

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS POROPRESSÕES EM
ATERROS CONSTRUÍDOS COM RESÍDUO DA
PRODUÇÃO DE ALUMINA DESAGUADO POR
FILTROS PRENSA**

Paulo Henrique Alfenas da Silva

Belo Horizonte

2020

Paulo Henrique Alfenas da Silva

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS POROPRESSÕES EM
ATERROS CONSTRUÍDOS COM RESÍDUO DA
PRODUÇÃO DE ALUMINA DESAGUADO POR
FILTROS PRENSA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Cláudio Lúcio Lopes Pinto

Coorientador: Lúcio Flávio de Souza Villar

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2020

S586s

Silva, Paulo Henrique Alfenas da.

Simulação numérica das poropressões em aterros construídos com resíduo da produção de alumina desaguado por filtros prensa [recurso eletrônico] / Paulo Henrique Alfenas da Silva. - 2020.
1 recurso online (187 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Cláudio Lúcio Lopes Pinto.

Coorientador: Lúcio Flávio de Souza Villar.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 163-187.

Bibliografia: f. 148-162.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Mecânica do solo - Teses. 2. Lama vermelha - Teses. 3. Resíduos - Teses. 4. Aterros - Teses. 5. Alumina - Teses. I. Pinto, Cláudio Lúcio Lopes II. Villar, Lúcio Flávio de Souza . III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624.13(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES



FOLHA DE APROVAÇÃO

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS POROPRESSÕES EM ATERROS CONSTRUÍDOS COM RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE ALUMINA DESAGUADO POR FILTROS PRENSA

PAULO HENRIQUE ALFENAS DA SILVA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 30 de julho de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Cláudio Lúcio Lopes Pinto - Orientador
UFMG

Prof. Christianne de Lyra Nogueira
UFOP

Prof. Felipe de Moraes Russo
CEFET-MG

Belo Horizonte, 30 de julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por seu amor antes mesmo de eu *ser*, e dar sentido à vida.

Agradeço ao meu orientador Cláudio Lúcio Lopes Pinto, pelas discussões proveitosas e pelo suporte oferecido. Ao meu coorientador Lúcio Flávio de Souza Villar, por introduzir a Mecânica dos Solos na minha vida de forma desafiadora e fascinante, e por compartilhar de forma generosa o conhecimento sobre resistência ao cisalhamento e os rejeitos de bauxita.

Ao Dr. Joaquim Pimenta, pela referência e excelência ao ensinar. Aos meus coordenadores João Pimenta, pelas consultas diárias acerca do comportamento dos resíduos de bauxita filtrados e pelo apoio à pesquisa, e ao Rodrigo Rodrigues, pelo amparo envolvendo a resistência dos rejeitos e, em especial, à modelagem numérica empregada neste trabalho. À Luciana Lima pelo incentivo contínuo, e aos demais colegas da Pimenta de Ávila que tanto contribuíram para o desenvolvimento desse conhecimento.

Aos meus pais João e Tânia, e meus irmãos João Filipe, Pedro e Isa, pelo apoio, amor e força ao longo da caminhada, certamente eu não conseguiria sem vocês. Aos amigos Milena e Roberto e Camila, por incentivarem a pesquisa, ouvirem minhas queixas e sempre estarem disponíveis nas horas mais importantes, e ao Gedeon Jr. pelas constantes discussões e trocas durante a implementação do modelo numérico que nos renderam frutos. Agradeço a todos os amigos que, ao longo dos anos, estiveram presentes compartilhando suas experiências e me deram apoio.

“Meu povo foi destruído por falta de conhecimento...”

Oséias 4:6

RESUMO

SILVA, Paulo Henrique Alfenas da. Simulação numérica das poropressões em aterros construídos com resíduo da produção de alumina desaguado por filtros prensa. 187f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

O aumento na demanda mineral observado nas últimas décadas tem sido responsável pela geração de considerável quantidade de rejeitos. O aumento da geração de resíduos, bem como a tendência de escassez de áreas disponíveis para sua disposição, tem destacado a necessidade de novas tecnologias de disposição de resíduos mais eficientes, que envolvam menores riscos operacional e ambiental. Com o objetivo de reduzir a água nos efluentes descartados em sistemas de disposição de rejeitos, têm sido discutidas soluções em que o material descartado apresenta um elevado teor de sólidos, tais como espessamento e filtragem de rejeitos. Nesta pesquisa foi apresentada uma avaliação, via simulação numérica, das poropressões construtivas desenvolvidas no maciço de uma pilha de resíduos de lama vermelha desaguados por filtros prensa. Para tanto, foram adotados os parâmetros geotécnicos do resíduo obtidos a partir de uma campanha de ensaios de laboratório. Um aterro experimental, localizado no norte do Brasil, forneceu dados de monitoramento geotécnico utilizados para calibração do modelo numérico aplicado. O pacote de software da GEOSTUDIO versão 2019 R2, SEEP/W, SIGMA/W e SLOPE/W, foi utilizado para construção do modelo numérico, o qual se baseia no Método dos Elementos Finitos e simula a construção do aterro em estágios a partir de análises acopladas de fluxo e deformação. O modelo foi aplicado a uma pilha hipotética para previsão dos excessos de poropressão construtiva frente a diferentes condições de umidade e compactação do resíduo filtrado, velocidade de construção e dissipação das poropressões ao longo do tempo decorrente da implantação de um sistema de drenagem interna. Como resultado, foi evidenciada a aplicabilidade da metodologia adotada no modelo na predição de poropressões construtivas desenvolvidas em aterros de lama vermelha filtrada. A partir das análises desenvolvidas, observou-se a relação entre a geração de poropressões geradas durante o processo de construção e a umidade do resíduo filtrado durante sua compactação, bem como a influência de uma faixa externa construída com resíduo apresentado menor teor de umidade à condição de estabilidade. Pela análise, foi possível constatar a necessidade de um sistema de drenagem interna para a dissipação dos excessos de poropressões construtivas.

Palavras-Chaves: Lama vermelha, filtro prensa, poropressões construtivas.

ABSTRACT

The increasing mineral demand observed in the last decades has been responsible for considerable tailings generation. The raising in tailings generation, as well as the lack of areas available for disposal, have pointed out the need for more efficient technologies that render less operational and environmental risks during tailings management. In order to reduce the water in the effluent discharged by the tailings systems, it has been discussed disposal solutions where the disposed material presents higher solids contents, such as paste disposal and filtering processes, for instance. In this research it is presented an assessment of the constructive pore pressures developed in a fill constructed with dewatered red mud from press filter. In order to achieve this goal, geotechnical parameters obtained from laboratory tests performed on red mud samples have been considered, as well as the procedures regarding a numerical modeling application. A test fill located in north of Brazil provided monitoring data to be used in calibrating the numerical model. The software developed by GEOSTUDIO version 2019 R2, SEEP/W, SIGMA/W and SLOPE/W have been used in the construction of the model, based on the Finite Element Method (FEM), which simulates the construction of a fill in stages by coupled analysis of flux and consolidation. The model had been applied to a hypothetical pile in order to assess its stability considering the constructive pore pressure using different values of moisture and compaction conditions, velocity of construction and the pore pressure dissipation over the time while an intern drainage system is implemented. As a result, it was evidenced the applicability of the methodology of estimating the constructive pore pressure developed on dewatered red mud fills. Based on the presented analyses, it was observed the relation between the pore pressure and the moisture content, as well as the corresponding stability, shown as Factor of Safety, related to the external shell, constructed with “dry” residue. Nonetheless, it was pointed out the necessity of an internal a drainage system to dissipate excess pore pressures developed in the fill during construction.

Keywords: Red mud, press filter, constructive pore pressure.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.1.1	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>16</i>
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	A BAUXITA	19
2.1.1	<i>Definição, Características e Classificação.....</i>	<i>20</i>
2.2	DEPÓSITOS DE BAUXITA	23
2.2.1	<i>Depósitos de Bauxita Laterítica</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>Depósitos de Bauxita Sedimentar.....</i>	<i>24</i>
2.2.3	<i>Depósitos de Bauxita sobre Rochas Carbonáticas.....</i>	<i>24</i>
2.2.4	<i>Os Principais Depósitos de Bauxita no Brasil</i>	<i>24</i>
2.3	MINERALOGIA DAS BAUXITAS LATERÍTICAS	25
2.4	O PROCESSO BAYER E O RESÍDUO DE BAUXITA PARA A PRODUÇÃO DE ALUMINA – LAMA VERMELHA.....	27
2.4.1	<i>Produtos de Dessilicação no Processo Bayer</i>	<i>29</i>
2.4.2	<i>Rejeitos de Beneficiamento de Bauxita.....</i>	<i>32</i>
2.4.3	<i>Características Físico-Químicas e Mineralógica da Lama Vermelha</i>	<i>32</i>
2.5	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE LAMA VERMELHA.....	35
2.5.1	<i>Peso específico dos grãos.....</i>	<i>36</i>
2.5.2	<i>Distribuição Granulométrica</i>	<i>36</i>
2.5.3	<i>Densidade de Compactação e Teor de Umidade.....</i>	<i>37</i>
2.5.4	<i>Condutividade Hidráulica</i>	<i>38</i>
2.5.5	<i>Adensamento do Material Compactado</i>	<i>38</i>
2.5.6	<i>Resistência ao cisalhamento.....</i>	<i>38</i>

2.6	MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE LAMA VERMELHA.....	39
2.6.1	<i>Disposição Via Úmida.....</i>	40
2.6.2	<i>Métodos de Disposição a Seco ou Semisseco.....</i>	40
2.7	FILTRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	43
2.7.1	<i>Filtros Prensa.....</i>	43
2.8	POROPRESSÃO CONSTRUTIVA EM ATERROS.....	46
2.9	ENSAIO TRIAXIAL PN.....	50
2.10	SOLOS NÃO SATURADOS.....	51
2.10.1	<i>Quantidade de Água no Solo.....</i>	53
2.10.2	<i>Curva Característica de Retenção de Água no Solo ou Curva Característica de Sucção.....</i>	54
2.11	ANÁLISE CONSTRUTIVA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
3.1	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO.....	61
3.1.1	<i>Normas e Procedimentos.....</i>	62
3.1.2	<i>Preparação das Amostras e Condições de Moldagem.....</i>	63
3.1.3	<i>Ensaio de Caracterização Física.....</i>	64
3.1.4	<i>Ensaio de Compactação Proctor Normal.....</i>	65
3.1.5	<i>Ensaio de Adensamento Unidimensional.....</i>	65
3.1.6	<i>Ensaio de Permeabilidade com Carga Variável.....</i>	66
3.1.7	<i>Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Isotropicamente, Não Drenado, Saturado - CIUsat ..</i>	66
3.1.8	<i>Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Isotropicamente, Não Drenado, Não Saturado - CIUunsat.....</i>	67
3.1.9	<i>Ensaio de Compressão Triaxial Não Adensado, Não Drenado, Não Saturado - UUunsat.....</i>	68
3.1.10	<i>Ensaio de Compressão Triaxial Adensado, Drenado - CID.....</i>	68
3.1.11	<i>Ensaio de Cisalhamento Direto.....</i>	68
3.1.12	<i>Ensaio de Cisalhamento Simples Estático.....</i>	69

3.1.13	<i>Ensaio de Compressão Triaxial PN</i>	71
3.1.14	<i>Curvas Características de Retenção de Água</i>	71
3.2	MONITORAMENTO DO ATERRO EXPERIMENTAL	72
3.2.1	<i>Descrição Geral</i>	72
3.3	MODELAGEM NUMÉRICA.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO FILTRADO	77
4.1.1	<i>Ensaio de Caracterização</i>	77
4.1.2	<i>Ensaio de Compactação Proctor Normal</i>	81
4.1.3	<i>Ensaio de Adensamento Unidimensional</i>	86
4.1.4	<i>Ensaio de Permeabilidade de Carga Variável</i>	92
4.1.5	<i>Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Isotropicamente, Não Drenado, Saturado – CIUsat</i>	93
4.1.6	<i>Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Isotropicamente, Não Drenado, Não Saturado – CIUunsat</i>	95
4.1.7	<i>Ensaio de Compressão Triaxial não adensado, não drenado, não saturado, UUunsat</i>	97
4.1.8	<i>Ensaio de Compressão Triaxial Adensado, Drenado, Saturado CIDsat</i>	99
4.1.9	<i>Ensaio de Cisalhamento Direto</i>	100
4.1.10	<i>Ensaio de Cisalhamento Simples (Direct Simple Shear - DSS)</i>	102
4.1.11	<i>Ensaio de Compressão Triaxial PN</i>	103
4.1.12	<i>Ensaio de Papel Filtro para Determinação da Curva de Retenção de Água</i>	106
4.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	108
4.2.1	<i>Aplicação do Modelo Cam-Clay Modificado</i>	108
4.2.2	<i>Aderência e Calibração do Modelo Numérico</i>	109
4.3	SIMULAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DE UMA PILHA	118
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	140
5.1	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO	140

5.2	MONITORAMENTO DO ATERRO EXPERIMENTAL	142
5.3	MODELAGEM NUMÉRICA.....	143
5.4	RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	146
6	REFERÊNCIAS.....	148
	ANEXO A.1 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIUsat TRAJETÓRIAS DE TENSÕES TOTAIS E EFETIVAS	163
	ANEXO A.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIUsat TENSÃO-DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO DA POROPRESSÃO-DEFORMAÇÃO.....	166
	ANEXO B.1 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIUunsat TRAJETÓRIAS DE TENSÕES TOTAIS.....	171
	ANEXO B.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIUunsat TENSÃO-DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO DA POROPRESSÃO-DEFORMAÇÃO.....	173
	ANEXO C.1 – TRAJETÓRIAS DE TENSÕES TOTAIS – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL UUunsat.....	176
	ANEXO C.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL UUunsat TENSÃO-DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO DA POROPRESSÃO-DEFORMAÇÃO.....	178
	ANEXO D.1 –ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIDsat TRAJETÓRIAS DE TENSÕES EFETIVAS.....	181
	ANEXO D.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIDsat TENSÃO-DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA-DEFORMAÇÃO.....	183
	ANEXO E – ENSAIO DE CISLHAMENTO SIMPLES ESTÁTICO (DSS) - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO	186

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Fotomicrografia eletrônica de varredura de sodalita (Fonte: Paz, 2016).....	30
Figura 2-2: Difractometria de Raios-X na lama vermelha (Fonte: Pinheiro <i>et al.</i> , 2017).....	35
Figura 2-3: Curvas Granulométricas de Lama Vermelha (Fonte: Nery, 2013).....	37
Figura 2-4: Ciclo de operação dos filtros prensa verticais (Nery, 2013).....	45
Figura 2-5: Curva característica típica de um solo siltoso.....	55
Figura 2-6: Curva característica de resíduo de bauxita via processo Bayer (Modificado de Feng & Yang, 2018).	56
Figura 3-1 – Conceito da amostra no ensaio de cisalhamento simples (Modificado de McGuire, 2011)	70
Figura 3-2: Planta de locação do aterro teste.....	73
Figura 3-3: Aterro teste – Seção instrumentada	73
Figura 4-1: Curvas Granulométricas do Resíduo Ensaiado.....	79
Figura 4-2: Classificação do resíduo pela Carta de Plasticidade de Casagrande	81
Figura 4-3: Curvas de Compactação das amostras de resíduo Grupos 1 e 2.....	83
Figura 4-4: Curvas de Compactação das amostras de resíduo Grupos 1.....	84
Figura 4-5: Curvas de Compactação das amostras de resíduo Grupos 2.....	85
Figura 4-6: Ensaio de Adensamento Unidimensional - Curvas de tensão efetiva x índice de vazios – Amostras Grupo 1 - GC - 95% Proctor Normal.....	90
Figura 4-7: Ensaio de Adensamento Unidimensional - Curvas de tensão efetiva x índice de vazios – Amostras Grupo 1 - GC - 90% Proctor Normal.....	90
Figura 4-8: Ensaio de Adensamento Unidimensional - Curvas de tensão efetiva x índice de vazios – Amostras Grupo 2	91
Figura 4-9: Condutividade Hidráulica x Tensão de Confinamento - Ensaio de Adensamento Unidimensional.....	92

Figura 4-10: Envoltórias de resistência dos Ensaios de Compressão Triaxial CIUsat.....	95
Figura 4-11: Envoltória de resistência dos Ensaios de Compressão Triaxial CIUunsat	97
Figura 4-12: Envoltória de resistência dos Ensaios de Compressão Triaxial UUunsat	98
Figura 4-13: Envoltória de resistência dos Ensaios de Compressão Triaxial CIDsat	100
Figura 4-14: Cisalhamento Direto - Plano de Ruptura paralelo à direção de compactação ...	101
Figura 4-15: Cisalhamento Direto – Plano de Ruptura perpendicular à direção de compactação	102
Figura 4-16: Resultados dos ensaios PN em amostras do Grupo 1	104
Figura 4-17: Resultados dos ensaios PN em amostras do Grupo 2	105
Figura 4-18: Curvas Características de Retenção do Resíduo – Grupo 1	107
Figura 4-19: Aplicação do Modelo Cam-Clay Modificado	109
Figura 4-20: Simulação Numérica do Ensaio Triaxial PN	110
Figura 4-21: Curva de Retenção de Umidade do Resíduo do Grupo 01	110
Figura 4-22: Simulação do ensaio triaxial PN – Tensão desviadora.....	111
Figura 4-23: Simulação do ensaio triaxial PN – Parâmetro B	111
Figura 4-24: Seção A-A' – Condições de Contorno.....	112
Figura 4-25: Seção A-A' – Domínio do Modelo e Malha de Elementos Finitos.....	113
Figura 4-26: Poropressões registradas no aterro experimental.....	114
Figura 4-27: Precipitação diária na área experimental	115
Figura 4-28: Geração de poropressões no aterro teste (kPa) (t = 419 dias)	115
Figura 4-29: Estimativa do parâmetro r_u para o aterro teste (t = 419 dias)	116
Figura 4-30: Poropressões Estimadas x Registradas	116
Figura 4-31: Poropressões Estimadas x Registradas – PZ-07	118

Figura 4-32: Pilha Hipotética – Condições de Contorno.....	119
Figura 4-33: Pilha Hipotética – Domínio do Modelo e Malha de Elementos Finitos.....	119
Figura 4-34: Ponto de análise das poropressões.....	121
Figura 4-35: Poropressões na pilha <i>versus</i> tempo	121
Figura 4-36: Influência do tempo de construção da pilha no parâmetro r_u	123
Figura 4-37: Poropressões desenvolvidas no maciço ao final de construção.....	124
Figura 4-38: Domínio do Modelo – Cenários I e II.....	126
Figura 4-39: Cenário I – Resíduo Seco – Tensões Totais	126
Figura 4-40: Cenário I – Resíduo Seco – Poropressões no centro da base da pilha x Cota de Topo.....	127
Figura 4-41: Cenário I – Resíduo Seco – Poropressões ao Final de Construção	127
Figura 4-42: Pilha Hipotética – Resíduo Seco – Cenário I – Mapa de r_u	128
Figura 4-43: Cenário II – Resíduo Úmido – Tensões Totais.....	128
Figura 4-44: Cenário II – Resíduo Úmido – Poropressões x Cota de Topo.....	129
Figura 4-45: Cenário II – Resíduo Úmido – Poropressões ao Final de Construção.....	129
Figura 4-46: Cenário II – Resíduo Úmido – Mapa de r_u (El. 72,00m).....	130
Figura 4-47: Cenário III – Domínio do Modelo e Malha de Elementos Finitos	131
Figura 4-48: Cenário III.1 – Geometria da Pilha – (razão 1,0H:1,0V).....	131
Figura 4-49: Cenário III.1 – Poropressões ao Final de Construção – (razão 1,0H:1,0V)	132
Figura 4-50: Cenário III.1 – Análise de Estabilidade – (razão 1,0H:1,0V).....	132
Figura 4-51: Cenário III.2 – Geometria da Pilha – (razão 1,5H:1,0V).....	133
Figura 4-52: Cenário III.2 – Poropressões ao Final de Construção – (razão 1,5H:1,0V)	133
Figura 4-53: Cenário III.2 – Análise de Estabilidade – (razão 1,5H:1,0V).....	133

Figura 4-54: Cenário III.3 – Geometria da Pilha – (razão 2,0H:1,0V).....	134
Figura 4-55: Cenário III.3 – Poropressões ao Final de Construção – (razão 2,0H:1,0V)	134
Figura 4-56: Cenário III.3 – Análise de Estabilidade – (razão 2,0H:1,0V).....	135
Figura 4-57: Poropressões no centro da base da pilha ao final de construção x Cota de Topo	135
Figura 4-58: Cenário III.4 – Vazão Percolada – Final de Construção sem Drenagem Interna – (razão 1,0H:1,0V).....	136
Figura 4-59: Cenário III.4 – Poropressões ao Final de Construção com Drenagem Interna – (razão 1,0H:1,0V).....	137
Figura 4-60: Cenário III.4 – Mapa de ru Final de Construção com Drenagem Interna – (razão 1,0H:1,0V).....	138
Figura 4-61: Cenário III.4 – Plastificação na Malha MEF – Final de Construção – (razão 1,0H:1,0V).....	138
Figura 4-62: Cenário III.4 – Análise de Estabilidade com Drenagem Interna – (razão 1,0H:1,0V).....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Minerais de alumínio presentes na bauxita. (Modificado de Paz, 2016).....	21
Tabela 2.2: Composição química típica de bauxitas lateríticas. (Modificado de Paz, 2016)..	26
Tabela 2.3: Composição mineralógica típica de bauxitas lateríticas. (Modificado de Paz, 2016).....	26
Tabela 2.4: Qualidade da bauxita beneficiada. (Modificado de Winschnewski <i>et al.</i> , 2011)..	31
Tabela 2.5: Composição química típica de lamas vermelhas. (<i>World Aluminium</i> , 2020).....	33
Tabela 2.6: Composição mineralógica típica de lamas vermelhas. (<i>World Aluminium</i> , 2020)	34
Tabela 3.1: Ensaios de Laboratório – Normas e Procedimentos.....	62
Tabela 3.2: Condição de Moldagem das Amostras – Grupo 1	64
Tabela 3.3: Condição de Compactação das Amostras – Grupo 2	64
Tabela 4.1: Massa Específica dos grãos (ρ_s)	77
Tabela 4.2: Limites de Consistência.....	80
Tabela 4.3: Resultados dos Ensaios de Compactação Proctor Normal	82
Tabela 4.4: Resultados dos Ensaios de Adensamento Oedométrico com Medida de Permeabilidade	88
Tabela 4.5: Resultados dos Ensaios de Permeabilidade a Carga Variável.....	93
Tabela 4.6: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial CIUsat	94
Tabela 4.7: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial CIUunsat	96
Tabela 4.8: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial UUunsat	98
Tabela 4.9: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial CIDsat	99
Tabela 4.10: Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto (<i>Paralelo</i>) – Grupo 1.....	100
Tabela 4.11: Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto (<i>Perpendicular</i>) – Grupo 1..	101

Tabela 4.12: Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Simples (DSS).....	103
Tabela 4.13: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial PN	105
Tabela 4.14: Parâmetros para calibração do Modelo Cam-Clay Modificado	108
Tabela 4.15: Condição da Amostra – Ensaio Triaxial PN Reconstituído	109
Tabela 4.16: Parâmetros geotécnicos adotados	113
Tabela 4.17: Parâmetros geotécnicos da fundação	120
Tabela 4.18: Parâmetros geotécnicos adotados na análise	121
Tabela 4.19: Parâmetros geotécnicos – Pilha Hipotética	125
Tabela 4.20: Vazão de Projeto.....	137
Tabela 4.21: Dimensionamento do Dreno	137

LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Alumina Aproveitável
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
a_v	Coefficiente de compressibilidade
B	matriz das funções de forma
BASR	Bauxita com alta sílica reativa
c	intercepto de coesão (kPa)
Cc	Índice compressão
Cr	Índice de recompressão
Cv	Coefficiente de adensamento
CID	Ensaio triaxial adensado isotropicamente, drenado
CIU_{sat}	Ensaio triaxial adensado isotropicamente, não drenado, saturado
CIU_{unsat}	Ensaio triaxial adensado isotropicamente, não drenado, não saturado
D	matriz constitutiva
DSP	<i>Dessilication Product</i>
DSS	<i>Direct Simple Shear</i>
e	número de Euler (2,71828...)
<u>F</u>	vetor das forças nodais
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais
Fpr	Filtros prensa
Frt	Filtros rotativos
GC	Grau de Compactação
H	Constante de Henry para solubilidade do ar
<u>H</u>	matriz de fluxo
HTD	High Temperature Digestion
IP	Índice de plasticidade
K	matriz de rigidez
k	condutividade hidráulica (cm/s)
<u>L</u>	matriz acoplada
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LTD	<i>Low Temperature Digestion</i>
m/m	<i>Massa/massa</i>

MEF	Método dos Elementos Finitos
m_v	Coefficiente de compressibilidade volumétrica
PEAD	Polietileno de alta densidade
PN	Pressão Neutra
r_u	Fator de geração de poropressão
S	Grau de saturação
Sad	Sucção de adsorção (kPa)
Sc	Sucção capilar (kPa)
SR	Sílica Reativa
Su	Resistência não drenada (kPa)
TS	Teor de Sólidos (%)
TTD	<i>Tailing Thickened Discharge</i>
u	Poropressão (kPa)
UU_{unsat}	Ensaio triaxial não adensado, não drenado, não saturado
\underline{v}	vetor de deslocamentos nodais
V_a	volume de ar livre nos vazios
V_s	volume dos sólidos
V_w	volume de água nos vazios
w	teor de umidade gravimétrico (%)
w_{otm}	teor de umidade ótimo
α	constante de integração
γ_s	peso específico dos grãos (kN/m ³)
γ_w	peso específico da água (kN/m ³)
θ	teor de umidade volumétrico
ρ_s	massa específica dos sólidos
ρ_w	massa específica da água
σ_1	Tensão principal maior (kPa)
σ_3	Tensão principal menor (kPa)
σ'_{vo}	Tensão vertical efetiva inicial (kPa)
φ	Ângulo de atrito interno (°)
ψ	sucção do solo (kPa)

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e o crescimento populacional observado nas últimas décadas têm sido responsáveis pelo aumento na demanda de bens minerais em distintas áreas da sociedade, como bens de consumo, transporte e construção civil.

