A malha utilizada compreende a uma área de aproximadamente 16 m² conforme se apresenta na Figura 3.45. Como se trata de um problema axissimétrico, o furo relativo ao ensaio pressiométrico está representado pelo seu raio médio igual a 3,4 cm e profundidade de aproximadamente 1,80 m.

Pode-se notar também a representação dos esforços horizontais aplicados pelo pressiômetro ao longo da célula central (20,5 cm de altura) com o seu centro a 1,5 m de profundidade.

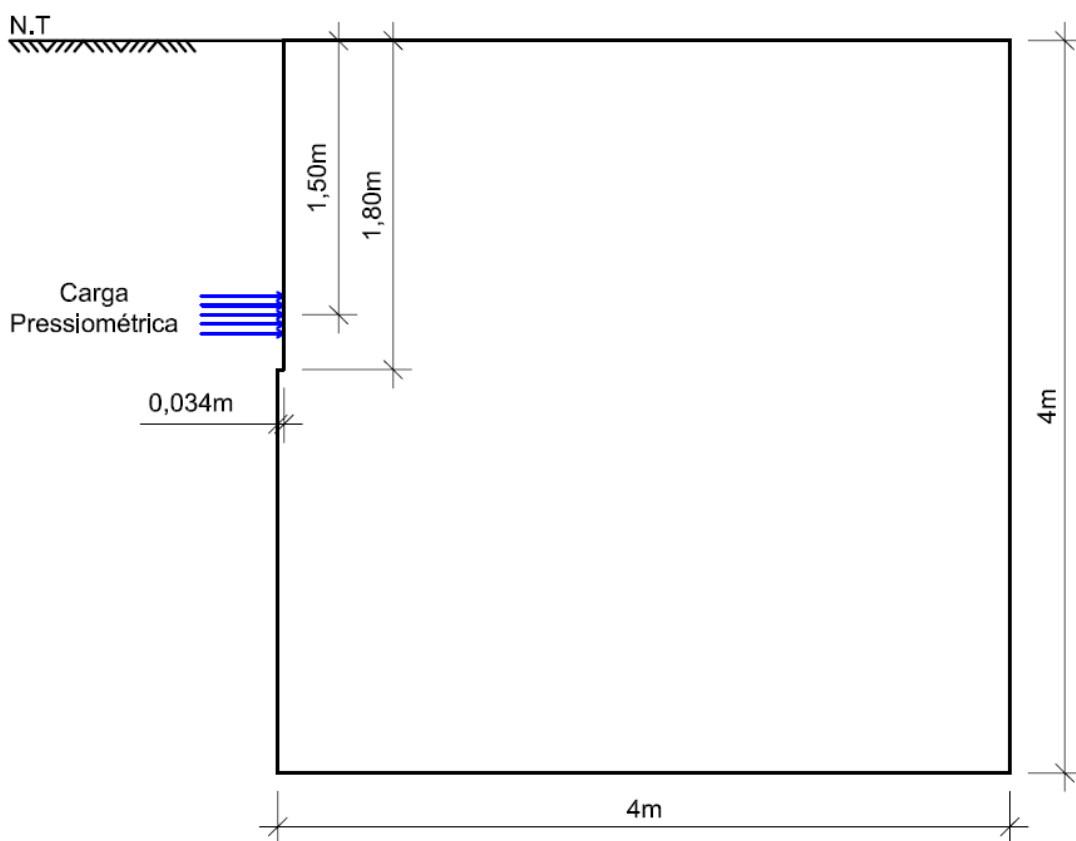


Figura 3.45 - Perfil representativo da área estudada.

A malha gerada pelo Sigma/W (Figura 3.46) possui 3180 nós e 1601 elementos quadrilaterais de tamanho 0,1 m, sendo a metade inferior discretizada por elementos quadrilaterais lineares (quatro nós) e a parte superior por elementos quadrilaterais de segundo grau (oito nós) para maior detalhamento da região nas proximidades da aplicação dos esforços horizontais.

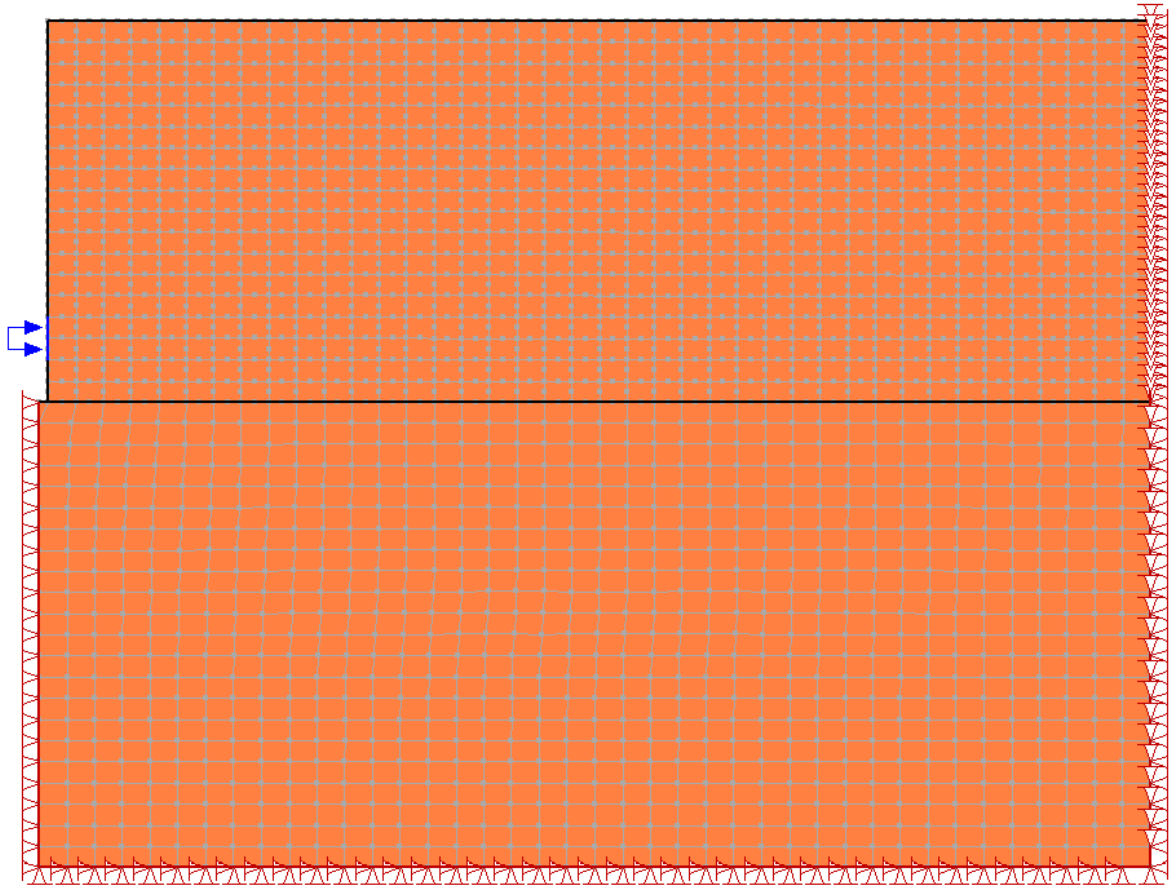


Figura 3.46 - Malha de elementos finitos gerada pelo Sigma/W.

3.4.3. Estado de tensão inicial

Para determinação do estado de tensão inicial (ou in situ) do maciço foi necessário o conhecimento do peso específico natural do solo (γ_{nat}) e coeficiente de Poisson (ν).

Como será destacado no procedimento genético, a cada conjunto de parâmetros analisados no Sigma/W recalculava-se o estado de tensão inicial de acordo com o coeficiente de Poisson considerado.

3.4.4. Modelo hiperbólico

O modelo hiperbólico apresentado no Sigma/W utiliza a formulação proposta por Duncan e Chang (1970).

Para sua aplicação foi necessário o conhecimento do módulo de elasticidade inicial (E_i), aplicando diretamente seu valor ou a função proposta por Janbu (1963), a coesão (c), ângulo de atrito (ϕ'), razão de ruptura (R_f) e coeficiente de Poisson (ν).

Como destacado anteriormente, o programa permite na análise a utilização do módulo de elasticidade como um parâmetro constante ou variável. Assim, as análises realizadas no procedimento genético foram feitas considerando E_i constante.

No entanto, para avaliação dos parâmetros encontrados pela calibração do modelo hiperbólico a função proposta por Janbu (1963) foi utilizada. Neste caso, os parâmetros k e n foram inseridos na formulação e para um conjunto de valores de tensão confinante (σ_3) obteve-se os valores do módulo de elasticidade (E_i).

Assim, no ícone “Function” disponível para o módulo de elasticidade do modelo hiperbólico entrou-se com os pares de valores (E_i, σ_3) na opção “Spline Data Point Function” e uma nova função foi criada. Dessa forma, a análise passou a considerar o módulo de elasticidade variável em função da tensão confinante aplicada durante a aplicação dos esforços horizontais.

3.4.5. Carregamento horizontal

A aplicação do carregamento horizontal foi feito após a análise in situ, assim as condições de tensão inicial foram consideradas utilizando no ícone “Settings” de “KeyIn Analyses” do programa a função “*Parent Analysis*”. Dessa forma, todas as análises realizadas no Sigma/W precederam de uma análise in situ conforme os parâmetros estudados.

Para cada ensaio pressiométrico realizado, obteve-se um esforço ou carregamento máximo aplicado. Para melhor definição da curva incremento de pressão versus deslocamento horizontal o carregamento máximo foi dividido em 100 etapas de carregamento no programa, sendo coletados somente os valores de tensão e deslocamento a cada 10 etapas, conforme se apresenta na Figura 3.47.

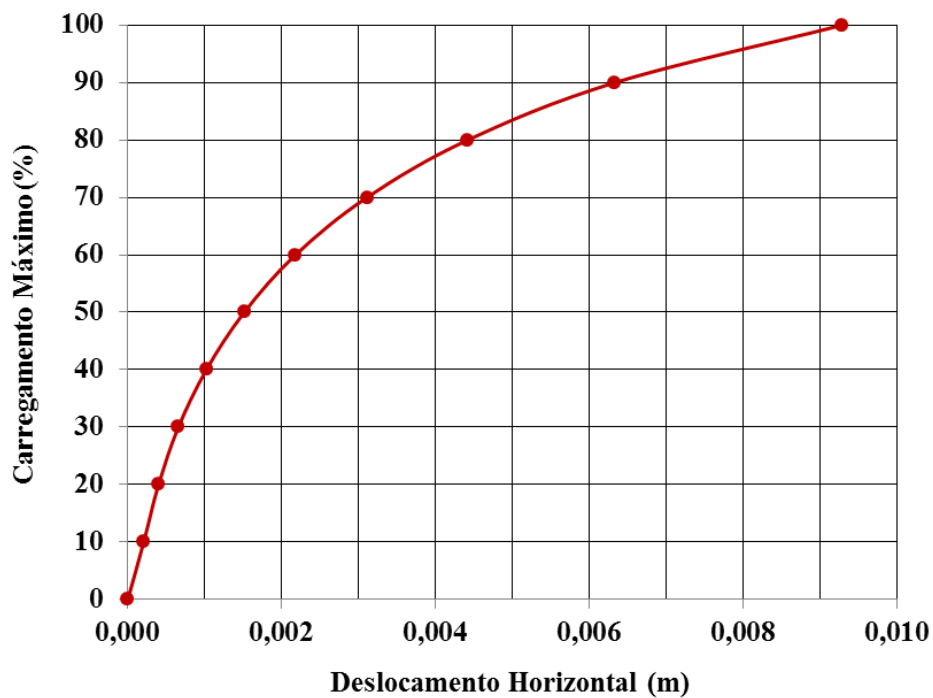


Figura 3.47 - Resultado típico da análise com o modelo hiperbólico no Sigma/W.

Os valores de deslocamento apresentados nos resultados fornecidos pelo programa foram comparados com os obtidos experimentalmente e o erro relativo entre eles foi quantificado por meio da função objetivo como será destacado a seguir.

3.5. Análise inversa

Para realizar o procedimento inverso foi necessário definir a forma como a curva pressiométrica a ser retroanalisada seria representada e qual seria o procedimento adotado para encontrar um conjunto de parâmetros que minimizasse a função objetivo (FO).

3.5.1. Curva pressiométrica

Para utilizar o modelo hiperbólico para representar a curva pressiométrica foram necessárias algumas considerações.

Como proposto por Ménard (1975) o ponto A (P_1 , V_1) da curva pressiométrica corrigida (Figura 3.48) representa o ponto no qual a sonda encosta nas paredes do furo. A partir deste

ponto, a curva apresenta uma configuração aproximadamente hiperbólica, o que justifica a utilização do modelo elástico não linear proposto por Duncan e Chang (1970).

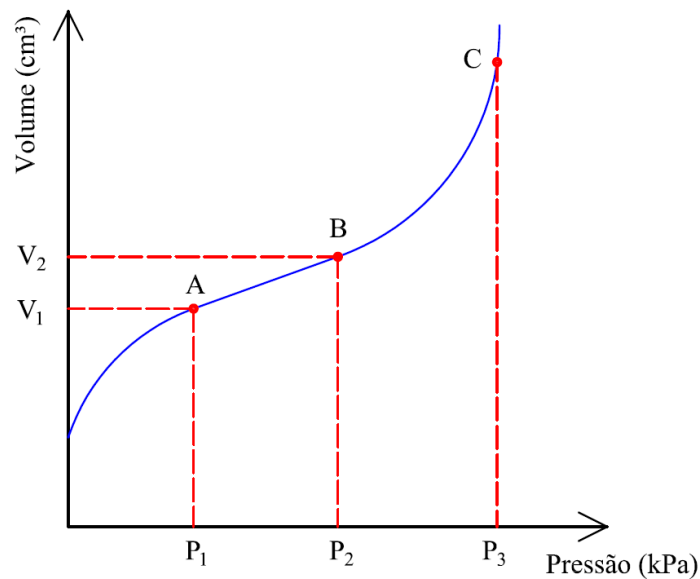


Figura 3.48 - Curva pressiométrica corrigida.

Para isso, os eixos com o resultado dos ensaios (Figura 3.48) foram invertidos e transladados para o ponto A como mostra a Figura 3.49.

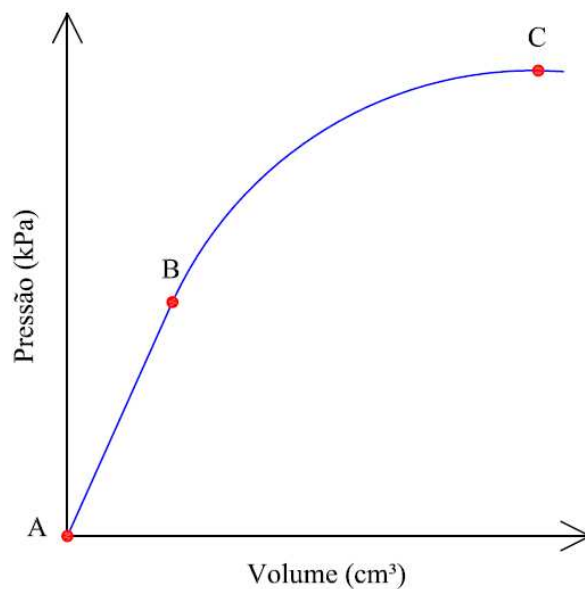


Figura 3.49 - Curva pressiométrica transladada.

Por outro lado, por se tratar de um problema axissimétrico, calculou-se o deslocamento radial (cm) do centro da sonda a partir do ponto A ao invés do volume injetado (cm³). Dessa forma, foram calculadas as variações de tensão e deformação radial considerando como valores

iniciais a pressão P_1 e o raio do furo, respectivamente. Sendo assim, a curva final a ser retro analisada apresentou a seguinte configuração.

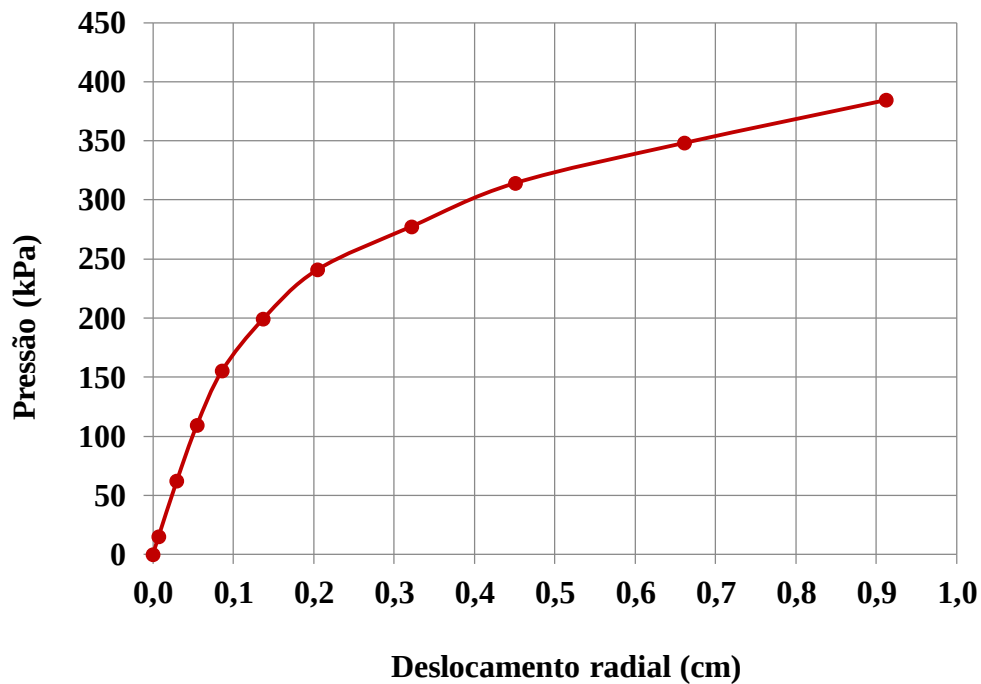


Figura 3.50 - Curva típica para análise inversa.

Como já destacado anteriormente, para retroanalisar a curva acima tomou-se a pressão máxima e dividiu seu valor em 100 incrementos iguais. Assim, para um dado conjunto de parâmetros fez-se a análise do estado de tensão inicial e por meio da análise não linear elástica (modelo hiperbólico) obteve-se os deslocamentos radiais na parede do furo para as pressões aplicadas. Os deslocamentos numéricos obtidos eram comparados com os deslocamentos medidos nos ensaios e a diferença quantificada pela função objetivo; que descreve o erro relativo entre os pontos experimentais e numéricos.

Portanto, minimizar o erro da função objetivo pode ser entendido como um problema de otimização. Assim, o uso de um método de otimização se torna necessário para se obter um conjunto de parâmetros ditos “ótimos” capaz de representar satisfatoriamente a curva pressiométrica estudada.

Neste trabalho, utilizou-se um algoritmo genético que, por meio de um procedimento genético baseado na teoria da seleção natural de Darwin, orienta as análises no sentido da minimização da função objetivo como será descrito a seguir.

3.5.2. Procedimento genético

O procedimento descrito neste tópico consiste basicamente em definir a função objetivo e o número de indivíduos (cromossomos) para compor as populações genéticas, utilizar operadores genéticos para gerar descendentes, avaliar os indivíduos por meio do MEF, comparar resultados experimentais e numéricos, e definir um critério de parada para o procedimento.

3.5.2.1. Função objetivo

A função objetivo que irá medir a diferença entre os resultados experimentais e os calculados pelo MEF foi definida pela seguinte expressão:

$$\text{erro}_{\delta} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta^{\text{MEF}} - \delta^{\text{Campo}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta^{\text{Campo}})^2}} \quad (3.13)$$

onde:

erro_{δ} : erro relativo em relação ao deslocamento;

δ^{MEF} : deslocamento obtido pelo MEF; e

δ^{Campo} : deslocamento obtido nos ensaios de campo.

3.5.2.2. Análise preliminar

Como não se dispunha de um programa de elementos finitos no qual o algoritmo genético estivesse implementado, limitou-se o espaço de busca para que o procedimento genético não se tornasse extremamente trabalhoso e inviável de ser feito sem automação.

De posse da curva pressiométrica a ser retroanalisada procedeu-se algumas análises no Sigma/W variando o conjunto de parâmetros (E_i , c , φ' , R_f e ν) do modelo hiperbólico, e com os deslocamentos resultantes calculou-se a função objetivo de modo a obter um indivíduo no qual apresentasse um erro relativo inferior a 15%.

Conforme destacado na revisão de literatura, este processo levará à obtenção de indivíduos interessantes, uma vez que a utilização destes na criação da população inicial fará com que a solução gerada seja tão boa quanto à obtida pela análise preliminar; melhorando assim a convergência do problema.

O conjunto de parâmetros (genes) do indivíduo encontrado serviu como diretriz para aplicação do algoritmo genético.

3.5.2.3. Considerações iniciais

Os parâmetros do indivíduo encontrado na análise preliminar serviu para determinar uma faixa de valores, dentro da qual se tomaria um conjunto de genes para formar indivíduos para criar as populações iniciais. Para cada gene do indivíduo preliminar foi aplicada uma taxa de variação de $\pm 10\%$, sendo os valores inferiores e superiores mantidos fixos ao longo do procedimento.

A recombinação foi realizada aplicando o crossover BLX- α com α igual a 0,5, e a mutação com uma taxa de 10%.

3.5.2.4. População inicial

Neste trabalho realizou-se 3 procedimentos genéticos, cada um com 5 gerações cada. A diferença entre os procedimentos consiste na população inicial considerada que foi de 10, 20 e 40 indivíduos. Sendo estes, como já destacado, determinados dentro da faixa estabelecida na análise preliminar.

Para determinação das populações iniciais a faixa foi dividida igualmente conforme o tamanho da população, o que implica em dizer que os indivíduos presentes em uma população inicial não estariam presentes em outra, pois os valores extremos foram fixados; aumentando assim a diversidade dentro do espaço de busca.

Esse conjunto de indivíduos da população inicial foram analisados no Sigma/W, ordenados em relação ao valor da função objetivo e os 5 melhores eram selecionados para compor a população principal.

3.5.2.5. População principal

Os indivíduos selecionados para compor a população principal foram levados para dar origem a 1ª geração, tornando-se pais, sendo nestes realizado o cruzamento (crossover BLX- α).

Esse processo leva à criação da população dos descendentes, onde o seu tamanho é dado pela seguinte relação:

$$IND = n(n - 1) \quad (3.14)$$

onde:

IND: número de descendentes; e

n: número de indivíduos da população principal.