Os processos de aproveitamento dos minérios são responsáveis pela geração de consideráveis quantidades de rejeitos. Durante o processo de beneficiamento mineral para a obtenção de uma tonelada de alumina, por exemplo, são geradas em média 1,35 toneladas de resíduos, de acordo com Evans (2016), requerendo, assim, ambientes estáveis para sua disposição. A metodologia tradicional de disposição desses resíduos em forma de polpa em barragens requer áreas cada vez mais escassas promovendo significativos impactos econômico e socioambiental com grandes riscos associados.

Segundo apresentado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2018), em 2017, o setor de mineração foi responsável pela geração de 290 milhões de toneladas de rejeitos, dos quais, aproximadamente, 95% são dispostos por via úmida em barragens.

Os recentes eventos envolvendo falhas dessas estruturas motivam discussões sob a ótica da aceitabilidade da sociedade acerca dos riscos inerentes às estruturas geotécnicas dessa natureza. Tais discussões, associadas à crescente tendência na geração de rejeitos, evidenciaram a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias de disposição de resíduos mais eficientes, e com menor risco associado (Power *et al.*, 2011).

No caso da bauxita, o rejeito obtido a partir de tratamento hidrometalúrgico para obtenção de alumina é denominado lama vermelha (Pinheiro *et al.*, 2017). Durante seu beneficiamento via processo Bayer, a bauxita é submetida às etapas de digestão, clarificação, evaporação, precipitação e calcinação.

De modo a reduzir o volume de água e/ou efluentes descartados nos sistemas de disposição de rejeitos, apontado como crítico por diversos autores (Davies, 2011, Power *et al.*, 2011, Kinnarién *et al.*, 2015, Guedes & Schneider, 2017), têm se discutido soluções de disposição de resíduos que apresentem teor de sólidos mais alto, como observado nas técnicas de disposição de lama espessada em pasta e em métodos de filtragem dos resíduos, associados à disposição em pilhas de aterro compactado (Collini *et al.*, 2011; Bach & Weston, 2011, *apud* Nery, 2013).

A confiabilidade dessas estruturas de contenção, e sua condição de segurança, estão associadas, dentre outros fatores, ao conhecimento das poropressões desenvolvidas em seu maciço, sobretudo durante a etapa de construção, de modo que se torna fundamental uma metodologia de previsão assertiva que suporte desenvolvimento de projetos dessa natureza.

Pesquisas envolvendo os resíduos da produção de alumina têm conferido amplo destaque à sua caracterização geotécnica (Liu *et al.*, 2007; Antunes *et al.*, 2011; Nery, 2013; Silva, 2016; Palomino, 2017), ou ainda, ao seu comportamento mecânico dependente do tempo (Zhao *et al.*, 2018). Contudo, a tecnologia de desaguamento de resíduo de bauxita com filtros-prensa tem sido pouco explorada, sobretudo quanto ao efeito da umidade de compactação na geração das poropressões, em condição não saturada, durante as etapas de construção de um aterro.

Cabe dar relevo ao fato que as características geotécnicas do resíduo de bauxita são dependentes da composição química e mineralógica da rocha de origem, além do processo industrial ao qual é submetido, portanto, torna-se difícil, ou mesmo impossível, a aplicação de um modelo genérico para projetos de pilhas de resíduo desaguado por filtros prensa, uma vez que essas condições iniciais são altamente variáveis.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal determinar e analisar, a partir de modelagem computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), as poropressões construtivas desenvolvidas no maciço de uma pilha de resíduos oriundos do beneficiamento de bauxita para produção de alumina via processo Bayer (lama vermelha) desaguados por filtros prensa.

Busca-se, assim, contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia para previsão do comportamento do regime de fluxo e da poropressão no maciço, subsidiando hipóteses mais assertivas a serem consideradas em futuros projetos de pilhas para disposição de resíduo de bauxita desaguado por filtros prensa.

1.1.1 Objetivos Específicos

Ao longo do projeto pretende-se que outros objetivos sejam alcançados, a fim de validar critérios de projeto de pilhas de resíduo do processamento da alumina desaguado por filtros prensa. São eles:

- Obtenção de um banco de dados de caracterização geotécnica do resíduo filtrado, incluindo parâmetros de resistência, compressibilidade, curva de retenção de umidade e condutividade hidráulica, por meio da análise e interpretação de resultados de ensaios de laboratório realizados em amostras do resíduo;
- Aplicação de modelo numérico elaborado com o pacote de softwares da GEOSTUDIO versão 2019 R2, SEEP/W, SIGMA/W e SLOPE/W, por meio de análises acopladas de deformação e fluxo, para comparação entre a previsão de poropressões estimadas, com os dados de monitoramento geotécnico de um aterro teste;
- Análise do modelo numérico bidimensional aplicado a uma pilha hipotética de resíduo filtrado, avaliando a influência de diferentes condições de umidade de compactação, distribuição geométrica dos resíduos e presença de drenagem interna nas poropressões desenvolvidas no maciço durante a etapa de construção.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório, no qual são apresentadas as considerações gerais, os objetivos gerais e específicos e a organização da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, onde são abordadas as propriedades das bauxitas e seus depósitos, a produção de alumina e principais características dos seus rejeitos, os métodos de disposição e o desaguamento por filtros prensa, os conceitos fundamentais a respeito das poropressões construtivas e de solos não saturados, além dos fundamentos de análise construtiva pelo Método dos Elementos Finitos.

Apresentam-se no Capítulo 3 os procedimentos e métodos utilizados para caracterização geotécnica do resíduo do processamento de bauxita proveniente de filtros prensa, o monitoramento do modelo físico experimental e a construção e aplicação do modelo numérico proposto.

A apresentação dos resultados dos ensaios de caracterização do rejeito é realizada no Capítulo 4, onde são também comparados os resultados do modelo numérico aos dados monitoramento geotécnico do modelo físico experimental, ou aterro teste, avaliando-se as poropressões construtivas desenvolvidas no material. Por fim, é abordada a aplicação do modelo numérico para previsão das poropressões construtivas de uma pilha com geometria hipotética, subsidiando hipóteses fundamentadas a serem consideradas em projetos de aterro compactados com resíduo de processamento de bauxita desaguado por filtros prensa.

As considerações finais a respeito da metodologia proposta são apresentadas no Capítulo 5, onde também são sugeridos os estudos futuros.

A lista de Referências Bibliográficas é apresentada no Capítulo 6.

Nos Anexos são apresentados os resultados dos ensaios realizados no resíduo estudado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para melhor compreensão do trabalho, apresenta-se, a seguir, uma revisão bibliográfica sobre as bauxitas, os principais conceitos, características, e estudos relacionados ao resíduo da produção de alumina, métodos de disposição e desaguamento. Atendendo aos objetivos elencados, é apresentada uma revisão sobre os mecanismos e fenômenos que controlam a geração poropressões construtivas, uma breve discussão acerca dos solos não saturados, além de aspectos relevantes à análise construtiva pelo Método dos Elementos Finitos aplicada ao estudo desse material específico.

2.1 A Bauxita

O alumínio, o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial (Paz, 2016), visto que devido à sua elevada reatividade química, não é encontrado na natureza em seu estado elementar, mas presente na estrutura de rochas constituídas por compostos oxidados como silicatos e suas argilas e óxidos hidratados (Villar, 2002). Os feldspatos, constituintes das rochas ígneas e solos com tal origem, são formados por silicatos de alumínio, dentre os quais, o principal é a caulinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o qual contém aproximadamente 40% de óxido de alumínio (Al_2O_3) (Barrand *et al.*, 1967). Os diversos óxidos hidratados do alumínio são encontrados nas rochas sedimentares, mas não formam mais que aglomerações locais, não representando, portanto, fontes significativas de alumínio (Santos, 1989).

Em 1808, graças aos esforços do químico britânico Humphry Davy, tornou-se possível obter o alumínio de maneira efetiva, por meio de eletrólise reduzindo a alumina ao alumínio. O metal fora inicialmente nomeado *aluminium*, que posteriormente seria chamado *aluminum*, e mais tarde *aluminium* (Barrand *et al.*, 1967).

Na natureza, o alumínio apresenta-se em suas formas mais predominantes como minerais de alumina tri-hidratada e mono-hidratada, comuns à composição de rochas residuais, denominadas bauxitas, nome escolhido para designar o material geológico formado por hidróxidos de alumínio nas proximidades da vila *Les Baux*, no sul da França (Barrand *et al.*, 1967).

A maior parte das jazidas de óxido de alumínio proveniente da decomposição das rochas de silicatos primários está situada em zonas tropicais devido ao fenômeno de laterização, embora algumas possam ser encontradas em regiões temperadas. Em função de variações climáticas

bem definidas (estações secas e chuvosas) e contato com a água, as rochas ricas em silicato (basalto, gnaisses, micaxistos, entre outras) se decompõe, dissolvendo parte da sílica, formando superficialmente crostas de rocha compostas principalmente por óxido de ferro e alumina hidratada, denominadas lateritas. A essas rochas formadas, quando predominantes em alumina, é dado o nome de bauxita.

Embora a bauxita seja a principal fonte mineral para produção em larga escala de alumina, outras fontes também podem ser consideradas, como a alunita, anortosito, resíduo de carvão e xistos betuminosos. No caso da produção da alumina refratária, podem ser consideradas fontes de matéria-prima a mulita sintética produzida do caulim, a cianita e a sillimanita. Para a produção de abrasivos considera-se o carboneto de silício e a alumina-zircônia, apesar do elevado custo de produção (USGS, 2018).

2.1.1 Definição, Características e Classificação

De um modo geral, os processos industriais para produção do alumínio metálico podem ser divididos em duas principais etapas, a saber, (i) o processo hidrometalúrgico que consiste na lixiviação alcalina da bauxita com hidróxido de sódio (NaOH) sob temperatura e pressão controladas dando origem à alumina (Al_2O_3), com pureza superior a 99%, ao qual é dado o nome de processo Bayer, (ii) seguindo o processo eletrolítico Hall-Héroult, que compreende na dissolução da alumina advinda do processo Bayer em criolita natural ou sintética fundida e reduzida dando origem ao alumínio primário ou metálico. A depender da composição do minério de bauxita disponível, a estequiometria de produção de alumínio primário pode variar entre quatro e sete toneladas de bauxita para cada duas toneladas de alumina, que são necessárias para a produção de uma tonelada de alumínio (Barrand *et al.*, 1967; Paz, 2016).

O isolamento do metal alumínio em forma de cloreto foi primeiramente apresentado pelo físico Hans Christian Oersted, em 1815. Henri Saint-Claire Deville, em 1854, cria o primeiro processo comercial de produção de alumínio, expondo o primeiro lingote de alumínio em 1855, em Paris, quando o processo de redução eletrolítica da alumina com uso de criolita (Na_3AlF_6) é tornado público, processo este conhecido como Hall-Héroult, nomeado segundo seus criadores.

De acordo com Klein & Hurlbut Jr. (2003), define-se por bauxita a rocha de cor avermelhada, que apresenta hidróxido ou oxi-hidróxidos de alumínio em diferentes composições, além de impurezas como a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), sílica em forma de quartzo (SiO_2), anatásio (TiO_2) e material amorfo. Dentre os principais minerais de

hidróxido de alumínio presentes na bauxita, cita-se a gibbsita ou hidrargilita, a boehmita e o diásporo. A Tabela 2.1 apresenta algumas de suas propriedades minerais.

Tabela 2.1: Minerais de alumínio presentes na bauxita. (Modificado de Paz, 2016)

Mineral	Fórmula Química	% Al ₂ O ₃	Massa específica (t/m ³)
Gibbsita	Al ₂ O ₃ .3H ₂ O	65,36	2,3-2,4
	Al(OH) ₃		
	γ-Al(OH) ₃		
Boehmita	Al ₂ O ₃ .H ₂ O	84,98	3,0-3,07
	AlO(OH)		
	γ-AlO(OH)		
Diásporo	Al ₂ O ₃ .H ₂ O	84,98	3,3-3,5
	AlO(OH)		
	α-AlO(OH)		

A hidrargilita, que é a bauxita rica em gibbsita é chamada tri-hidratada, uma vez que sua fórmula pode ser expressa como Al₂O₃.3H₂O. Por sua vez, a bauxita composta por boehmita (Al₂O₃.H₂O) é conhecida como boehmítica ou mono-hidratada. Além dela, a bauxita com presença de diásporo também é mono-hidratada, embora usualmente referenciada diaspórica ou mono-hidratada diaspórica.

Segundo Paz (2016), existem as bauxitas mistas, essencialmente gibbsíticas, apresentando boehmita desde 2% até 30%, como no caso das bauxitas identificadas no Caribe. De acordo com Authier-Martin *et al.* (2001), as bauxitas gibbsíticas com presença de boehmita em taxas inferiores a 2%, mesmo que dificilmente identificadas nas análises, podem impactar negativamente nos custos dos processos a temperaturas baixas.

Como ilustrado na Tabela 2.1, o diásporo apresenta a maior massa específica entre as bauxitas, enquanto a gibbsita é a que apresenta condições mais favoráveis à solubilização durante o processo Bayer. Dessa forma, atesta-se que a bauxita tri-hidratada é a mais indicada para o processo produtivo de obtenção de alumínio por apresentar menores custos de processo (Hill & Ostojic, 1984; Authier-Martin *et al.*, 2001; Paz, 2016).

Na literatura são propostas diferentes classificações para a bauxita levando em conta a gênese dos depósitos, sua composição químico-mineralógica e finalidade tecnológica. (Patterson, 1984; Hill & Ostojic, 1984; Freyssinet *et al.*, 2005; Smith, 2009; Paz, 2016).

a) Gênese dos Depósitos

Com relação à gênese dos depósitos, as bauxitas são classificadas como cársticas ou lateríticas (Paz, 2016).

- i. Os depósitos de bauxitas cársticas são compostos por aglomerações de óxidos de alumínio provenientes da dissolução de carbonatos e do intemperismo dos aluminossilicatos. Bardossy *et al.* (1980) estabelece subtipos baseando na composição dos depósitos e no modo de carstificação. Esses depósitos são vastamente encontrados no leste europeu e norte da Ásia (Freyssinet *et al.*, 2005).
- ii. Os depósitos de bauxitas lateríticas formados em clima tropical e subtropical, tipicamente originados a partir de intemperismo de rochas aluminossilicatadas, representam em torno de 90% das reservas mundiais desse minério (Paz, 2016).

b) Composição Químico-Mineralógica

São classificadas com base no mineral útil, gibbsítico, boehmítico, diaspórico ou misto; e definidos em relação aos teores de Alumina Aproveitável (AA) e Sílica Reativa (SR), impureza geralmente associada à caulinita (Paz, 2016).

Nesse caso, menciona-se a subdivisão entre as bauxitas gibbsíticas, a saber, *high-grade*, que contém acima de 41% m/m de AA e menos de 5% m/m de SR, e *low-grade*, cuja AA está presente em menos de 40% e apresenta SR entre 5 e 20%. (Rayzman *et al.*, 2003).

c) Finalidade Tecnológica

As bauxitas podem ser classificadas ainda entre metalúrgicas, quando destinadas à obtenção do alumínio primário, e não metalúrgicas, como as destinadas à produção de refratários, produtos abrasivos, reagentes químicos (como sulfato de alumínio, aluminato de sódio, cloreto e acetato de alumínio), agente fluxante na fabricação de aço, cimento com alta alumina e cimento Portland, por exemplo (Paz, 2016).

Não obstante, outros pesquisadores propõem critérios de classificação baseados na geomorfologia, natureza do substrato, a forma dos corpos mineralizadores e suas relações com rochas associadas, além da altitude em que ocorrem (Hose, 1960; Valeton, 1972; Patterson, 1967; Grubb, 1973; Palomino, 2017).

2.2 Depósitos de Bauxita

Segundo Carvalho (1989), os primeiros depósitos de bauxita foram localizados no sul da França e na Europa Central, associados, principalmente, a rochas carbonáticas. Posteriormente, foram apontados depósitos em regiões tropicais, com materiais abundantes em alumínio sobre rochas ígneas, metamórficas e na forma de depósitos sedimentares.

Harrossowitz (1926) *apud* Kotschoubey (1988), identificou dois grupos de bauxita, dos quais um grupo se forma sobre rochas carbonáticas e outro sobre rochas silicáticas.

Lelong *et al.* (1976) *apud* Palomino (2017), consideraram as características morfológicas dos depósitos classificando-as em bauxitas lateríticas de cobertura, bauxitas “sedimentares” e bauxita de “carst”, termo introduzido por Vadasz (1951).

Bárdossy (1982), apesar de não considerar o ambiente tectônico de formação, apresenta uma classificação em que a litologia do substrato é enfatizada. Nesse caso, são indicados dois grupos fundamentais: os depósitos sobre rochas alumino-silicáticas, este subdividido em depósitos lateríticos e depósitos sedimentares, e os depósitos sobre as rochas carbonáticas. Por se tratar de uma classificação amplamente aceita, neste trabalho será utilizada a classificação proposta por Bárdossy (1982).

2.2.1 Depósitos de Bauxita Laterítica

Tiveram sua origem em depósitos autóctones, de variadas rochas alumino-silicáticas formadas sob intenso intemperismo, em condições tipicamente tropical e subtropical úmido (Bárdossy, 1994). Ocorrem em forma de *blankets* ou corpos lenticulares em zonas aplainadas, relevos tabulares e platôs, submetidos a processos erosivos recentes. Apresentam espessura média de até 10 metros, com variações laterais nos teores de alumínio (Al), ferro (Fe) e silício (Si). As bauxitas são comuns de ocorrerem em perfis lateríticos de grande espessura, formados por meteorização subaérea, intemperismo químico prolongado e lixiviação de rochas de aluminossilicatos (Bárdossy & Aleva, 1990; Ferenczi, 2001; Retallack, 2010). A composição química varia segundo o tempo de formação, onde depósitos mais novos, em geral, são gibbsíticos, enquanto nos depósitos lateríticos mais antigos, comumente, a boehmita é mais presente. Os principais depósitos podem ser encontrados na Austrália, e no Brasil, nesse último em Pitinga, Paragominas, Porto Trombetas, Cataguases, Mirai e Poços de Caldas.

2.2.2 Depósitos de Bauxita Sedimentar

Tiveram origem em depósitos alóctones, sedimentares, sem associação a estratos carbonáticos, com formações de natureza ígnea, metamórfica ou sedimentar. Ocorrem em regiões tectonicamente estáveis, plataformas ou paraplatformas, majoritariamente encontradas na parte basal de coberturas sedimentares, representam entre 1% e 2% das bauxitas (Bárdossy, 1982).

A composição mineralógica aparenta ser independente do seu tempo de formação, sendo principalmente formados por: gibbsita, bohemita e caulinita. Os depósitos são encontrados na região de Tikvvin na Rússia, Arkansas e Sibéria (Palomino, 2017).

2.2.3 Depósitos de Bauxita sobre Rochas Carbonáticas

Apesar da baixa presença de alumínio, formam depósitos devido à dissolução e lixiviação dos carbonatos, deixando presente o alumínio concentrado (Santos, 2011). Ocorrem comumente em depressões paleocársticas em forma de acumulações de material argiloso entre carbonatos, por exemplo, o calcário e a dolomita (Bárdossy, 1982; Pajović, 2009). Seus depósitos comercialmente significativos ocorrem na Europa, Oriente Médio, China e Jamaica.

Sua composição mineralógica varia com o tempo de formação do minério, com abundância de boehmitas, porém em depósitos mais antigos, figuram os diaspóricos e boehmítico-diaspóricos.

2.2.4 Os Principais Depósitos de Bauxita no Brasil

Enquanto as reservas mundiais de bauxita somam 29 bilhões de toneladas (entre Austrália, Guiné, Brasil, Indonésia e China), as reservas de bauxitas somente no Brasil somam 3,6 bilhões de toneladas, das quais 75% estão no estado do Pará, onde estão as minas Trombetas, Paragominas e Juruti, e 16% em Minas Gerais. Esses depósitos são tipicamente lateríticos, derivados de rochas cretáceas, que ocorrem em extensos platôs, como no caso da Amazônia, enquanto os depósitos do sudeste do país ocorrem em depósitos isolados, derivados de distintos tipos litológicos, encontrados em topos de morros e encostas. (Costa, 2016).

Os depósitos de bauxita laterítica mapeados no Brasil são formados a partir de intemperismo tropical intenso e, embora constituídos em grande parte por gibbsita, tiveram sua origem em diferentes tipos de rocha (Melfi, 1997).

Com base em estudos publicados (Almeida, 1977; Dennen & Norton, 1977; Grubb, 1973; Sigolo, 1979; Aleva, 1981; Melfi & Carvalho, 1984; Varajão, 1988; Valetton *et al.*, 1991) tornou-se possível diagnosticar a ocorrência de três principais depósitos de bauxita no Brasil. Melfi (1997) propõe o seguinte agrupamento aos depósitos de bauxita brasileiros de acordo com a sua litologia:

- i. Bauxita da província da Amazônia Central – em geral formada sobre rochas sedimentares clásticas, inclusive a região de Carajás, depositadas sobre rochas pré-cambrianas metavulcânicas básicas e itabiritos;
- ii. Bauxita da província Central da Mantiqueira – formada sobre rochas pré-cambrianas. Podem ser citados os depósitos do Quadrilátero Ferrífero, formados sobre rochas sedimentares, metavulcânicas e sedimentares, além do complexo Juiz de Fora e Costeiro;
- iii. Bauxita da região Sul e Sudeste – formada principalmente sobre depósitos de rochas alcalinas.

Em seu trabalho, Costa (2016) descreve os depósitos brasileiros de bauxita segundo suas regiões e modo de ocorrência, a saber: os depósitos tipo Platô na Amazônia, depósitos isolados do tipo Topo de Morros, Encostas de Montanhas e Montanhas do nordeste-sudeste-sul, ocorrentes na Bahia, Minas Gerais, Goiás, Espírito Santo, Rio de Janeiro e Santa Catarina, e depósito tipo Montanhas-Platô Isolado em Goiás.

2.3 Mineralogia das Bauxitas Lateríticas

Em função da sua vasta representatividade, aproximadamente 90% das reservas mundiais, especial atenção será dada à composição mineralógica das bauxitas lateríticas. Essas são compostas principalmente por quatro elementos, alumínio (Al), sílica (Si), ferro (Fe) e titânio (Ti), indicados na Tabela 2.2 em percentual de massa, que compõem majoritariamente oito minerais, listados na Tabela 2.3. Esses minerais são classificados como ativos e inertes – ou solúveis e insolúveis.

Tabela 2.2: Composição química típica de bauxitas lateríticas. (Modificado de Paz, 2016).

Componentes principais	% m/m	Traços	% m/m
Al ₂ O ₃	30-60	Carbono orgânico	0,02-0,40
SiO ₂	<0,5-10	P ₂ O ₅	0,02-1,0
Fe ₂ O ₃	1-30	CaO	0,1-2
TiO ₂	<0,5-10	V ₂ O ₅	0,01-0,10
		ZnO	0,002-0,10
		Ga ₂ O ₃	0,004-0,013
		Cr ₂ O ₃	0,003-0,30
		S	0,02-0,10
		F	0,01-0,10
		Hg (ppb)	50-1000

Tabela 2.3: Composição mineralógica típica de bauxitas lateríticas. (Modificado de Paz, 2016).

Elemento	Mineral	Composição química
<i>Principais</i>		
Alumínio	Gibbsita	Al(OH) ₃ ou Al ₂ O ₃ .3H ₂ O
	Boehmita	AlO(OH) ou Al ₂ O ₃ .H ₂ O
Silício	Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ ou Al ₂ O ₃ .2SiO ₂ .2H ₂ O
	Quartzo	SiO ₂
Ferro	Hematita	Fe ₂ O ₃
	Al-Goethita	(Fe,Al)OOH ou (Fe,Al) ₂ O ₃ .H ₂ O
Titânio	Anatásio	TiO ₂
	Rutilo	TiO ₂
<i>Traços</i>		
Carbono	Carbono orgânico	Matéria húmica
Fósforo	Crandalita	CaAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₅ .H ₂ O
	Wavelita	Al ₃ (PO ₄) ₂ (OH,F) ₃ .5H ₂ O
Cálcio	Calcita	CaCO ₃
	Crandalita	CaAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₅ .H ₂ O
Potássio	Muscovita	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂
	Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ .(H ₂ O)]
Manganês	Litioforita	(Al,Li)MnO ₂ (OH) ₂
Magnésio	Magnesita	MgCO ₃
	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
Sódio	Dawsonita	NaAl(CO ₃)(OH) ₂
Estrôncio	Celestita	SrSO ₄
Enxofre	Woodhouseita	CaAl ₃ (PO ₄)(SO ₄)(OH) ₆
	Pirita	FeS ₂
Zinco	Gahnita	ZnAl ₂ O ₄
Cromo	Cromita	FeCr ₂ O ₄
Vanádio	Schubnelita	Fe(VO ₄)(H ₂ O)
Zircônio	Zircão	ZrSiO ₄

2.4 O Processo Bayer e o Resíduo de Bauxita para a produção de Alumina – *Lama Vermelha*

Segundo Silva Filho *et al.* (2007), inicialmente, a bauxita era beneficiada por meio do processo conhecido por Le Chatelier, desenvolvido por Louis Le Chatelier em 1855. Em linhas gerais, produzia-se a alumina por meio do aquecimento a 1.200 °C da bauxita em presença de carbonato de sódio (Na_2CO_3), quando então eram removidos os aluminatos formados com água. Em seguida, ocorria a precipitação do hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) em função da ação de gás carbônico (CO_2) presente do meio. Dessa forma era obtido o hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) o qual era filtrado, seco e limpo.

Em 1888, o químico Karl J. Bayer patenteou um processo hidrometalúrgico mais moderno de extração da alumina calcinada a partir do beneficiamento da bauxita, o processo Bayer (Lumley, 2011; Parekh & Goldberg, 1976; Palomino, 2017), sendo o principal método para produção de alumina a partir de bauxita no mundo. Seu fundamento explora a solubilidade dos hidratos de alumínio em solução cáustica, diferentemente dos demais óxidos presentes na rocha e que não são aproveitáveis à produção de alumina. Os principais aspectos do processo Bayer são:

- a dissolução da alumina da bauxita em altas temperaturas e baixa pressão por meio de soda concentrada;
- a separação dos resíduos insolúveis;
- a precipitação parcial da alumina em solução por meio da diminuição da temperatura;
- a diluição da lixívia de aluminato de sódio.

De um modo geral, o processo inicia-se com redução das partículas da bauxita por britagem e moagem com uma porção cáustica a ≈ 60 °C. Em seguida, é realizada a dissolução da bauxita em soda cáustica (NaOH) concentrada em alta temperatura e baixa pressão, obtendo-se o aluminato de sódio (NaAl_2). Juntamente com o aluminato, é obtido um resíduo insolúvel de fácil filtragem, por floculação-decantação ou filtração direta, constituído por variados óxidos. A alumina hidratada original da rocha é recuperada por meio de hidrólise. Os resíduos da solução são lavados para recuperação de licor rico e, então, são descartados.

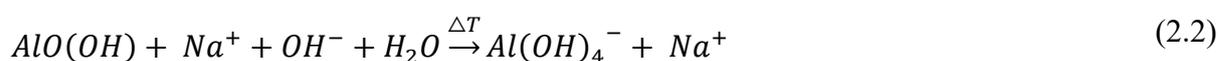
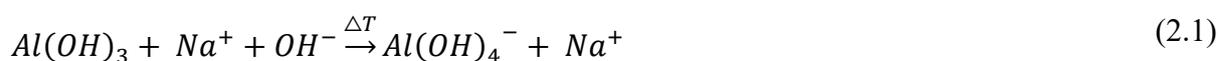
Esses resíduos insolúveis gerados durante a etapa de clarificação, provenientes da desagregação do constituinte alumino-férrico, dão origem, por vezes, a uma lama fina, rica em sílica e óxidos de ferro, conhecida pela sua cor como *lama vermelha*, podendo variar de composição devido às impurezas presentes na bauxita de origem e ao comportamento durante

o ataque cáustico (Anjos & Silva, 1983). Após resfriada com inserção de sementes de gibbsita, a solução enriquecida com aluminato de sódio (licor rico) é agitada por entre 20 e 50 horas, para que se precipite em forma de gibbsita parte da alumina dissolvida. O produto da precipitação é classificado em frações fina e grossa. A fração fina é retornada ao circuito de precipitação onde interage como semente no ciclo subsequente. A fração grossa resultante é lavada e calcinada a temperaturas entre 1.000 °C e 1.100 °C, cujo produto final é a alumina. A alumina tri-hidratada resultante (Al_2O_3) – ou alumina aproveitável – é seca e calcinada para eliminação da água de cristalização.

A seguir são apresentadas, em linhas gerais, as etapas constituintes do processo Bayer.

a) Digestão

A digestão é um processo de lixiviação em que os minerais ricos em alumínio presentes na bauxita são dissolvidos em solução cáustica NaOH até margem seguramente abaixo da saturação do licor, evitando a precipitação prematura de gibbsita no circuito de separação da lama. As equações de dissolução da gibbsita (Equação 2.1) e boehmita e diásporo (Equação 2.2) são apresentadas a seguir:



Conforme explica Palomino (2017), a solubilização do processo Bayer pode ocorrer em diferentes temperaturas, a depender da proporção entre a gibbsita, ou alumina tri-hidratada, e boehmita e diásporo, aluminas mono-hidratadas. A solubilização da gibbsita varia entre 140°C a 150 °C, quando o processo Bayer é dito de baixa temperatura (LTD). A boehmita e o diásporo são solubilizados a aproximadamente 250 °C, e o processo é denominado de alta temperatura (HTD) (Van Deursen, 2016). Nessas condições, é formado um licor a partir da dissolução dos minerais contendo alumínio. (Silva Filho *et al.*, 2007).

No caso da solubilização a temperaturas mais elevadas, pode haver a dissolução de impurezas como quartzo e caulinita, em forma de sodalita Bayer artificial, fixando íons de sódio (Na^+) na fase sólida durante sua eliminação. A formação da sodalita, que é insolúvel nas condições do processo Bayer, e, portanto, descartada junto à lama vermelha, representa uma perda de alumina associada aos argilominerais, além de aumentar o consumo de soda cáustica (NaOH) durante o processo.

No caso das bauxitas lateríticas, comuns nos depósitos nacionais, sua composição é rica em gibbsita e solubilizam, principalmente, a caulinita em forma de sílica reativa. Devido à sua natureza argilomineral, a caulinita é facilmente separada durante o processo de beneficiamento da fração de interesse (Ostap, 1986).

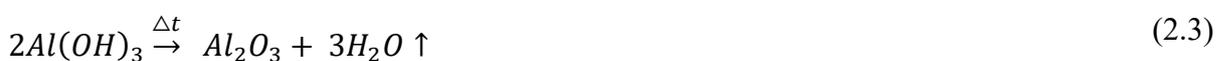
b) Clarificação

Compreende o processo da sedimentação, por meio de adição de flocculantes à solução, dos sólidos insolúveis do licor cáustico (aluminato de sódio). Os resíduos do minério depositam-se em tanques de decantação, de onde são transferidos para tanques de lavagem para recuperação da soda cáustica e reutilização na fase de digestão. Em seguida, o licor é submetido a uma etapa de separação adicional, utilizando-se filtros de segurança em série a fim de eliminar impurezas do licor clarificado.

O resíduo insolúvel (*lama vermelha*) representa o maior volume de resíduos gerados no processo Bayer, fazendo dele um dos maiores problemas ambientais causados pelas refinarias de alumina (Palomino, 2017). A depender da metodologia de disposição, podem ser empregados ainda processos como filtragem, espessamento ou neutralização.

c) Calcinação

Inicialmente, a alumina hidratada passa pelo processo de lavagem com a finalidade de remover vestígios de licor. Posteriormente, a alumina é levada à calcinação com temperaturas de até 1.100 °C, eliminando a água de hidratação e produzindo um pó alvo de cristais de alumina pura (Palomino, 2017; Filho *et al.*, 2007; Gancev, 2009). Este produto é encaminhado para fundições de alumínio primário por meio do processo de obtenção Hall-Hearult. A reação que descreve a etapa de calcinação é descrita pela Equação 2.3:



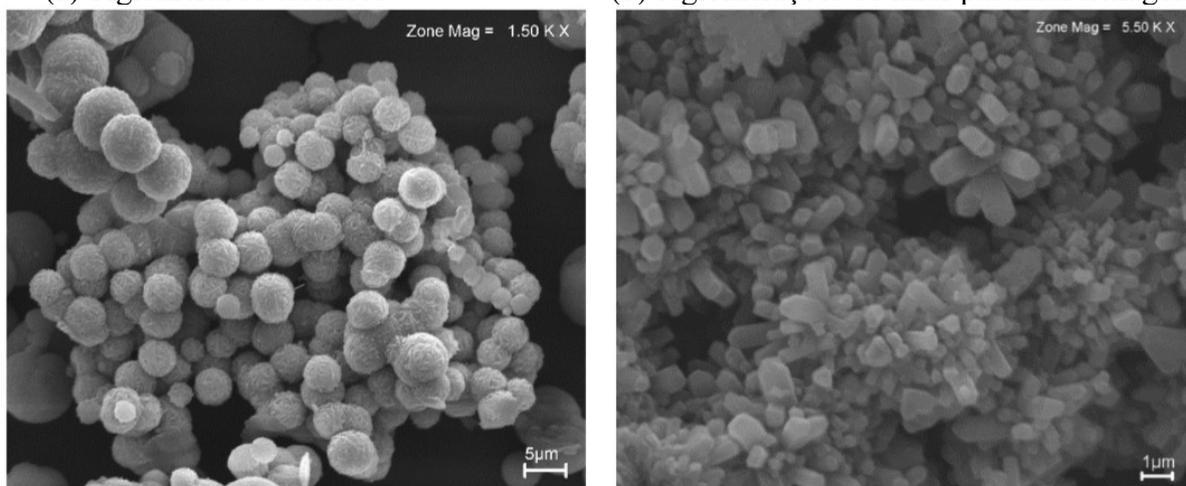
2.4.1 Produtos de Dessilicação no Processo Bayer

No processo Bayer, a caulinita e o quartzo solubilizados nos processos LTD e HTD, respectivamente, são precipitados em forma de silicatos insolúveis, denominados produtos de dessilicação - DSP¹ (Paz, 2016). No processo LTD, a sodalita Bayer (Na₈Cl₂[AlSiO₄]₆),

¹ Do termo *Dessilication Product*.

principal forma de silicato insolúvel encontrada, é facilmente sintetizada em processos hidrotermais alcalinos, em presença de silício, alumínio, metais alcalinos ou alcalinos terrosos (Paz, 2016). Sua precipitação ocorre em forma de aglomerados esféricos de placas hexagonais ou em finos discos. A Figura 2.1 apresenta, em detalhe, as formações da sodalita Bayer registradas em fotomicrografias de varredura eletrônica.

Figura 2-1: Fotomicrografia eletrônica de varredura de sodalita (Fonte: Paz, 2016)
(a) Aglomerados esféricos (b) Aglomerações de finas pastilhas hexagonais



A quantidade necessária para reposição de NaOH por tonelada de alumina produzida é fator importante para a avaliação da viabilidade econômica do beneficiamento baseado no custo do refino. É conhecido que a formação de sodalita Bayer é responsável pelo consumo de NaOH e é diretamente proporcional à concentração de caulinita no material minerado de tal modo que Van Deursen (2016) afirma que, de um modo geral, as bauxitas que apresentam a razão entre alumina aproveitável e sílica reativa $AA/SR > 10$ são economicamente atraentes, uma vez que a produção de alumina equilibra os custos de reposição de soda.

De acordo com Smith (2009), dentre as maneiras de reduzir a perda de sódio no processo, podem ser estabelecidas as seguintes estratégias:

- i. Reduzir a quantidade de sílica reativa disponível na alimentação, por meio de processamento mineral ou tornando a sílica em não reativa durante a digestão Bayer;
- ii. Intervir no processo a fim de produzir resíduos menos abundantes em soda, como por exemplo reduzindo transformação da porção de sílica reativa em DSP, ou incentivar a formação de DSPs alternativos, com menores concentrações de soda;
- iii. Recuperar soda do DSP, retornando o licor Bayer a partir de um reprocessamento da lama vermelha, ou de um concentrado de DSP obtido da lama.

As estratégias elencadas são consideradas tecnologias que devem ser implementadas em estágios anteriores, posteriores ou até mesmo durante o processo Bayer. Em seu trabalho, Smith (2009) discorre sobre potenciais tecnologias para o processamento de bauxitas com alta sílica reativa (BASR).

Conforme discorrido, resumidamente, fazem parte do processo de refino de bauxitas as seguintes etapas:

- i. Cominuição para manejo e exposição de argilominerais;
- ii. Desagregação dos argilominerais com água;
- iii. Lavagem para separação dos argilominerais da fração de interesse;
- iv. Desaguamento da fração de interesse;
- v. Desaguamento dos argilominerais;
- vi. Descarte dos argilominerais.

A importância em se viabilizar economicamente o processamento das bauxitas com alta sílica reativa deve-se ao fato de que parte das reservas mundiais de bauxita, cerca de 60%, é constituída de bauxita nessas condições, representando assim um aumento global das reservas.

No caso das reservas de bauxita de Paragominas-PA, por exemplo, os depósitos ricos em bauxitas com alta sílica reativa (BASR) são economicamente viáveis por ser possível reduzir a quantidade de caulinita por meio de processos de desagregação, com adição de água e agitação, seguidos da lavagem com separação de materiais com diferentes granulometrias (Paz, 2016). Em linhas gerais, a desagregação ocorre previamente ou simultaneamente ao processo de lavagem, em que a fragmentação do minério com água ocorre a fim de remover as partículas mais finas de argila aderidas às partículas grosseiras de interesse.

O desempenho do refino de alumina depende tipicamente da qualidade da bauxita beneficiada, em particular da quantidade de alumina aproveitável, sílica reativa e componentes orgânicos. No caso da planta de beneficiamento em estudo, são beneficiadas bauxitas extraídas de duas diferentes minas localizadas no norte do Brasil, aqui indicadas como minas “Pa” e “Tr”. Suas principais características são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Qualidade da bauxita beneficiada. (Modificado de Winschnewski *et al.*, 2011)

	Mina Pa	Mina Tr
Alumina aproveitável - Al ₂ O ₃	48,2%	49,1%
Sílica reativa - SiO ₂	4,6%	4,1%
Carbono orgânico	<0,05%	<0,05%

O alto teor de alumina presente em ambas as amostras resulta em um consumo de bauxita relativamente baixo, o que é benéfico em termos de consumo de energia, uma vez que a quantidade de bauxita não gibbsítica, que não contribui para a produção de hidrato é pequena. Como ambas as bauxitas apresentam baixo teor de boehmita, o processo no refino é LTD. Em contrapartida, conforme apresentado na Tabela 2.4, o teor de sílica reativa relativamente alto é responsável pelo consumo de soda cáustica para DSP, aumentando a quantidade de lama vermelha gerada no processo.

2.4.2 Rejeitos de Beneficiamento de Bauxita

De um modo geral, as atividades de lavra, beneficiamento e extração metalúrgica fazem parte dos principais processos da indústria minerária. A atividade de lavra consiste na exploração, ou extração, do bem mineral presente na superfície ou subsolo. O beneficiamento tem por finalidade a adequação física e química do bem mineral de acordo com requisitos exigidos por processos industriais posteriores. Por fim, o metal almejado é extraído do minério beneficiado por meio da quebra das ligações metálicas na etapa da extração metalúrgica.

Nos processos de beneficiamento dos minérios são gerados os rejeitos de mineração, comumente apresentando elevado volume de água. Conforme descrito por Vick (1983), os rejeitos são compostos por material sem interesse econômico, oriundo do processamento mineral ou do beneficiamento industrial, em geral descartado em forma de lama por via úmida em diques ou barragens.

No caso do processamento da bauxita, sua lavra ocorre, geralmente, em minas a céu aberto, em especial em regiões tropicais ou subtropicais. Segundo valores indicados na literatura, na produção de uma tonelada de alumina são geradas entre 0,3 a 2,5 toneladas de lama vermelha, em casos extremos, sendo mais observada a geração média entre 0,7 e 2,0 toneladas (Singh *et al.*, 1997; Nguyen & Boger, 1998; Hind *et al.*, 1999; Bermann, 2002; McConchie *et al.*, 2002; Kahane *et al.*, 2002; Agrawal *et al.*, 2004; Genç-Fuhrman *et al.*, 2004; Brunori *et al.*, 2005; Collazo *et al.*, 2005; Tan & Khoo, 2005; Wang *et al.*, 2005; Santora *et al.*, 2006; Silva Filho *et al.*, 2007, *World Aluminium*, 2015) o que representa uma geração de aproximadamente 120 Mt de resíduos industriais, anualmente, majoritariamente via processo Bayer (Redhy & Rao, 2016).

2.4.3 Características Físico-Químicas e Mineralógica da Lama Vermelha

Por se tratar de um resíduo industrial, a lama vermelha está sujeita a variações atribuídas principalmente às características da matéria-prima, do processo industrial e ao tempo de

descarte. Tais características atribuem a esse resíduo uma diversidade de propriedades e comportamentos mesmo para os resíduos de uma mesma refinaria. Com efeito, os diferentes processos de obtenção da alumina, além da composição da bauxita que lhe deu origem, são os principais responsáveis pela variabilidade observada na composição químico-mineralógica das lamas vermelhas.

Diversos autores têm realizado análises químicas em amostras de lama vermelha coletadas em distintos países a fim de caracterizar a composição químico-mineralógica média desse resíduo (Liu & Wu, 2012; Li & Rutherford, 1996; Manfroi, 2009; Silva Filho *et al.*, 2007; Arruda Falcão, 2005, Paramguru *et al.*, 2004; Garcia, 2012, Rivas Mercury *et al.*, 2010; Arslan *et al.*, 2015, Sutar *et al.*, 2014, Kinnarinen *et al.*, 2018). Observa-se, com base nos trabalhos desenvolvidos, que entre os compostos mais comuns da lama vermelha, há a predominância dos óxidos de ferro (Fe_2O_3), alumínio (Al_2O_3), silício (SiO_2), titânio (TiO_2), cálcio (CaO) e sódio (Na_2O). Apesar de haver registros de lama vermelha variando consideravelmente as concentrações dos componentes, como os óxidos de ferro, atingindo intervalos entre 4% e 72%, e óxido de alumínio variando entre 5% e 40%, de um modo geral, os compostos químicos presentes nas lamas vermelhas estudadas enquadram-se nos intervalos ilustrados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Composição química típica de lamas vermelhas. (*World Aluminium*, 2020)

Compostos	% em peso (base seca)
Fe_2O_3	5 - 60
Al_2O_3	5 - 30
SiO_2	3 - 50
TiO_2	0,3 - 15
CaO	2 - 14
Na_2O	1 - 10

Outros componentes como óxidos de metais, podem estar presentes em pequenas proporções, como é o caso de óxidos de arsênio, berílio, cádmio, cromo, cobre, gálio, chumbo, manganês, mercúrio, níquel, potássio, escândio, thorium, urânio, vanádio, zinco e zircônio. Elementos não metálicos como fósforo, carbono e enxofre também podem estar presente na lama vermelha (*World Aluminium*, 2020).

A ocorrência de óxidos em maiores ou menores quantidades pode influir nas características e propriedades do resíduo, de tal modo que, a variação na composição da lama vermelha decorrente de mudanças em frentes de lavra e até mesmo do empobrecimento do minério

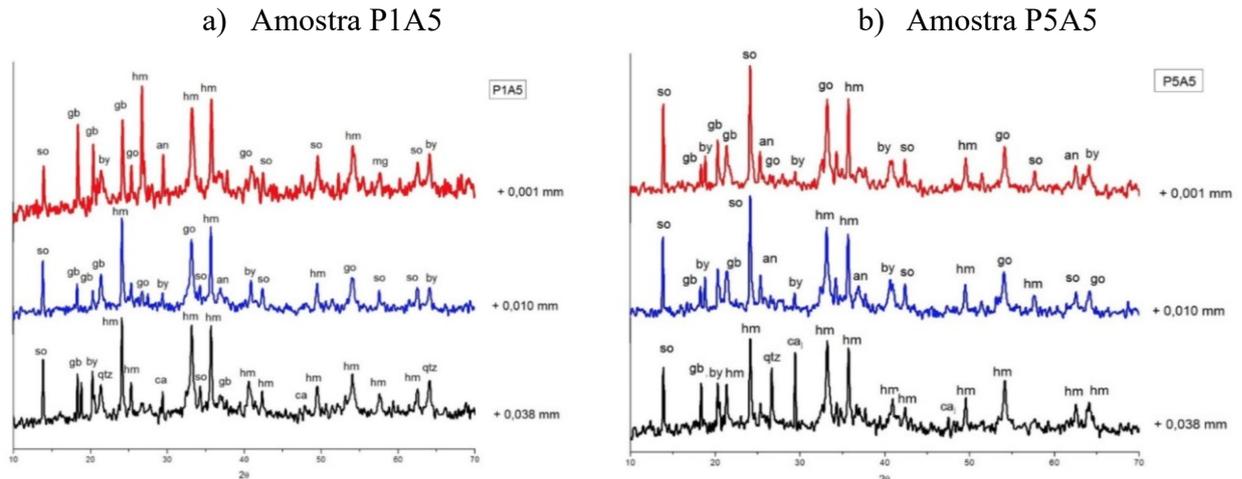
extraído pode representar dificuldades para o processo de filtragem, tornando-o menos eficaz (Garcia, 2012). A composição mineralógica comum às lamas vermelhas é apresentada na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Composição mineralógica típica de lamas vermelhas. (*World Aluminium*, 2020)

Compostos	% em peso (base seca)
Sodalita ($3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$)	4 - 40
Goethita (FeOOH)	10 - 30
Hematita (Fe_2O_3)	10 - 30
Magnetita (Fe_3O_4)	0 - 8
Sílica (SiO_2)	3 - 20
Aluminato de Cálcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	2 - 20
Boehmita (AlOOH)	0 - 20
Dióxido de Titânio (TiO_2)	2 - 15
Muscovita ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0 - 15
Calcita (CaCO_3)	2 - 20
Caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0 - 5
Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$)	0 - 5
Perovskita (CaTiO_3)	0 - 12
Cancrinita ($\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot 2\text{CaCO}_3$)	0 - 50
Diásporo (AlOOH)	0 - 5

A lama vermelha abordada no presente trabalho foi objeto de estudo de Pinheiro *et al.* (2017) que aponta o pH do resíduo entre 10,6 e 11,7, sendo observada variação durante os processos de preparação das amostras e filtragem. A partir da difratometria de Raios-X realizadas por Pinheiro *et al.* (2017), foram indicadas como as principais fases presentes no resíduo a hematita, sodalita, goethita, gibbsita e anatásio. Além desses minerais, foram observadas também bayerita, calcita, quartzo e cancrinita, em menores quantidades. A Figura 2.2 ilustra os resultados dos difratogramas de Raios-X para duas amostras, P1A5 e P5A5, coletadas na lama vermelha descartada no depósito de resíduos.

Figura 2-2: Difratometria de Raios-X na lama vermelha (Fonte: Pinheiro *et al.*, 2017)



Gb – gibbsita; Hm – hematita; So – sodalita; Go – goethita; an – anastásio; by – bayerita; ca – calcita; qtz - quartzo.

Dentre as principais fases existentes na lama vermelha analisada cita-se a gibbsita, hematita e sodalita. A sodalita é formada a partir da solubilização da caulinita como um subproduto do processo Bayer e tem grande influência na capacidade de intercambiar íons de sódio, apresentando como consequência a redução da velocidade de deposição das partículas em solução cáustica, como apontado por Nery (2013). Como discutido por Newson *et al.* (2006), lamas vermelhas podem apresentar compressibilidade similar à de solos argilosos, mesmo sem a presença de argilominerais, e ângulo de atrito interno semelhante às das areias (φ' entre 37 e 45°). As lamas vermelhas são sujeitas à ação da sodalita, em que as ligações decorrentes das cargas elétricas das partículas responsáveis pela estruturação das moléculas parecem ser suficientemente estáveis sob compressão. A exposição do resíduo a soluções ácidas é responsável pela dissolução da sodalita e, conseqüente, perda de cimentação.

2.5 Caracterização Geotécnica de Lama Vermelha

O estudo para conhecimento das propriedades físicas e definição de parâmetros geotécnicos de lamas vermelhas tem sido motivação de pesquisas ao longo da última década. O comportamento e a natureza dos rejeitos e resíduos de mineração são influenciados por fatores tais como, a natureza do minério de origem, os processos de beneficiamento e refino adotados durante a extração e beneficiamento do minério, além da metodologia de desaguamento e disposição final.

Conforme apontado por Palomino (2017), dentre as principais propriedades a serem estudadas em rejeitos ou resíduos compactados, podem ser citadas:

- Distribuição granulométrica;
- Densidade de compactação e teor de umidade do material;
- Condutividade hidráulica;
- Compressibilidade do material compactado;
- Resistência ao cisalhamento;
- Curva característica de retenção de água.