3.5.2.6. População dos descendentes

Como a população principal foi mantida constante em todos os processos e igual a 5, logo a população de descendentes sempre se manteve igual a 20 indivíduos.

Com o valor de α igual a 0,5, tem-se um valor de β igual a -0,5 e 1,5. Assim, os genes para formação dos filhos (descendentes) foram gerados por meio das seguintes expressões:

$$p'_i = 1,5p_{1i} - 0,5p_{2i} \quad (3.15)$$

$$p'_i = 1,5p_{2i} - 0,5p_{1i}$$

onde p'_i é um gene do cromossomo filho e, p_{1i} e p_{2i} genes dos cromossomos pais.

Para manter a diversidade da população, verificava-se a presença de algum filho igual aos pais. Caso houvesse a igualdade, um número aleatório era gerado para cada gene do indivíduo e seu valor substituído multiplicando o número aleatório pelo intervalo relativo ao gene, somando o limite inferior do respectivo gene.

De modo a evitar a estagnação em uma única região do espaço de busca, a população de descendentes passou por um processo de mutação. Para cada gene dos 20 descendentes gerou-se um número aleatório entre 0 e 1, e caso este fosse inferior a taxa de mutação estipulada ($T_m=0,1$) o gene seria modificado.

A modificação do gene se deu gerando um novo conjunto de números aleatórios para cada gene, e naqueles definidos para ocorrência da mutação o número aleatório foi multiplicado pelo intervalo estipulado para o gene e somado ao seu limite inferior; alterando assim o valor do gene.

Após finalizar o processo de mutação tinha-se então a população de descendentes para ser analisada no Sigma/W.

3.5.2.7. População intermediária

Após analisar os descendentes, estes foram ordenados, juntamente com os pais (População Principal), em ordem crescente do erro relativo da função objetivo.

Esse conjunto de indivíduos, compostos por 5 pais e 20 filhos formam a população intermediária.

Dessa população selecionou-se os 5 indivíduos mais aptos, ou seja, com menor valor da função objetivo, para comporem a população principal na 2ª geração. População esta que dará origem a um novo processo como citado anteriormente (Pop. principal → crossover → mutação → pop. descendentes → pop. intermediária → pop. principal) ao longo da 2ª, 3ª, 4ª e 5ª geração.

Cabe destacar aqui a aplicação do elitismo, pois caso não se encontrasse um descendente mais apto que os pais, estes eram mantidos na população principal da próxima geração; evitando assim a perda de indivíduos mais aptos ao meio.

3.5.2.8. Critérios de parada

Inicialmente foi definido que seriam realizados três procedimentos genéticos com populações iniciais variáveis (10, 20 e 40) com 5 gerações cada, observando assim a convergência ao longo do processo.

Esperava-se com esses procedimentos obter um ou mais indivíduos com valor da FO menor ou igual a 5%. Caso não fosse possível alcançar este objetivo, as alternativas seriam ampliar a faixa de variação dos parâmetros do indivíduo encontrado na análise preliminar, aumentar o número de indivíduos na população inicial ou o número de gerações.

3.5.2.9. Considerações finais

O procedimento genético foi realizado no ambiente de trabalho do Microsoft Office Excel 2010, onde os únicos dados de entrada foram o número de indivíduos da população inicial (N) e os valores de deslocamento radial provenientes da análise no Sigma/W relativos a cada indivíduo ao longo das gerações.

O restante do processo foi todo automatizado e o número de estudos realizados no procedimento genético foi de aproximadamente 400 análises, contabilizando também as análises preliminares.

Resultados e Discussão

4.1. Ensaaios pressiométricos

Neste item serão apresentadas as curvas pressiométricas dos 5 ensaios realizados, bem como os parâmetros de deformabilidade e resistência determinados diretamente destes ensaios.

Como já destacado, os ensaios PMT01 e PMT03 foram realizados a 2,7 m do talude e distância de aproximadamente 2 m entre eixos dos furos. Já os ensaios PMT02, PMT04 e PMT05 foram realizados a uma distância de 30 cm do talude e 1 metro entre eixos.

A seguir serão apresentados os procedimentos aplicados para obtenção dos parâmetros para o ensaio PMT01, que teve a sua curva pressiométrica retroanalizada neste trabalho. Além disso, serão plotadas as curvas dos demais ensaios e seus respectivos parâmetros.

As curvas pressiométricas obtidas dos ensaios (Figura 4.1) e as curvas corrigidas (Figura 4.2) estão apresentadas a seguir.

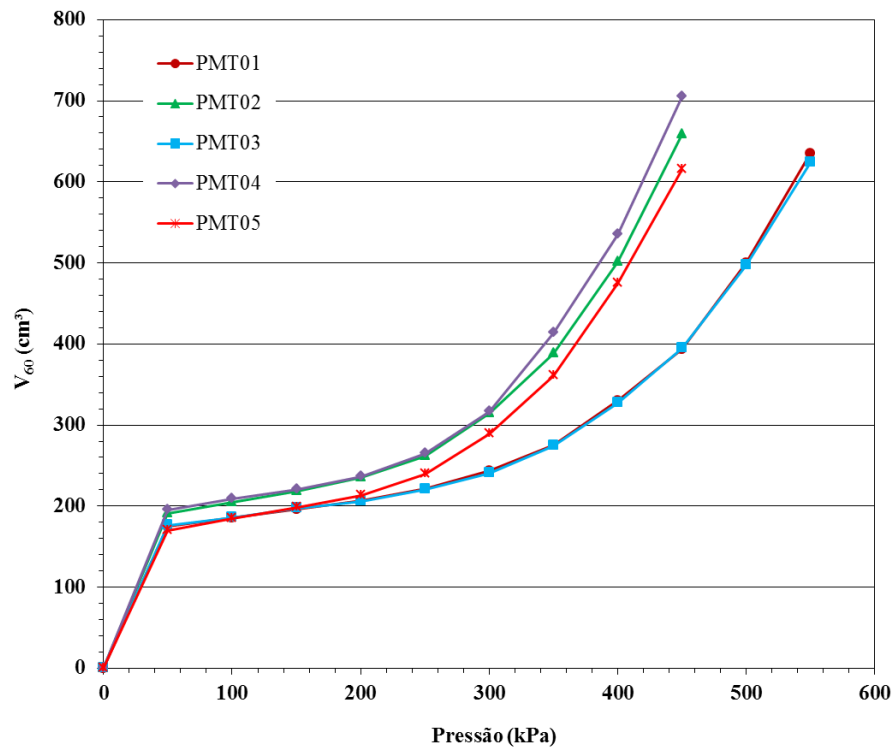


Figura 4.1 - Curvas pressiométricas dos ensaios.

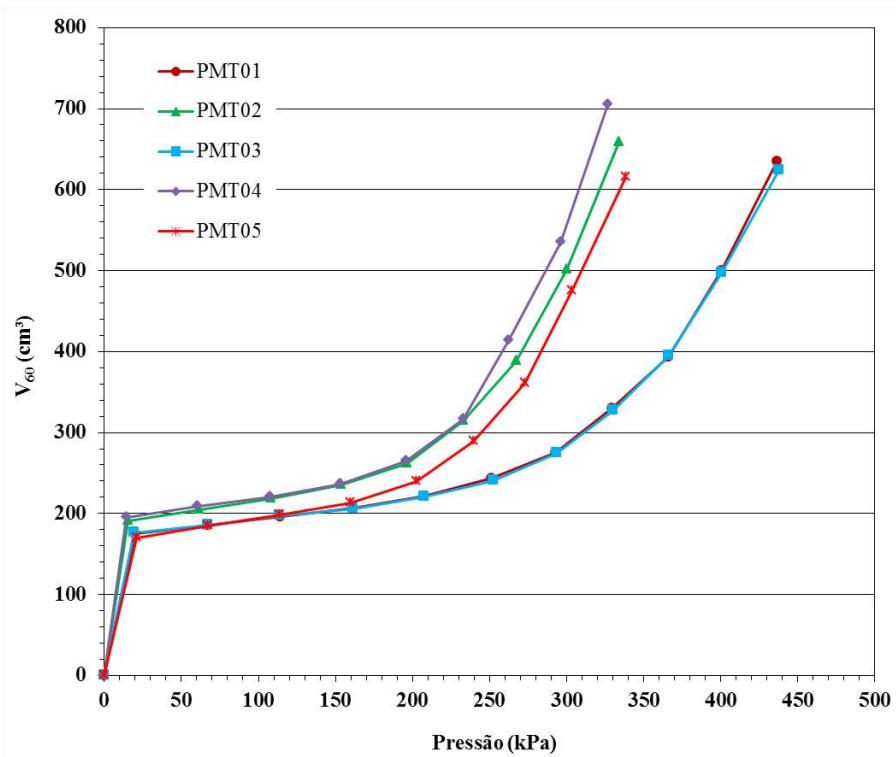


Figura 4.2 - Curvas pressiométricas corrigidas.

Como pode ser observado, as curvas dos ensaios PMT01 e PMT03 foram praticamente coincidentes, e as curvas dos ensaios PMT02, PMT04 e PMT05 apresentaram um comportamento bem similar. Além disso, observa-se que em todos os ensaios o primeiro incremento (50 kPa) já se apresenta praticamente no trecho pseudoelástico. Isso implica em dizer que para se obter uma melhor definição dos trechos iniciais das curvas pressiométricas deveriam ter sido aplicados incrementos menores de pressão, como por exemplo 25 kPa.

A curva pressiométrica PMT01 foi escolhida para ser retroanalísada por ter uma forma aproximadamente hiperbólica que poderia facilitar a retroanálise utilizando o modelo não linear elástico de Duncan e Chang (1970).

Os parâmetros de deformabilidade e resistência foram obtidos plotando a curva corrigida juntamente com a curva de fluência conforme se apresenta na Figura 4.3.

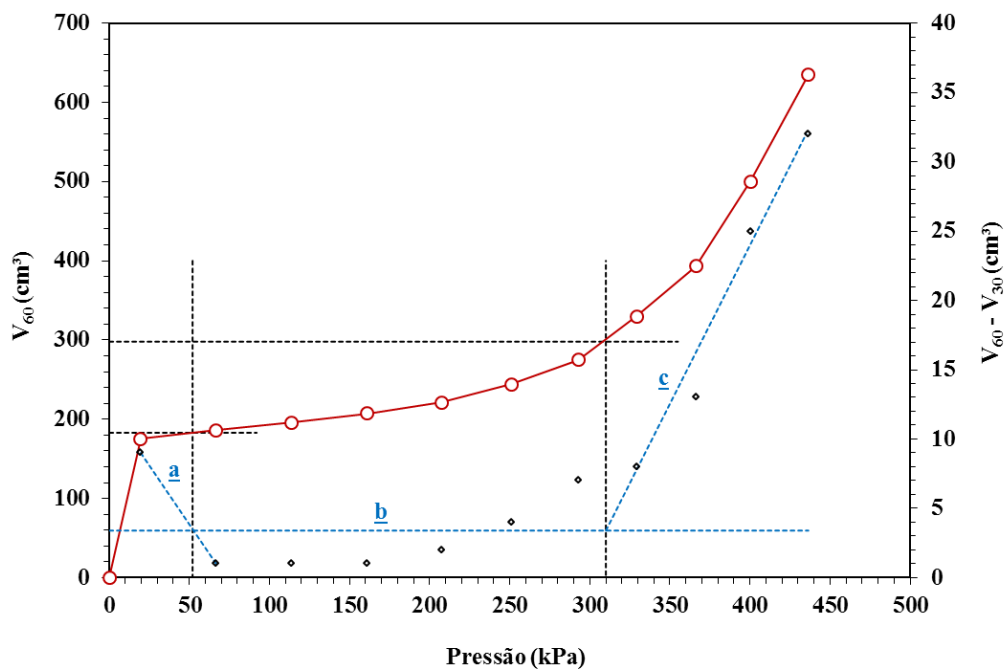


Figura 4.3 - Curva pressiométrica corrigida e curva de Fluência do ensaio PMT01.

- **Estimativa da pressão inicial (P_0)**

A pressão inicial (P_0) foi obtida diretamente da curva de fluência por meio da interseção entre a as retas a e b. O volume correspondente foi determinado traçando deste ponto uma reta

vertical, na qual a sua interseção com a curva corrigida forneceu o valor do volume inicial V_0 para pressão P_0 , no eixo das ordenadas. Os valores encontrados foram de 52 kPa e 183 cm³, para pressão e volume inicial, respectivamente.

- **Estimativa da pressão de Fluência ou de Creep (P_F)**

O procedimento para determinar a pressão de fluência seguiu o mesmo princípio utilizado na estimativa da pressão inicial. No entanto, considerou-se a interseção entre as retas b e c da curva de fluência para determinar seu valor no eixo das abcissas, e o volume correspondente foi obtido prolongando-se esta interseção até a curva corrigida e retirando seu valor no eixo das ordenadas. Os valores de pressão e volume de fluência, correspondentes ao início do trecho de plastificação do solo, são de 310 kPa e 298 cm³, respectivamente.

- **Módulo de Ménard (E_P) ou Módulo Pressiométrico (E_M)**

O módulo de Ménard foi determinado utilizando a Equação 2.1 considerando os valores de pressão e volume obtidos acima e assumindo um coeficiente de Poisson igual a 0,33, como apresentado a seguir.

$$E_p = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot V_m \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

$$E_p = 2,66 \cdot \left[V_s + \frac{(V_f - V_0)}{2} \right] \cdot \left[\frac{(P_f - P_0)}{(V_f - V_0)} \right]$$

Logo, tem-se:

$$E_p = 2,66 \cdot \left[557 + \frac{(298 - 183)}{2} \right] \cdot \left[\frac{(310 - 52)}{(298 - 183)} \right]$$

$$E_p = 3667,12 \text{ kPa}$$

- **Pressão limite (P_L)**

A pressão limite foi determinada utilizando a recomendação da norma americana ASTM D4719, que apresenta uma técnica que consiste em desenhar as três últimas leituras correspondentes à fase plástica numa escala P versus Log V_{60} .

Os pontos plotados devem formar uma linha reta que intercepta a linha horizontal correspondente ao dobro do volume inicial da cavidade, ou seja, $V = V_S + 2V_0$; com, ou sem, prolongamento. O ponto desta intercessão no eixo das abcissas é a pressão limite P_L .

Como o volume da sonda e o volume inicial correspondem a 557 cm^3 e 183 cm^3 respectivamente, logo tem-se:

$$V = 557 + 2 \cdot 183 = 923 \text{ cm}^3$$

Como não se obteve essa variação de volume durante o ensaio, foi necessário fazer o prolongamento da reta de melhor ajuste dos pontos conforme se apresenta na Figura 4.4.

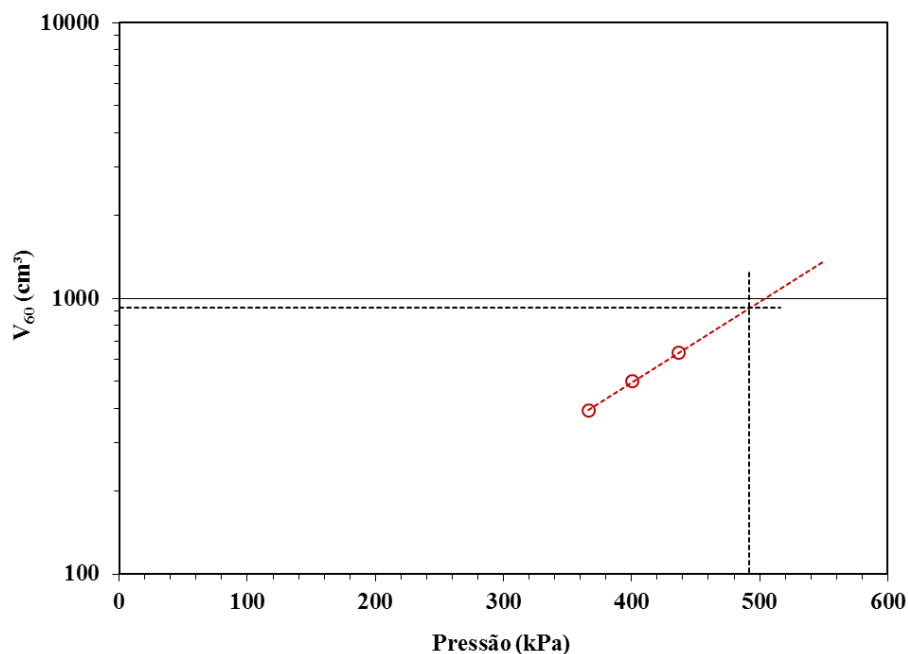


Figura 4.4 - Obtenção da pressão limite por extrapolação do ensaio PMT01.

Da Figura 4.4, tem-se que a pressão limite é igual a 492 kPa.

Para obtenção dos parâmetros de resistência e deformabilidade dos demais ensaios (PMT02, 03, 04 e 05) seguiram-se os mesmos procedimentos adotados anteriormente.

Na Tabela 4.1 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 4.1 - Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios pressiométricos.

Ensaio	P ₀ (kPa)	V ₀ (cm ³)	P _F (kPa)	V _F (cm ³)	P _L (kPa)	V _L (cm ³)	E _m (kPa)	ΔV/V ₀
1	52,0	183	310	298	492	923	3667	0,63
2	51,0	202	250	347	381	961	2298	0,72
3	62,5	185	334	334	491	927	3061	0,81
4	58,0	208	227	306	365	973	2786	0,47
5	55,5	183	227	271	384	923	3123	0,48

Como pode ser observado na Tabela 4.1 e Figura 4.2 os ensaios realizados mais afastados do talude (PMT01 e PMT03) apresentaram, em geral, pressões limites e módulos pressiométricos superiores aos demais ensaios (PMT02, PMT04 e PMT05).

4.2. Ensaio de laboratório

4.2.1. Caracterização geotécnica do solo

Na Figura 4.5 tem-se a curva granulométrica do solo residual de gnaiss estudado, composto por 30% de areia, 50% de silte e 20% de argila, e classificado pelo Sistema Unificado como um silte de alta compressibilidade (CH); confirmando assim a identificação tátil visual realizada durante a sondagem com SPT.

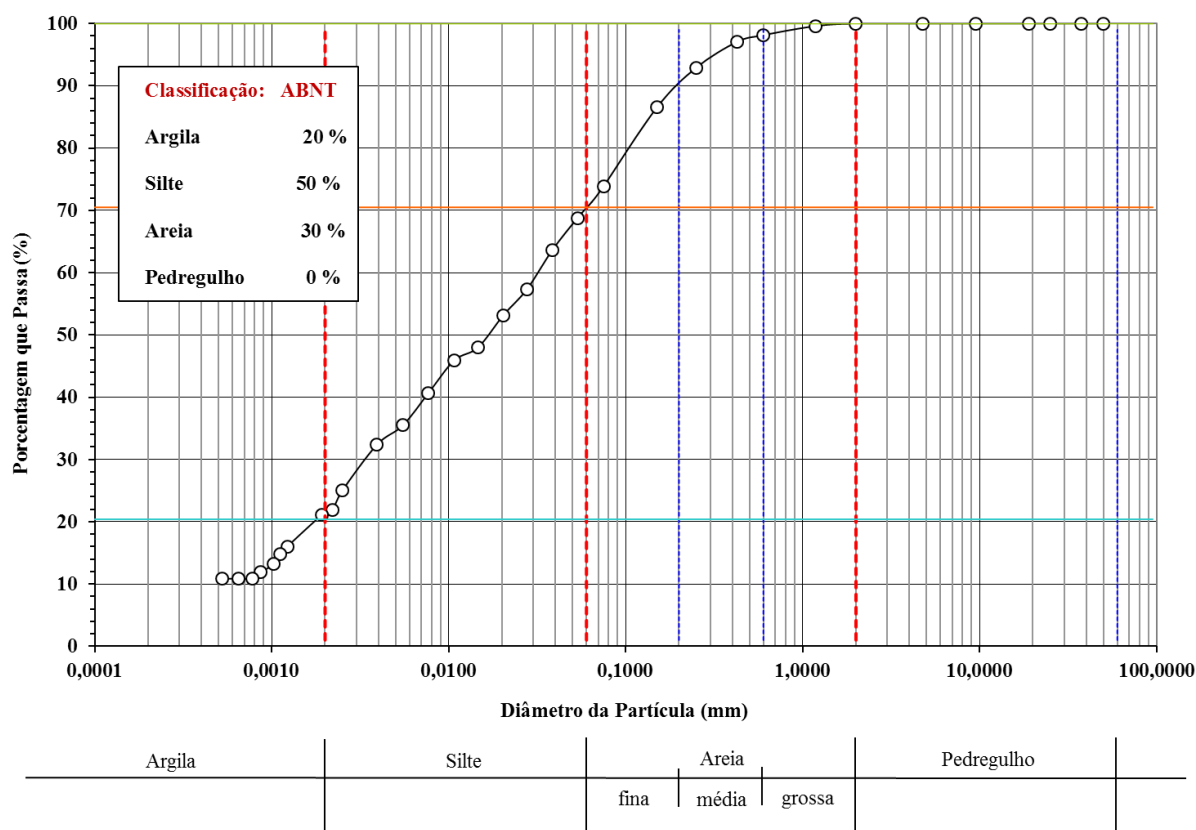


Figura 4.5 - Curva granulométrica do solo estudado.

Na Tabela 4.2 está apresentada uma síntese dos resultados da caracterização geotécnica do solo.

Tabela 4.2 - Caracterização geotécnica do solo.

Fração granulométrica (%)			Limites de Atterberg (%)			γ_s (kN/m ³)
Areia	Silte	Argila	LL	LP	IP	
30	50	20	53	30	23	28,74

4.2.2. Ensaios triaxiais

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios triaxiais consolidados isotropicamente e drenados na condição natural (CID_{nat}) e saturada (CID_{sat}). A escolha das tensões de adensamento baseou-se na tensão horizontal atuante na profundidade de realização dos ensaios pressiométricos, sendo da ordem de 38 kPa, como será mostrado adiante na análise de

tensões in situ. Com base neste valor, realizou-se os ensaios com tensões de adensamento de 25, 50, 75 e 100 kPa.

4.2.2.1. Ensaios CID_{nat}

Os dados iniciais dos corpos de prova submetidos aos ensaios CID_{nat} , tais como o teor de umidade inicial e final, peso específico natural, índice de vazios, grau de saturação e nível de tensão efetiva a que os mesmos foram submetidos ao final do adensamento estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais CID_{nat} .