As propriedades e características supracitadas possuem fundamental importância em estudos e aplicações de modelos no âmbito da Engenharia Geotécnica. Por essa razão, a seguir serão apresentadas algumas das principais características e parâmetros geotécnicos da lama vermelha reportados na bibliografia.

2.5.1 Peso específico dos grãos

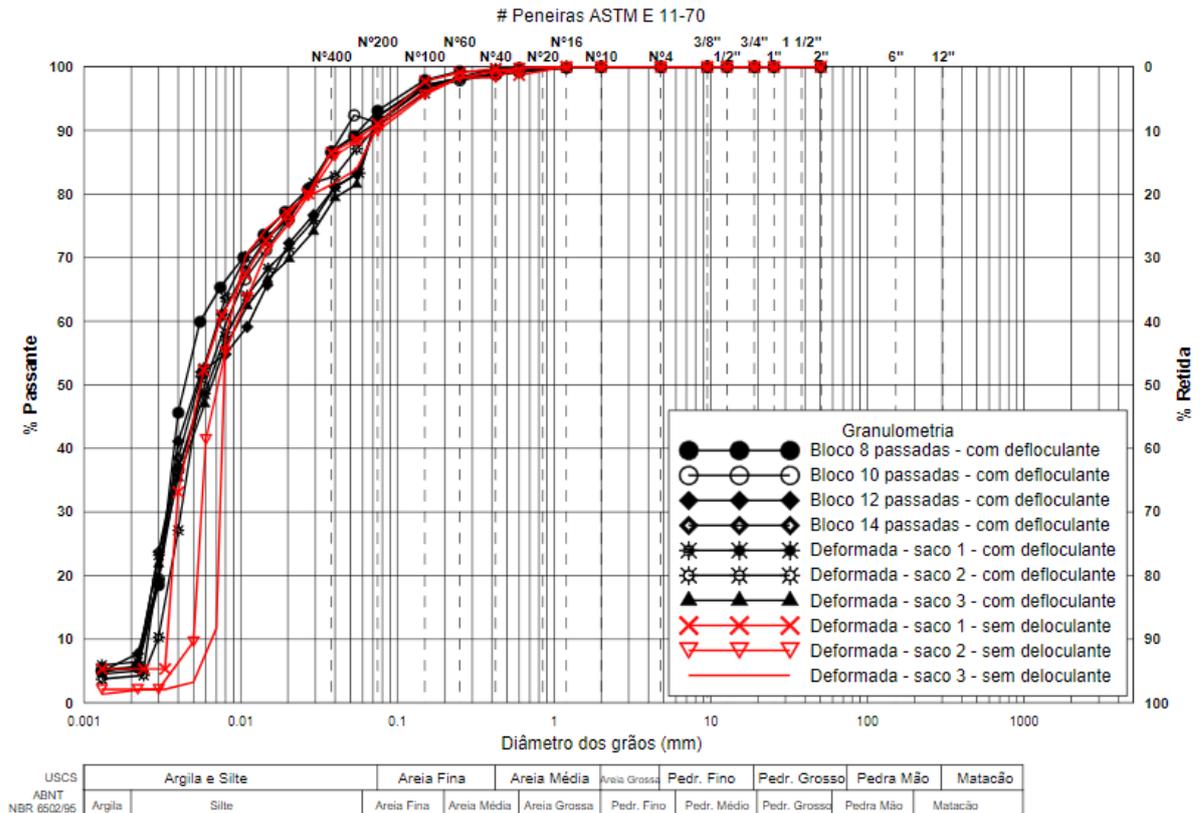
A partir da compilação de resultados de ensaios realizados por autores em diferentes países é observada faixa com valores elevados para peso específico dos grãos (γ_s) em lamas vermelha, variando entre 27 a 37 kN/m³ (Reddy *et al.*, 2020). O elevado valor encontrado para o peso específico dos grãos deve-se à composição das lamas vermelhas ser abundante em metais, em particular, por fases ricas em ferro.

2.5.2 Distribuição Granulométrica

A observação inicial da granulometria de resíduos, representada pela porcentagem presente por faixas em relação ao peso total da amostra, permite a avaliação acerca de seu comportamento esperado, como condutividade hidráulica e compressibilidade, por exemplo.

Li (1998), apresenta uma investigação do efeito da temperatura e concentração de hidróxido de sódio (NaOH), aplicados durante a etapa de digestão do processo Bayer, sobre o comportamento de sedimentação e características físicas, químicas e mineralógicas. Rout *et al.* (2013) apresenta as curvas granulométricas da lama vermelha em que aponta alta presença de finos. Nery (2013) apresenta as frações granulométricas do resíduo de bauxita proveniente do processo Bayer desaguado por filtros prensa. A autora utiliza de ensaios de sedimentação e peneiramento para a definição completa da curva granulométrica, com e sem efeito de floculante, de modo que verificou a faixa de silte, em torno de 85 a 90%, predominante ao resíduo ensaiado, enquanto a fração argila variou entre 1% e 3% nos ensaios com defloculante. A Figura 2-3 ilustra as curvas encontradas no estudo.

Figura 2-3: Curvas Granulométricas de Lama Vermelha (Fonte: Nery, 2013)



2.5.3 Densidade de Compactação e Teor de Umidade

A partir da necessidade de matéria-prima para construção de aterro e rodovias, Reddy & Rao (2016) avaliaram as características de compactação de amostras de lama vermelha nas condições natural, e neutralizada com cloreto de sódio (NaCl) e com ácido clorídrico (HCl). As amostras não tratadas apresentaram resultados de peso específico seco máximo variando entre 12 kN/m³ a 16 kN/m³, e umidade ótima entre 33% e 45%.

Gore *et al.* (2016) com o objetivo de utilizar a lama vermelha para construção de diques, realizaram ensaios de caracterização em resíduos provenientes de duas plantas, uma delas localizada na Jamaica, de bauxita cárstica (R1), e a segunda localizada em Guiné, proveniente de bauxita laterítica (R2). Os ensaios indicaram para a amostra R1 peso específico seco máximo igual a 14,7 kN/m³ e umidade ótima igual a 34%, enquanto para R2, os valores obtidos indicaram valores de peso específico seco máximo entre 14,2 e 14,8 kN/m³, no caso de amostras secas ao ar, e 15,5 kN/m³ para amostra seca sob pressão, e umidade ótima entre 30 e 32%, para ambos os casos.

No caso da lama vermelha desaguada por filtros prensa, os resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal realizados por Nery (2013) indicaram peso específico seco

máximo igual a 14,33 kN/m³ e umidade ótima igual a 33%, para amostras destorroadas, e peso específico seco máximo igual a 13,23 kN/m³ e umidade ótima igual a 31,87%, quando não destorroadas.

2.5.4 Condutividade Hidráulica

Pesquisas referentes à condutividade hidráulica da lama vermelha indicaram valores entre 1,2 x10⁻⁰⁸ m/s e 6,7 x10⁻⁰⁸ m/s (Gore *et al.*, 2016) em que foram ensaiadas amostras de lama vermelha moldadas próxima à umidade ótima (32%) com a energia Proctor Normal. Os resultados apresentados pelos autores foram obtidos a partir de três metodologias, a saber, utilizando o permeâmetro de carga variável e paredes rígidas e permeâmetro de carga variável e paredes flexíveis com e sem aplicação de contrapressão.

Ensaio de permeabilidade a carga variável foram realizados em corpos de prova talhados a partir de amostras indeformadas do resíduo desaguado por filtros prensa, ensaiadas perpendicularmente à direção de compactação das camadas, e em amostras moldadas em laboratório do mesmo resíduo. As amostras deformadas indicaram permeabilidade entre 3,57x10⁻¹⁰ m³/s e 1,91x10⁻⁰⁸ m³/s, enquanto as amostras indeformadas resultaram em permeabilidades entre 3,30x10⁻⁰⁹ m³/s e 4,03x10⁻⁰⁷ m³/s (Nery, 2013).

2.5.5 Adensamento do Material Compactado

A classificação apontada em estudos de caracterização de lamas vermelhas é de silte de baixa plasticidade, com coeficiente de adensamento variando entre 3,64 x10⁻⁰² a 4,75 x10⁻⁰² cm²/s (Rubinos *et al.*, 2015) e 2,21 x10⁻⁰⁶ cm²/s a 9,16 x10⁻⁰⁵ cm²/s (Nery, 2013). Apesar disso, seu comportamento, por vezes, pode assemelhar-se ao de argilas de alta plasticidade (Gore *et al.*, 2016; Reddy *et al.*, 2020).

2.5.6 Resistência ao cisalhamento

Embora as lamas vermelhas possam apresentar comportamento plástico, o ângulo de atrito interno efetivo (φ') encontrado a partir de ensaios de compressão triaxial CIU, com medida de poropressão, reportados na literatura assemelha-se ao de materiais granulares, variando entre 30° e 35° (Gore *et al.*, 2016).

Em se tratando de ensaios de compressão triaxial UU, o ângulo de atrito interno (φ) apresentado por Reddy *et al.* (2020) é igual a 26° e intercepto de coesão (c) igual a 206 kPa. Nery (2013) realizou os ensaios UU em amostras de lama vermelha desaguadas por filtros

prensa, em que os resultados indicaram intercepto de coesão (c) variando entre 19,8 kPa e 161,0 kPa e ângulo de atrito interno (φ) entre 8,5° e 30,1°.

Reddy *et al.* (2020) apresentam faixas mais extensas para os parâmetros de resistência das lamas vermelhas, em que o ângulo de atrito interno (φ) varia entre 27° e 45°, o intercepto de coesão (c) apresenta valores entre 7 kPa e 28 kPa, e a resistência não drenada (S_u) entre 20 kPa e 175 kPa, sem haver, porém, descrição dos ensaios utilizados para a definição dos parâmetros.

2.6 Métodos de Disposição de Lama Vermelha

Os métodos de disposição de lama vermelha empregados e os impactos ambientais relacionados ao seu descarte inadequado têm sido discutidos por diferentes autores (Silva Filho *et al.*, 2007; Power *et al.*, 2011; Klauber *et al.*, 2011; Gräfe *et al.*, 2011; Evans *et al.*, 2012; World Aluminium, 2015; Van Deursen, 2016).

A disposição da lama vermelha proveniente do processamento da bauxita pelo processo Bayer, em particular, representa um grande desafio para a indústria de alumina devido ao significativo volume gerado e à sua elevada alcalinidade, o que torna urgente a necessidade de alternativas tecnológicas que possam ser empregadas em escala industrial. Segundo Evans *et al.*, (2012), inicialmente, o resíduo de bauxita gerado nas plantas de produção de alumina era, por vezes, estocado em pilhas localizadas adjacentes às plantas de beneficiamento, e minas exauridas eram preenchidas com o resíduo. Com o passar do tempo, melhorias decorrentes da gestão, controle e monitoramento dessas áreas foram postas em prática, com o intuito de minimizar os riscos de contaminação tornando mais simples e eficiente a recuperação dessas áreas.

Em outros casos, o resíduo era descartado em vales represados, estuários, corpos hídricos e até mesmo nos oceanos, também citado como “*offshore disposal*”. De acordo com Silva Filho *et al.* (2007), a prática de descarte de resíduo em corpos hídricos receptores ou oceanos, motivada pela escassez de área para disposição, deixou de ser realizada por grande parte das refinarias de alumina persistindo apenas em países como Japão e Itália (Vick, 1983; Agrawal *et al.*, 2004; Hyun *et al.*, 2005).

Neste sentido, Davies (2011) relata a tendência em se dispor lama vermelha em forma de polpa de alta densidade com teor de sólidos (TS variando entre 57% e 68%), em forma de pastas minerais (TS entre 60 e 70%) ou ainda em tortas (TS entre 75 e 85%).

2.6.1 Disposição Via Úmida

Os métodos de disposição de lamas por via úmida são assim denominados por conduzir grande quantidade de água de processo em conjunto com os rejeitos sólidos até a sua disposição.

No Brasil, o resíduo de processamento da bauxita na produção de alumina foi amplamente disposto por via úmida até meados dos anos 80. Nesse método os resíduos gerados são diluídos em água com teor de sólidos de até 30%, e bombeados para grandes áreas de disposição compostas por diques ou barragens. O grande volume gerado de resíduo caracterizado pelo baixo teor de sólidos obtido na solução é armazenado em sistemas de disposição compostos por extensas barragens ou bacias. A ocorrência de separação de fases no local de disposição é comum à prática. A fase sólida do rejeito, naturalmente sujeita à sedimentação, é segregada da fase líquida, dando origem ao sobrenadante alcalino (Silva Filho *et al.*, 2007).

Como principais desvantagens cita-se o acúmulo de água no interior dos reservatórios, com maior risco geotécnico associado, salientam-se aqui os casos de rompimento de barragens em Miraí, em 2007, Mariana, em 2015 e Brumadinho, em 2019. Outra característica da metodologia é a baixa concentração de sólidos no rejeito quando comparada aos métodos de disposição que incluem secagem por evaporação ou desaguamento mecânico, e, portanto, menor capacidade de estocagem de rejeitos. Além disso, a formação de áreas com acúmulo de materiais finos e pouco consolidados representa uma desvantagem para execução de atividades necessárias ao fechamento e recuperação ambiental das barragens ou depósitos, tornando o processo lento.

2.6.2 Métodos de Disposição a Seco ou Semiseco

Na disposição semiseca de rejeitos de mineração são adotados ciclos de deposição de forma controlada em que o lançando os rejeitos em camadas de deposição garantem tempo suficiente à secagem superficial do material lançado. A existência de dispositivos drenantes no interior do depósito para coleta de efluente infiltrado pode ou não existir. Apesar disso, em geral são instalados dispositivos extravasores contrários aos pontos de lançamento, responsáveis pela coleta e direcionamento da fase líquida sobrenadante.

De acordo com Ritcey (1989), parte da água presente nos rejeitos é perdida, seja por infiltração em camadas anteriormente lançadas, ou por processo evaporativo. Os lançamentos

são realizados tipicamente a partir de múltiplos pontos do reservatório, homogeneizando as camadas de secagem e minimizando a ocorrência de erosões em camadas subjacentes.

Segundo Nery (2013), dentre os principais métodos de disposição de rejeitos finos semissecos empregados na mineração podem ser citados, o método de disposição de lama espessada (TTD – *Tailing Thickened Discharge*) em que o rejeito é descarregado com cerca de 40% de sólidos, a partir de uma região elevada no depósito, a fim de se obter uma grande superfície de evaporação. Em seu trabalho McPhail *et al.* (2004) abordam o método.

Outro método de disposição semisseco largamente empregado na atividade minerária é a disposição em pasta (*paste disposal*), que consiste no espessamento prévio do rejeito até uma mistura densa e viscosa, de modo que não apresente segregação durante o transporte. Essa tecnologia é explorada nos trabalhos de Newman *et al.* (2001), Biesinger & Slottee (2011), Fitton & Seddon (2013), Cavalcanti & Palkovits (2013) e Van Deursen (2016).

As desvantagens do método de disposição semisseco são menores quando comparadas àquelas elencadas para a disposição via úmida, devido ao gradual aumento na concentração de sólidos, permitindo a ampliação da capacidade de armazenamento das barragens de rejeitos, embora ainda necessite de grandes áreas para o rodízio e secagem na disposição. Outra vantagem decorrente da redução da água armazenada no depósito é a redução no tempo necessário ao adensamento do rejeito depositado, impactando positivamente nas atividades de reabilitação e descomissionamento do reservatório.

2.6.2.1 Empilhamento a Seco (*Dry Stacking*)

O método de empilhamento a seco (*dry stacking*) figura entre os mais utilizados na disposição de lama vermelha, e consiste no espessamento por meio de filtros rotativos, chegando a teor de sólidos entre 55 e 60% (Ávila, 2012). O conceito de empilhamento de resíduos industriais teve início na década de 60, como o sistema desenvolvido nas minas de Kidd Creek, no Canadá. O sistema prevê o desaguamento do rejeito com consequente aumento de teor de sólidos e reaproveitamento da água para o processo. Seu descarte é realizado em ciclos de disposição e secagem com alternância entre as frentes de disposição de forma difusa, formando finas camadas que favorecem a secagem por evaporação e drenagem (Silva Filho *et al.*, 2007). De acordo com a *World Aluminium* (2015), o rejeito espessado é disposto formando uma pilha com ângulo de repouso entre 2 e 6%, podendo atingir superfícies ainda mais íngremes a depender da reologia do resíduo, teor de sólidos no lançamento e condições do relevo. Dentre suas principais vantagens podem ser citadas:

- Máxima utilização das áreas destinadas à disposição devido à maior concentração de sólidos se comparado à disposição convencional;
- Menor potencial de risco;
- Retomada de água e compostos presentes no rejeito, representando uma economia em relação ao tratamento de efluentes e insumos do processo;
- Antecipação da recuperação da área de forma progressiva, auxiliando no controle de poeira e redução no tratamento de efluente com segregação de efluentes provenientes de drenagem superficial de áreas já recuperadas.

2.6.2.2 Disposição a seco (*Dry Cake Disposal*)

A disposição em tortas de resíduo filtrado (TS > 65% anterior à disposição) é apontada por autores (Power *et al.*, 2011; Nery, 2013; Kinnarien *et al.*, 2015) como uma das técnicas mais atraentes quando considerados os aspectos ambientais associados à disposição de resíduos, além da possibilidade de utilização futura dos sólidos.

O emprego de tecnologias de filtragem possibilitou a disposição de rejeitos de mineração após intenso desaguamento, em estado não saturado, diferentemente das formas convencionais em lama ou pasta. De acordo com Nery (2013), essa tecnologia torna dispensável a execução de barragens ou bacias de retenção para seu armazenamento, uma vez que o rejeito filtrado é submetido ao transporte, lançamento, espalhamento e compactação, formando uma pilha de aterro compactado.

Contudo, para avaliação da viabilidade técnica dessas pilhas com rejeito filtrado é fundamental a análise das distâncias médias de transporte, uma vez que seu transporte se dá por correias transportadoras ou caminhões basculantes, representando um custo significativo de sua operação. Além disso, conforme explicado por Nery (2013), as condições climáticas da região onde se encontram essas estruturas têm importância singular na definição dos projetos, em especial no que diz respeito aos regimes de chuvas intensas, uma vez que as condições de compactação, sistemas de drenagens superficial e interna, e trafegabilidade nos acessos e nas frentes de disposição são cardeais para a operação dessas pilhas. Nesse caso, segundo a autora, deve-se avaliar a construção de zoneamentos onde os rejeitos dispostos de forma a atender os critérios construtivos de umidade e compactação formam uma espécie de “bacia”, cujo papel principal é conter os rejeitos dispostos durante períodos chuvosos, e assegurar estabilidade global à pilha. Dentre as principais vantagens da operação de sistemas de disposição a seco de lama vermelha filtrada podem ser citados:

- Maior estabilidade da pilha em aterro compactado;
- Elevada densidade do resíduo disposto;
- Maior capacidade dos depósitos;
- Elevada recuperação de água e insumos do processo;
- Maior controle de construção e operação;
- Reduzido potencial de risco geotécnico;
- Menores impactos ambientais, com melhores condições para o fechamento progressivo.

2.7 Filtragem de Rejeitos de Mineração

A filtragem consiste em operação unitária para separação de partículas sólidas de uma suspensão aquosa, por passagem do fluido pelo meio filtrante formando uma torta de sólidos retidos. Os rejeitos filtrados, tipicamente denotados como tortas secas (*dry cakes*), possuem umidade suficiente para permitir maior abertura dos poros a serem preenchidos com água, mas não a ponto que impeça sua compactação à umidade ótima (Nery,2013).

A aplicação de esforços sobre o meio poroso, necessário à filtragem dos rejeitos, pode ser efetuada por ação da gravidade, centrifugação, pressão ou vácuo. Dentre os agentes mais utilizados em plantas de filtragem estão os tambores, as placas empilhadas e as correias horizontais.

A seguir será apresentada uma breve descrição do mecanismo de filtragem utilizado para o presente estudo, resumindo-se à operação de filtros tipo prensa. Outros mecanismos tais como filtros a vácuo, centrífugas, filtros hiperbáricos ou capilares não serão tratados nesse trabalho. Diversos autores discorrem sobre as metodologias de filtragem aplicadas a rejeitos de mineração (Van Deursen, 2016; Silva, 2016; Nery, 2013; Davies, 2011).

2.7.1 Filtros Prensa

Os filtros prensa distinguem-se de outros sistemas de filtragem por aplicarem uma pressão positiva na polpa, em detrimento da aplicação de vácuo. A pressão positiva, próxima de 10 atm, ou 10^6 Pa, é aplicada sobre a polpa, forçando-a contra o meio filtrante, promovendo desta forma a separação das fases líquida e sólida. De acordo com Guimarães *et al.*, (2012), sistemas de filtragem a vácuo limitam-se a 1 atm de diferença de pressão aplicada, enquanto os sistemas de filtros hiperbáricos são inferiores a 4 atm.

De um modo geral, o equipamento é composto por uma extremidade fixa e outra móvel, sobre a qual é aplicada a pressão nas placas e quadros. As placas e quadros podem ser dispostos horizontal ou verticalmente, podendo ou não serem dotadas de diafragmas. A abertura das placas pode ocorrer de forma individual ou simultânea, influenciando nas áreas necessárias às plantas de filtração bem como na produtividade.

Com a abertura das placas, a torta retida nos filtros é liberada para retomada e transporte até as áreas de disposição. Periodicamente é realizada a lavagem dos tecidos filtrantes com jatos pressurizados.

Seu desempenho é função do volume de filtrado obtido por ciclo completo, definido pelo tempo de filtração, lavagem, abertura, limpeza e montagem do filtro (Van Deursen, 2016). O número de placas instaladas define as câmaras disponíveis, podendo variar entre dezenas a centenas, cujos tamanhos variam de 250 x 250 mm até 2500 x 2500 mm (Guimarães, 2011).

Além de permitirem a geração de tortas com menor teor de umidade se comparados a outras tecnologias de desaguamento, os filtros prensa são eficientes na recuperação de soda por lavagem (Nery, 2013; Kinnarinen *et al.*, 2015). Em seu estudo, Kinnarinen *et al.* (2018) após analisar quimicamente soluções preparadas com tortas do resíduo filtrado de lama vermelha a fim de identificar as concentrações de solúveis tais como soda cáustica e aluminato, destacam a influência da temperatura e da pressão na recuperação de solúveis, além de fatores como a razão sólido/líquido, composição do líquido solvente ($[\text{Na}_2\text{CO}_3]$), temperatura e tempo de lixiviação. Para Kinnarinen *et al.* (2015), a recuperação de mais de 80% de soda pode ser obtida utilizando o método de lavagem das câmaras. Além disso, é destacado que o baixo teor de umidade das tortas resultantes da filtração por filtros prensa permite uma disposição seca desses resíduos de forma segura e econômica.

Os ciclos de operação dos filtros prensa distinguem-se com base em suas principais características, variando entre filtro prensa com placas tipo câmara, tipos diafragma e filtro prensa de placas horizontais.

2.7.1.1 Filtros Prensa Horizontais com Placas Tipo Câmara

De maneira geral, o ciclo de operação dos filtros prensa horizontais com placas tipo câmara compreende as seguintes etapas:

- i. Enchimento;
- ii. Filtração sob pressão;

iii. Descarga da torta.

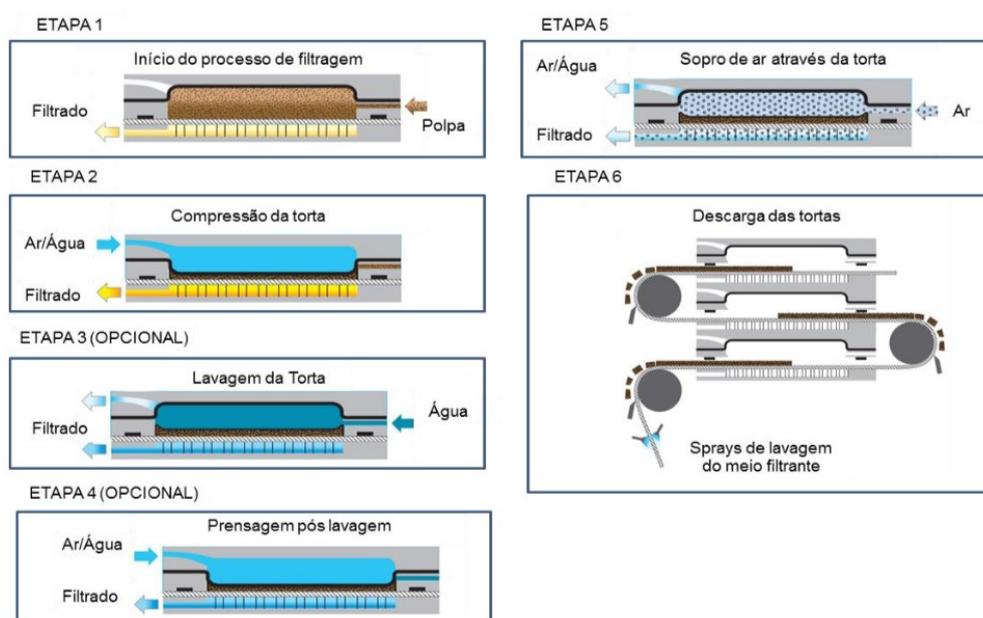
Por meio do sistema de alimentação dos filtros ocorre o enchimento completo das câmaras com a polpa. A pressão de alimentação é mantida por determinado tempo até que se garanta a formação das tortas, com a remoção do volume de filtrado. A aplicação de pressão sujeita a polpa a atravessar o meio filtrante, até sua condução e coleta externa ao filtro. A torta formada é removida por injeção de ar comprimido no canal central, podendo ocorrer a lavagem para recuperação de soda. Em seguida a torta é descarregada com a abertura dos filtros.

2.7.1.2 Filtros Prensa Verticais com Placas Tipo Câmara

Os filtros prensa verticais são compostos por placas dispostas horizontalmente, com grande utilidade em plantas de filtragem com área restrita (Figura 2.4). Seu ciclo de filtragem é composto pelas seguintes etapas:

- i. Bombeamento da polpa para o interior das câmaras simultaneamente, com início da formação das tortas pela remoção de filtrado;
- ii. Pressurização dos diafragmas com água ou ar para compressão das tortas;
- iii. Bombeamento de água de lavagem para o interior das câmaras, quando requerido;
- iv. Após a lavagem da torta, os diafragmas são novamente pressurizados para máxima recuperação de filtrado;
- v. Injeção de ar comprimido pelas câmaras reduzindo ainda mais a umidade das tortas;
- vi. Abertura concomitante das placas do filtro para descarga das tortas com auxílio esteiras. Ocorre então a lavagem com jatos de alta pressão do meio filtrante.

Figura 2-4: Ciclo de operação dos filtros prensa verticais (Nery, 2013)



2.7.1.3 Filtros Prensa com Placas Tipo Diafragma

Os filtros prensa com placas tipo diafragma são compostos por placas individuais justapostas formadas por câmaras revestidas por um diafragma elástico. A alimentação do sistema ocorre até o completo enchimento das câmaras com a polpa, quando as bombas de alimentação são desligadas e os diafragmas pressurizados hidráulicamente. Quando submetidos à pressão, ocorre a dilatação de uma membrana no interior da câmara, responsável pelo aumento da pressão exercida na torta. Essa pressão aplicada com o auxílio dos diafragmas pode atingir 30 atm (Van Deursen, 2016), que acelera o processo de separação das fases líquida e sólida, reduzindo o tempo de filtragem. Depois de finalizado o desaguamento, os diafragmas são despressurizados para descarga das tortas.

2.8 **Poropressão Construtiva em Aterros**

Métodos teóricos para predição de poropressões construtivas foram desenvolvidos no último século. Apesar disso, alguns deles mostraram-se pouco assertivos ou ainda com aplicação restrita. Por essa razão, de um modo geral, estruturas geotécnicas eram projetadas por meio da adoção de um parâmetro único de geração de poropressões construtivas. Essa abordagem é questionável no sentido físico, e portanto, não agrega em assertividade nos padrões de segurança do projeto.

O primeiro método analítico para análise de poropressões construtivas em aterros foi publicado pelo *U. S. Bureau of Reclamation* e desenvolvido por Bruggeman, Zanger & Brahtz em 1939 (Bruggeman *et al.*, 1939 *apud* Clough & Snyder, 1966). As poropressões em regime transiente eram determinadas a partir da definição de características do solo. A teoria baseia-se na hipótese que a taxa de variação da soma dos volumes de líquido e de ar livre em uma massa de solo é causada por: (a) fluxo em uma unidade de volume devido a percolação e (b) mudança no volume de ar livre devido às alterações na temperatura e pressão. A taxa de variação é igualada à taxa de adensamento, e a integração dessa equação fornece a solução para o problema transiente das poropressões.

Embora fossem úteis na solução de problemas de determinação de poropressões construtivas em aterros compactados, as hipóteses consideradas no desenvolvimento do método limitaram seu uso. Apesar disso, grande valor foi reconhecido ao método tendo em vista seu pioneirismo.

Baseado no trabalho de Bruggeman *et al.* (1939), Hilf (1948) desconsidera em sua teoria a ocorrência de drenagem, evitando assim dificuldades matemáticas quando analisados fluxos

dinâmicos. A partir de uma abordagem simplista para a estimativa de poropressões construtivas em aterros, Bruggeman *et al.* (1939) postulou que as poropressões durante o adensamento do solo relacionam-se à quantidade de compressão pela lei de Boyle pela compressibilidade do ar com lei de Henry pela solubilidade do ar em água. Hilf (1948) expressou na Equação 2.5:

$$u = \frac{Pa \cdot \Delta}{V_a + H \cdot V_w - \Delta} \quad (2.4)$$

Em que:

u é a pressão total no ar após o adensamento menos a pressão atmosférica;

Pa é a pressão do ar após a compactação;

Δ é o adensamento ou mudança de volume em porcentagem do volume inicial de massa de solo;

V_a é o volume de ar livre nos vazios após compactação em porcentagem do volume inicial de massa de solo;

H é a constante de Henry para solubilidade do ar em água por volume;

V_w é o volume de água nos vazios em porcentagem do volume inicial de massa de solo.

No caso do solo estar saturado, $\Delta = Va$, e portanto,

$$u = \frac{Pa \cdot Va}{H \cdot V_w} \quad (2.5)$$

Essa relação é correta desde que não haja drenagem e a tensão superficial da água seja desprezada (Clough & Snyder, 1966).

A partir dessas equações, ensaios de adensamento foram utilizados para relacionar tensão efetiva durante a compressão desenvolvendo um gráfico das curvas de tensão-deformação, condição que poderia ser aproximada à região central de um maciço de uma barragem.

Embora seu método tenha se aproximado às leituras de piezômetros instalados nas barragens de Green Mountain e Anderson Ranch (Clough & Snyder, 1966), ele desconsidera a tensão superficial da água, apontada como uma importante limitação à sua proposição. Além disso, a hipótese de não haver drenagem poderia resultar em estimativas de poropressões exageradas, em especial nos casos em que o maciço conta com um sistema de drenagem interna. Apesar das limitações, o método de Hilf (1948), por vezes, permite uma estimativa razoável das

poropressões construtivas a partir de ensaios de rotina como adensamento oedométrico e ensaios de compactação (Clough & Snyder, 1966).

Em 1948, Skempton (1948) propõe a solução para determinação das poropressões em solos saturados expressa em termos das tensões principais maior e menor, assumindo como elástico o comportamento do solo durante um carregamento não drenado. Com o objetivo de minimizar discrepâncias em relação à consideração do comportamento real do solo, Skempton (1948) introduziu o parâmetro A obtido a partir de ensaios triaxiais (Equação 2.7).

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A. (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (2.6)$$

Com esforços de outros estudos mais contemporâneos desenvolvidos por Bishop (1952), Skempton (1954), Bjerrum (1954), Henkel & Skempton (1955), uma teoria de predição de poropressões desenvolvidas em maciços durante sua construção foi publicada por Skempton & Bishop (1955), estendendo sua aplicação a solos não saturados (Equação 2.8).

$$\Delta u = B. [\Delta \sigma_3 + A. (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \quad (2.7)$$

Em que:

$\Delta \sigma_1$ é o acréscimo de tensão total principal maior;

$\Delta \sigma_3$ é o acréscimo de tensão total principal menor;

A e B são medidos experimentalmente em ensaio de compressão triaxial não drenado, e variam segundo o grau de saturação da amostra. O parâmetro B é função da saturação da amostra de solo e A é um parâmetro é função da compressibilidade do solo sob carregamentos hidrostáticos e a tendência de expandir ou contrair em resposta ao cisalhamento (Kerkes, 2004).

Bishop (1954) apresentou a expressão de Skempton (1948) de forma rearranjada, conforme Equação 2.8.

$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} = \bar{B} = B \left[1 - (1 - A). \left(1 - \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1} \right) \right] \quad (2.8)$$

Quando um solo compressível com alto teor de umidade e baixa permeabilidade é carregado, o fluido presente nos interstícios do solo inibe a deformação volumétrica necessária para a transferência de carregamento para o esqueleto do solo, manifestando assim um acréscimo nas poropressões presentes no solo. Apesar do excesso de poropressões gerado por meio desse fenômeno ser dissipado ao longo do tempo, sua ocorrência pode influenciar negativamente na

estabilidade da estrutura durante e imediatamente após sua construção. Segundo as análises apresentadas por Bernell (1958) e Pereira (2005), os parâmetros de poropressão alcançam seus valores mais elevados no período inicial de construção. Uma vez que, em geral, os solos são compactados na condição não saturada, a avaliação das poropressões geradas torna-se uma tarefa complexa devido à natureza acoplada do fenômeno envolvendo o equilíbrio de deformações e fluxo.

Existem muitos fatores na construção de obras de terra que determinam o desenvolvimento das poropressões, dentre os principais citam-se a umidade de compactação, o grau de compactação, a permeabilidade e compressibilidade do material, a carga total aplicada, a velocidade de construção, e os fatores drenantes do aterro e da fundação (Pereira, 2005).

Em sua análise acerca dos fatores que influenciam o desenvolvimento e magnitude das poropressões construtivas em aterros, Sherard *et al.* (1963) *apud* Clough & Snyder (1966) concluem que a “umidade com que o aterro é construído tem maior parcela de influência na magnitude das poropressões que este desenvolve”.

Cloth & Snider (1966) analisam o efeito da umidade de compactação e sua relação com a altura de aterro, e apontam que as poropressões aumentam proporcionalmente com a altura do aterro, enquanto a taxa de geração da poropressão é controlada pelo teor de umidade na compactação. De fato, a partir dos casos de barragens analisados, os autores concluem que a taxa de geração de poropressão em aterros compactados com desvio de umidade acima de 2% no ramo seco representa apenas 5% da taxa de geração de poropressão quando comparados aos aterros compactados com desvio de umidade acima de 2% no ramo úmido.

A partir da constatação do baixo desenvolvimento de poropressões em aterros compactados com umidade inferior a 80% da umidade ótima e densidade seca máxima acima de 97% em relação ao ensaio Proctor Normal, Cloth & Snider (1966) concluem que o teor de umidade tem maior efeito no desenvolvimento de poropressões ainda que a energia de compactação seja relativamente alta. Segundo Ávila (1980), para solos não saturados, o efeito da umidade de compactação é mais importante do que o efeito da trajetória de tensões.

Tem sido uma prática comum a utilização do fator r_u (Bishop & Morgenstern, 1960) para a estimativa das poropressões geradas durante a construção de barragens, quando não se dispõem de análises mais precisas, conforme apresentado na Equação 2.10.

$$r_u = \frac{u}{\sigma} \quad (2.9)$$

Onde:

r_u é o fator de geração de poropressão;

u é a poropressão;

σ é a tensão vertical total proveniente do peso das camadas acima de um determinado ponto.

Conforme discutido por Pereira (2005), o parâmetro r_u quando aplicado a materiais específicos, não considera a distância da fronteira drenante. Apesar disso, na tentativa de considerar os efeitos de fronteiras drenantes, por simplificação, pode-se distribuir faixas com aproximação de parâmetros r_u obtidas empiricamente.

2.9 Ensaio Triaxial PN

Inicialmente proposto por Casagrande & Hirschfeld (1960), o ensaio de compressão triaxial PN (Pressão Neutra) tem sido utilizado para avaliação da geração de poropressão em maciços de barragens em construção (Ligocki, 2003). Sua aplicabilidade à previsão de poropressões de construção foi também discutida por Ávila (1980), Nery (2013), Silva (2016).

Conforme apresentado por Pereira & Assis (2005), o ensaio consiste em aplicar acréscimo das tensões confinante e axial atuantes no corpo de prova em um ensaio triaxial, simultaneamente, com um carregamento não drenado, segundo uma relação constante σ_1/σ_3 . O objetivo principal do ensaio triaxial PN é observar o desenvolvimento de poropressões devido a solicitações construtivas, com acréscimo das tensões verticais e confinantes, em situação considerada como representativa da solicitação de campo durante a fase de construção do aterro. O coeficiente de poropressão, ou parâmetro B de Skempton (1954) obtido no ensaio é análogo ao apresentado na Equação 2.9.

Segundo Lambe & Whitman (1969), em casos de carregamento isotrópico e oedométrico realizados em solos saturados, a compressibilidade do esqueleto do solo é muito maior que a da água presente nos poros, e portanto, essencialmente todos os incrementos de tensão aplicados em um carregamento não drenado são transmitidos pela água (B=1). No caso de solos secos, a compressibilidade do ar é muito superior à compressibilidade do esqueleto do solo, de modo que todo o incremento de tensão aplicada é transmitido pelo esqueleto do solo (B=0). Em solos parcialmente saturados, a compressibilidade do ar é muito maior quando

comparada à da água e das partículas do solo, resultando em baixos valores de B , até que o grau de saturação se aproxime de 100%.

Conforme discutido por Nery (2013), durante a consolidação inicial de um maciço de aterro não saturado há ocorrência de poropressões negativas devido à presença de ar na estrutura do solo. Entretanto, a execução de camadas sobrepostas em velocidade superior ao tempo de dissipação de possíveis acréscimos de poropressão gerados no maciço, é responsável pelo carregamento parcialmente não drenado do material, com identificação de excessos positivos de poropressões.

Observações de poropressões construtivas em barragens instrumentadas com piezômetros realizadas por Li (1967) e Pereira (2005) indicaram a distribuição de poropressões dependente da distância da fronteira drenante. Considerando o caráter transiente do problema, observa-se que o solo em contato com o sistema de drenagem interna se comporta de forma drenada variando para condições parcialmente drenadas a não drenadas à medida que se afasta do contorno drenante.

2.10 Solos não saturados

A água presente no solo pode ser classificada segundo sua interação com as partículas presentes na estrutura do solo (Vargas, 1977 *apud* Graça, 2018), sendo elas:

- água livre, ou gravitacional, é a parcela de água que flui livremente no solo, por meio da comunicação dos poros saturados, deslocando-se por ação gravitacional para camadas mais profundas do solo;
- água Capilar é a água retida às partículas de solo devido à tensão superficial, preenchendo continuamente os espaços capilares;
- água higroscópica associa-se à superfície coloidal dos solos, ou efeito da dupla camada, sendo sua mobilidade restrita ao estado de vapor;
- água adsorvida é retida na superfície dos minerais a fim de satisfazer o equilíbrio iônico das partículas do solo.

Em casos de solos não saturados, conforme inicialmente discutido por Fredlund (1996), as quatro fases presentes (líquida, sólida, gasosa e membrana contrátil), são controladas pela tensão normal líquida e pela sucção matricial. A região imediatamente acima do nível d'água é denominada zona vadosa.

Na zona capilar, considera-se o estado de ar ocluso, ou seja, a fase aquosa é contínua, enquanto a fase ar é geralmente descontínua. Sobreposta à franja capilar, ambas as fases ar e água apresentam-se continuamente, e o grau de saturação é da ordem de 20 a 90%. Acima desta fase o solo encontra-se seco, e a fase água é descontínua, enquanto a fase ar se mantém contínua (Fredlund, 1996 *apud* Graça, 2018).

A sucção, comum em solos não saturados, juntamente a fatores como a condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento, compressibilidade e potencial de expansão, podem ser citados como os principais fatores que controlam seu comportamento mecânico (Singh & Sreedeeep, 2011).

Em linhas gerais, a sucção dos solos relaciona-se à capacidade do solo em reter água. Pode ser entendida como a energia necessária para desprender a água retida, ou adsorvida, no solo. Essa energia externa aplicada frente às forças de retenção do solo, por unidade de volume de água a ser despreendida, é a sucção (Lee & Wray, 1995 *apud* Vilar, 2002). No âmbito da Geotecnia, atenção especial deve ser dada a duas das principais influências da sucção nos solos: (i) a mudança na tensão normal e tangencial do esqueleto do solo por meio da variação na poropressão média e (ii) o fornecimento de uma força normal adicional aos contatos entre as partículas, conseqüente da capilaridade ou membrana contrátil (Fredlund, 1996). Segundo Marinho (1997), a sucção pode ser dividida em sucção matricial e osmótica.

A sucção matricial, composta pelas parcelas de sucção capilar (S_c) e sucção de adsorção (S_{ad}), é dada pela diferença entre a pressão do ar e a pressão da água intersticial, e depende da matriz do solo, ou seja, do tipo de partícula e seu arranjo estrutural (Marinho, 1997 *apud* Graça, 2018). A capilaridade do solo deve-se às relações físico-químicas (hidrofobicidade) relacionando-se às características macro do solo, enquanto a adsorção se vale das características químico-mineralógicas (forças de adsorção), e se relaciona às características microestruturais do solo. Dentre os principais fatores que interferem na sucção matricial podem ser citados (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015):

- o estado de tensões no solo;
- a granulometria do meio poroso;
- o arranjo estrutural;
- a mineralogia;
- a porosidade;
- a distribuição dos poros;

- a presença de matéria orgânica.

A sucção osmótica, por sua vez, é a pressão oriunda da diferença de concentração do fluido, devido ao teor de elementos químicos na água, e em geral, é fornecida pela diferença entre a sucção total e a sucção matricial (Marinho, 1997). De acordo com Graça (2018), o comportamento de solos não saturados depende basicamente da sucção matricial, de modo que a sucção osmótica não contribui significativamente para a resistência ao cisalhamento.

2.10.1 Quantidade de Água no Solo

Em geral, a água presente nos solos é quantificada em termos do teor de umidade gravimétrico, volumétrico e do grau de saturação.

O teor de umidade gravimétrico (w), ou teor de umidade natural, é de fácil obtenção e determinado pela razão entre a massa de água (M_w) e a massa de sólidos (M_s), conforme apresentado na Equação 2.11.

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{V_w \cdot \rho_w}{V_s \cdot \rho_s} \quad (2.10)$$

Onde:

V_w - volume de água;

ρ_w - massa específica da água;

V_s - volume de sólidos;

ρ_s - massa específica dos sólidos.

O teor de umidade volumétrico (θ), definido como a razão entre o volume de água (V_w) e o volume total (V_t), é utilizado em curvas de retenção de água e na aferição da condutividade hidráulica em meios porosos não saturados. A condutividade hidráulica em meios não saturados modifica-se segundo a variação do grau de saturação do meio, o que pode ser utilizado na definição do valor de entrada de ar, alterando dessa forma, a taxa de fluxo de água no solo. A Equação 2.12 descreve o teor de umidade volumétrico.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (2.11)$$

2.10.2 Curva Característica de Retenção de Água no Solo ou Curva Característica de Sucção

A curva característica de sucção do solo, ou curva de retenção de água, é uma relação constitutiva fundamental na mecânica dos solos não saturados. A curva descreve a relação entre a sucção no solo e o teor de umidade. Mais especificamente, a curva característica descreve o potencial termodinâmico da água nos poros do solo em relação à água livre como uma função da quantidade de água adsorvida pelo solo. Em baixos teores de umidade, o potencial da água dos poros é relativamente baixo quando comparado com a água livre, correspondendo a uma alta sucção desenvolvida. Em caso de alto teor de umidade, a diferença entre o potencial de água dos poros e o potencial da água livre se reduz, e conseqüentemente a sucção também decresce.

Em laboratório, a curva característica tem sido obtida utilizando-se distintas técnicas e equipamentos, conforme discutido por autores (Fredlund & Xing, 1994; Barbour, 1998; Dineen & Ridley, 1999; Sillers & Fredlund, 2001; Fredlund *et al.*, 2005; Sillers *et al.*, 2001; Fredlund, 2002; Villar, 2002; Mendes *et al.*, 2007; Seki, 2007; entre outros).

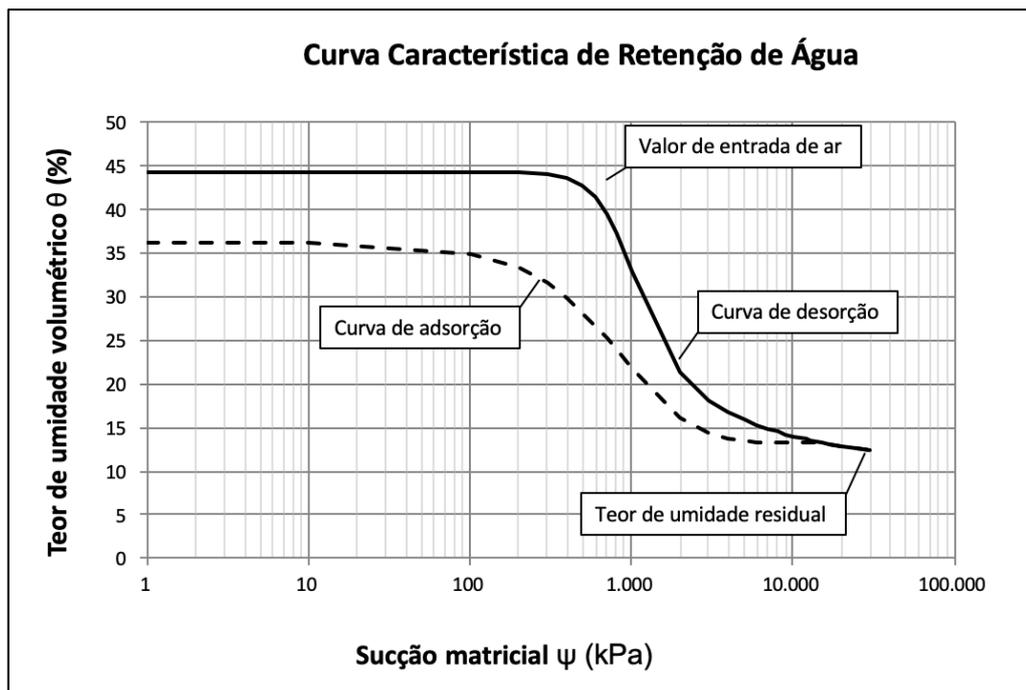
Dentre os instrumentos capazes de medir sucção cita-se o psicrômetro, que mede a umidade do solo e pode ser utilizado para medir sucção total e calor, como é o caso de alguns instrumentos (Villar, 2002). A técnica do papel filtro pode ser utilizada para cobrir a escala de sucção de solos, em que a sua umidade é associada à sucção presente na estrutura do solo (Houston *et al.* 1994; Marinho, 1994; Melgarejo *et al.* 2002). Sensores têm sido amplamente utilizados para medições, direta e indiretamente, tanto em laboratório como no campo, tais como sensores de matriz granular, reflectômetros, tensiômetros, entre outros (Ridley & Burland, 1993; Fleming *et al.* 1994; Marinho & Souza Pinto, 1997; Trichês & Pedroso, 2002; Mendes *et al.* 2007). Em seu trabalho Lee & Wray (1995) comparam diferentes métodos e equipamentos para medição da sucção, dentre eles placa de pressão, psicrômetro e papel filtro. Os autores concluíram que, para as amostras de solo ensaiadas, os resultados indicaram resposta semelhante, indicando convergência nos resultados quando devidamente calibrados e utilizados os diferentes instrumentos.

A forma da curva característica pode ser unimodal ou bimodal. Segundo Fredlund & Xing (1994) *apud* Nery (2013), a quantidade de fluido presente no solo pode ser apresentada segundo a umidade gravimétrica (w), ou o grau de saturação (S) ou a umidade volumétrica (θ).

Sua forma varia segundo o tipo de solo (estrutura e agregação), o teor de umidade inicial, o índice de vazios, a textura, a mineralogia, a história de tensões e os métodos de compactação (Nery, 2013), e pode ser utilizada como ferramenta para a estimativa de parâmetros tais como a condutividade hidráulica, a variação de volume e a resistência ao cisalhamento (Villar, 2002).

A partir da avaliação da curva de retenção do solo, é possível aferir o valor de entrada de ar, que indica o nível de sucção para o qual o ar começa a entrar nos vazios do solo, representando o limiar entre o solo saturado, em que a mecânica dos solos clássica é válida, e o solo não saturado. O teor de umidade residual representa o estado em que a fase líquida do solo se encontra descontínua, indicando a necessidade de grande variação de sucção para sua remoção. Na Figura 2.5 é ilustrada uma curva característica de retenção de água para um solo siltoso, seguindo as trajetórias de desorção (secagem) e de adsorção (umedecimento).

Figura 2-5: Curva característica típica de um solo siltoso.