Condição do ensaio	Tensão de adensamento (kPa)	Valores				
		Iniciais				Finais
		γ_{nat} (kN/m ³)	w (%)	e	Sr (%)	w (%)
CID natural	25	16,47	27,41	1,22	65,70	30,61
	50	17,24	25,81	1,10	68,90	29,52
	75	16,42	28,94	1,26	67,50	32,46
	100	16,65	27,16	1,19	66,62	28,77

Nas figuras a seguir apresentam-se as curvas de tensão desviadora versus deformação axial e as trajetórias de tensões efetivas (p' versus q) para as tensões de adensamento aplicadas.

Como era de se esperar, quanto maior a tensão de adensamento aplicada ao CP maior foi o valor da tensão desviadora obtida para um mesmo valor de deformação, como pode ser observado na Figura 4.6. No entanto, as curvas tensão versus deformação apresentaram características distintas para níveis de tensões de adensamento inferior e superior a 50 kPa, uma vez que para valores inferiores ao atingir o pico de tensão desviadora houve uma pequena queda da mesma até atingir 20% de deformação. Para valores superiores observou-se o contrário, houve um ganho de resistência à medida que o CP foi sendo cisalhado.

Este fato pode ser justificado pela pequena diferença entre as tensões de adensamento (25 kPa) aplicadas e pelo estado relativamente fofo no qual se encontrava a amostra, indicando que somente para tensões superiores a 50 kPa foi possível provocar uma alteração

representativa do arranjo do solo capaz de fazer com que houvesse um ganho de resistência durante o cisalhamento.

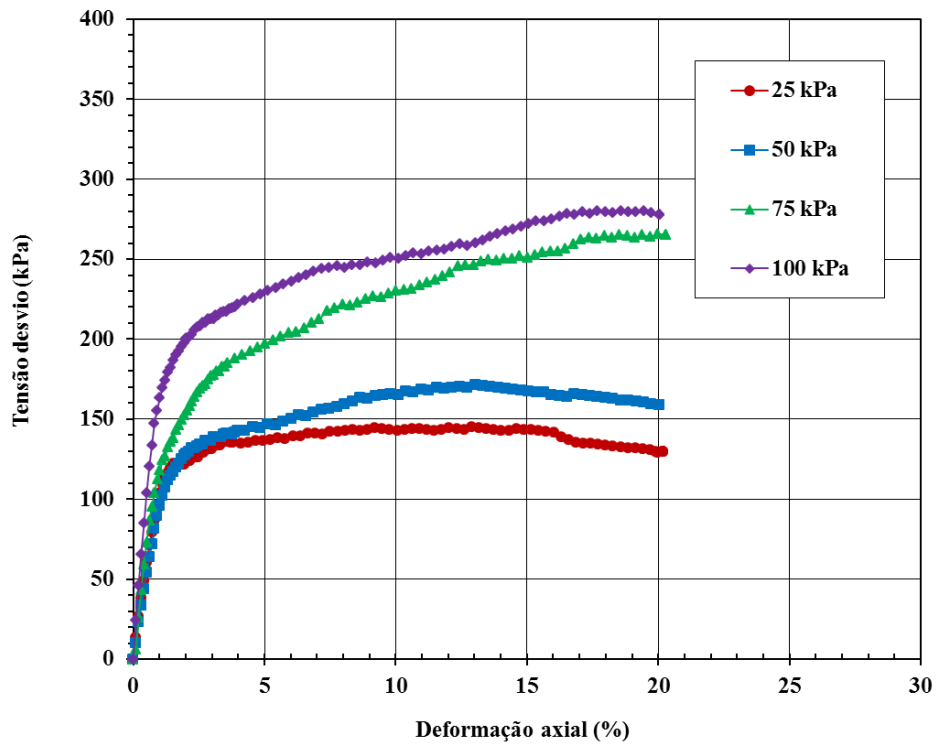


Figura 4.6 - Curvas tensão versus deformação para o ensaio triaxial CID_{nat} .

Na Figura 4.7 têm-se as trajetórias de tensões efetivas. Após traçar uma reta de melhor ajuste pelos pontos máximos das trajetórias obteve-se os coeficientes β e d' , e com estes determinou-se os parâmetros de resistência efetivos da ordem de 31° e 24 kPa de ângulo de atrito e coesão, respectivamente.

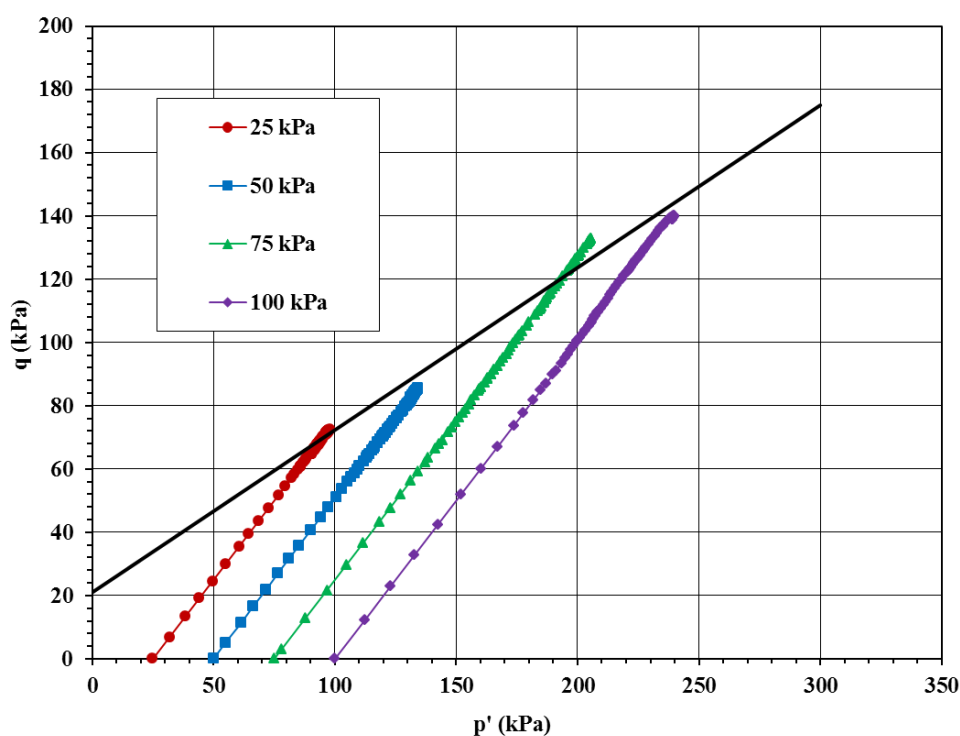


Figura 4.7 - Trajetórias de tensões efetivas para o ensaio triaxial CID_{nat} .

4.2.2.2. Ensaios CID_{sat}

Os dados iniciais dos corpos de prova submetidos aos ensaios triaxiais CID_{sat} estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais CID_{sat} .

Condição do ensaio	Tensão de adensamento (kPa)	Valores				
		Iniciais				Finais
		γ_{nat} (kN/m ³)	w (%)	e	Sr (%)	w (%)
CID saturado	25	15,87	25,55	1,27	58,79	44,14
	50	16,30	29,40	1,28	67,20	43,24
	75	16,63	27,93	1,21	67,57	38,72
	100	16,35	28,43	1,26	66,26	39,44

Nas figuras a seguir apresentam-se as curvas de tensão desviadora versus deformação axial, as trajetórias de tensões efetivas (p' versus q) e a variação de volume versus deformação axial para as tensões de adensamento aplicadas.

Como era de se esperar, quanto maior a tensão de adensamento aplicada maior foi o valor da tensão desviadora obtida para um mesmo valor de deformação (Figura 4.8). No entanto, diferentemente do observado nos resultados dos ensaios CID_{nat} , neste a saturação dos CPs foi suficiente para fazer com que houvesse uma diferença significativa e praticamente constante dos valores de tensão desviadora máxima entre os níveis de tensão aplicados.

Além disso, observa-se a ausência de picos bem definidos nas curvas, o que evidencia uma reorganização da estrutura, causada possivelmente por uma perda de cimentação devido a saturação dos corpos de prova.

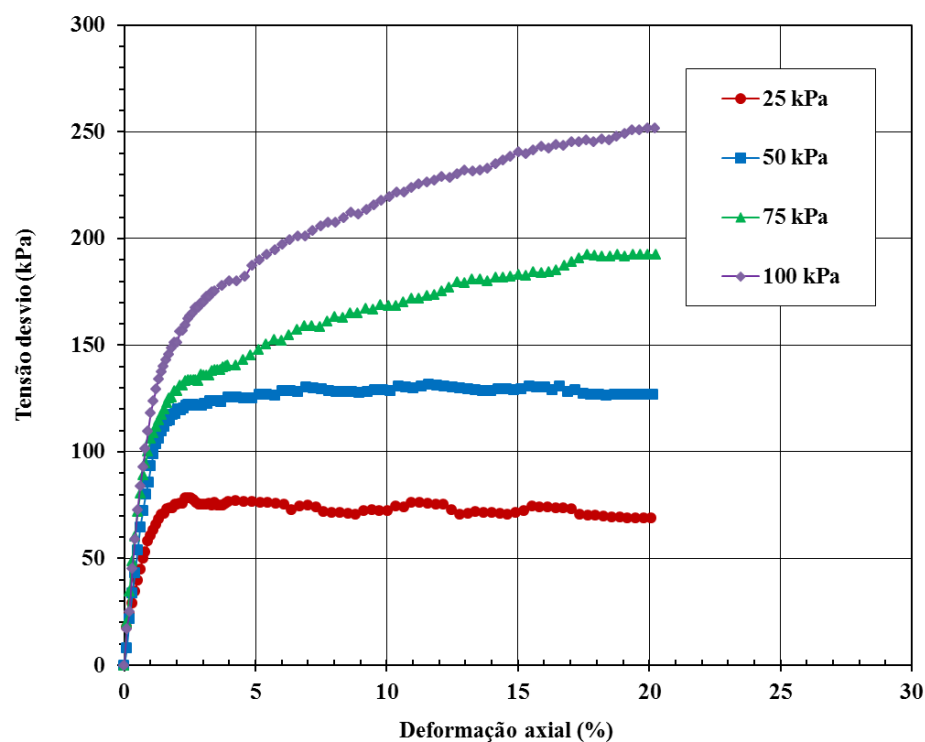


Figura 4.8 - Curvas tensão versus deformação para o ensaio triaxial CID_{sat} .

Na Figura 4.9 têm-se as trajetórias de tensões efetivas. Por meio destas obteve-se os parâmetros de resistência efetivos, cujos valores foram de $32,5^\circ$ e 5 kPa para o ângulo de atrito e coesão, respectivamente.

Como era esperado, a saturação dos corpos de prova fez com que houvesse uma queda no valor da coesão, e o ângulo de atrito apresentou-se bem próximo aos resultados obtidos nos ensaios CID_{nat} .

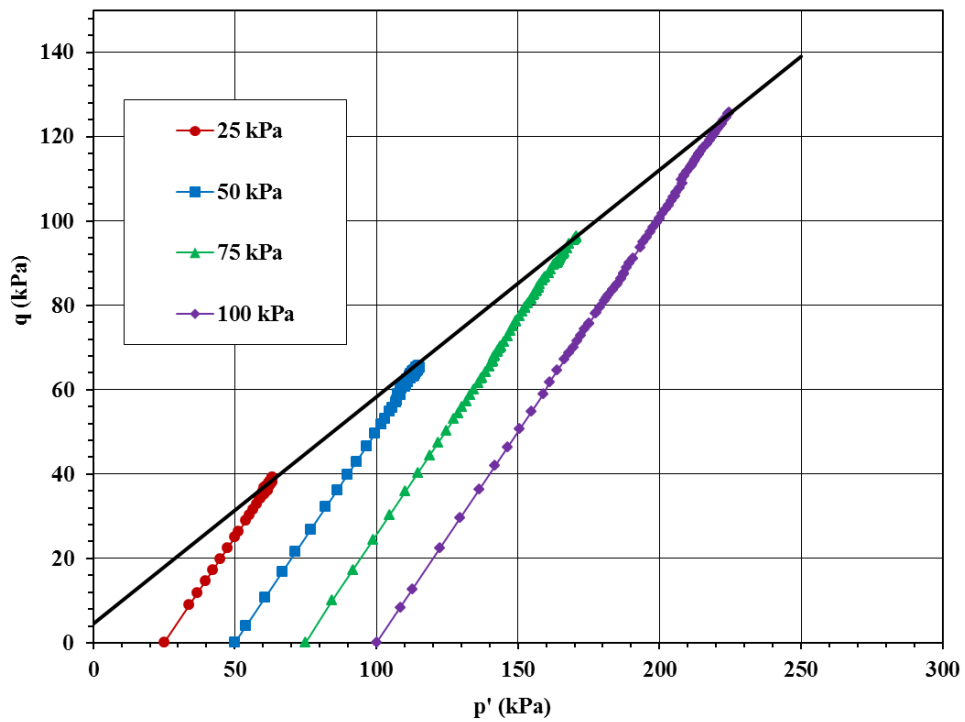


Figura 4.9 - Trajetórias de tensões efetivas para o ensaio triaxial CID_{sat}.

Na Figura 4.10 têm-se as curvas de variação volumétrica. Observa-se nestas que, para os corpos de prova de 25 kPa e 50 kPa, as variações volumétricas cessaram a partir de 10% e 15%, respectivamente. Isso confirma o comportamento observado nas curvas tensão versus deformação, onde estes CPs não apresentaram variações de tensões desviadoras significativas a partir desses níveis de deformação axial.

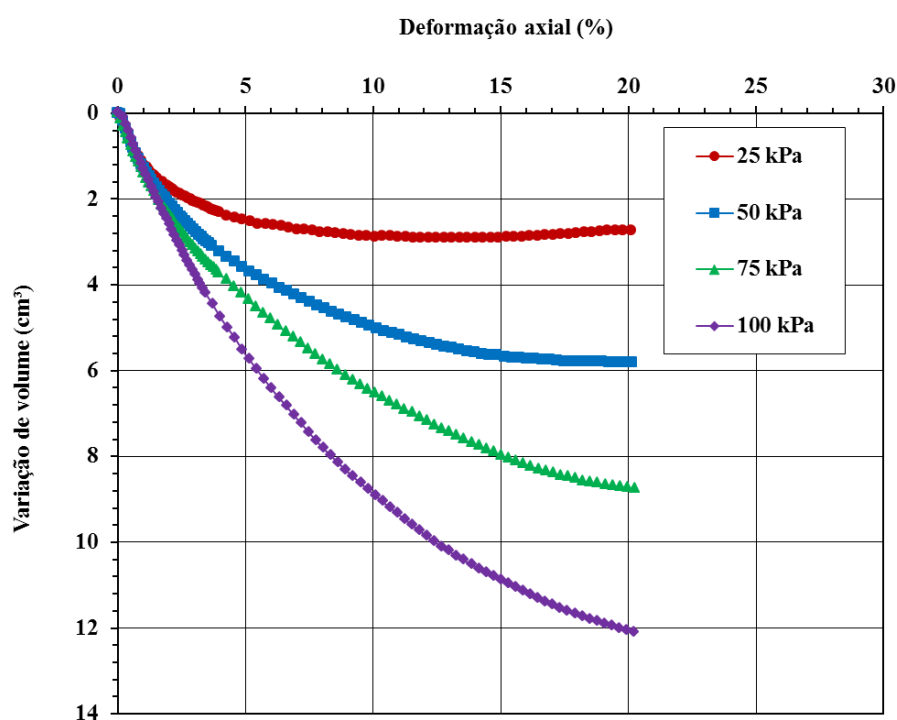


Figura 4.10 - Curvas deformação axial versus variação de volume para o ensaio triaxial CID_{sat}.

4.2.3. Ensaio de cisalhamento direto

Na Tabela 4.5 estão apresentados os índices físicos dos CPs ensaiados com tensões normais de 25, 50, 75 e 100 kPa na condição natural.

Tabela 4.5 - Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.

Condição do ensaio	Tensão de adensamento (kPa)	Valores				
		Iniciais				Finais
		γ_{nat} (kN/m³)	w (%)	e	Sr (%)	w (%)
Cisalhamento direto natural	25	16,81	30,03	1,22	71,95	29,17
	50	16,50	28,93	1,25	68,05	28,51
	75	16,86	28,70	1,19	70,47	27,81
	100	16,48	30,64	1,28	70,26	29,64

Nas figuras a seguir apresentam-se as curvas de tensão cisalhante versus deformação axial, deformação vertical versus deformação horizontal e a envoltória de Mohr-Coulomb.

Como se pode observar na Figura 4.11 todas as curvas apresentaram picos de tensões cisalhantes bem definidos. Além disso, nota-se também que à medida que se aumentou a tensão normal aplicada o comportamento tensão versus deformação, até então típico de uma ruptura frágil, tende a migrar para uma ruptura plástica; o que é justificável por se tratar de um solo pré-adensado.

Na Figura 4.12 têm-se as curvas deformação vertical versus deformação horizontal específica. O pré-adensamento do solo justifica o comportamento das curvas obtidas, uma vez que a quebra do arranjo até então existente no solo fino estudado implica na expansão do CP a medida que este vai sendo cisalhado; sendo estas deformações verticais cada vez menores com o aumento da tensão normal aplicada.

Com os valores de tensão cisalhante máxima pode-se traçar a envoltória de Mohr-Coulomb (Figura 4.13). Pode-se observar que os valores máximos ou residuais se ajustaram muito bem pela envoltória e que os resultados obtidos (Tabela 4.6) apresentaram valores coerentes.

O ângulo de atrito obtido foi exatamente o mesmo determinado pelo ensaio triaxial CID_{nat} ($\phi' = 31^\circ$). A coesão apresentou um maior valor (61 kPa) comparado com os obtidos nos ensaios triaxiais, no entanto, o fato de ter ocorrido um aumento do teor de umidade ao longo dos ensaios CID_{nat} pode ter contribuído para que houvesse um decréscimo do valor de coesão; sendo este um dos fatores que justificam a diferença entre os valores de coesão obtidos nos ensaios de cisalhamento direto e triaxiais CID_{nat} .

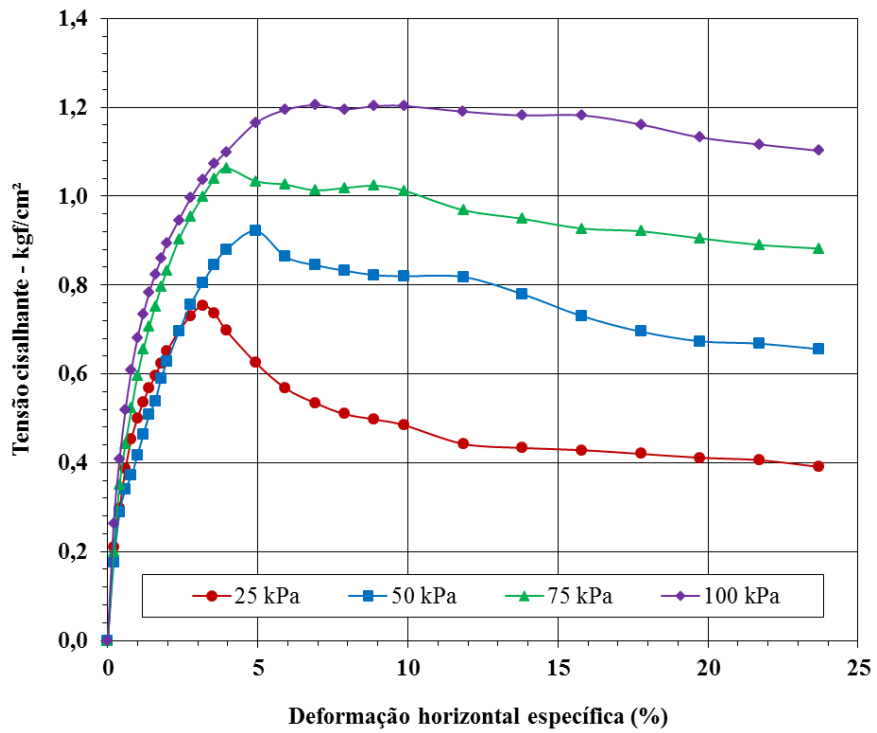


Figura 4.11 - Curvas tensão cisalhante versus deformação horizontal para o ensaio de cisalhamento direto.

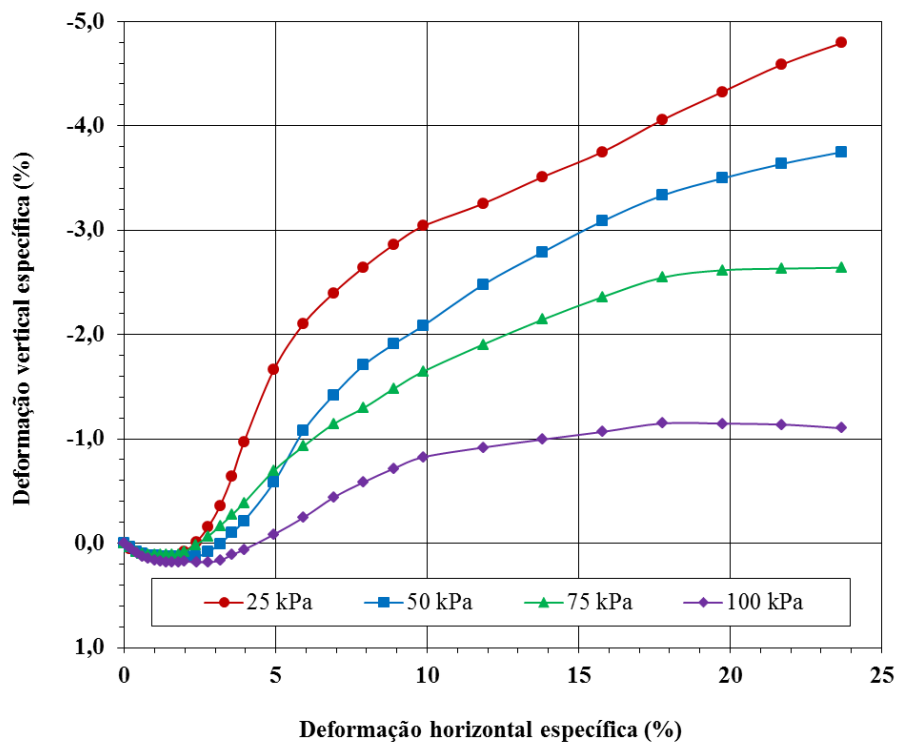


Figura 4.12 - Curvas deformação vertical versus deformação horizontal específica para o cisalhamento direto.