Diversos autores propuseram formulações para a curva característica do solo, Brooks & Corey (1964), van Genuchten (1980), Kosugi (1996), Durner (1994), Seki (2007). A proposição de Fredlund & Xing (1994), adotada nesse trabalho, é descrita na Equação 2.13:

$$S = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1.000.000}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m \quad (2.12)$$

Em que:

S - grau de saturação;

ψ - sucção do solo;

e - número de Euler (2,71828...);

ψ_r - sucção correspondente ao teor de umidade residual (r);

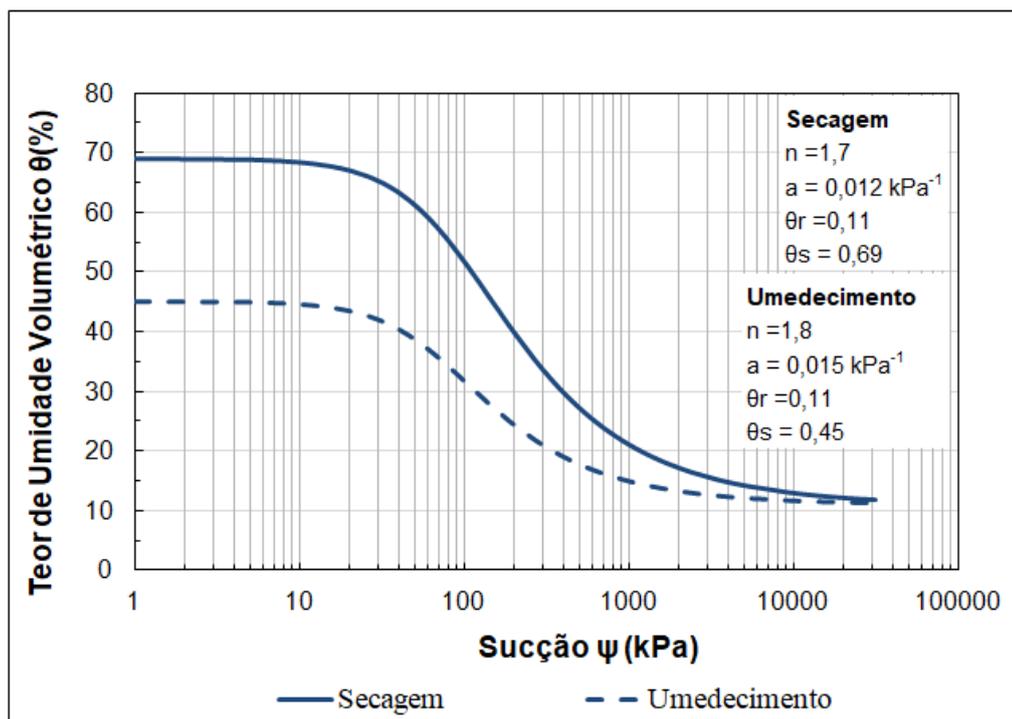
a - aproximação do valor de entrada de ar;

n - número que controla o ponto de inflexão da curva;

m - parâmetro relacionado ao teor de umidade residual.

Feng & Yang (2018) analisaram a curva característica de retenção de água para uma amostra de resíduo de bauxita via processo Bayer (Figura 2-6), apontando o efeito de histerese quando avaliadas as curvas de adsorção e dessorção da amostra. De acordo com os autores, a lama vermelha proveniente do processo Bayer apresenta partículas finas em sua composição, com área superficial específica elevada, o que contribui com o efeito de adsorção. Além disso, o resíduo do processo Bayer contém óxidos alcalinos solúveis, tais como óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O), que conferem cimentação entre as partículas em baixos teores de umidade, mas que são destruídos quando do umedecimento da estrutura, com sensível reação à água.

Figura 2-6: Curva característica de resíduo de bauxita via processo Bayer (Modificado de Feng & Yang, 2018).



2.11 Análise Construtiva pelo Método dos Elementos Finitos

O método matemático desenvolvido para solucionar equações diferenciais parciais denominado Método dos Elementos Finitos (MEF) baseia-se no conceito de que funções contínuas, tais como temperatura, pressão ou deslocamento, podem ser aproximadas a um determinado conjunto de funções definidas para um número finito de subdomínios considerando um determinado modelo (Segerlind, 1976 *apud* Marzo, 2010).

No caso da modelagem via MEF da construção de uma pilha de resíduo filtrado, é empregada a representação discreta, em que os diferentes tipos de elementos finitos são usados para simular o comportamento do resíduo, fundação, materiais de interface e filtros. Esse tipo de representação fornece diretamente informações acerca das deformações e das tensões nos materiais (fundação, resíduo e filtros) bem como na interface entre eles, permitindo a modelagem dos deslocamentos relativos entre os elementos componentes do modelo, além do próprio processo construtivo, ou seja, dos alteamentos das camadas de construção do aterro.

Dentre as etapas que constituem uma análise em Método dos Elementos Finitos (MEF), podem ser citadas a definição do domínio e sua discretização em elementos por meio da definição do tipo e dimensão da malha de elementos, a definição das condições de contorno e condições iniciais e a definição do modelo constitutivo dos materiais. A partir das etapas citadas é possível a geração da matriz e vetores para cada elemento, levando em consideração a compatibilidade entre os nós.

O sistema de equações definido é resolvido por métodos numéricos de soluções de sistema lineares, de modo que são encontrados os resultados para as variáveis secundárias (tensões e deformações).

A aplicação do MEF para solução numérica transforma as equações diferenciais de governo em um sistema de equações algébricas com valores nodais referentes às componentes do vetor deslocamento e da poropressão como incógnitas a serem satisfeitas considerando as condições de contorno e condições iniciais pré-estabelecidas, além das condições de equilíbrio.

O desenvolvimento teórico da análise do fenômeno de adensamento em três dimensões apresentado por Biot (1941), elenca as hipóteses simplificadoras assumidas nos modelos numéricos, dentre elas: (1) isotropia do material, (2) relações de tensão deformação reversíveis ao final das condições de equilíbrio, (3) linearidade das relações tensão-deformação, (4) as deformações são pequenas, (5) a água presente nos vazios do solo é incompressível, (6) a água pode conter ar e (7) a lei de Darcy para fluxo laminar é válida.

A compactação de um aterro de pilha ou barragem em solo é realizada a partir da execução de camadas com espessura que variam entre 20 e 30 cm, em geral, a depender do material de construção e equipamentos utilizados durante a compactação. Segundo Pereira (2005), a adoção correta do número de camadas em uma análise numérica depende de duas considerações: (i) a região a ser analisada e (ii) a variável de interesse, uma vez que tensões são mais facilmente reproduzidas em elementos com menor número de camadas se comparadas aos deslocamentos.

As condições de drenagem durante a construção são compostas por estágios de carregamento não drenado – ou parcialmente não drenado – e estágios de dissipação dos excessos de poropressões gerados. Desta forma, Pereira (2005) considera adequada a modelagem por meio de análises acopladas de consolidação, em que tanto equações de equilíbrio como de continuidade são satisfeitas.

A aplicação de modelagem em Método dos Elementos Finitos para análise de fenômenos acoplados relacionados à construção e operação de barragens tem sido objeto de estudo de diversos autores. Lima (2008) avalia recalques na fundação de um reservatório de resíduo de bauxita decorrentes de sobrecarga imposta por alteamentos. A estrutura em estudo foi inicialmente operada com lançamento e disposição em lagos artificiais em forma de polpa, seguido com o lançamento de resíduo em camadas para ressecamento a montante. Foram analisadas pelo autor duas áreas, a saber, a primeira em fase de reabilitação, onde foram obtidos os dados de monitoramento de campo (recalques e deslocamentos horizontais), e a segunda, em fase de operação, em que se dispõe de dados experimentais. Os resultados encontrados a partir reprodução numérica em MEF do processo de alteamento da área instrumentada e comparação com dados da instrumentação de campo mostraram potencialidade de aplicação da solução numérica para a previsão do comportamento geotécnico de depósitos de resíduos durante as atividades de alteamento para previsão de recalques e deslocamentos horizontais. Apesar disso, o autor destaca dentre as principais limitações do modelo utilizado, a impossibilidade de serem consideradas variações dos parâmetros de compressibilidade e permeabilidade do resíduo ao longo do tempo, decorrentes dos processos de sedimentação e adensamento, além de dificuldades na modelagem do excesso de poropressões devido no início da atividade de alteamento. Outro fator destacado deve-se às restrições do software utilizado em se aplicar distribuições de poropressões diferentes daquelas obtidas por processo de fluxo permanente ou condição hidrostática, não sendo possível incorporar o adensamento por peso próprio.

Costa (2009), por sua vez, modela em MEF o terceiro alteamento da barragem do Itabiruçu, destinada à contenção de rejeitos de minério de ferro, utilizando o pacote Geostudio 2007. A análise permitiu analisar as condições de fluxo, tensões *in situ*, deformações e estabilidade nos períodos anterior, durante e após a execução das obras. As análises realizadas consideraram o efeito da velocidade do carregamento construtivo, adensamento e dissipação das poropressões no tempo, tomados por meio de análises acopladas de deformação e fluxo. Quanto à discretização da malha o autor considera válida a discretização do modelo em camadas de construção segundo o recurso computacional disponível e a acurácia esperada aos resultados. Em estudo comparativo, conclui-se que a modelagem em etapa única de alteamento resultou em recalques superiores àqueles apontados pela análise em estágios, apesar da indicação similar de tensões totais em ambos os modelos. As análises de fluxo, realizadas na pesquisa para os estágios inicial e final, mostraram-se compatíveis às leituras e dados registrados em campo. Tendo em vista as limitações apresentadas no trabalho, o autor descreve a metodologia como consistente no que diz respeito à modelagem de processos construtivos, sendo indicada sua aplicação em projetos e avaliação de segurança de barragens.

Silva (2014) avalia a influência da condutividade hidráulica de fundação e camadas de base do aterro, a ocorrência do fluxo verticalizado e o aumento de gradiente no fator de segurança em barragens alteadas por montante, com lançamento hidráulico. Os estudos objetivaram a ampliação da vida útil estimada para uma planta de beneficiamento de minério de ferro. O autor conclui que a adoção simplificada da distribuição das poropressões, resultante de análises em regime permanente, subestimou o fator de segurança da barragem em torno de 20%, quando comparado aos resultados das análises realizadas com a aplicação da distribuição das poropressões observada em campo no maciço da barragem.

Com o objetivo de avaliar o funcionamento da drenagem de fundo, a distribuição das poropressões ao final do enchimento, os perfis dos índices físicos e a estimativa da vida útil do reservatório de um depósito de resíduos de bauxita, Moreira (2015) analisa o comportamento durante a operação de enchimento do reservatório por meio da aplicação do MEF, do software Plaxis. Os dados de entrada do modelo numérico utilizado foram obtidos a partir de campanha de ensaios de campo e laboratório, em que foram realizados ensaios de adensamento e piezocone em amostras da polpa do resíduo. Para a calibração foram utilizados levantamentos batimétricos e resultados de parâmetros geotécnicos obtidos em profundidade, tais como peso específico, índice de vazios e permeabilidade. A autora considera que as análises numéricas reproduziram satisfatoriamente os processos de sedimentação e adensamento por peso próprio da lama durante o enchimento do depósito.

Neste trabalho, de modo a definir as propriedades constitutivas do resíduo de bauxita via processo Bayer, foi aplicado o modelo Cam-Clay, por representar satisfatoriamente o comportamento tensão *versus* deformação desse resíduo, evidenciado a partir da análise dos resultados dos ensaios triaxiais de compressão CID realizados.

Inicialmente desenvolvido por Roscoe et al. (1958) para a argila de Cambridge na Inglaterra, o modelo baseia-se na teoria do estado crítico, adotando uma relação tensão-deformação elástica não-linear (Pedroso, 2002), cujas relações tensão-deformação dependem de quatro parâmetros característicos: λ , κ , M e G' , discutidos ao longo do texto.

O modelo é capaz de reproduzir satisfatoriamente deformações nos solos, embora limitado à condição axissimétrica de tensões e deformações. Há casos de sua aplicação em simulações tridimensionais (Pedroso, 2002). Os principais conceitos relacionados ao modelo Cam-Clay são apresentados por autores como Atkinson & Bransby(1978), Britto & Gunn (1987) e Ortigão (1995).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho consiste em três etapas, que compreendem: (i) a obtenção e interpretação de parâmetros geotécnicos de resistência, compressibilidade e permeabilidade a partir de ensaios de caracterização de amostras deformadas e indeformadas do resíduo da produção de alumina via processo Bayer, denominado lama vermelha, (ii) a obtenção e análise de dados de monitoramento de um aterro experimental para calibração do modelo numérico e (iii) aplicação de modelo numérico bidimensional de análise acoplada para previsão do regime de fluxo e das poropressões desenvolvidas no maciço de uma pilha hipotética, com a definição de critérios de projeto a partir da avaliação de fatores construtivos. Essas etapas são descritas a seguir.

3.1 Caracterização Geotécnica do Resíduo

O resíduo em estudo consiste na lama vermelha - subproduto gerado durante o estágio de clarificação do Processo Bayer para produção de alumina de uma refinaria localizada no estado do Pará, no Norte do Brasil. O resíduo é filtrado por filtros prensa para recuperação da soda presente no filtrado e desaguamento, até que seja atingido um teor de sólidos (TS) de aproximadamente 78%.

Foram separados dois grupos distintos de amostras de resíduo segundo o mecanismo de filtração utilizado. O Grupo 1 é composto das amostras de resíduo obtidas a partir da filtração por filtros rotativos. Nesse caso, a condição de moldagem objetivou atingir teor de sólidos semelhante ao obtido na saída dos filtros prensa. O Grupo 2 é formado por amostras obtidas no resíduo filtrado por filtros prensa. Em ambos os casos o resíduo filtrado utilizado para execução de aterro experimental ou moldagem de amostras deformadas teve origem no processamento da bauxita proveniente de dois depósitos de bauxita laterítica, denominados sítios “Pa” e “Tr”, ambos localizados na região norte do Brasil, aproximadamente 1.000 km distantes entre si. A bauxita proveniente do sítio “Pa” é transportada até a refinaria por mineroduto, enquanto a bauxita proveniente do sítio “Tr” chega na refinaria por meio de transporte marítimo. Os resíduos analisados, seja do Grupo 1 ou do Grupo 2, tiveram como origem a mesma planta de beneficiamento de bauxita para produção de alumina. A interpretação conjunta dos resultados será utilizada a fim de avaliar interferências do mecanismo de filtração nas propriedades geotécnicas observadas. Destaca-se que foram analisados resultados disponibilizados de distintos ensaios de caracterização, resistência, compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo, de modo que será apresentada

avaliação final quanto à sua aplicabilidade no uso do modelo numérico. Todos os referidos ensaios foram realizados por laboratório contratado para tal finalidade, cabendo ao desenvolvimento desse trabalho a interpretação dos resultados disponibilizados pelo laboratório.

3.1.1 Normas e Procedimentos

Foram adotadas as seguintes normas ou procedimentos (Tabela 3.1) para a preparação das amostras e a realização dos ensaios de laboratório com o resíduo filtrado.

Tabela 3.1: Ensaios de Laboratório – Normas e Procedimentos

Item	Ensaio	Norma	Título
1	Determinação do teor de umidade	NBR 6457 (ABNT, 1986)	Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização
2	Massa específica dos grãos	NBR-6508 (ABNT, 1984)	Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa Específica
3	Granulometria completa com defloculante	NBR 7181 (ABNT, 1984)	Solo – Análise Granulométrica
4	Granulometria completa sem defloculante	NBR 7181 (ABNT, 1984)	Solo – Análise Granulométrica
5	Limite de Liquidez	NBR-6459 (ABNT, 1984)	Solo - Determinação do Limite de liquidez
6	Limite de Plasticidade	NBR-7180 (ABNT, 1984) cor. 1988	Solo – Determinação de Limite de Plasticidade
7	Compactação Proctor Normal	NBR-7182 (ABNT, 1986) cor.1988	Solo – Ensaio de Compactação
8	Compactação Proctor Normal	NBR 6457 (ABNT,2016)	Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização
9	Adensamento Unidimensional	NBR 12007 (ABNT, 1990)	Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional
10	Permeabilidade a carga variável	NBR 14545 (ABNT, 2000)	Solo - Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável
11	Ensaio de compressão triaxial CIU sat	ASTM D4767:2011	Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils
12	Ensaio de compressão triaxial UU unsat	ASTM D2850:2015	Standard Test Method for Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils
13	Ensaio de compressão triaxial CID	ASTM D7181:2011	Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils

Continua

Tabela 3.1: Ensaio de Laboratório – Normas e Procedimentos (Continuação)

Item	Ensaio	Norma	Título
14	Ensaio de compressão triaxial PN	HEAD, K, H, 1986, vol. III	Manual of soil Laboratory Testing. Effective Stress Tests
15	Cisalhamento direto	ASTM D3080:2011	Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions.
16	DSS (Direct Simple Shear)	ASTM D6528:2007	Standard Test Methods for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils
17	Método do papel filtro	ASTM D 5298-92	Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper

3.1.2 Preparação das Amostras e Condições de Moldagem

Para realização dos ensaios de caracterização e compactação nas amostras do Grupo 1, foram moldadas amostras em laboratório utilizando uma mistura (*blend*) com 72,3% do resíduo da produção de alumina via processo Bayer proveniente do sítio “Pa” e 27,7% proveniente do sítio “Tr”, simulando assim as porcentagens de contribuição em relação aos rejeitos totais gerados pela planta segundo sua origem. Os ensaios de compressão triaxial drenados e não drenados, saturados e não saturados, ensaios de adensamento e de compressão triaxial PN foram realizados em amostras moldadas segundo as mesmas proporções, simulando condições de grau de compactação, adotando a energia do ensaio Proctor Normal, e desvio da umidade em relação à umidade ótima conforme apresentado na Tabela 3.2. Os valores adotados de desvio de umidade em relação à umidade ótima de compactação durante a moldagem das amostras objetivaram auxiliar no entendimento do comportamento geomecânico do resíduo frente a diferentes condições de umidade possíveis de ocorrência durante a compactação.

Para os ensaios de cisalhamento direto e triaxial drenado foram moldados corpos de prova com as condições indicadas na Tabela 3.2, com exceção das condições de desvio de umidade ótima -2% e +6%.

Tabela 3.2: Condição de Moldagem das Amostras – Grupo 1

Tipo de amostra	Identificação	Descrição
Amostras Deformadas (moldadas em laboratório)	AM-01	$w_{otm} + 4\%$ com GC=95%
	AM-02	$w_{otm} + 2\%$ com GC=95%
	AM-03	w_{otm} com GC=95%
	AM-04	$w_{otm} - 2\%$ com GC=95%
	AM-05	$w_{otm} + 6\%$ com GC=90%
	AM-06	$w_{otm} + 4\%$ com GC=90%
	AM-07	$w_{otm} + 2\%$ com GC=90%
	AM-08	w_{otm} com GC=90%

O Grupo 2, por sua vez, é composto por amostras indeformadas talhadas a partir de blocos indeformados coletados em pista teste, executada com resíduo filtrado por filtros prensa, compactado por trator de esteiras tipo D6, por ser o equipamento previsto de ser utilizado durante as atividades de espalhamento e compactação do resíduo durante sua disposição. Os ensaios de compactação foram realizados nas amostras deformadas identificadas segundo os blocos coletados na proximidade. A Tabela 3.3 indica as condições de compactação para as amostras coletadas no aterro experimental.

Tabela 3.3: Condição de Compactação das Amostras – Grupo 2

Tipo de amostra	Identificação	Descrição	Espessura das camadas
Amostras Indeformadas (aterro experimental)	BL-01	$w + 6\%$	30cm
	BL-02	w	30cm
	BL-03	w_{otm}	30cm
	BL-04	$w_{otm} + 2\%$	40cm
	BL-05	$w_{otm} + 2\%$	40cm
	BL-06	$w_{otm} + 2\%$	40cm
	BL-07	w	40cm
	BL-08	w_{otm}	40cm
	BL-09	w_{otm}	40cm
	BL-10	w_{otm}	50cm
	BL-11	$w_{otm} + 2\%$	50cm
	BL-12	w_{otm}	50cm

w_{otm} adotado como 29%, e $w = 27,5\%$ (umidade na saída dos filtros prensa)

3.1.3 Ensaios de Caracterização Física

Fizeram parte dos ensaios de caracterização, os seguintes ensaios:

- classificação tátil visual;
- granulometria por peneiramento e sedimentação sem defloculante, com o objetivo de determinar as faixas granulométricas do resíduo em sua condição de campo, em estado semelhante à saída dos filtros prensa. Além disso, foram realizados ensaios com uso de defloculante, os quais permitiram a definição da distribuição granulométrica real das partículas presentes nas amostras e o entendimento da ocorrência da floculação no resíduo;
- determinação da Massa Específica dos Grãos;
- limites de Liquidez e Plasticidade.

3.1.4 Ensaio de Compactação Proctor Normal

O ensaio de compactação Proctor Normal foi utilizado para determinar a curva de compactação do resíduo, indicar a massa específica aparente seca e o teor de umidade referente, a fim de estabelecer a densidade seca máxima e umidade ótima, definida pelo ponto de inflexão da curva de compactação.

Foram moldados cinco corpos-de-prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro, com a compactação do resíduo por meio da aplicação de golpes com soquete padronizado (4,5 kg). A densidade e o teor de umidade foram determinados para cada corpo de prova.

3.1.5 Ensaio de Adensamento Unidimensional

Para o Grupo 1 foram utilizados corpos-de-prova com 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro moldados nas condições indicadas na Tabela 3.2. As amostras foram inicialmente inundadas e submetidas a um ciclo de carregamento axial com as tensões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 800 e 1.600 kPa. Posteriormente os corpos-de-prova foram submetidos às etapas de descarregamento, compostas por três estágios. Cada carregamento foi mantido por um período mínimo de 24 horas. Foram realizados ensaios de permeabilidade a carga variável ao final dos estágios de carregamento referentes às tensões 100, 400, 800 e 1.600 kPa.

Para as amostras do Grupo 2, ensaiadas em campanha posterior, foram utilizados corpos-de-prova com dimensões de 3cm de altura e 10 cm de diâmetro, talhados a partir dos blocos indeformados conforme apresentado na Tabela 3.3. Neste caso, os ciclos de carregamento seguiram as pressões de 10, 20, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, seguidos do descarregamento às tensões de 400, 100 e 20 kPa. A inundação ocorreu na pressão de 50 kPa. Os ensaios de permeabilidade a carga variável foram realizados nas pressões de 50, 100, 200 e 400 kPa, ao final dos estágios.

Os níveis de tensão ensaiados nas amostras dos Grupos 1 e 2 foram definidos em função da aplicação de seus resultados em seus respectivos projetos, motivadores das referidas campanhas, não sendo objeto desta dissertação a definição das faixas de tensão ensaiadas, mas a interpretação e aplicação dos resultados no modelo numérico apresentado.

3.1.6 Ensaio de Permeabilidade com Carga Variável

Para realização dos ensaios foram utilizados corpos-de-prova moldados nas condições apresentadas nas Tabelas 3.2 e 3.3, com dimensões aproximadas de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura.

Cada corpo-de-prova foi posicionado no centro do permeâmetro de carga variável, que consiste em um cilindro metálico com uma bureta graduada acoplada. Utilizou-se argila plástica nas laterais do corpo-de-prova permitindo a drenagem somente pelo topo e pela base da amostra. A saturação do corpo-de-prova ocorreu inicialmente por fluxo ascendente. Os resultados obtidos foram normalizados à temperatura de 20 °C.

3.1.7 Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Isotropicamente, Não Drenado, Saturado - CIUsat

Foram utilizados corpos-de-prova moldados segundo as condições indicadas nas Tabelas 3.2 e 3.3, com dimensões 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, atendendo à relação altura/diâmetro de aproximadamente 2.

Por meio da aplicação de contrapressão, as amostras foram saturadas até que se atingissem valores de B maiores que 0,98. Após a saturação, deu-se início à etapa de adensamento, em que as amostras foram submetidas a quatro níveis de tensão confinante. As campanhas de ensaio tiveram por objetivo subsidiar envoltórias de resistência para o resíduo segundo as condições esperadas para os distintos projetos motivadores das campanhas de ensaio realizadas, de modo que as amostras do Grupo 1 foram ensaiadas às tensões efetivas confinantes de 50, 150, 300 e 600 kPa, enquanto as amostras do Grupo 2 foram submetidas às tensões efetivas confinantes de 100, 225, 450 e 900 kPa. Cabe salientar que, uma vez que as campanhas foram motivadas por projetos em pilhas de resíduo filtrado distintas e independentes, o autor não teve parte na definição das faixas de tensão ensaiadas, sendo os resultados das campanhas de ensaios de laboratório disponibilizados para interpretação e aplicação no modelo numérico apresentado nessa dissertação.

Uma vez finalizada a etapa de adensamento, iniciou-se a etapa de cisalhamento, com carregamento axial sem que ocorresse drenagem, com medição de poropressão. A etapa de cisalhamento foi realizada com deformação controlada e velocidade definida segundo o coeficiente de adensamento C_v .

No caso do Grupo 1, estimou-se os valores de $\sqrt{t_{100}}$ de aproximadamente 4,5 minutos, C_v da ordem de 10^{-2} cm²/s e tf menor que 60 minutos. Desta forma, adotou-se o tempo para ruptura igual a 120 min e deformação axial na ruptura de 10%, de modo que a velocidade obtida foi de 0,08 mm/min.

Já para o Grupo 2, adotou-se valores de $\sqrt{t_{100}}$ de aproximadamente 5 minutos, C_v da ordem de 10^{-3} cm²/s e tf menor que 60 minutos, de modo o tempo para ruptura foi definido como 120 min e a deformação axial na ruptura de 5%, obtendo a velocidade igual a 0,04 mm/min.

A realização do ensaio CIUsat tem especial importância para a definição dos parâmetros de resistência do resíduo em estudo pela praticidade de execução, tendo em vista sua granulometria do resíduo, além de permitir o conhecimento das poropressões ao longo do cisalhamento.

3.1.8 Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Isotropicamente, Não Drenado, Não Saturado - CIUunsat

A geometria dos corpos-de-prova do Grupo 1 moldados para realização do ensaio e suas condições de moldagem são semelhantes às apresentadas no item 3.1.7.

O início da etapa de adensamento ocorreu sem que houvesse saturação inicial da amostra, de modo que as amostras foram submetidas a quatro níveis de tensão efetiva confinante: 50, 150, 300 e 600 kPa. A variação volumétrica da câmara triaxial foi monitorada ao longo de todo o adensamento a fim de determinar a variação volumétrica dos corpos-de-prova.

Os procedimentos adotados durante a fase de cisalhamento são análogos àqueles apresentados para o ensaio CIUsat, descrito no item 3.1.7. A realização do ensaio em condição não saturada teve por objetivo fornecer resultados de parâmetros de resistência para o desenvolvimento de banco de dados de propriedades desse resíduo.

3.1.9 Ensaio de Compressão Triaxial Não Adensado, Não Drenado, Não Saturado - *UUunsat*

A geometria dos corpos-de-prova do Grupo 1 moldados para realização do ensaio e suas condições de moldagem são semelhantes às apresentadas no item 3.1.7.

Os ensaios foram realizados sem que ocorresse a fase de adensamento dos corpos-de-prova, tampouco sua saturação. Desta forma, as amostras foram confinadas às tensões efetivas de 150, 300 e 600 kPa para o início da fase de cisalhamento, que ocorreu com deformação controlada e medida de poropressão, à velocidade de 0,08 mm/min. A realização do ensaio em condição não saturada teve por objetivo fornecer resultados de parâmetros de resistência para o desenvolvimento de banco de dados de propriedades desse resíduo nessa condição.

3.1.10 Ensaio de Compressão Triaxial Adensado, Drenado - *CID*

De modo semelhante, foram utilizados corpos-de-prova do Grupo 1 moldados segundo as condições indicadas na Tabela 3.2, com dimensões 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, atendendo à relação altura/diâmetro de aproximadamente 2.

Os corpos-de-prova foram inicialmente saturados, com avaliação do parâmetro B em que se considerou a ocorrência da saturação para valores maiores que 0,98. Em seguida iniciou-se a etapa de adensamento, quando foram aplicadas as tensões confinantes de 50, 150, 300 e 600 kPa. Depois de concluída a etapa de adensamento, deu-se início à fase de cisalhamento, em que os corpos-de-prova sofreram carregamento axial até sua ruptura, de modo drenado.

Aplicou-se uma velocidade de cisalhamento igual a 0,08 mm/m durante a etapa de cisalhamento com deformação controlada. Os resultados do ensaio CID foram utilizados, além da obtenção de parâmetros de resistência, dados de entrada para construção de modelo constitutivo Cam-Clay a partir da análise das deformações volumétricas registradas no ensaio durante o cisalhamento.

3.1.11 Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios foram realizados de modo a obter duas envoltórias de ruptura, a saber, a primeira correspondente aos corpos-de-prova posicionados com o plano de compactação paralelo ao plano de horizontal ruptura, e a segunda com posicionamento dos planos de compactação perpendicular ao plano de ruptura horizontal. Em ambos os casos foram moldados quatro corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova do Grupo 1 ensaiados foram moldados em quadrados de 6 cm de aresta e 2,5 cm de altura.

Durante a fase de adensamento do ensaio foram aplicadas as tensões de 50, 150, 300 e 600 kPa nas amostras inundadas. Após estabilização das deformações verticais decorrentes do adensamento, deu-se início à etapa de cisalhamento com aplicação de esforço horizontal, com deformação controlada e velocidade estabelecida segundo o coeficiente de adensamento e tempo mínimo de ruptura igual a 200 minutos, conforme preconizado pela ASTM D3080:2011 para solos siltosos.

3.1.12 Ensaio de Cisalhamento Simples Estático

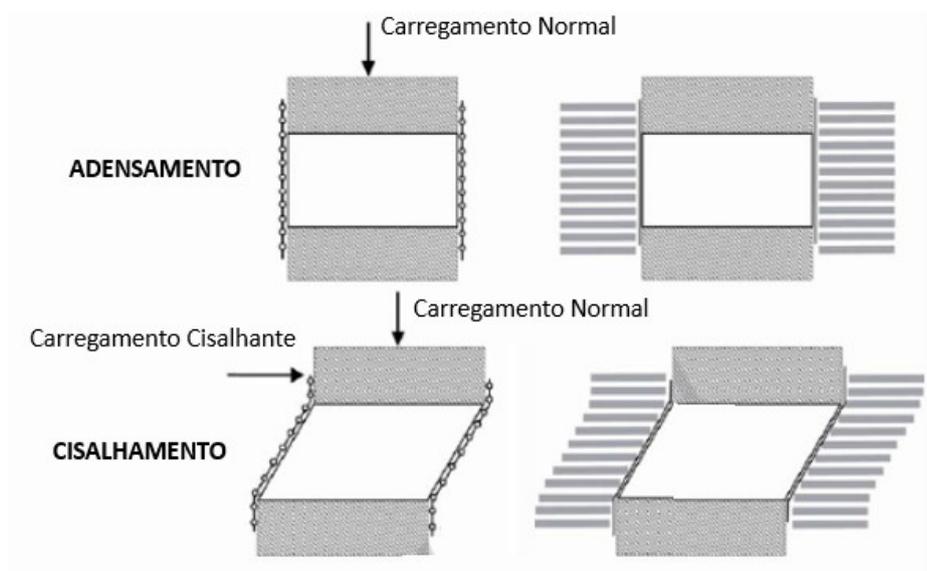
Com o intuito de compreender a resistência ao cisalhamento *in situ* de uma argila sensível (altamente sensível), normalmente adensada, foram realizados estudos tensão-deformação e de propriedades correlacionadas à resistência ao cisalhamento. Esses estudos foram responsáveis pelo desenvolvimento do ensaio de laboratório denominado ensaio de cisalhamento simples, ensaio em que são permitidas as deformações uniformes devidas ao cisalhamento puro ao longo de um plano definido.

Essencialmente, existem dois tipos de ensaios de cisalhamento simples, dentre eles, o cisalhamento simples direto (*direct simple shear*) e o cisalhamento simples com confinamento (Matziaris & Vimalan, 2019). Em ambos os ensaios as amostras são cisalhadas por carregamentos horizontais. Durante um ensaio de cisalhamento simples direto a amostra é confinada por anéis rígidos concêntricos ou por uma membrana reforçada.

O ensaio de cisalhamento simples, que é creditado a Krey, Terzaghi e Casagrande (McGuire, 2011) pode ser realizado em amostras circulares ou quadradas, e consiste em uma fase de carregamento normal e a segunda fase de carregamento cisalhante.

No ensaio, a amostra é confinada em uma membrana de borracha, reforçada ou não, ou por anéis rígidos, responsáveis por prevenir deformações radiais, permitindo no entanto, deformações verticais durante o cisalhamento. O teste pode ser realizado de forma drenada ou não drenada, em que o carregamento não drenado é simulado a partir do ajuste contínuo da tensão vertical de modo que a altura do corpo-de-prova seja mantido constante, mantendo consequentemente, o volume constante. As mudanças na tensão vertical são assumida como iguais às variações das poropressões. A Figura 3-1 ilustra o conceito de ensaio de cisalhamento simples.

Figura 3-1 – Conceito da amostra no ensaio de cisalhamento simples (Modificado de McGuire, 2011)



O ensaio é capaz de simular carregamentos estáticos e cíclicos, bem como carregamentos com tensão controlada ou deformação controlada. O ensaio de deformação controlada, por sua vez, não requer o conhecimento da direção e magnitude da tensão principal maior durante o cisalhamento. Maiores detalhes acerca dos procedimentos e hipóteses do ensaio são discutidos por Bjerrum & Landva (1966) e Lacasse & Raadim (1987).

Para esse trabalho, os ensaios foram realizados em corpos-de-prova com 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro, segundo as condições de umidade e compactação apresentadas na Tabela 3.2, com exceção das condições indicadas para AM-04 e AM-05.

Nesse ensaio procurou-se aplicar um estado de deformação e tensão uniformes na amostra. As deformações radiais no corpo-de-prova cilíndrico foram impedidas lateralmente a partir da adoção de anéis metálicos ou membrana de borracha, as quais permitem apenas deformações verticais durante o adensamento.

A fase inicial de adensamento foi realizada com adensamento unidimensional, impedindo deformações laterais, com a aplicação de carregamento vertical em quatro estágios até a tensão de sobre-adensamento estabelecida, 300 kPa.

A fase de cisalhamento foi realizada de forma não drenada, a volume constante, em que a variação da tensão vertical é proporcional à poropressão desenvolvida no cisalhamento. Nessa etapa, foi aplicado ao topo do corpo-de-prova, o carregamento horizontal cisalhante, com deformação controlada, e taxa de deformação de 5% de deformação cisalhante por hora.

3.1.13 Ensaio de Compressão Triaxial PN

Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova com 4 cm de diâmetro e relação altura/diâmetro próxima de 2, segundo as condições apresentadas nas Tabelas 3.2 e 3.3, sem que houvesse saturação prévia. Foi utilizada uma prensa triaxial do tipo Bishop-Wesley, onde os ensaios foram realizados sem a ocorrência de drenagem.

Durante o ensaio foram obtidas leituras de poropressões decorrentes dos incrementos de tensões principais maior e menor, simultaneamente. A tensão desviadora foi aplicada com controle das deformações, segundo a velocidade indicada para os ensaios CIUsat, e os acréscimos de tensão confinante seguiram a razão $\sigma_3/\sigma_1 = 0,5$ para as amostras do Grupo 1 e $\sigma_3/\sigma_1 = 0,5$ e $0,6$ para o Grupo 2.

O ensaio finalizou quando a tensão principal maior atingiu 400 kPa no caso do Grupo 1, e à tensão de 200 kPa para o Grupo 2.

3.1.14 Curvas Características de Retenção de Água

Para definição da curva característica de retenção de água para o resíduo foram ensaiadas 16 amostras do Grupo 1, moldadas segundo as condições apresentadas na Tabela 3.2.

Para tanto, foi utilizado o método indireto do papel filtro. Nesse caso, a metodologia empregada consiste em provocar a transferência de água do resíduo ensaiado para um meio poroso (papel filtro), até que seja atingido o equilíbrio. Desta forma, por meio de uma curva de calibração é possível determinar a relação entre a umidade e a sucção observadas no papel filtro, e conseqüentemente no material avaliado.

Para cada amostra ensaiada correspondem dez anéis, para os quais foram definidos os valores de umidade para determinação da sucção mátrica. Após determinação da umidade inicial, as amostras foram secas gradualmente, de modo que a curva obtida representa a curva de secagem. Os discos de papel filtro (Whatman n. 42) cortados segundo o diâmetro interno de cada anel foram justapostos em contato com a face superior e inferior dos corpos-de-prova. Prosseguiu-se com o cobrimento das amostras envolvendo-as com filme plástico de PVC e papel de alumínio, seguidos do acondicionamento em caixas de isopor por período mínimo de 168 horas. Em seguida, os discos foram retirados e imediatamente pesados em balança.

3.2 Monitoramento do Aterro Experimental

3.2.1 Descrição Geral

O aterro experimental foi construído no interior do depósito de resíduos localizado no estado do Pará, na região norte do Brasil. A área experimental consiste em uma faixa de dimensões 50 m de largura e 30 m de comprimento, denominada área 2A-2B, composta por um aterro compactado de resíduo de lama vermelha desaguado por filtros prensa, construído sobre a superfície de resíduo existente, sendo composta por lama vermelha desaguada por filtros rotativos depositada pelo método *dry stacking*. Sobre a superfície de resíduo filtrado por filtros prensa o aterro experimental conta com um sistema impermeabilizante em geomembrana PEAD.

O monitoramento do aterro foi realizado com o objetivo de avaliar as poropressões desenvolvidas em ambas as camadas de resíduo filtrado. A seção instrumentada A-A (Figura 3-2) é composta por uma camada de resíduo proveniente dos filtros rotativos (Frt), seguida de uma camada de resíduo desaguado por filtros prensa (Fpr), cuja espessura é de aproximadamente 2,5 metros. Estão instalados na camada de resíduo desaguado por filtros rotativos, a uma profundidade de aproximadamente 7,0 m, os piezômetros elétricos de corda vibrante PZ-6 e PZ-8 (Figura 3-3). Adicionalmente, a seção A-A' conta ainda com piezômetros elétricos de corda vibrante PZ-5 e PZ-7, dotados de pedra porosa de alta pressão de borbulhamento, instalados à profundidade de 1,5 m, e são responsáveis pelo registro das poropressões desenvolvidas no resíduo de filtros prensa decorrente de sua construção.

A Figura 3.2 apresenta o arranjo geral do aterro teste com indicação da instrumentação em planta, enquanto a seção A-A é ilustrada na Figura 3.3.

Figura 3-2: Planta de localização do aterro teste

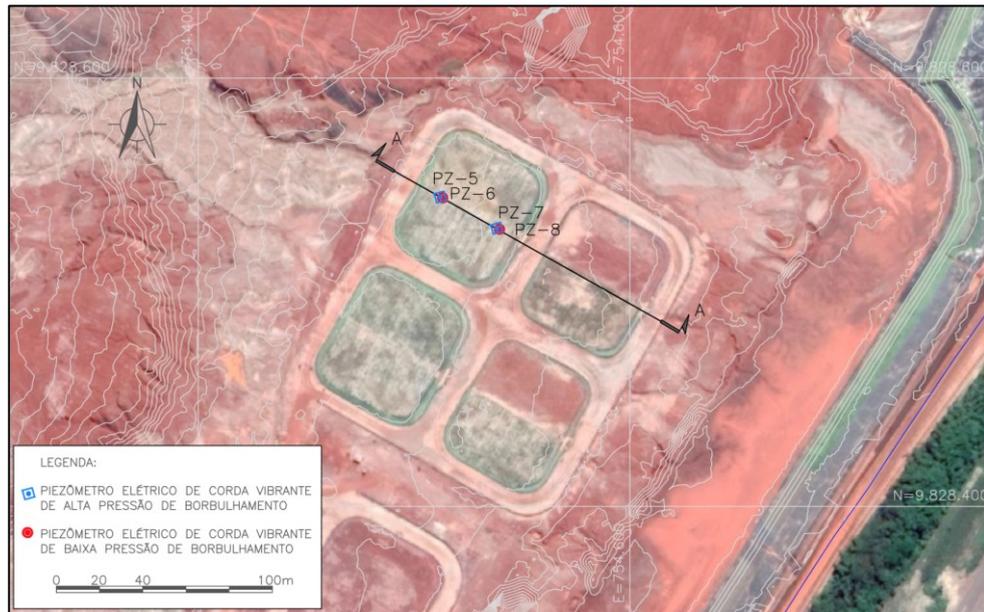
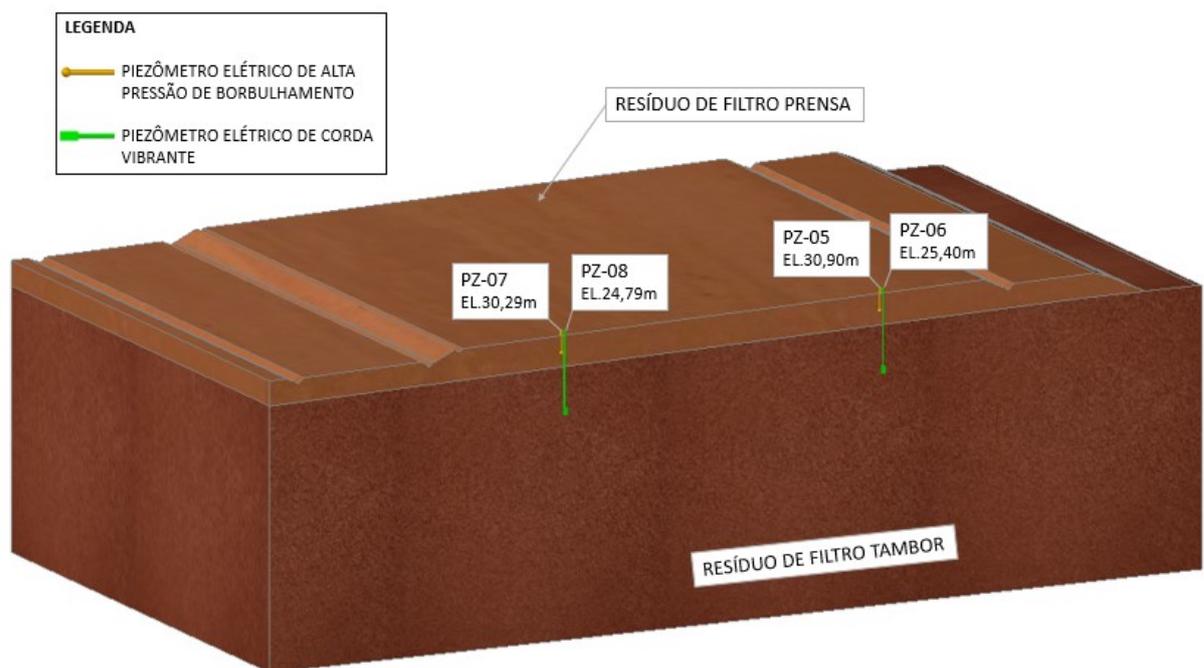


Figura 3-3: Aterro teste – Seção instrumentada



A análise de velocidade de construção do aterro experimental foi realizada por meio da sobreposição de levantamentos topográficos mensais a laser da área do depósito. Contudo, para o desenvolvimento dessa pesquisa, não foram informados aspectos construtivos como espessura de camada de compactação adotada, grau de compactação mínimo atingido e teor de umidade durante a compactação do resíduo.

3.3 Modelagem Numérica

Foi aplicado um modelo numérico bidimensional, utilizando os softwares SEEP/W, SIGMA/W e SLOPE/W que compõem o pacote GEOSTUDIO versão 2019 R2, da Geoslope *International*, que permitiram as análises tensão-deformação com análises acopladas de deformação e fluxo. A formulação do adensamento foi construída partir da Teoria de Biot (1941), particularizada para duas dimensões, que fornece equações diferenciais de governo solucionadas pelo Método dos Elementos Finitos.

Com base na formulação apresentada, foi aplicado um modelo para os sucessivos carregamentos a partir de camadas de aterro construído com resíduo filtrado. No modelo numérico adotado, a ativação das camadas foi realizada de forma sucessiva e individual, computando um acréscimo de tensão total e de poropressões construtivas. Cada etapa de carregamento construtivo corresponde a um problema transiente, para o qual são solucionadas numericamente as equações de governo.

A aplicação de um modelo numérico visa simular as etapas de carregamento e dissipação das poropressões construtivas do aterro, e avaliar as condições de fluxo e das poropressões desenvolvidas no maciço de uma pilha de resíduo filtrado ao longo de sua construção e operação.

Inicialmente foram reproduzidos numericamente os ensaios de compressão triaxial PN, a fim de atestar a aderência do modelo segundo os dados de entrada obtidos nos referidos ensaios. Nessa etapa foram simulados os ensaios triaxiais realizados nas amostras que indicaram maior e menor taxa de geração de poropressão, aqui denominados resíduo “úmido” e “seco”, respectivamente. Para efeitos de distinção, o resíduo “seco” foi aquele considerado cujas amostras apresentaram desvio de umidade menor ou igual a 2%, em relação à umidade ótima de compactação e grau de compactação mínimo igual a 95% do ensaio Proctor Normal, enquanto o resíduo “úmido” foi designado para as amostras com desvio de umidade entre 4% e 6%, acima da umidade ótima de compactação, e grau de compactação igual a 90% em relação ao ensaio Proctor Normal.

Em seguida, a construção do aterro experimental foi objeto de modelagem, quando foram confrontadas as leituras indicadas pela instrumentação nele instalada frente aos resultados do modelo numérico com o objetivo de atestar a calibração do modelo. Foi aplicada a condição de contorno impermeável ($Q=0$) na fundação do aterro, simulando o sistema de impermeabilização existente. Não foram consideradas a ocorrência de recarga superficial

tampouco condições climáticas tendo em vista que o aterro experimental é dotado de sistema de impermeabilização em seu topo. Como condição inicial foi considerada uma freática estabelecida na camada subjacente ao aterro. O carregamento devido à construção do aterro foi simulado a partir da computação sequencial de nove camadas com espessura aproximada de 0,40 m cada. Foram utilizados elementos quadrangulares e triangulares de ordem quadrática de interpolação, com maior detalhamento ao trecho do aterro teste. A construção do modelo numérico é descrita em detalhes no item 4.2.2.

Por fim, o modelo foi utilizado como ferramenta de previsão das poropressões desenvolvidas durante a construção de uma pilha do resíduo filtrado, segundo uma geometria hipotética com altura igual a 100,00 m, talude com inclinação média de 19,0°, dotado de bermas com 5,0 m de largura a cada 10,0 m de desnível. A geometria avaliada apresenta inclinação de taludes entre bermas igual a 2,0H:1,0V. Inicialmente, no modelo foi considerada a condição *in situ* em que fazia parte da geometria estudada apenas a fundação da pilha, representando assim a condição anterior à sua construção. Nesse caso foram aplicadas condições de contorno de deslocamento nulo nas direções x e y nos elementos de base, enquanto os elementos de fronteira laterais tiveram os deslocamentos na direção x restringidos. A condição de contorno de fluxo ($Q=0$) foi aplicada à fundação da pilha de resíduos simulando a existência de um sistema de impermeabilização na região. Tendo em vista o objetivo de avaliar as poropressões no maciço da pilha, à fundação foi atribuída de forma simplificadora, uma superfície plana e horizontal na El. 0,00 m, composta por material elástico-linear com resistência infinita. Além disso, não foi considerada a ocorrência de recarga superficial decorrente de deflúvio na área, tampouco condições climáticas. Os elementos atribuídos ao modelo possuem geometria quadrangular e triangular, de ordem quadrática de interpolação. Detalhes da geometria da pilha hipotética são apresentados no Item 4.3. Essa etapa teve como objetivo avaliar os principais aspectos construtivos influentes na geração de poropressões em uma pilha. Foi objeto de análise a influência do tempo de construção da pilha nas poropressões construtivas, com avaliação da construção realizada em 1, 5, 10 e 20 anos. Além disso, a influência da umidade de compactação do resíduo foi discutida a partir do estudo de três cenários, sendo eles: (i) pilha executada em sua totalidade com o resíduo “seco”, (ii) pilha executada em sua totalidade com resíduo “úmido”, e (iii) pilha executada com ambos os resíduos, respeitando-se um zoneamento proposto. No terceiro cenário foram avaliadas ainda diferentes razões entre altura de pilha *versus* base da faixa “seca”, que representa uma faixa estrutural executada com o resíduo “seco”, além da influência da construção de tapete drenante nas poropressões construtivas.

Os resultados dos ensaios discutidos no Item 3.1, foram utilizados para definição do modelo constitutivo do resíduo da produção de alumina via processo Bayer desaguado por filtros prensa, de tal modo que foi aplicado o Modelo Cam-Clay Modificado para as relações tensão-deformação, a partir da definição dos parâmetros λ , κ , M e G' característicos ao material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este item foi organizado em três partes. A primeira consiste na consolidação e apresentação dos resultados de caracterização do resíduo filtrado obtidos a partir dos resultados dos ensaios de laboratório discutidos no item 3.1, necessários para a construção do modelo numérico proposto. Em seguida, são apresentados os procedimentos necessários para construção do modelo numérico bem como os resultados da modelagem frente às etapas de validação das hipóteses (ensaios de laboratório) e calibração do modelo (a partir de dados de monitoramento do aterro teste). Por fim, é apresentada a avaliação dos excessos de poropressões decorrentes da construção de uma pilha hipotética frente aos diferentes cenários estudados.

4.1 Caracterização Geotécnica do Resíduo Filtrado

4.1.1 Ensaios de Caracterização

4.1.1.1 Massa Específica dos Grãos

A massa específica dos grãos (ou dos sólidos) ρ_s é representada pela relação entre a massa das partículas sólidas e seu volume. Para a determinação da massa específica dos grãos foram tomadas amostras deformadas (Grupo 1) e de amostras retiradas dos blocos (Grupo 2). A Tabela 4.1 sumariza os resultados de massa específica dos grãos para as amostras de resíduo desaguado. Nesse caso, observa-se uma massa específica dos grãos média do resíduo desaguado de 2,996 g/cm³ e 3,063 g/cm³ para os Grupos 1 e 2, respectivamente. Os resultados indicaram um desvio padrão de 0,055, e indicaram valores médios coerentes com a faixa reportada na literatura, com valores entre 2,7 e 3,7 g/cm³ (Reddy *et al.*, 2020).