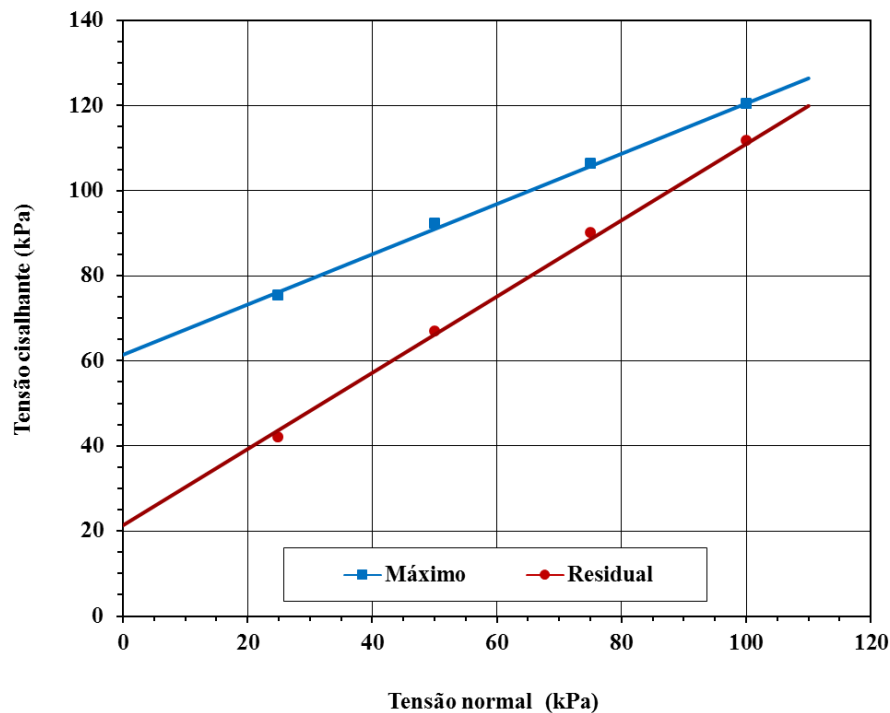


Figura 4.13 - Envoltória de Mohr-Coulomb.

Tabela 4.6 - Parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto.

Valores	Coesão efetiva (kPa)	Ângulo de atrito efetivo (°)
Máximos	61	31
Residuais	21	42

4.2.4. Ensaio de adensamento

O ensaio de adensamento unidimensional foi realizado com uma amostra de diâmetro e altura de aproximadamente 7,12 cm e 1,95 cm, respectivamente. Os dados iniciais do CP estão apresentados na Tabela 4.7 e como se pode observar houve um pequeno aumento no teor de umidade devido ao contato do CP com a pedra porosa, o que é perfeitamente aceitável, uma vez que a norma brasileira (ABNT NBR 12007:1990) recomenda a utilização de pedras porosas umedecidas na realização de ensaios em solos não saturados em ambientes de temperatura aproximadamente constante; o que pode levar a um pequeno aumento no teor de umidade ao final do ensaio.

Tabela 4.7 - Índices físicos do corpo de prova do ensaio de adensamento.

Valores				
Iniciais				Finais
γ_{nat} (kN/m ³)	w (%)	e	Sr (%)	w (%)
15,99	29,20	1,32	64,69	31,74

Na Figura 4.14 tem-se a curva de adensamento do solo. As tensões de pré-adensamento determinadas pelos métodos de Pacheco Silva e Casagrande apresentaram os mesmos valores (242 kPa) e o índice de compressão obtido foi igual a 0,57.

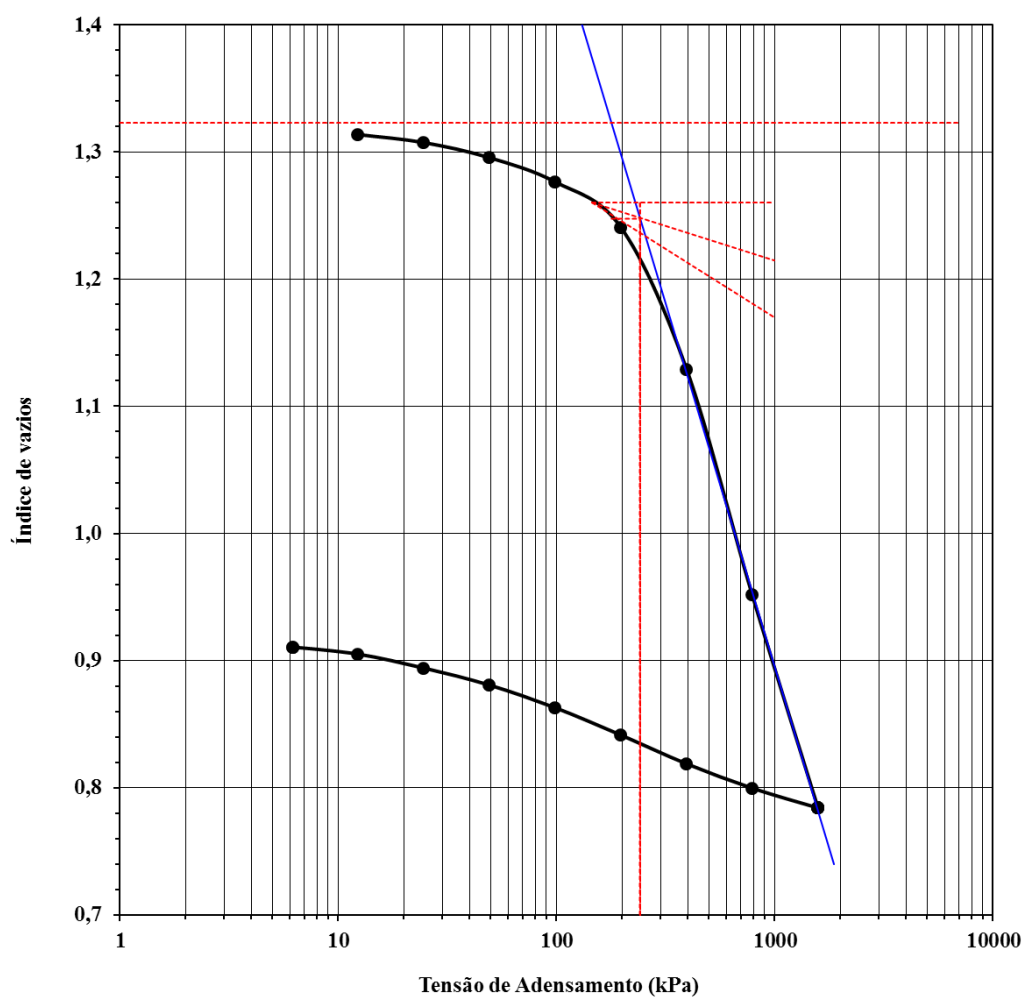


Figura 4.14 - Curva de adensamento do solo.

4.3. Calibração do modelo hiperbólico

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais foi possível fazer a calibração do modelo hiperbólico.

Primeiramente, utilizando os resultados dos ensaios triaxiais CID_{sat} fez-se a linearização das curvas de tensão desviadora versus deformação axial, porém estas não se ajustaram bem, assim optou-se por calcular os módulos de elasticidade inicial considerando o mesmo ponto de deformação axial ($\epsilon_a = 0,81\%$) para todas as curvas, sendo este o ponto no qual começa a ficar nítida a diferença dos módulos de elasticidade.

Com essa consideração, podem-se determinar os parâmetros E_i e b definidos para cada nível de tensões conforme se apresenta na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Parâmetros E_i e b .

σ_3 (kPa)	E_i (kPa)	b (1/kPa)
25	6518,52	0,0127713921
50	8938,27	0,0076103501
75	11691,36	0,0051921080
100	12506,17	0,0039761431

Os parâmetros de resistência do solo, coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ'), foram obtidos plotando-se os valores máximos das trajetórias de tensão (p' versus q) para cada CP conforme se apresentou na Figura 4.9.

Com a inclinação e a intercessão da reta de melhor ajuste no eixo das abcissas foi possível, por meio da Equação 3.8, obter um valor de $32,5^\circ$ e 5 kPa para o ângulo de atrito e coesão, respectivamente.

Com a tensão desviadora última $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ e a resistência do solo $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, obtida pelo critério de Mohr-Coulomb, foi possível determinar R_f de cada ensaio. O parâmetro é dado pela média dos valores obtidos nos ensaios, tendo sido encontrado um R_f médio igual a 0,998.

Os parâmetros K e n da Equação 2.20 proposta por Janbu (1963) foram determinados plotando o logaritmo dos módulos de elasticidade inicial (E_i) e de σ_3 , ambos divididos pela pressão atmosférica ($P_a = 100$ kPa), conforme se apresenta na Figura 4.15.

Quando σ_3/P_a é igual a 1, obtém-se o valor de K igual a 128,88. O valor de n igual a 0,4937 corresponde à inclinação da reta (Figura 4.15).

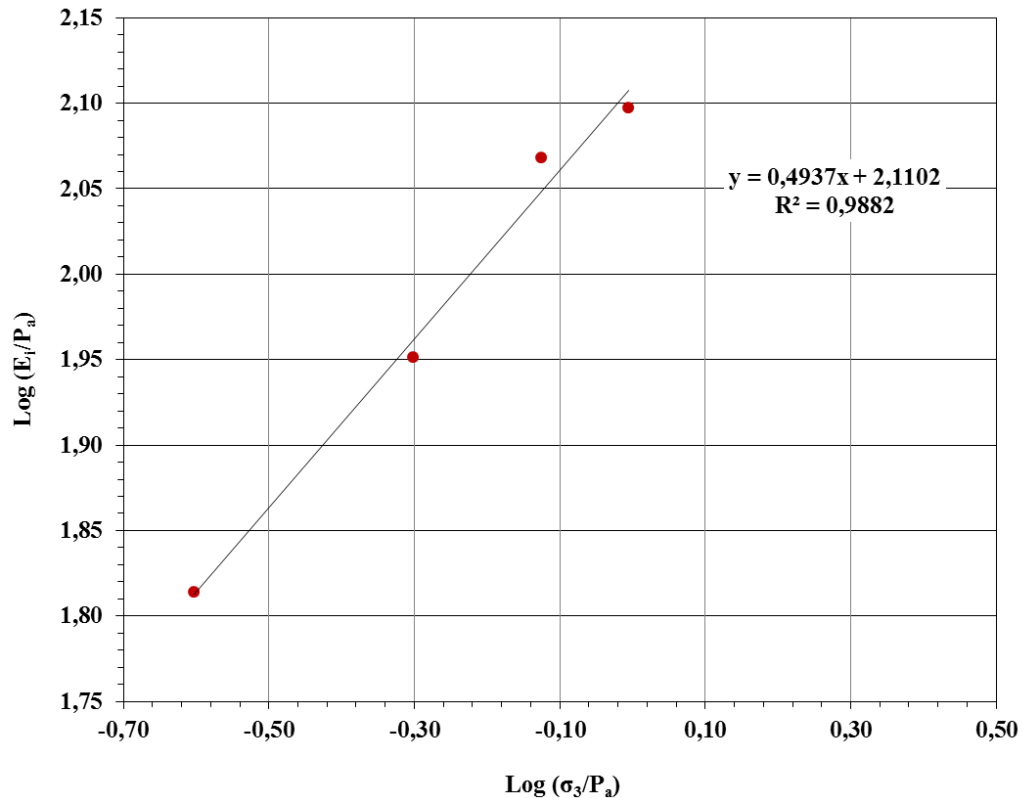


Figura 4.15 - Obtenção dos parâmetros K e n para a calibração com o ensaio CID_{sat} .

Assim como feito anteriormente, os parâmetros K_b e m também são definidos por meio de um gráfico do tipo $\log(B_i/P_a)$ versus $\log(\sigma_3/P_a)$, onde m será a inclinação da reta de melhor ajuste e K_b o ponto ordenado relativo a $\log(\sigma_3/P_a)$ igual a zero, ou seja, σ_3/P_a igual a 1.

Com base nas curvas de variação de volume obtidas nos ensaios triaxiais CID_{sat} pode-se verificar que nenhuma delas atingiu uma tangente horizontal antes de se mobilizar 70% da resistência. Assim, como proposto por Duncan et al. (1980) deve-se calcular B no ponto correspondente a 70% da resistência mobilizada, como mostrado na Figura 4.16.

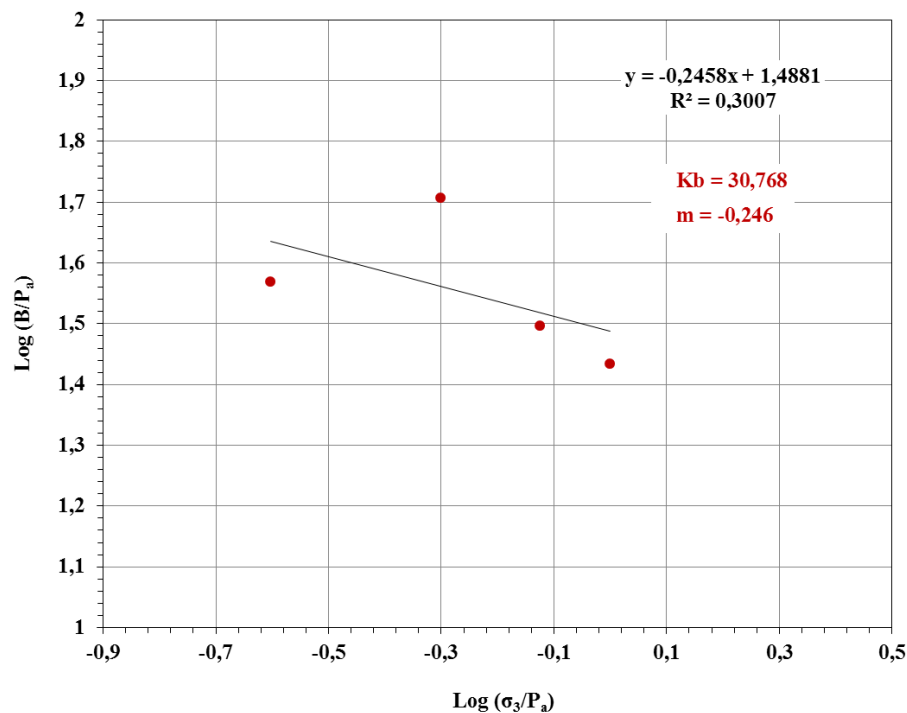


Figura 4.16 - Parâmetros K_b e m para 70% da resistência mobilizada.

No entanto, os pontos plotados na figura anterior não se ajustaram bem, como pode ser comprovado pelo coeficiente de determinação (R^2), o que levou a uma má representação das curvas de variação de volume.

Como pode ser visto na Figura 4.17 os valores de B variaram muito até 10% de deformação axial aproximadamente, o que levou a obtenção de resultados não satisfatórios pelo método proposto por Duncan et al. (1980). Logo, optou-se por traçar uma reta média a partir da estabilização e obteve-se um valor para o módulo volumétrico igual a 1450 kPa aproximadamente.

Assim, B será constante para todas as curvas, acarretando em K_b e m iguais a 14,50 e zero, respectivamente.

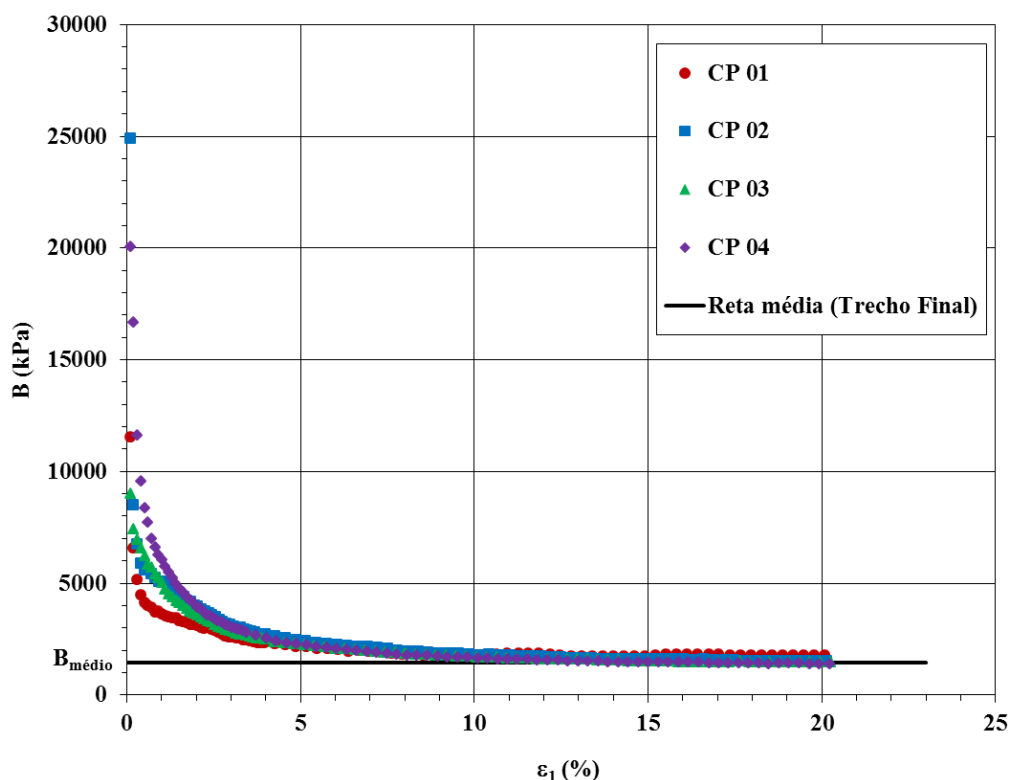


Figura 4.17 - Variação do módulo de deformação volumétrico em relação a deformação axial.

Na Tabela 4.9 têm-se os parâmetros calibrados do modelo hiperbólico e na Figura 4.18 encontram-se as curvas tensão desviadora e deformação volumétrica, ambas em função da deformação axial, reconstituídas com base nos parâmetros definidos na calibração.

Nota-se que o modelo não representou bem as curvas experimentais. Nas curvas de tensão desviadora o modelo conseguiu representar satisfatoriamente somente a assíntota das curvas de tensões confinantes iguais a 25 e 50 kPa, e nas curvas de deformação volumétrica apenas a assíntota da curva de 50 kPa foi bem ajustada pelo modelo.

Tabela 4.9 - Parâmetros obtidos pela calibração tradicional do modelo hiperbólico.

Parâmetro	K	n	K_b	m	R_f	c' (kPa)	ϕ' (°)
Valor	128,884	0,494	14,500	0,000	0,998	4,987	32,513

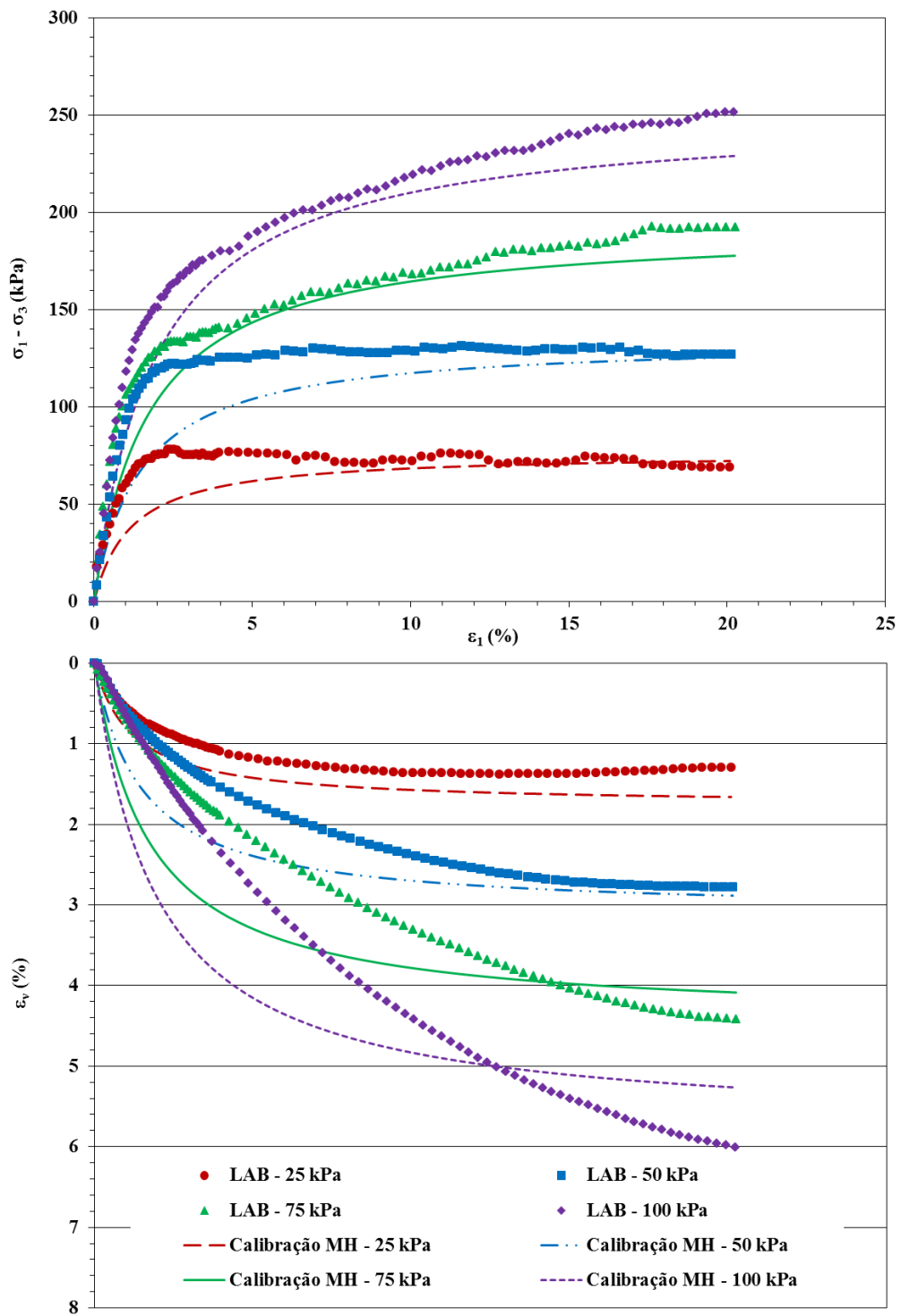


Figura 4.18 - Representação das curvas de tensão desviadora e deformação volumétrica pelo modelo hiperbólico calibrado com o ensaio CID_{sat} .

Além da calibração tradicional (CID_{sat}) realizou-se também a calibração com o ensaio triaxial na condição natural (CID_{nat}).

Na Figura 4.19 têm-se as curvas de tensão versus deformação transformadas para determinação dos parâmetros a e b (Tabela 4.10). Pode-se observar que as linhas de tendência se ajustaram bem aos pontos experimentais, porém ao plotar o logaritmo de E_i/P_a e σ_3/P_a percebeu-se que o ponto relativo ao ensaio de 25 kPa fazia com que a inclinação da reta fosse negativa. Assim, optou-se por retirar o ponto e fazer o ajuste utilizando somente os outros três pontos ensaiados, conforme apresentado na Figura 4.20.

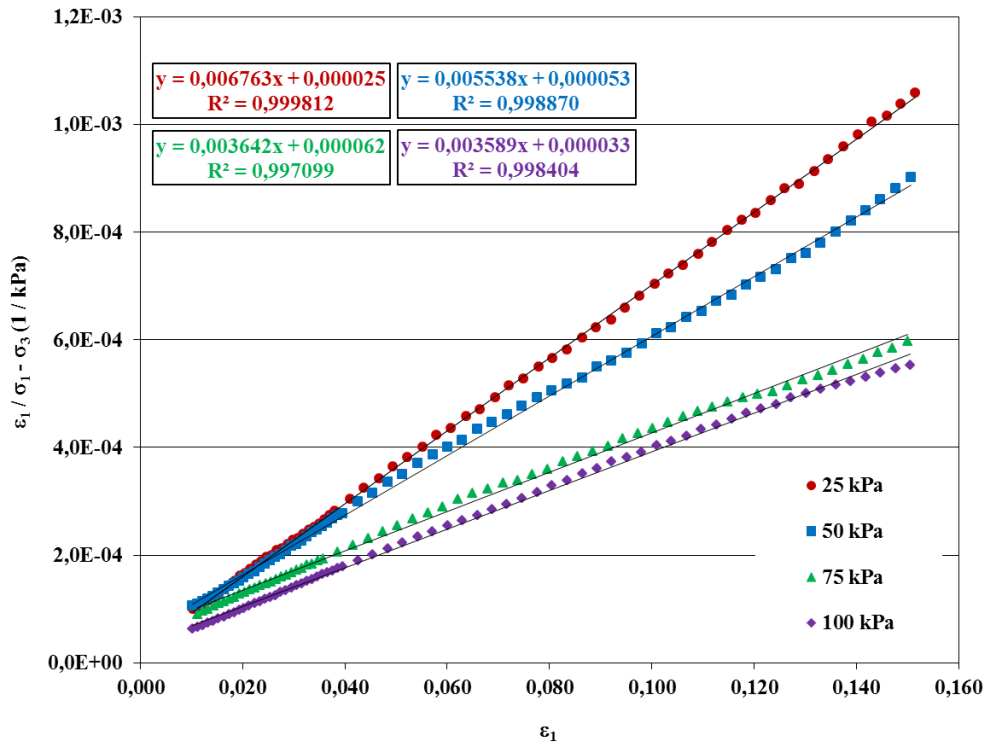


Figura 4.19 - Curvas tensão versus deformação transformadas para calibração com o ensaio CID_{nat}.

Tabela 4.10 - Parâmetros a, b e E_i para a calibração com o ensaio triaxial CID_{nat}.

σ_3 (kPa)	a (1/kPa)	b (1/kPa)	E_i (kPa)
25	0,000025	0,006763	40000,00
50	0,000053	0,005538	18867,92
75	0,000062	0,003642	16129,03
100	0,000033	0,003589	30303,03

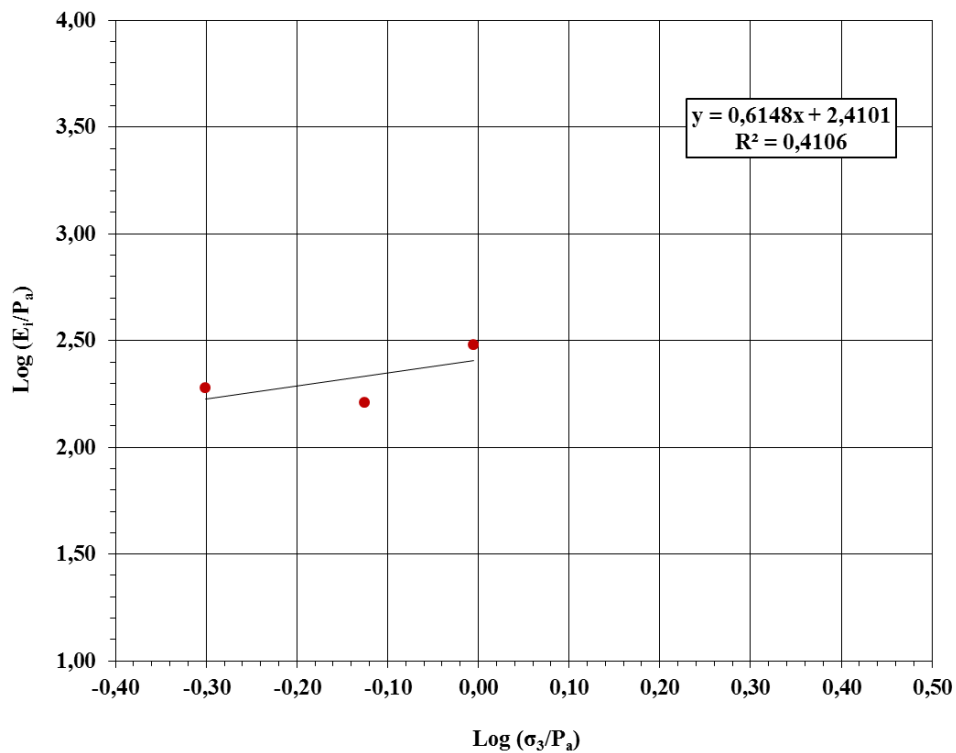


Figura 4.20 - Obtenção dos parâmetros K e n para a calibração com o ensaio CID_{nat}.

Da Figura 4.20 quando σ_3/P_a é igual a 1, obtém-se o valor de K igual a 257,10. O valor de n igual a 0,6148 corresponde à inclinação da reta.

Como já apresentado, os parâmetros de resistência obtidos foram de 31° e 24,18 kPa para o ângulo de atrito e coesão, respectivamente. O valor médio da razão de ruptura foi igual a 1,00.

Na Tabela 4.11 têm-se os parâmetros do modelo hiperbólico obtidos por meio da calibração utilizando o ensaio triaxial CID_{nat} e na Figura 4.18 encontram-se as curvas tensão desviadora versus deformação axial reconstituídas com base nos parâmetros definidos na calibração.

Como pode ser observado, o modelo conseguiu representar bem somente a curva experimental relativa ao ensaio com tensão de adensamento de 100 kPa.

Tabela 4.11 - Parâmetros obtidos por meio da calibração utilizando o ensaio triaxial CID_{nat}.

Parâmetro	K	n	R _f	c' (kPa)	φ' (°)
Valor	257,10	0,6148	1,00	24,18	31

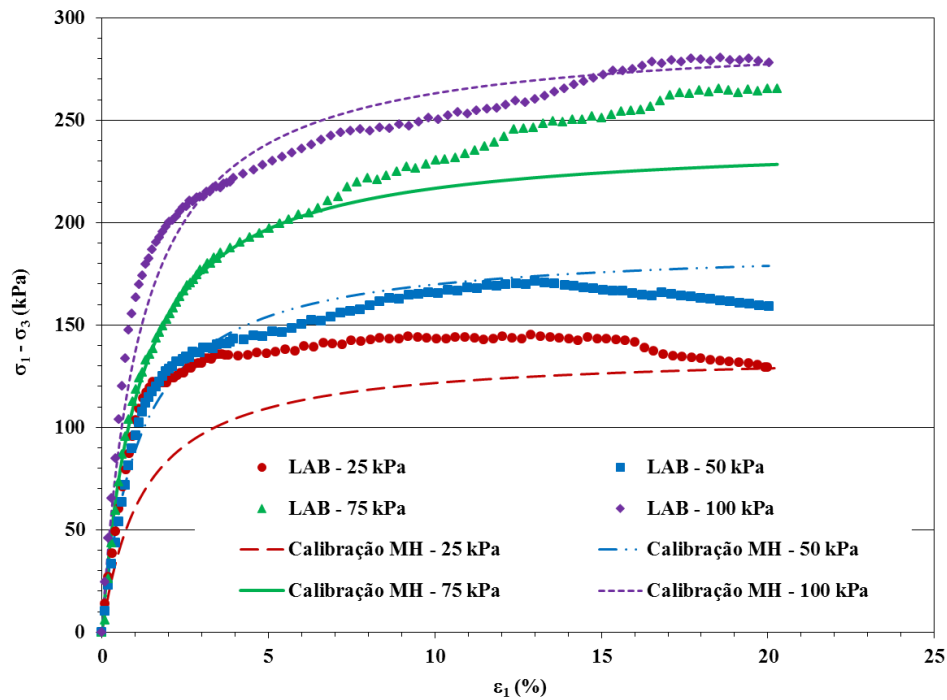


Figura 4.21 - Representação das curvas de tensão desviadora versus deformação axial pelo modelo hiperbólico calibrado com o ensaio CID_{nat}.

4.4. Análise do ensaio pressiométrico

4.4.1. Estado de tensão inicial

A primeira etapa da análise consistiu na determinação do estado de tensão in situ, uma vez que para realizar qualquer tipo de análise tensão versus deformação utilizando o programa Sigma/W é necessário inicialmente a definição do estado inicial de tensões a que o maciço está submetido.

Para isto, deve-se fornecer ao programa o peso específico do solo em seu estado natural (γ_{nat}) e o coeficiente de empuxo do solo no repouso (K_0). No caso em estudo, o coeficiente de empuxo do solo no repouso deve ser aquele que considere as características de pré-adensamento do material (K_0^{PA}). Este parâmetro é função do coeficiente de empuxo do solo no estado normalmente adensado (K_0^{NA}) e da razão de pré-adensamento do solo (OCR).

O coeficiente K_0^{NA} pode ser aproximado pela Equação 4.1 proposta por Jaky (1944).

$$K_0^{NA} = 1 - \sin \phi' \quad (4.1)$$

Considerando o ângulo de atrito obtido pelo ensaio triaxial CID_{sat} ($32,5^\circ$) tem-se que o valor de K_0^{NA} será igual a 0,46.

O coeficiente de empuxo do solo no repouso para o estado pré-adensado é calculado pela Equação 4.2 proposta por Mayne e Kulhawy (1982).

$$K_0^{PA} = K_0^{NA} \cdot OCR^{\tan \phi'} \quad (4.2)$$

A razão de pré-adensamento do solo é dada pela Equação 4.3.

$$OCR = \frac{\sigma_v'^{PA}}{\sigma_v'} \quad (4.3)$$

sendo:

$\sigma_v'^{PA}$: tensão vertical efetiva de pré-adensamento; e

σ_v' : tensão vertical devido ao peso próprio do solo atuando na profundidade ensaiada (1,5 m).

Com o valor da tensão de pré-adensamento determinada pelo ensaio de adensamento (242 kPa) e o peso específico natural do solo (16,18 kN/m³) tem-se, para 1,5 m de profundidade um valor de OCR igual a 9,97. Assim, a sobrecarga inicial que foi aliviada pelo corte do talude é dada pela Equação 4.4.

$$H = \frac{\sigma_v'^{PA}}{\gamma_{nat}} - h \quad (4.4)$$

Logo, a altura inicial correspondente ao maciço que foi escavado é de 13,96 metros.

Na Tabela 4.12 têm-se, para a profundidade ensaiada, os valores de OCR, K_0^{PA} , σ_v' , σ_h' e E_i , sendo este último parâmetro determinado utilizando a formulação de Janbu (1963) com os parâmetros K e n obtidos pela calibração tradicional e a tensão confinante igual a tensão horizontal in situ (Figura 4.22).

Tabela 4.12 - Propriedades do solo na profundidade ensaiada.

Prof. (m)	OCR	K_0^{PA}	σ_v' (kPa)	σ_h' (kPa)	E_i (kPa)
1,50	9,97	1,59	24,27	38,63	8058,83

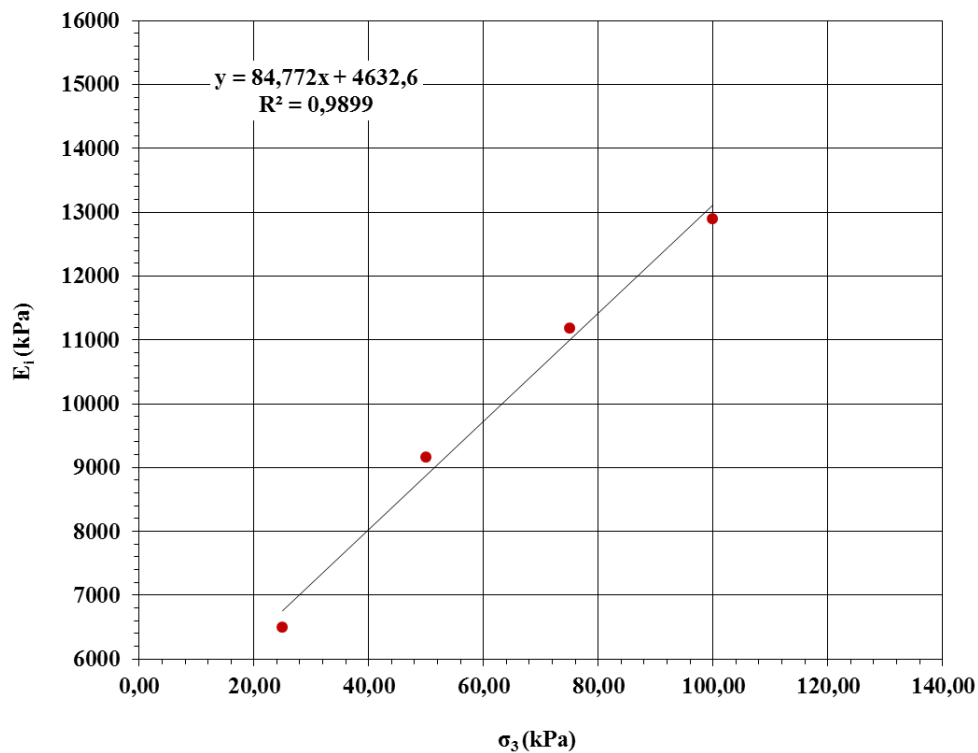


Figura 4.22 - Variação do módulo de elasticidade inicial com a tensão confinante.

Como pode ser constatado nos resultados apresentados na Tabela 4.12, com o valor de K_0^{PA} aplicado na Equação 4.5 obteve-se um valor do coeficiente de Poisson superior a 0,5, o que não condiz com o esperado, uma vez que segundo os conceitos da teoria da elasticidade o coeficiente de Poisson tem que ser maior que -1 e menor que 0,5.

$$K_0^{PA} = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (4.5)$$

Sendo assim, o coeficiente de Poisson foi determinado utilizando a Equação 2.32, onde as variações de deformação volumétrica e axial foram retiradas da reta média dos trechos iniciais das curvas de variação de volume do ensaio triaxial CID_{sat} , conforme apresentado na Figura 4.23.

O valor encontrado para o coeficiente de Poisson foi igual a 0,25. Assim, com o peso específico natural (16,179 kN/m³) e o módulo de elasticidade de 8058,83 kPa determinou-se as isocurvas de tensões iniciais utilizando o Σ/W , conforme se apresenta nas Figuras 4.24 e 4.25.

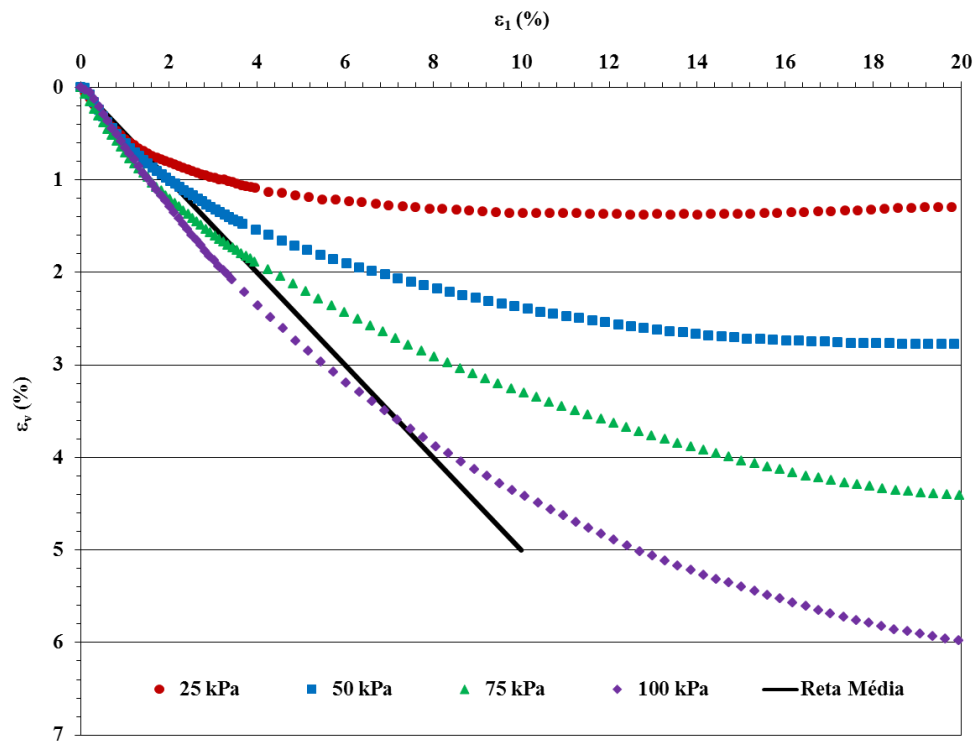


Figura 4.23 - Obtenção do coeficiente de Poisson pelas curvas de variação volumétrica.

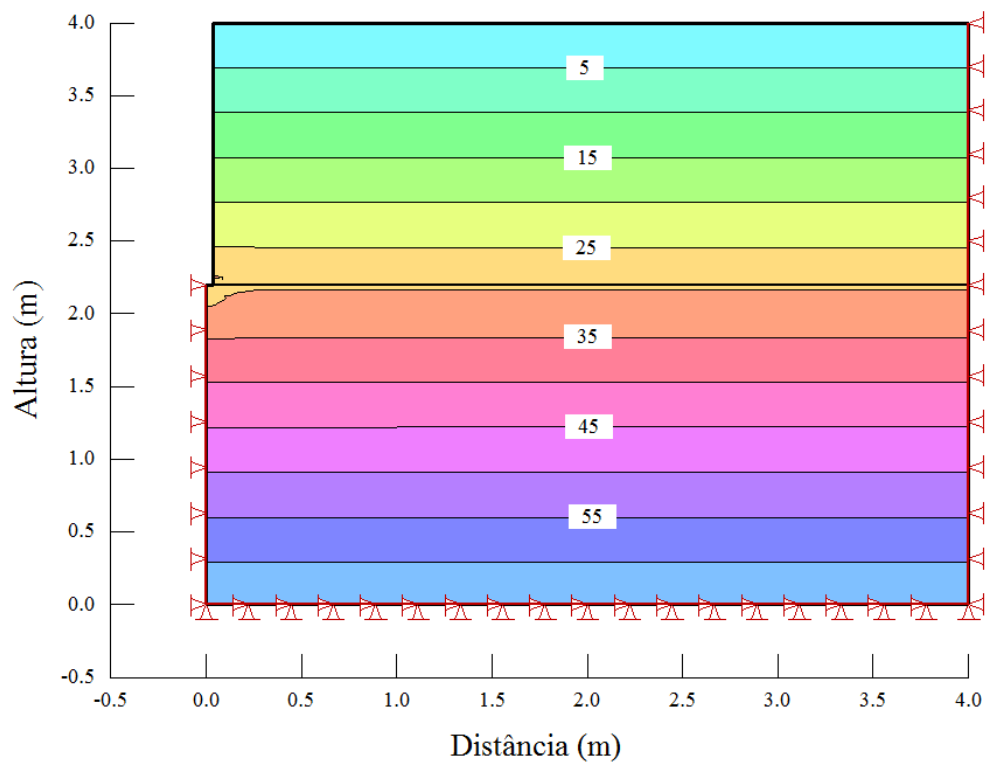


Figura 4.24 – Isóbaras de tensão vertical in situ (kPa).

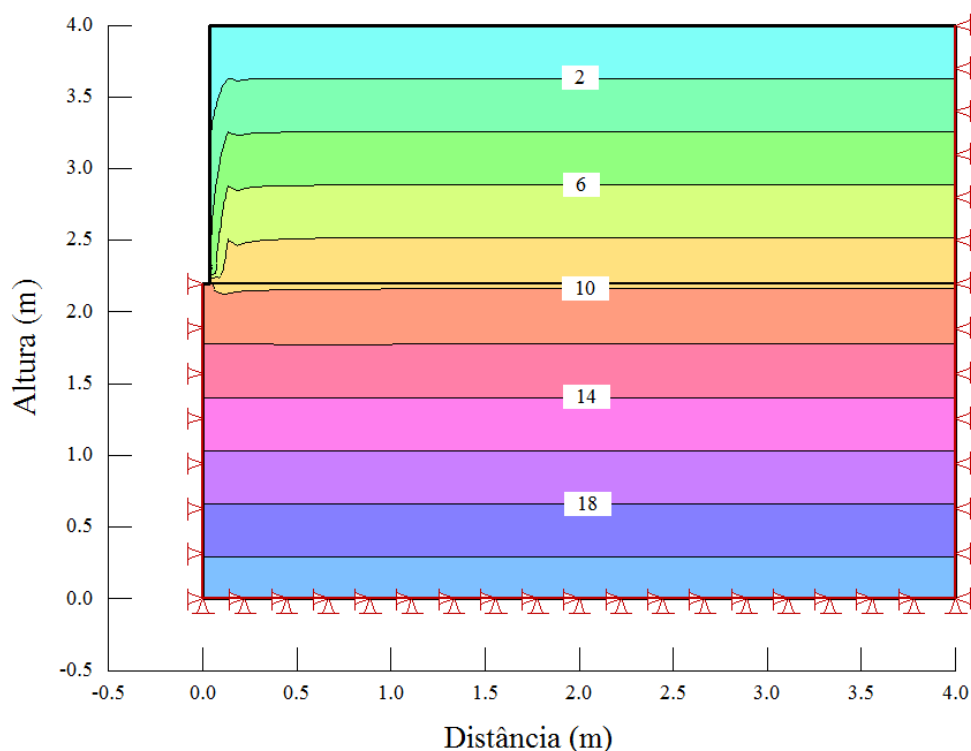


Figura 4.25 – Isóbaras de tensão horizontal in situ (kPa).

Na Tabela 4.12, obteve-se para uma profundidade correspondente a realização dos ensaios pressiométricos (1,5 m) uma tensão horizontal in situ de aproximadamente 38,63 kPa. Foi baseado nesta informação que se determinou as tensões de adensamento (25, 50, 75 e 100 kPa) aplicadas nos ensaios para determinação dos parâmetros de resistência do solo.

Como já destacado, o estado de tensão in situ foi recalculado toda vez que se analisava um novo conjunto de parâmetros no Sigma/W, portanto o cálculo realizado acima serviu como orientação para determinação das tensões de adensamento e cálculo dos módulos de elasticidade nas análises com os parâmetros calibrados, como será apresentado a seguir.

4.4.2. Curvas transformadas

Como já abordado, fez-se necessário a transformação das curvas pressiométricas para facilitar a análise do problema axissimétrico, passando a considerar os deslocamentos radiais (cm) do centro da sonda ao invés do volume injetado (cm³), como apresentado na Figura 4.26.

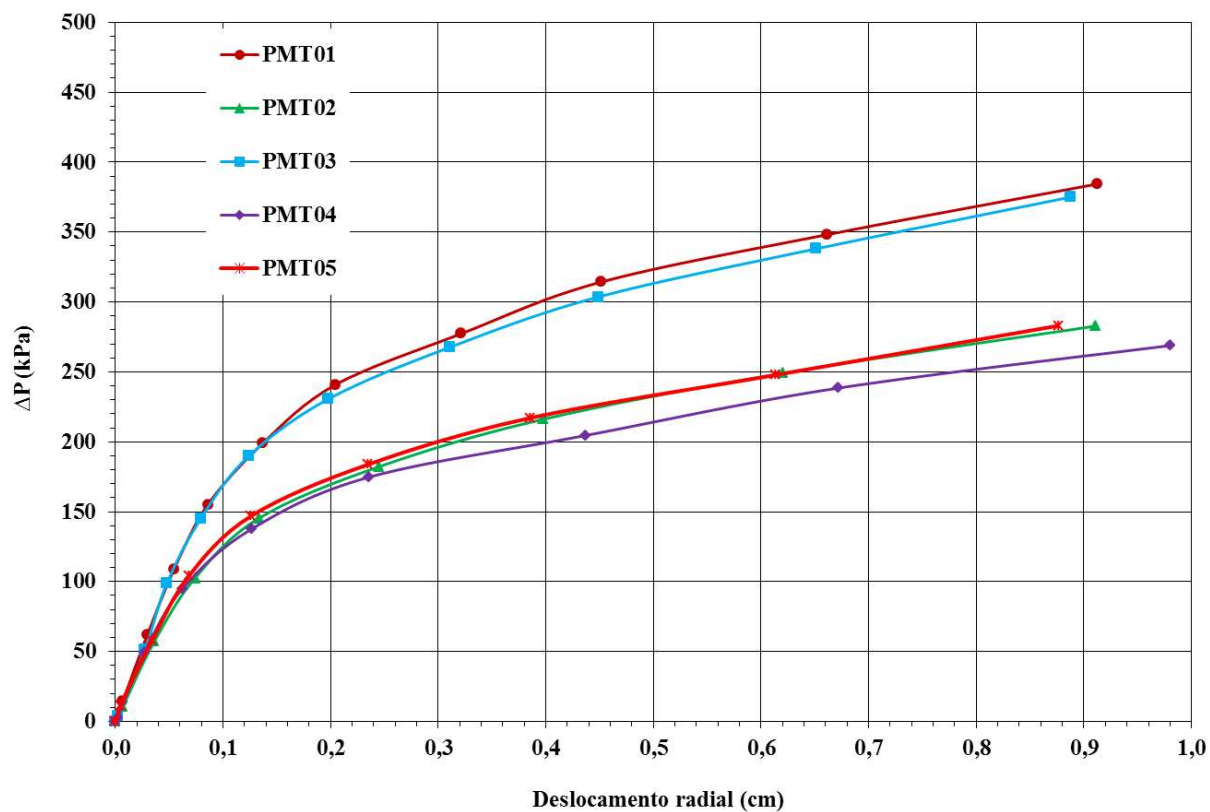


Figura 4.26 - Curvas pressiométricas transformadas.

Na Tabela 4.13 têm-se os valores de pressão e deslocamentos radiais das curvas pressiométricas corrigidas. Os valores máximos de pressão foram aplicados de forma incremental no Sigma/W e os deslocamentos obtidos são comparados, utilizando a FO pré-estabelecida, com os deslocamentos apresentados na tabela abaixo; o erro relativo entre eles é o valor da função objetivo.

Tabela 4.13 - Valores de pressão e deslocamento radial das curvas pressiométricas transformadas.

PMT01		PMT02		PMT03		PMT04		PMT05	
ΔP (kPa)	Δ_r (cm)	ΔP (kPa)	Δ_r (cm)	ΔP (kPa)	Δ_r (cm)	ΔP (kPa)	Δ_r (cm)	ΔP (kPa)	Δ_r (cm)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14,712	0,007	10,595	0,007	4,212	0,002	2,512	0,002	11,480	0,005
62,026	0,030	57,072	0,036	51,257	0,027	49,530	0,027	57,987	0,034
109,053	0,055	102,473	0,074	98,824	0,048	95,204	0,063	103,928	0,068
155,259	0,086	145,269	0,133	145,030	0,079	137,481	0,126	146,896	0,126
199,053	0,137	182,146	0,245	189,627	0,124	174,668	0,235	183,799	0,235
240,877	0,205	216,186	0,398	230,636	0,198	204,488	0,436	217,079	0,386
277,391	0,321	249,109	0,620	267,583	0,311	238,396	0,671	247,817	0,613
314,245	0,451	282,774	0,911	303,558	0,448	268,879	0,980	283,057	0,876
348,226	0,661			338,079	0,651				
384,454	0,912			375,131	0,888				

4.4.3. Análise preliminar

A busca por um conjunto de parâmetros que, após a comparação com a curva pressiométrica a ser retroanalisada, apresentasse um erro relativo da FO inferior a 15% serviu de diretriz para a análise inversa.

Com esse conjunto de parâmetros aplicou-se uma taxa de variação de $\pm 10\%$ criando assim o intervalo de valores (Tabela 4.14) para aplicação do procedimento genético.

Tabela 4.14 - Conjunto de parâmetros para aplicação do algoritmo genético.

Conjunto	E_i (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)	R_f	v
Superior	9900	22,00	28,05	1,00	0,28
Preliminar	9000	20,00	25,50	0,95	0,25
Inferior	8100	18,00	22,95	0,86	0,23

Pode se observar da tabela anterior que o limite superior da razão de ruptura (R_f) se apresenta com um valor inferior ao calculado (1,05). Isso se deve ao fato do Sigma/W considerar R_f igual a 1 como limite superior, ou seja, o programa considera que a tensão desviadora última será no máximo igual a resistência do solo.

4.4.4. Procedimento genético

As populações genéticas foram compostas pelas populações iniciais variáveis (10, 20 e 40 indivíduos), principais (5), descendentes (20) e intermediária (25) ao longo de todo o procedimento.

4.4.4.1. População inicial com 10 indivíduos

Com a faixa de valores definidas e mantendo-se os indivíduos extremos, obteve-se mais 8 indivíduos dividindo os intervalos em partes iguais para formação da população inicial.

A análise numérica da população inicial levou a obtenção de um indivíduo com um erro mínimo de 7,45% (Geração 0), maior que o obtido pelo indivíduo preliminar (Figura 4.27).

Na 1ª geração obteve-se um indivíduo com um erro de 4,26% e este permaneceu como sendo o mais adaptado até a 5ª geração, quando se obteve um indivíduo com um erro mínimo de 3,96%.

Nas Tabelas 4.15 e 4.16 pode ser observado que os parâmetros que mais variaram ao longo do processo foram o módulo de elasticidade inicial e a coesão, ambos com uma redução de 9,45% e 5,85%, respectivamente.

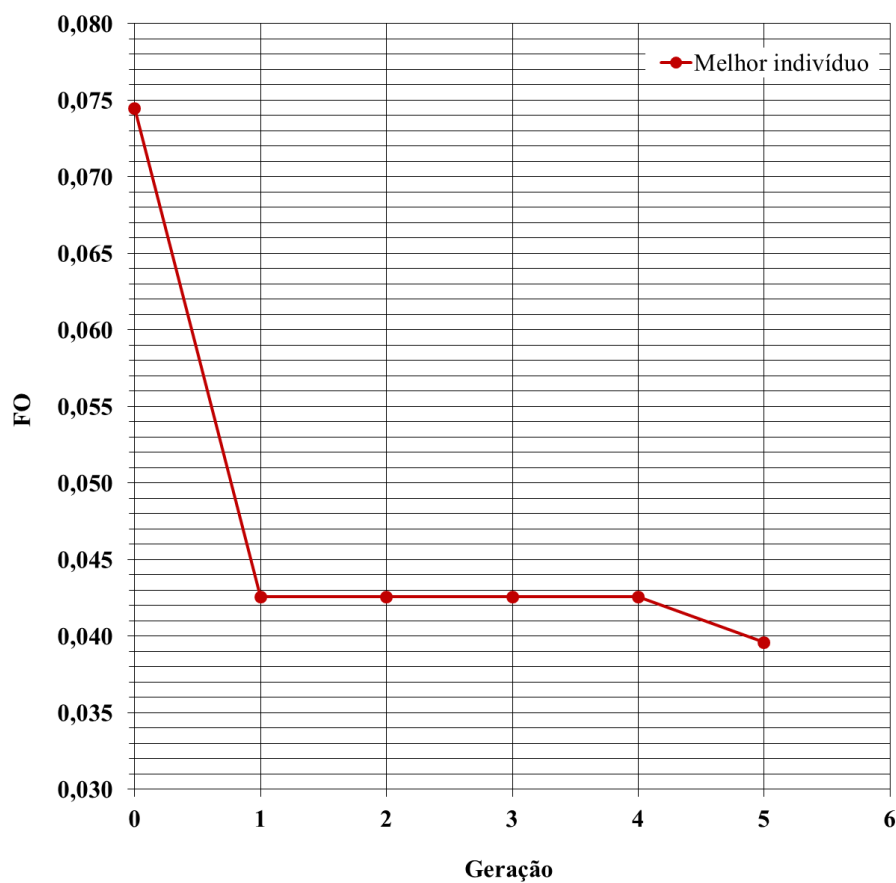


Figura 4.27 - Convergência do procedimento genético para a população inicial de 10 indivíduos.

Tabela 4.15 - Parâmetros dos melhores indivíduos para população inicial com 10 indivíduos.

Geração	E_i (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	R_f	v	FO
Preliminar	9000,00	20,00	25,50	0,95	0,25	0,0591
0	8900,00	19,78	25,22	0,92	0,25	0,0745
1	8263,95	18,98	26,63	0,96	0,26	0,0426
2	8263,95	18,98	26,63	0,96	0,26	0,0426
3	8263,95	18,98	26,63	0,96	0,26	0,0426
4	8263,95	18,98	26,63	0,96	0,26	0,0426
5	8222,96	18,90	26,83	0,97	0,26	0,0396

Tabela 4.16 - Taxa de variação dos parâmetros do indivíduo preliminar para população inicial de 10 indivíduos.

ΔE_i (%)	$\Delta c'$ (%)	$\Delta \phi'$ (%)	ΔR_f (/)	Δv (%)
-9,45	-5,82	4,96	2,06	3,85

4.4.4.2. População inicial com 20 indivíduos

Com uma população inicial de 20 indivíduos o procedimento convergiu praticamente durante todo o processo conforme pode ser visualizado na Figura 4.28.

Além disso, percebeu-se claramente a melhora na convergência do problema quando se compara com o procedimento anterior; o que era de se esperar uma vez que se refinou o espaço de busca com o aumento da população.

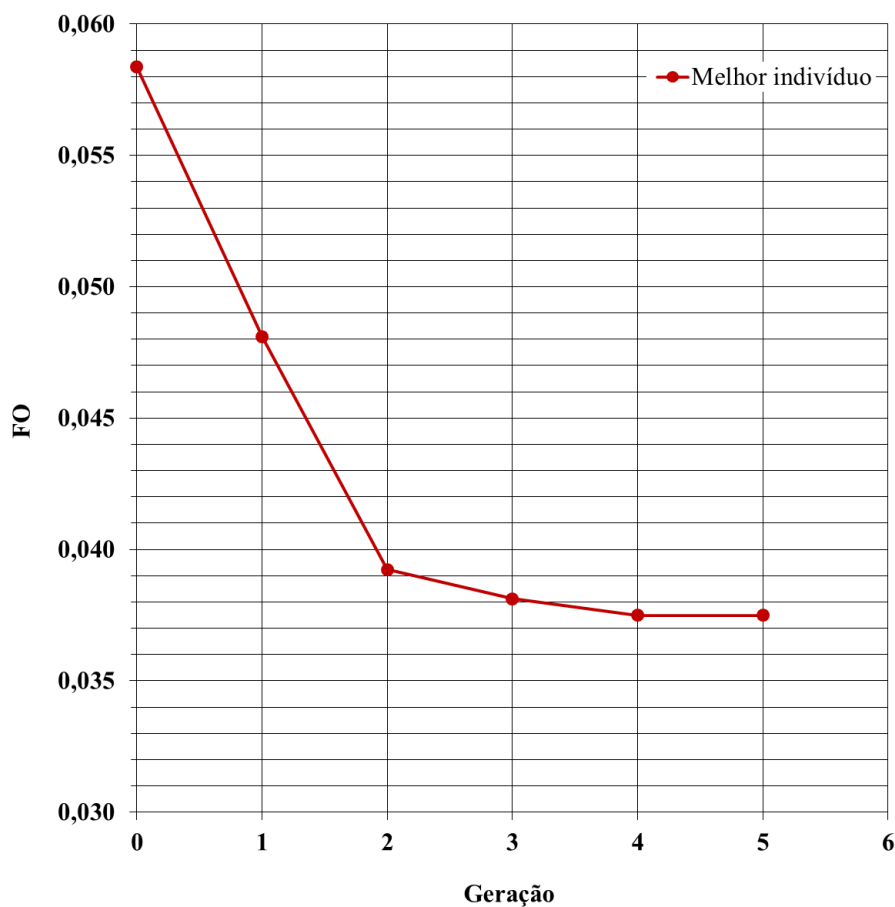


Figura 4.28 - Convergência do procedimento genético para a população inicial de 20 indivíduos.

Como pode ser notado nas Tabelas 4.17 e 4.18 os parâmetros que mais variaram, quando se compara o indivíduo preliminar com o mais adaptado obtido pelo procedimento, foram o coeficiente de Poisson e a coesão.

Tabela 4.17 - Parâmetros dos melhores indivíduos para população inicial com 20 indivíduos.

Geração	E_i (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	R_f	ν	FO
Preliminar	9000,00	20,00	25,50	0,95	0,25	0,0591
0	8857,89	19,68	25,10	0,92	0,25	0,0584
1	8668,42	19,26	24,56	0,90	0,26	0,0481
2	8621,05	19,16	24,43	0,90	0,28	0,0392
3	8561,84	19,03	24,26	0,89	0,28	0,0381
4	8650,66	18,80	24,51	0,90	0,28	0,0375
5	8650,66	18,80	24,51	0,90	0,28	0,0375

Tabela 4.18 - Taxa de variação dos parâmetros do indivíduo preliminar para população inicial de 20 indivíduos.

ΔE_i (%)	$\Delta c'$ (%)	$\Delta \phi'$ (%)	ΔR_f (/)	$\Delta \nu$ (%)
-4,04	-6,38	-4,04	-5,56	10,71

4.4.4.3. População inicial com 40 indivíduos

Com a divisão da faixa de valores para obter 40 indivíduos observou-se que houve convergência ao longo de aproximadamente todo o processo (Figura 4.29).

O indivíduo com um menor erro da FO (4%) foi obtido na 4ª geração, sendo este valor superior ao encontrado com populações iniciais inferiores; o que não condiz com o esperado.

No entanto, este fato pode ser justificado pela forma como fora dividido o intervalo para determinação das populações iniciais. Com os valores extremos fixados, a divisão dentro deste intervalo levava a obtenção de indivíduos distintos. Assim, indivíduos presentes numa população inicial menor não estariam em uma maior. Este fato aliado à mutação possibilita a perda de indivíduos capazes de apresentar resultados satisfatórios no início do processo, porém com o aumento das gerações os procedimentos com maiores populações iniciais tendem a obter melhores resultados como será discutido adiante.

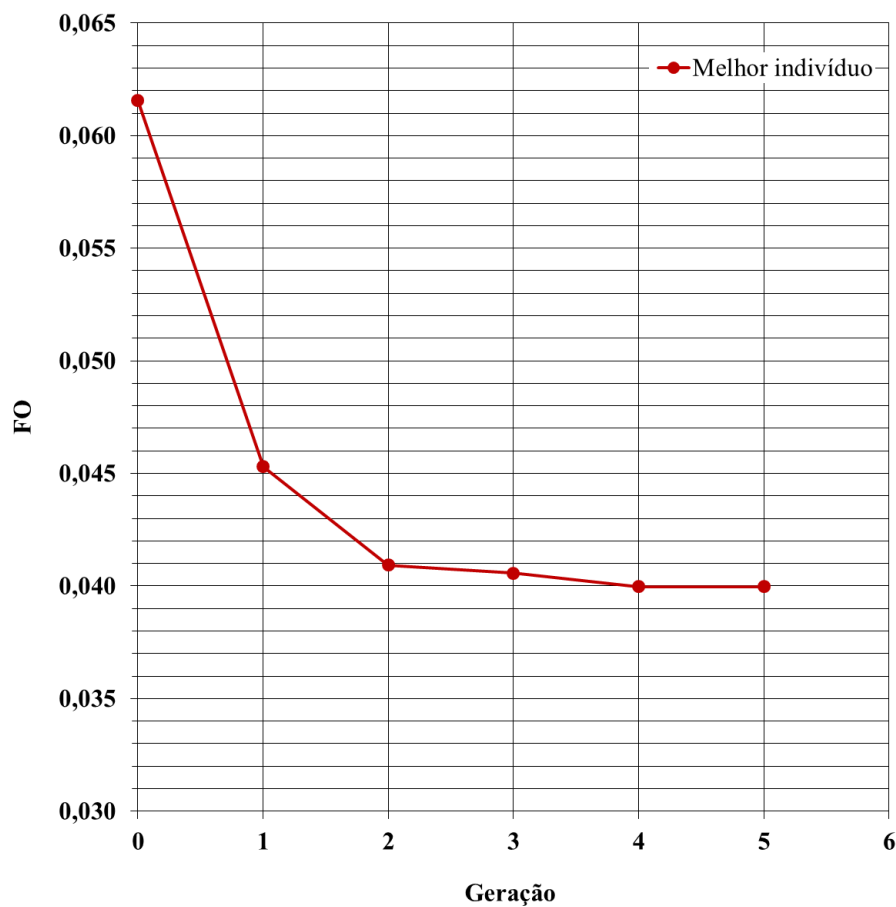


Figura 4.29 - Convergência do procedimento genético para a população inicial de 40 indivíduos.

Assim como no procedimento anterior, o parâmetro que mais variou foi o coeficiente de Poisson (Tabela 4.19), com um aumento também de 10,71%, como pode ser visto na Tabela 4.20.

Como pode ser observado nos procedimentos acima, os cálculos foram fortemente afetados pela variação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Fato diferente ao observado por Zentar et al. (2001), que destacou a pouca influência da variação do coeficiente de Poisson nos cálculos.

Tabela 4.19 - Parâmetros dos melhores indivíduos para população inicial com 40 indivíduos.

Geração	E_i (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	R_f	v	FO
Preliminar	9000,00	20,00	25,50	0,95	0,25	0,0591
0	8792,31	19,54	24,91	0,91	0,24	0,0616
1	8861,54	19,69	24,64	0,92	0,27	0,0453
2	8850,00	19,60	24,38	0,92	0,28	0,0409
3	8861,54	19,69	24,41	0,92	0,28	0,0406
4	8806,73	19,57	24,26	0,91	0,28	0,0400
5	8806,73	19,57	24,26	0,91	0,28	0,0400

Tabela 4.20 - Taxa de variação dos parâmetros do indivíduo preliminar para população inicial de 40 indivíduos.

ΔE_i (%)	$\Delta c'$ (%)	$\Delta \phi'$ (%)	ΔR_f (/)	Δv (%)
-2,19	-2,20	-5,11	-4,40	10,71

4.4.4.4. Comparações

Na Figura 4.30 apresentam-se plotados os resultados dos valores mínimos da FO para todas as populações iniciais consideradas. Pode-se verificar que até a geração estudada (5ª) o aumento da população inicial não apresentou uma relação inversa com o valor da FO, ou seja, não se obteve um menor valor da função objetivo para o procedimento com maior número de indivíduos na população inicial.

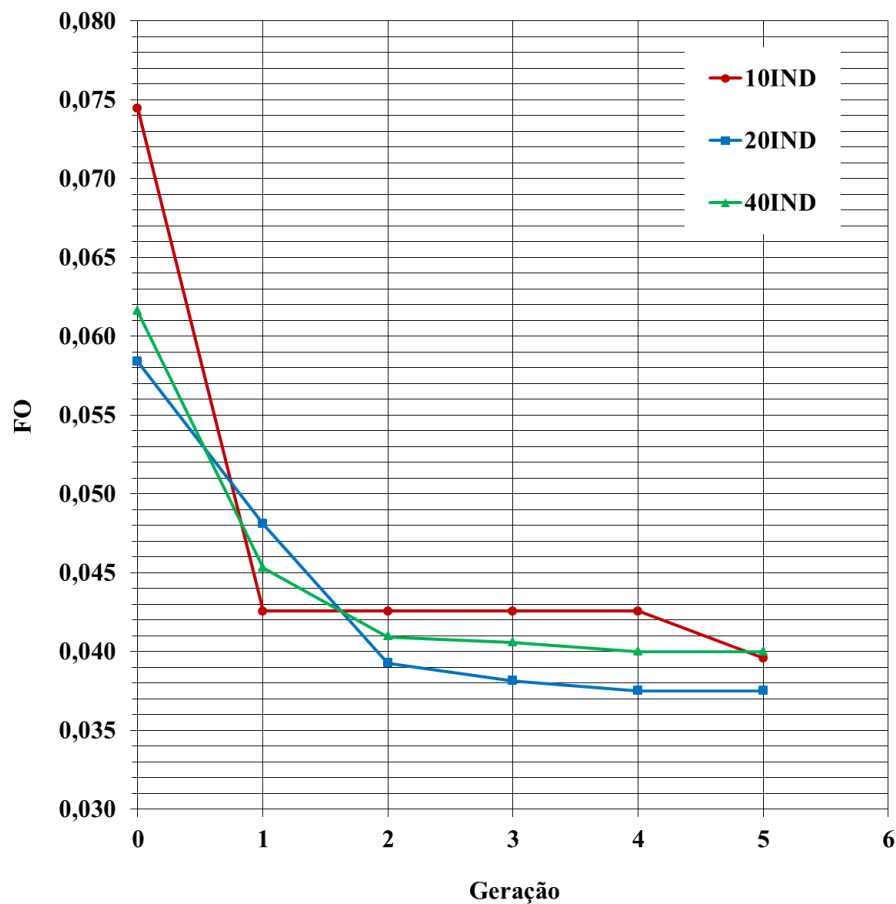


Figura 4.30 - Convergência do algoritmo genético variando o tamanho da população inicial.

O fato descrito anteriormente também foi verificado em Heleno (2011) que, partindo de populações iniciais compostas de 10, 20 e 40 indivíduos gerados aleatoriamente dentro de um intervalo pré-estabelecido, apresentou comportamento similar na 5ª geração de um procedimento genético para retroanalisar uma prova de carga em uma sapata rígida.

No entanto, por ter um algoritmo genético implementado em um programa de elementos finitos (ANINVEC), Heleno (2011) realizou elevado número de gerações (30 em média) para cada população inicial considerada e ao fim do procedimento foram obtidos valores mínimos da FO inversamente proporcionais ao tamanho da população inicial, como o esperado.

Portanto, com base nas constatações anteriores pode-se dizer que a busca por um indivíduo preliminar facilitou e muito a convergência para valores inferiores a 5% com apenas 5 gerações, o que dificilmente teria acontecido caso o ponto de partida apresentasse erros superiores aos pré-estabelecidos (15%).

Além disso, pode-se dizer que a obtenção de menores valores da FO podem ser obtidos aumentando-se o número de gerações até aqui realizadas, o que possivelmente levará também a obtenção de uma relação inversa entre a população inicial e o valor de FO; porém o tempo despendido nas análises pode não compensar a melhora que se venha a ter, uma vez que já se obteve um conjunto de parâmetros que conseguiu representar muito bem a curva pressiométrica do ensaio PMT01.

Com base nas informações já apresentadas pode-se plotar a curva pressiométrica dos ensaios PMT01 e PMT03 com a curva hiperbólica (Figura 4.31) gerada pelo conjunto de parâmetros do indivíduo de menor valor da FO obtido no procedimento genético, e como observado o modelo representou muito bem os dois ensaios pressiométricos realizados.

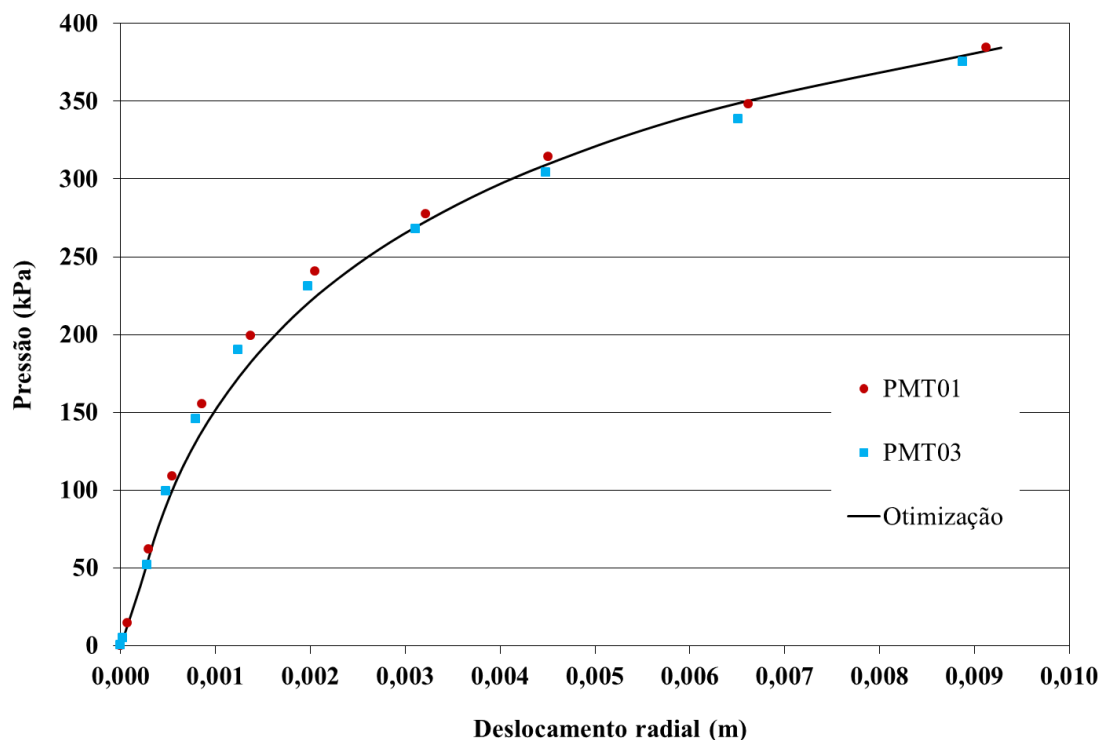


Figura 4.31 - Comparação das curvas pressiométricas PMT01 e PMT03 com a curva hiperbólica gerada pelos parâmetros otimizados.

Na Figura 4.32 têm-se representado as curvas obtidas com os parâmetros determinados pelas calibrações do modelo com os ensaios triaxiais CID_{sat} (tradicional) e CID_{nat} . Além disso, tomou-se a calibração tradicional e alteraram-se os parâmetros de resistência utilizando os valores obtidos pelos ensaios com o solo na condição natural (CID_{nat} e cisalhamento direto – CD). Os resultados foram comparados com a otimização e o ensaio PMT01, analisando

também a influência da utilização dos módulos de elasticidade inicial (E_i) constante (como realizado nas análises) ou variável segundo a formulação proposta por Janbu (1963).

Pode-se observar que a curva otimizada encontra-se, no geral, entre a calibração tradicional e a calibração utilizando o ensaio CID_{nat} . A diferença entre a calibração tradicional e as curvas utilizando os parâmetros de resistência na condição natural consiste basicamente na influência da coesão, uma vez que baseado na Equação 2.26 proposta por Duncan e Chang (1970) e com valores aproximadamente iguais de ângulo de atrito, a presença da coesão no denominador da equação faz com que o aumento deste parâmetro leve a obtenção de maiores valores de módulo de elasticidade tangente; obtendo assim menores deslocamentos.

Quanto às comparações das curvas utilizando o módulo de elasticidade inicial constante ou variável, percebeu-se que em média o erro entre elas foi de 6%. Quando comparadas com o ensaio PMT01 pode-se verificar que considerar ou não a variação de E_i leva a um erro de apenas 1%, validando assim o procedimento genético realizado que considerou E_i constante.

Este fato também pode ser justificado pela expressão do módulo de elasticidade tangente (Equação 2.26), pois independentemente da consideração, a parcela que multiplica o E_i apresentará o mesmo comportamento durante a aplicação da carga, assim o que mudará será o módulo de elasticidade inicial, que será menor para E_i variável até que o incremento de tensão aplicado supere a tensão horizontal in situ (38,63); utilizada para calcular os módulos de elasticidade inicial nas análises com E_i constante.

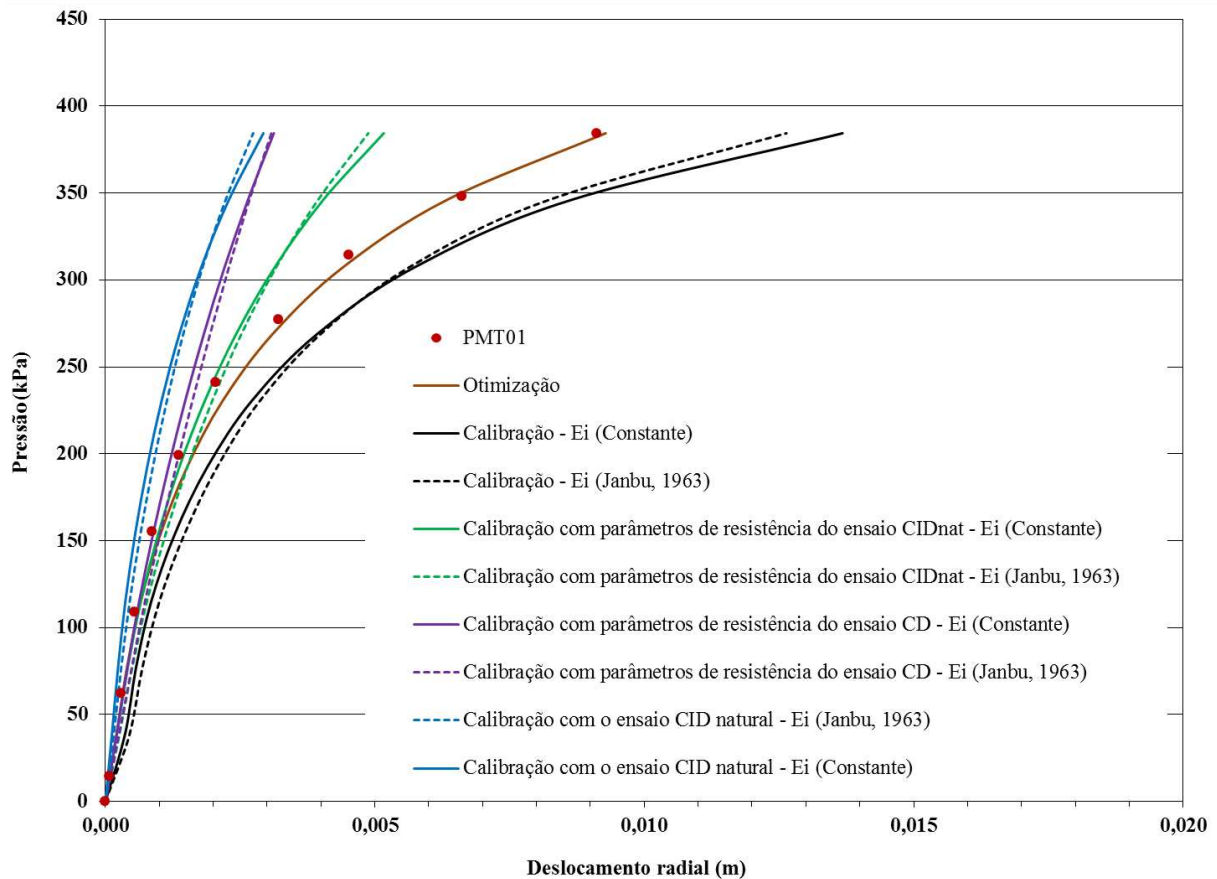


Figura 4.32 - Comparação entre as curvas do ensaio PMT01 e diferentes métodos de calibração.

Na Tabela 4.21 tem-se um resumo dos parâmetros obtidos com as calibrações utilizando os ensaios triaxiais. Pode-se observar que a determinação de uma faixa de valores para início do procedimento genético poderia ter sido muito bem definida considerando os valores máximos e mínimos obtidos para o E_i (Figura 4.33) e c' , pela aplicação de uma taxa de variação de $\pm 10\%$ nos parâmetros R_f e ν para os menores valores obtidos pelas calibrações e pela consideração de uma faixa de variação típica para o ângulo atrito dos solos (20 a 45°, por exemplo).

Sendo assim, com a faixa de valores considerada tem-se a delimitação de um espaço de busca promissor para o procedimento genético desde que se utilize um algoritmo genético implementado em um programa de elementos finitos, pois a obtenção de resultados satisfatórios demandará um número de gerações superior ao realizado neste trabalho.

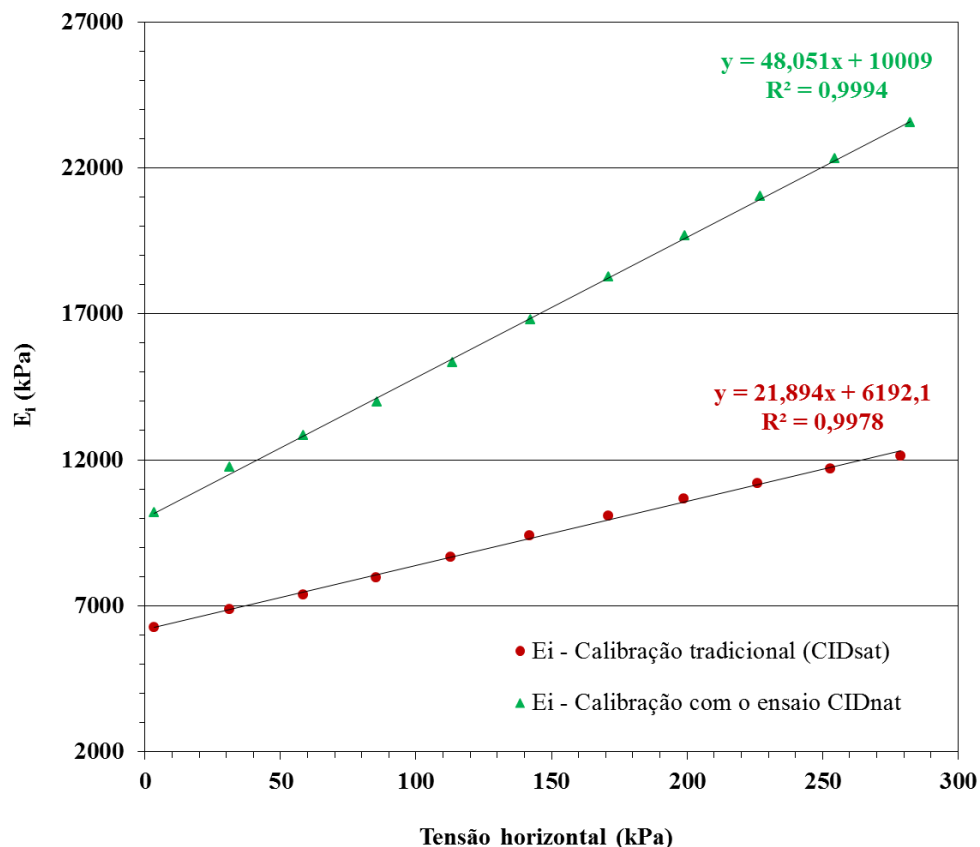


Figura 4.33 - Variação do módulo de elasticidade inicial nas análises utilizando os parâmetros obtidos nas calibrações com os ensaios triaxiais.

Tabela 4.21 - Parâmetros obtidos pelas calibrações (CID_{sat} e CID_{nat}) e pela otimização.

Conjunto	E_i (kPa)		c' (kPa)	ϕ' (°)	R_f	ν
Calibração tradicional	Máx	12135,11	4,99	32,51	0,99	0,25
	Mín	6268,81				
Otimização	8650,66		18,80	24,51	0,90	0,28
Calibração com o ensaio CID_{nat}	Máx	23514,03	24,18	31,00	1,00	0,25
	Mín	10177,36				

4.4.4.5. Resultados da análise do ensaio pressiométrico com os parâmetros otimizados

Utilizando o conjunto de parâmetros otimizados foi possível gerar no programa Sigma/W as isocurvas de deslocamento horizontal e vertical, e as isóbaras de tensões horizontais e

verticais correspondentes ao último estágio de aplicação da carga pressiométrica na região detalhada na Figura 4.34.

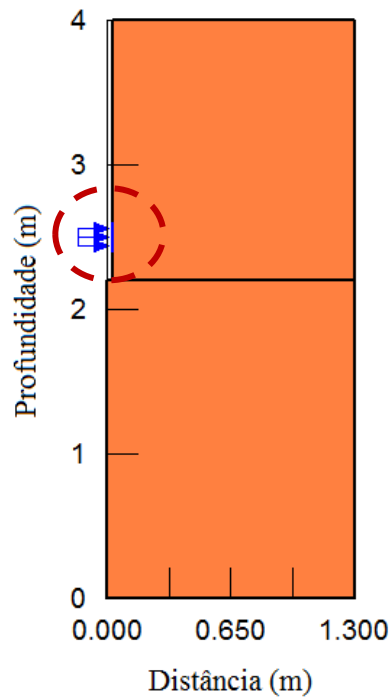


Figura 4.34 - Região estudada no Sigma/W.

Nas isocurvas de deslocamento horizontal (Figura 4.35), verifica-se que o deslocamento máximo ocorre ao longo de aproximadamente toda a superfície de aplicação da carga e que a partir de 7 cm de distância os deslocamentos horizontais se tornam praticamente nulos.

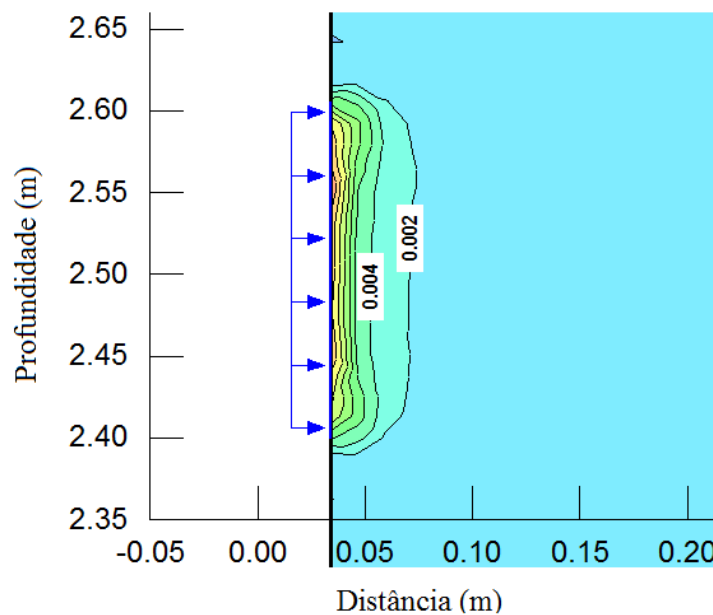


Figura 4.35 - Isocurvas de deslocamentos horizontais ao final da aplicação da carga pressiométrica, em metros.

Nas isocurvas de deslocamentos verticais (Figura 4.36) observa-se que os deslocamentos máximos se concentram nos bordos de aplicação da carga pressiométrica. Estes deslocamentos foram positivos (para baixo) na parte inferior e negativos (para cima) na parte superior, o que era de se esperar, uma vez que o pressiômetro funciona como uma sapata flexível.

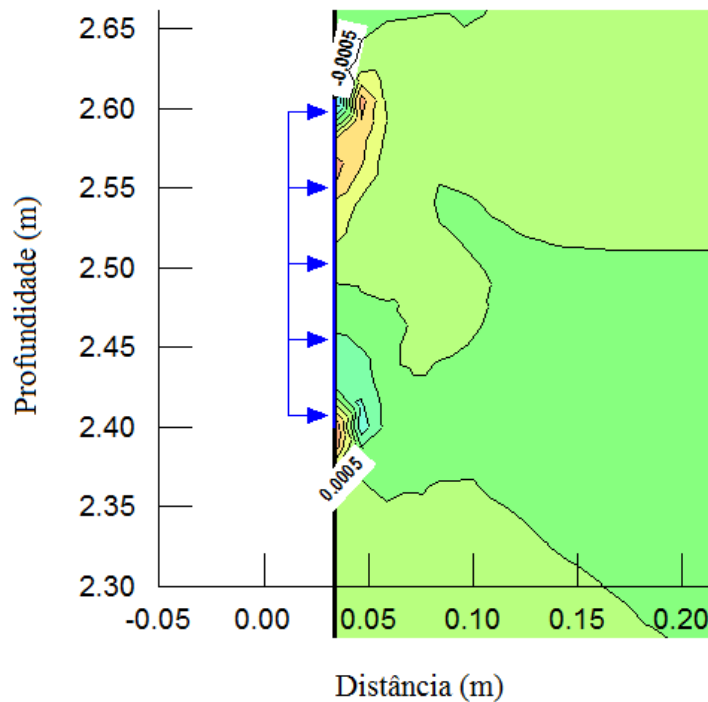


Figura 4.36 - Isocurvas de deslocamentos verticais ao final da aplicação da carga pressiométrica, em metros.

Na Figura 4.37 nota-se que a tensão horizontal é cerca de 10% da tensão aplicada a uma distância de aproximadamente 12 cm. Nos bulbos de tensão, habitualmente encontrados na literatura (Poulos e Davis, 1974) e obtidos com elasticidade linear, isso só ocorre a uma distância correspondente a cerca de duas vezes a altura da célula central. Esta diferença talvez possa ser atribuída ao fato de se ter um problema axissimétrico e não de deformação plana.

Na Figura 4.38 têm-se as isóbaras de tensões verticais, podendo-se observar uma concentração de tensões verticais nas extremidades da área de aplicação da carga pressiométrica, coincidentes com os máximos valores de deformações observados na Figura 4.36, como se esperava.

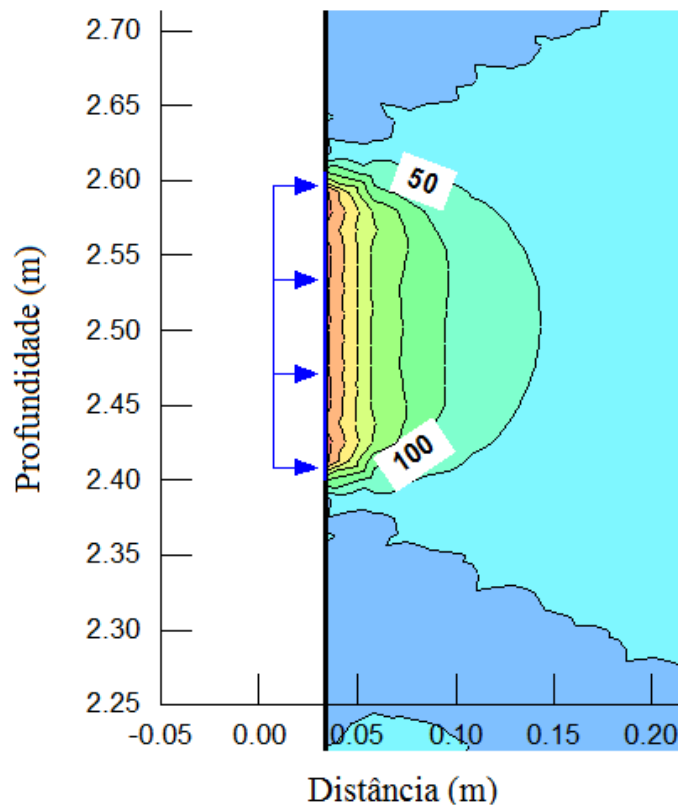


Figura 4.37 - Isóbaras de tensões horizontais ao final da aplicação da carga pressiométrica, valores em kPa.

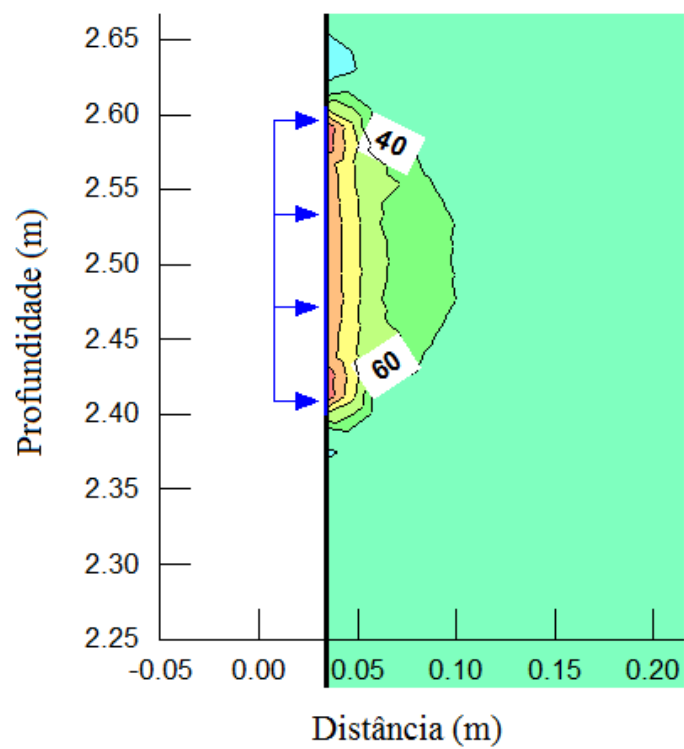


Figura 4.38 - Isóbaras de tensões verticais ao final da aplicação da carga pressiométrica, valores em kPa.

Conclusões e Sugestões

5.1. Conclusões

Os ensaios pressiométricos apresentaram resultados satisfatórios e condizentes com o esperado para a área de estudo. No entanto, observou-se que para se obter uma melhor definição do trecho inicial das curvas pressiométricas deveriam ter sido aplicados menores incrementos de pressão, uma vez que os pontos iniciais influenciam diretamente na determinação de P_0 . Devido a ausência de pontos neste trecho, a reta a da curva de fluência pode ter ficado menos inclinada, o que levou a interceptar a reta b em valores de pressão superestimados.

Como P_0 está diretamente relacionado com a tensão horizontal no repouso (σ_{h0}), pode-se observar que, para o ensaio PMT01 estudado, obteve-se 52 kPa e 38,63 kPa para P_0 e para a tensão horizontal in situ, respectivamente. Diferentemente ao observado neste trabalho, segundo Araujo (2001), na prática, verifica-se que a tensão horizontal no repouso é um pouco maior que P_0 estimada nos ensaios com pré-furo devido às perturbações causadas durante a

execução do furo e da instalação da sonda pressiométrica. No entanto, esta constatação não prejudicou a configuração da curva transformada do ensaio PMT01, uma vez que a redução de P_0 e V_0 para valores próximos a σ_{h0} e volume relativo a este ponto, leva a erros da ordem de 1% e 3,5% para o deslocamento radial e pressão final, respectivamente.

O solo residual estudado, classificado pelo Sistema Unificado como um silte de alta compressibilidade (CH) apresentou resultados satisfatórios nos ensaios de laboratório. Nos ensaios para determinação dos parâmetros de resistência obteve-se praticamente o mesmo valor de ângulo de atrito e a coesão variou conforme a umidade dos CPs ao longo de todos os ensaios. No ensaio de adensamento para determinação dos parâmetros de compressibilidade obteve-se uma boa representação da variação do índice de vazios do solo com a tensão aplicada, o que levou a uma boa definição das tensões de pré-adensamento do solo pelos métodos usualmente empregados (Pacheco Silva e Casagrande).

A calibração do modelo hiperbólico foi feita utilizando os resultados dos ensaios triaxiais CID_{sat} e CID_{nat} . Pode-se perceber que a pequena diferença entre as tensões de confinamento fez com que houvesse dificuldades na determinação dos parâmetros a e b diretamente das curvas transformadas de tensão versus deformação; principalmente na calibração com o ensaio CID_{sat} . Para minimizar esse problema poderia ter sido realizado um ensaio com tensão de confinamento de 200 kPa ao invés da tensão de 75 kPa, por exemplo. Os parâmetros obtidos pelas calibrações não foram capazes de reconstituir satisfatoriamente bem as curvas de tensão desviadora versus deformação axial de ambos os ensaios e a curva de variação de volume do ensaio CID_{sat} .

A análise do estado de tensão in situ mostrou que, para o valor da tensão de pré-adensamento obtida e pelo peso específico do solo, a altura correspondente ao maciço escavado foi de aproximadamente 14 metros. Como os valores do coeficiente de Poisson apresentaram-se maiores que o limite superior aceitável ($-1 < \nu < 0,5$) até a profundidade de 4 metros, optou-se por determiná-lo diretamente das curvas de variação volumétrica do ensaio triaxial CID_{sat} ; obtendo um valor médio igual a 0,25. Com o estudo obteve-se na profundidade ensaiada um valor de K_0^{PA} superior a 1, o que levou a determinação de uma tensão horizontal in situ de 38,63 kPa; que foi utilizada para definir as tensões de confinamento aplicadas nos ensaios de laboratório e no cálculo dos módulos de elasticidade inicial.

O procedimento genético que se mostrou eficiente na retroanálise da curva pressiométrica PMT01, cujo erro entre os dados experimentais e numéricos foi de apenas 3,75%, teve as seguintes características:

- população inicial de 10, 20 ou 40 indivíduos;
- população principal igual a 5 indivíduos;
- população de descendentes igual a 20 indivíduos;
- população intermediária igual a 25 indivíduos;
- recombinação do tipo crossover BLX- α , com α igual a 0,5; e
- mutação do tipo uniforme, com taxa igual a 10%.

Como não se dispunha de um algoritmo genético implementado em um programa de elementos finitos, fez-se necessário delimitar um conjunto de parâmetros preliminares, com um erro menor que 15%, para servir de diretriz para o procedimento genético. Pode-se concluir que o conjunto preliminar, determinado de forma a restringir altos valores de FO na população inicial, contribuiu satisfatoriamente para convergência do problema, uma vez que com apenas 5 gerações (totalizando cerca de 400 análises no Sigma/W) foi possível obter um erro de 3,75%. No entanto, este erro foi obtido para uma população inicial de 20 indivíduos, o que pode ser explicado pelo fato desta população ter apresentado o menor valor de FO no início do procedimento genético (Geração 0), o que contribuiu para a melhoria da convergência. Pode-se observar que a diferença entre os melhores indivíduos obtidos nos procedimentos com populações iniciais variáveis foi de apenas 0,25%, assim pode-se concluir com base em trabalhos correlatos que uma nítida correlação entre o tamanho da população e o valor da FO só será possível de ser obtida após um número considerável de gerações; o que seria inviável de se fazer neste trabalho.

As calibrações realizadas com os ensaios triaxiais CID_{sat} (tradicional) e CID_{nat} não representaram bem a curva pressiométrica. No entanto, pode-se mostrar que os pontos experimentais do ensaio PMT01 se encontram exatamente entre a calibração tradicional e as curvas calibradas seja pelo ensaio triaxial CID_{nat} ou pela calibração tradicional com os parâmetros do ensaio de cisalhamento direto (CD). Este fato pode ser um indicativo de que uma faixa de valores para criação de um espaço de busca menos subjetivo pode ser determinado utilizando estas calibrações.

Sendo assim, com a realização de um ensaio triaxial CID_{sat} e um triaxial CID_{nat} ou cisalhamento direto natural pode-se obter um espaço de busca promissor.

Com base nas constatações desta dissertação propõem-se o seguinte procedimento para determinação do espaço de busca:

- parâmetros E_i (ou k e n) e c' delimitados pelos valores máximos e mínimos obtidos pelas calibrações com os ensaios triaxiais;
- parâmetros R_f e v definidos pela aplicação de uma taxa de variação de $\pm 10\%$ sobre os valores mínimos obtidos; e
- valores de ângulo de atrito variando entre 20 e 45° para solos residuais.

Com as comparações das curvas utilizando o módulo de elasticidade inicial constante ou variável pode-se afirmar que a utilização de E_i constante nas análises foi uma boa aproximação.

Na análise numérica do ensaio pressiométrico realizada com os parâmetros otimizados do modelo hiperbólico observou-se que as isóbaras de tensão horizontal foram menos profundas do que normalmente se encontra na literatura, possivelmente porque a análise realizada foi axissimétrica.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Em vista dos estudos realizados sugere-se:

- desenvolver um programa de elementos finitos que incorpore o modelo hiperbólico (DUNCAN E CHANG, 1970) e outros modelos constitutivos, tais como o modelo de Lade-Kim (LADE E KIM, 1995 e LADE, 1990), Cam-Clay (ROSCOE ET AL., 1958) e Cam-Clay Modificado (ROSCOE E BURLAND, 1968);
- implementar no programa um método de otimização baseado em Algoritmo Genético;
- adaptar no software uma técnica de processamento paralelo para ser utilizado no equipamento para Processamento de Alto Desempenho (Cluster) da Universidade Federal de Viçosa (UFV);
- realizar ensaios pressiométricos em diferentes locais do campus da UFV;

- executar ensaios triaxiais drenados (CID_{sat} e CID_{nat}) para obter parâmetros iniciais dos modelos e definir um espaço de busca como o proposto nesta dissertação; e
- otimizar estes parâmetros com o programa desenvolvido usando algoritmo genético e programação paralela.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, M. M. D. **Estudo tensão deformação de barragem de terra e enrocamento**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2010.

ALMEIDA, M. S. S. **Análise numérica de um prova de carga direta em solo residual de gnaiss**. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2000.

AMAR, S.; CLARKE, B. G. F.; GAMBIN, M.P. e ORR, T. L. L. **The application of pressuremeter test results to foundation design in Europe**, A-state-of-the-art Report by ISSMFE European Regional Technical Committee on Pressuremeters, Part 1: Predrilled Pressuremeters and Self-Boring Pressuremeters, Balkema, Rotterdam, n. 4. 1991. p. 1-23.

AMAR, S.; JÉZÉQUEL, J. F. **Essais en place et en laboratoire sur sols cohérents: comparaison des résultats**. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, n. 58, p. 97-108, 1972.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, Pennsylvania, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **D4719**: Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils. West Conshohocken, Pennsylvania, 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **D7181**: Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. West Conshohocken, Pennsylvania, 2011.

APAGEO (França). **Ménard pressuremeter**. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/prod/apageo/product-60855-389496.html>>. Acesso em: 22 fev. 2016

ARAÚJO, S. P. M. **O ensaio pressiométrico de Ménard e sua utilização na estimativa da capacidade de carga e recalque de fundações assentes em solo residual de gnaiss**. 2001.

177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: Solo - Ensaio de adensamento unidimensional - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica - Procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250**: Identificação e descrição de amostras de solo obtido por sondagens de simples reconhecimento dos solos - procedimento. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas (procedimentos). Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P 94-110**: Sols: reconnaissance et essais. Essai pressiométrique Ménard. 32 p. 1991.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P 94-110-1**: Sols: reconnaissance et essais. Essai pressiométrique Ménard. Partie 1: Essai sans cycle. La Plane Saint-Denis, France, 42 p. 2000.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. Norme expérimentale. **XP P 94-110-2**: Sols: reconnaissance et essais. Essai pressiométrique Ménard. Partie 2: Essai avec cycle. La Plane Saint-Denis, France, 8 p. 1999.

BAGUELIN, F.; JÉZÉQUEL, J. F.; SHIELDS, D. H. **The Pressuremeter and Foundation Engineering**. Transportation Technical Publications. Clausthal-Zellerfeld, Germany, 617p. 1978.

BAHAR, R. **Analyse numérique de l'essai pressiométrique : application à l'identification de paramètres de comportement des sols**. Thèse de doctorat. École Centrale de Lyon, France, 1992.

BAHAR, R.; CAMBOU, B.; FRY, J. J. Forecast of creep settlements of heavy structures using pressuremeter tests. **Computers and Geotechnics**, v. 17, n. 4, p. 507-521, 1995.

BAHAR, R.; NASSIMA, A.; OUARDA, B. Interpretation of a pressuremeter test in cohesive soils. In: **International conference on geotechnical engineering**, Tunisia. 2013.

BAHAR, R.; OLIVARI, G. Analyse de la réponse du modèle de Prager généralisé sur chemin pressiométrique. In: **Actes du 6ème Colloque Franco-Polonais de Mécanique des Sols Appliquée**. Douai, France, p. 97-104, 1993.

BAROTH, J.; MALECOT, Y. Probabilistic analysis of the inverse analysis of an excavation problem. **Computers and Geotechnics**, v. 37, n. 3, p. 391-398, 2010.

BASTOS, E. A. **Otimização de Seções Retangulares de Concreto Armado Submetidas à Flexo-Compressão Oblíqua Utilizando Algoritmos Genéticos**. 2004. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BISHOP, R. F.; HILL, R.; MOTT, N. F. **The theory of indentation and hardness test**. **Proceedings of the Physical Society**, London, v. 57, n. 321, Part. 3, p. 147-159, 1945.

BOUBANGA, A. **Identification de paramètres de comportement des sols à partir de l'essai pressiométrique**. Thèse de doctorat. École Centrale de Lyon, France, 1990.

BRANDT, J. R. T. **Utilização de um novo pressiômetro para determinação do comportamento elástico de solos residuais gnáissicos jovens e de estratos do terciário**

paulista. 1978. 244 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1978.

BRIAUD, J. L. **The Pressuremeter**. Transportation Technical Publications, A. A. Balkema, Rotterdam, 322p. 1992.

BURNIER, A. A. L. **Análises numéricas de provas de carga em sapatas utilizando o método dos elementos finitos**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

CALVELLO, M.; FINNO, R. J. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis. **Computers and Geotechnics**, v. 31, n. 5, p. 410-424, 2004.

CARVALHO, A. C. P. L. F. **Algoritmos Genéticos**. São Carlos, jul. 1997. Disponível em: <<http://www.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/genetic/>>. Acesso em: 08 nov. 2015.

CASTRO, R. E. **Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos**. 2001. 226 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CAVALCANTE, E. H. **Uma contribuição ao estudo do comportamento tensão-deformação de um depósito de argila mole da cidade do Recife, através do uso do Pressiômetro de Ménard**. 1997. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 1997.

CLARKE, B. G. **Pressuremeter in Geotechnical Design**. Chapman & Hall, Cambridge, Grã-Bretanha, 362 p, 1995.

CLARKE, B. G. Pressuremeter testing in ground investigation. Part 1 - Site operations. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, v. 119, n. 2, p. 96-108, 1996.

CORREIA, A. I. A. **Métodos de Pesquisa Directa: Optimização Não Linear**. 2010. 335 f. Tese (Doutorado em Ciências Matemáticas) - Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2010.

DOURADO, K. C. A. **Utilização do pressômetro Ménard na identificação e previsão de recalques em um solo colapsível**. 2005. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

DUNCAN, J. M. Hyperbolic Stress-Strain Relationships. In: **Proceedings of the Workshop on Limit Equilibrium, Plasticity and Generalized Stress-Strain in Geotechnical Engineering**, edited by R. K. Yong and H-Y. Ko, ASCE press, p. 443-460, 1980.

DUNCAN, J. M.; CHANG, Y. C. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. **Journal of the soil mechanics and foundations division**. v. 96, n. 5, p. 1629-1653, 1970.

DUNCAN, J. M.; WONG, K. S.; MABRY, P. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses. In: **Geotechnical engineering**. University of California, 1980.

GARDNER, E. J.; SIMMONS, M. J.; SNUSTAD, D. P. **Principles of Genetics**. 8th ed., John Wiley & Sons. New York, 1991.

GHOSTUDIO. **Stress-deformations modeling with SIGMA/W 2007**. An Engineering Methodology. GEO-SLOPE International Ltda. Third edition, 2008.

GERSCOVICH, D. M. S. **Modelos Constitutivos - Modelo Hiperbólico**. 2010. Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/modelohiperbolico.pdf> >. Acesso em: 29 dez. 2015.

GUIMARÃES, A. G. **Análise inversa para determinação de parâmetros de deformabilidade de solos**. 2008. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2008.

HEAD, K. H. **Manual of laboratory soil testing**. 2th ed., John Wiley & Sons Ltd, England, v. 3, 431p, 1998.

HELENO, A. F. **Análise inversa da prova-de-carga em uma sapata rígida utilizando o método dos elementos finitos**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2011.

HERRMANN, L. R. **User's Manual for REA: General Two Dimensional Soils and Reinforced Earth Analysis Program**. Department of Civil Engineering Report, University of California, Davis, 1978.

- HICHER, P. Y.; MICHALI, A. Identifying soil parameters by means of laboratory and in situ testing. **Computers and Geotechnics**, v. 19, n. 2, p. 153-170, 1996.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- HOLTZ, G. C. C. **Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário**. 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- IBAÑEZ, J. P. **Modelagem constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados**. 2003. 241 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- JAKY, J. The Coefficient of Earth Pressure at Rest. **Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers**, October, p. 355-358, 1944.
- JANBU, N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial test. In: **Proceedings of the Third European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Wiesbaden, Germany, p. 19-25, 1963.
- KING, R. C. **A dictionary of genetics**. 2th ed., New York: Oxford University Press, 375p, 1974.
- KONDNER, R. L.; ZELASKO, J. A hyperbolic stress-strain formulation for sands. **Proceedings of the Second Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, vol. 1, p. 289-324, 1963.
- KULHAWY, F. H.; DUNCAN, J. M. Stresses and movements in Oroville dam. **Journal of Soil Mechanics & Foundations Division**, v. 98, n. 7, 1972.
- KULHAWY, F. H.; DUNCAN, J. M.; SEED, H. B. **Finite element analysis of stresses and movements in Embankments during construction**. Office of Research Services, Report n. TE 69-4, University of California, 1969.
- LADE, P. V. Single-hardening model with application to NC clay. **Journal of geotechnical engineering**, v. 116, n. 3, p. 394-414, 1990.

LADE, P. V.; KIM, Moon K. Single hardening constitutive model for soil, rock and concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 32, n. 14, p. 1963-1978, 1995.

LAMÉ, G. **Leçons Sur la Théorie Mathématique de L'élasticité des Corps Solides**. Bachelier, Paris, France, 1852.

LEDESMA, A.; GENS, A.; ALONSO, E. Estimation of parameters in geotechnical backanalysis - I. maximum likelihood approach. **Computers and Geotechnics**, vol. 18, n. 1, p. 1-27, 1996.

LEVASSEUR, S.; MALÉCOT, Y.; BOULON, M.; FLAVIGNY, E. Soil parameter identification using a genetic algorithm. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 32, n. 2, p. 189-213, 2008.

LEVASSEUR, S.; MALÉCOT, Y.; BOULON, M.; FLAVIGNY, E. Statistical inverse analysis based on genetic algorithm and principal component analysis: Method and developments using synthetic data. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, vol. 33, p. 1485-1511, 2009.

LOPES, G. S. **Execução e análise de uma prova de carga direta em verdadeira grandeza em solo residual de gnaiss**. 1997. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 1997.

MAYNE, P. W.; KULHAWY, F. H. "K₀ - OCR Relationships in Soil". **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 108, n. 6, p. 851-872, 1982.

MÉNARD, L. **The Ménard Pressuremeter, Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design**. General Memorandum, Sols Soils, n. 26, 1975.

MENDONÇA, C. E. L. R. **Um sistema computacional para otimização através de algoritmos genéticos e redes neurais**. 2004. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MENDONÇA, H. M. X. **Sobre a modelagem de problemas da engenharia geotécnica pelo método dos elementos finitos**. 2005. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

- OLIVA, R. R. R. S. **Caracterização do Comportamento de Materiais a partir do Ensaio Pressiométrico**. 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009.
- PESSOA, T. F. P. **Análise numérica de medidas de contenção de sólidos em rochas produtoras de óleo do Brasil**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics**, John Wiley & Sons, New York. 411 p, 1974.
- RAO, S. S. **Engineering Optimization - Theory and Practice**. 4th ed., John Wiley & Sons Ltd, New York, 840 p, 2009.
- ROSCOE, K. H.; BURLAND, J. B. **On the generalized stress-strain behaviour of wet clay**. 1968.
- ROSCOE, K. H.; SCHOFIELD, A.N.; WROTH, C. P. On the yielding of soils. **Geotechnique**, v. 8, n. 1, p. 22-53, 1958.
- SCHNAID, F. **Ensaaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 189 p.
- SILVA, A. J. M. **Implementação de um Algoritmo genético utilizando o modelo de ilhas**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- SILVA, E. M. J. **O ensaio pressiométrico: tratamento e interpretação dos resultados do ensaio**. Tecnovisão: Revista de divulgação tecnológica, Escola superior de tecnologia da universidade do Algarve, Portugal, n. 12, p. 12-15, 2001.
- STANSFIELD, W. D. **Genética**. São Paulo: MacGraw - Hill do Brasil, 958p, 1974.
- VELLOSO, R. Q. **Estudo numérico da estimativa de parâmetros hidráulicos em solos parcialmente saturados**. 2000. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

WIDMAIER, K. **Algoritmo genético aplicado à otimização de asas de material compósito de veículos**. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2005.

WOOD, D. M. **Soil behaviour and critical state soil mechanics**. Cambridge, England, University Press. 1990.

YIN, Z. Y.; HICHER, P. Y. Identifying parameters controlling soil delayed behaviour from laboratory and in situ pressuremeter testing. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 32, n. 12, p. 1515-1535, 2008.

ZENTAR, R.; HICHER, P; MOULIN, G. Identification of soil parameters by inverse analysis. **Computers and Geotechnics**, v. 28, n. 2, p. 129-144, 2001.