Tabela 4.1: Massa Específica dos grãos (ρ_s)

Grupo	Identificação	ρ_s (g/cm ³)	ρ_s médio (g/cm ³)
Grupo 1	Pa - 01	3,0454	2,9961
	Pa - 01A	3,0562	
	Tr - 01	2,9577	
	Tr - 01A	2,9567	
	MISTURA - 01	2,9780	
	MISTURA -01A	2,9825	

Continua

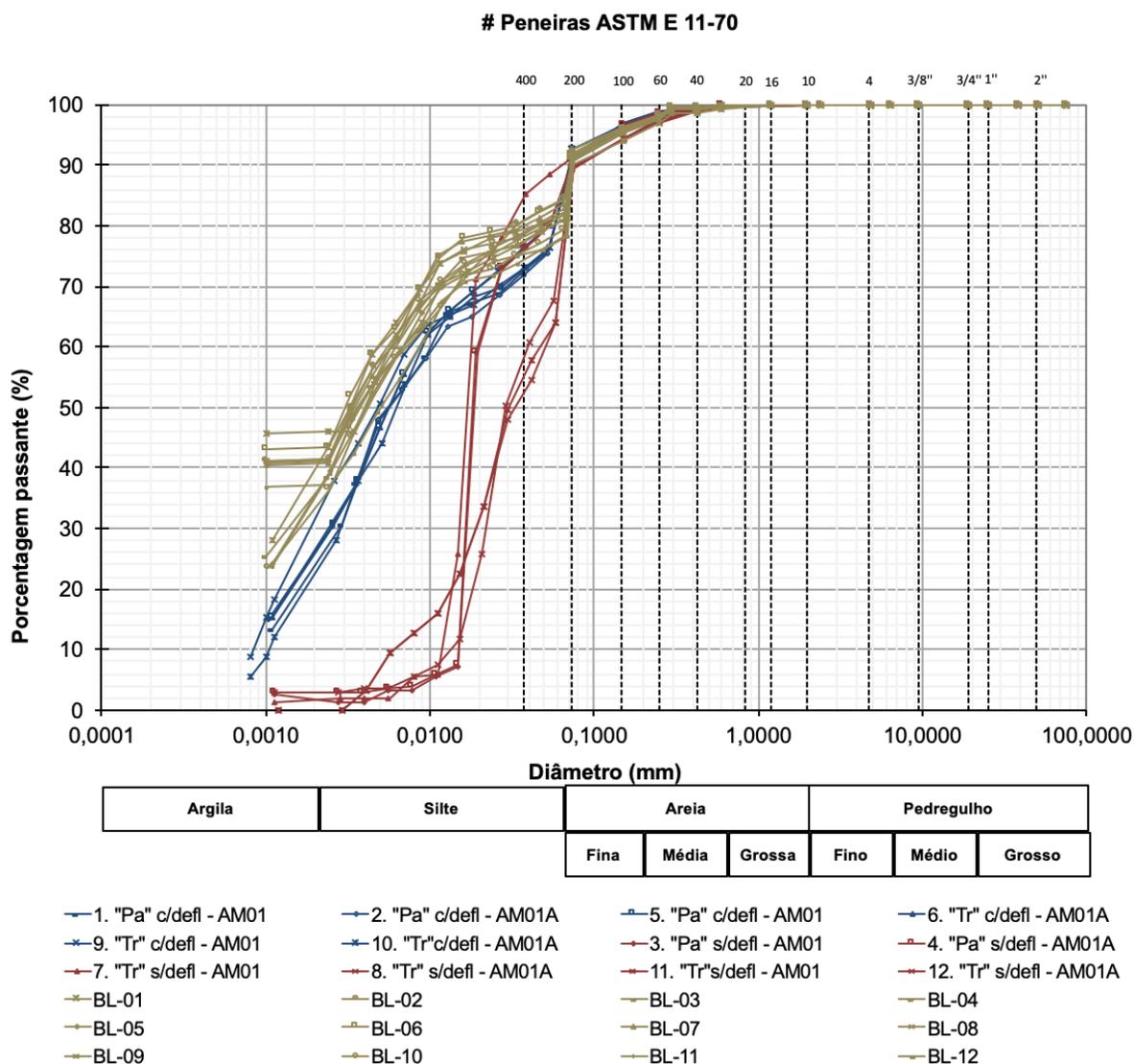
Tabela 4.1: Massa Específica dos grãos (ρ_s) – Continuação

Grupo	Identificação	ρ_s (g/cm³)	ρ_s médio (g/cm³)
Grupo 2	BL-01	3,0713	3,0633
	BL-02	3,1300	
	BL-03	3,0610	
	BL-04	3,1366	
	BL-05	3,0083	
	BL-06	3,0499	
	BL-07	3,1403	
	BL-08	3,0717	
	BL-09	2,9959	
	BL-10	3,0218	
	BL-11	3,0580	
	BL-12	3,0146	

4.1.1.2 Distribuição Granulométrica

Foi realizada a análise granulométrica completa em amostras deformadas preparadas com material proveniente do Grupo 1, apresentadas pelas curvas em azul (com defloculante) e em vermelho (sem defloculante), além de amostras com material retirado dos blocos do Grupo 2 (curvas em amarelo). Para tanto, foram realizados os procedimentos preconizados pela norma NBR-7181 (ABNT, 1988). Para as amostras preparadas, foram realizadas análises granulométricas sem o uso de defloculante (curvas em vermelho), com o objetivo de avaliar a influência de flocculação no campo, indicando a distribuição granulométrica na condição da estrutura do material quando da saída dos filtros. A partir das frações granulométricas obtidas nos ensaios conclui-se que o resíduo se trata de um silte argiloso com areia fina. Essas frações são ilustradas graficamente na Figura 4.1, e apresentadas na Tabela 4.2.

Figura 4-1: Curvas Granulométricas do Resíduo Ensaiado



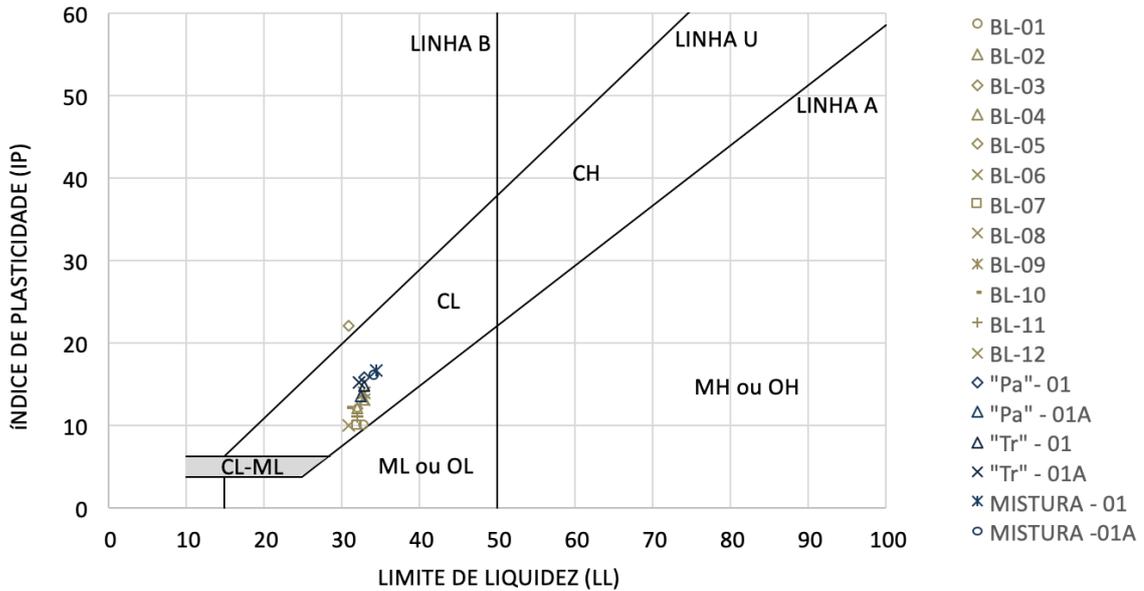
4.1.1.3 Limites de Consistência

A partir dos resultados dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) inseridos na Carta de Plasticidade de Casagrande (Figura 4.2) observa-se a classificação do material como solo argiloso de baixa compressibilidade (CL). A Tabela 4.2 sumariza os valores individuais encontrados para os limites de consistência das amostras ensaiadas.

Tabela 4.2: Limites de Consistência

Grupo	Identificação	γ_s (t/m ³)	Granulometria (%)					Limites de Consistência				
			Argila	Silte	Areia			Pedregulho	LL(%)	LP(%)	IP	Atividade
					Fina	Média	Grossa					
Grupo 1	“Pa” - 01	3,0454	24	63	11	2	0	0	33	17	16	0,67
	“Pa” - 01A	3,0562	26	60	12	2	0	0	33	19	14	0,54
	“Tr” - 01	2,9577	22	62	9	3	0	0	33	18	15	0,68
	“Tr” - 01A	2,9567	26	60	10	4	0	0	32	17	15	0,58
	MISTURA - 01	2,9780	32	56	9	3	0	0	34	18	17	0,53
	MISTURA -01A	2,9825	23	63	11	3	0	0	34	18	16	0,70
Grupo 2	BL-01	3,0713	40	48	9	3	0	0	33	23	10	0,25
	BL-02	3,1300	34	53	10	3	0	0	33	20	13	0,38
	BL-03	3,0610	35	51	11	3	0	0	32	20	12	0,34
	BL-04	3,1366	36	52	9	3	0	0	32	20	12	0,33
	BL-05	3,0083	35	53	9	3	0	0	31	22	9	0,26
	BL-06	3,0499	43	46	8	3	0	0	33	19	14	0,33
	BL-07	3,1403	41	48	8	3	0	0	32	22	10	0,24
	BL-08	3,0717	41	47	9	3	0	0	33	20	13	0,32
	BL-09	2,9959	46	40	10	3	1	0	33	19	14	0,30
	BL-10	3,0218	41	47	9	3	0	0	31	19	12	0,29
	BL-11	3,0580	41	48	8	3	0	0	32	21	11	0,27
	BL-12	3,0146	37	51	9	3	0	0	31	21	10	0,27

Figura 4-2: Classificação do resíduo pela Carta de Plasticidade de Casagrande



O peso específico real dos grãos médio encontrado para as todas as amostras foi de 30,41 kN/m³. A fim de avaliar o índice de atividade da fração argila presente das amostras do resíduo, é sugerida por Skempton (1953) a análise do potencial da fração argila, conferindo a plasticidade ao solo, segundo a Equação 4.1.

Considera-se normal a fração argila presente no solo para valores de índice de atividade entre 0,75 e 1,25. A fração argila é considerada inativa para índice de atividade menor que 0,75, e considerada ativa para valor acima de 1,25.

$$\text{índice de atividade} = \frac{\text{índice de plasticidade (IP)}}{\text{Fração argila (< 0,002mm)}} \quad (4.1)$$

Como visto na Tabela 4.2, todas as amostras apresentaram índice de atividade menor que 0,75, portanto, a fração argila é caracterizada como inativa. O resultado é esperado uma vez que grande parte dos argilominerais é desagregada do minério ainda durante a etapa de lavagem, precedente ao processo Bayer, conforme discutido no Item 2.4.1.

4.1.2 Ensaios de Compactação Proctor Normal

Para a realização dos ensaios de compactação Proctor Normal no resíduo do Grupo 1, foram preparadas amostras de resíduos da produção do beneficiamento da bauxita via processo Bayer provenientes dos dois sítios, aqui denominados “Pa” e “Tr”. Além disso, foram testados ainda corpos de prova compostos pela mistura dos resíduos industriais gerados a partir do beneficiamento da bauxita proveniente dos distintos. Para realização do ensaio nas amostras

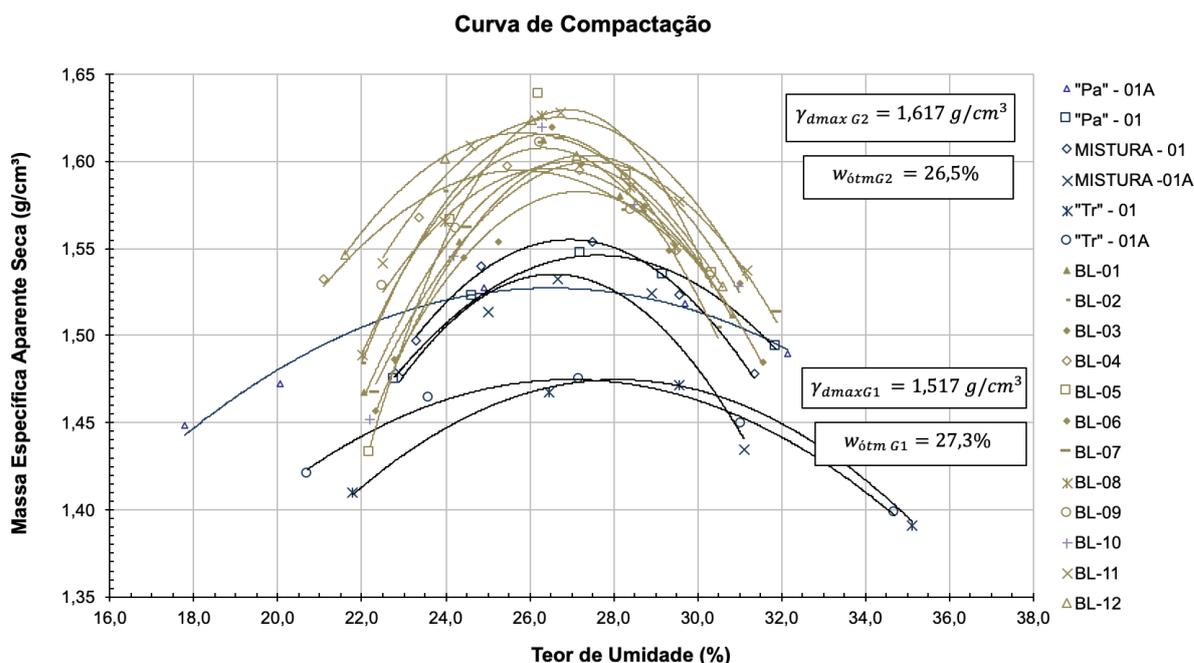
do Grupo 2, foram coletadas amostras deformadas nas proximidades de onde foram retirados os blocos indeformados, razão pela qual segue a mesma nomenclatura, conforme Tabela 4.3.

Com base nos ensaios de Compactação Proctor Normal realizados conforme padronizado pela NBR – 7182 (ABNT, 1986), obteve-se valores médios de massa específica aparente seca máxima igual a 15,17 kN/m³ e umidade ótima igual a 27,3 % para o Grupo 1, e para o Grupo 2, massa específica aparente seca máxima de 16,17 kN/m³ e umidade ótima de 26,52%. Os resultados individuais dos ensaios de compactação realizados são indicados numericamente na Tabela 4.3, enquanto a Figura 4.3 ilustra graficamente os resultados, em que as curvas em azul representam as amostras do Grupo 1 e as curvas em amarelo representam as amostras do Grupo 2. No gráfico, fica evidente que as amostras de resíduo do Grupo 2 apresentam massa específica seca máxima superiores aos observados nos ensaios realizados nas amostras do Grupo 1.

Tabela 4.3: Resultados dos Ensaios de Compactação Proctor Normal

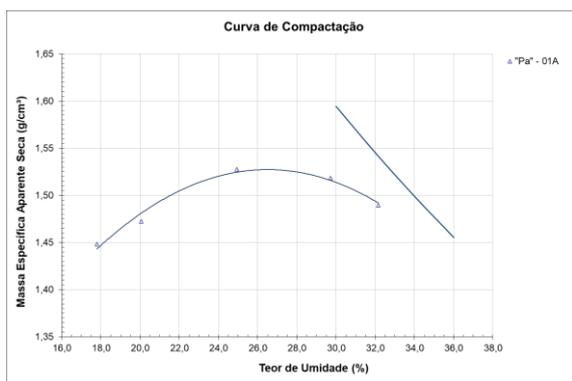
Grupo	Identificação	$\gamma_{d \max}$ (kN/m³)	w_{ot} (%)
Grupo 1	“Pa” - 01	15,46	27,6%
	“Pa” - 01A	15,27	26,6%
	“Tr” - 01	14,70	28,1%
	“Tr” - 01A	14,70	26,9%
	MISTURA - 01	15,50	27,0%
	MISTURA - 01A	15,40	27,4%
Grupo 2	BL-01	16,13	26,5%
	BL-02	16,10	26,0%
	BL-03	15,98	27,2%
	BL-04	16,01	26,3%
	BL-05	16,38	26,4%
	BL-06	16,20	26,7%
	BL-07	16,13	26,8%
	BL-08	16,27	26,5%
	BL-09	16,10	26,4%
	BL-10	16,20	26,5%
	BL-11	16,30	26,3%
	BL-12	16,23	26,1%

Figura 4-3: Curvas de Compactação das amostras de resíduo Grupos 1 e 2

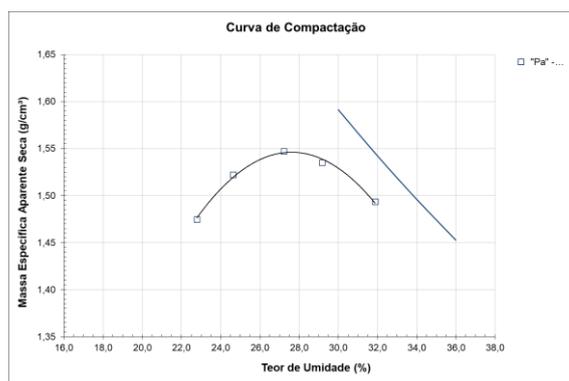


Conforme discutido, o material originário do Grupo 1 foi preparado em laboratório, enquanto as amostras do Grupo 2 foram coletadas na proximidade dos blocos indeformados obtidos em aterro experimental. Dessa forma, além da própria metodologia de filtragem, por filtros rotativos no caso do Grupo 1, e por filtros prensa no caso do Grupo 2, cita-se como possíveis fatores influentes nas curvas de compactação; as características dos resíduos, as atividades de compactação às quais foram submetidas as amostras do Grupo 2 durante a execução do aterro experimental, anteriormente à coleta das amostras. Adicionalmente, o efeito do tempo de exposição à radiação do resíduo nas áreas de retomada e na área teste após sua compactação representa uma secagem prévia ao ensaio de compactação feito em laboratório, que pode influenciar as curvas de compactação (Pinto, 2006). Nesse caso, as amostras coletadas na área experimental apresentaram valores de umidade ótima ligeiramente inferiores e resultados de massa específica aparente seca máxima superiores quando comparados aos resultados dos ensaios no resíduo do Grupo 1. As Figuras 4-4 e 4-5 apresentam as curvas de compactação individuais das amostras dos Grupos 1 e 2, respectivamente.

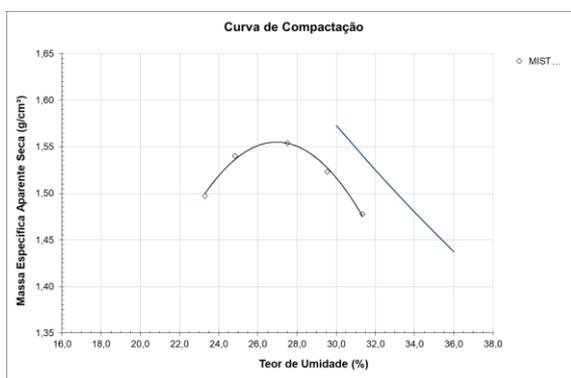
Figura 4-4: Curvas de Compactação das amostras de resíduo Grupos 1



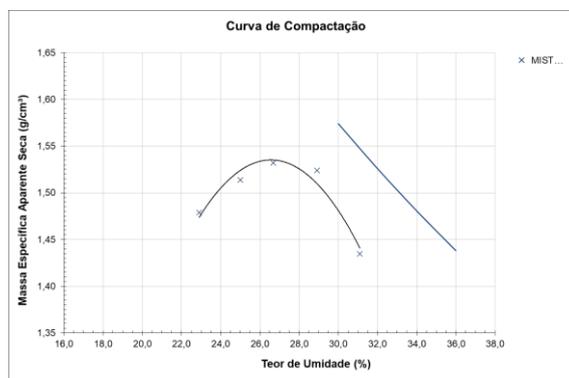
Pa-01A – Grupo 1



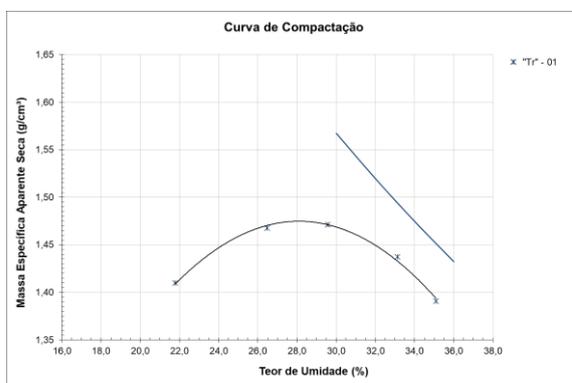
Pa-01 – Grupo 1



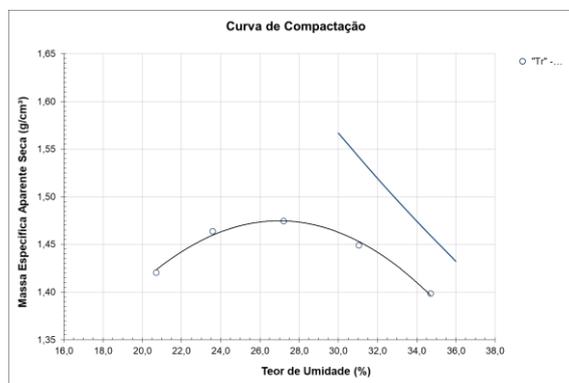
Mistura 01 – Grupo 1



Mistura 01A – Grupo 1

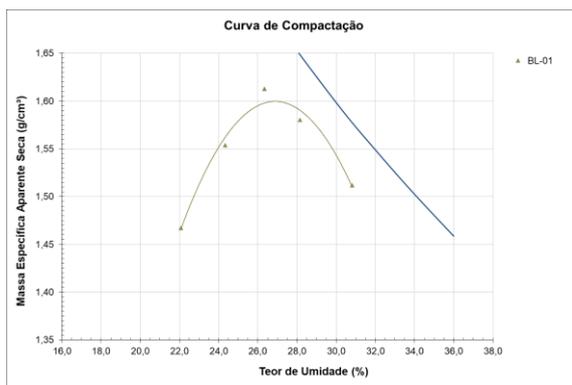


Tr-01 – Grupo 1

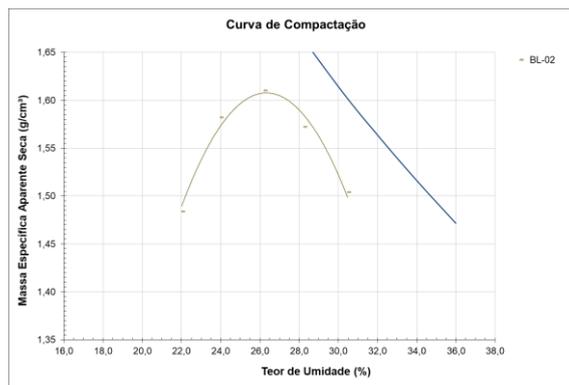


Tr-01A – Grupo 1

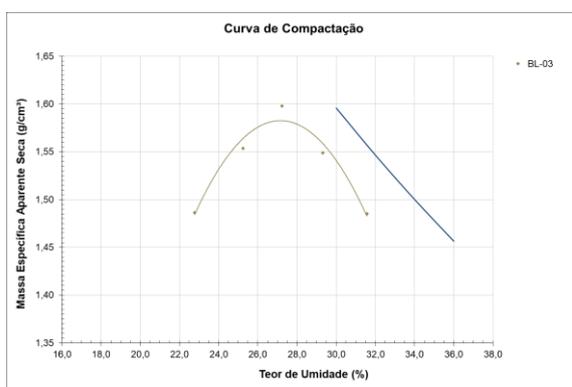
Figura 4-5: Curvas de Compactação das amostras de resíduo Grupo 2



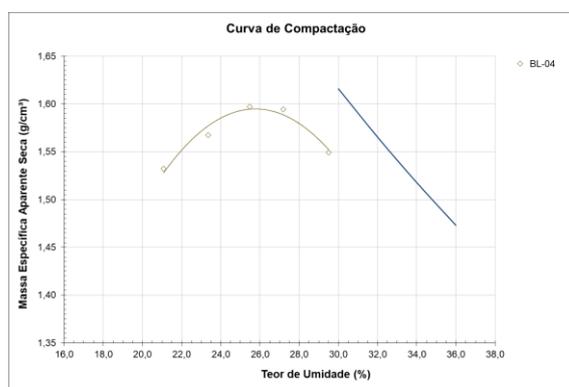
BL – 01 – Grupo 2



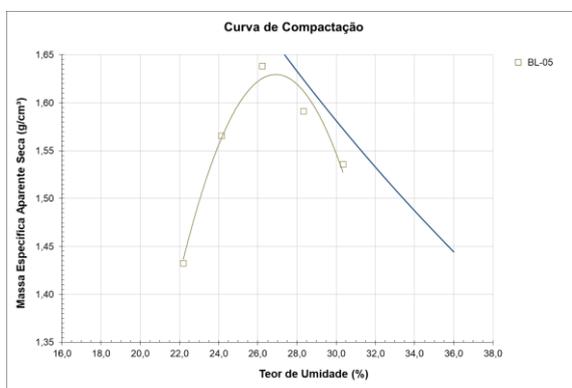
BL – 02 – Grupo 2



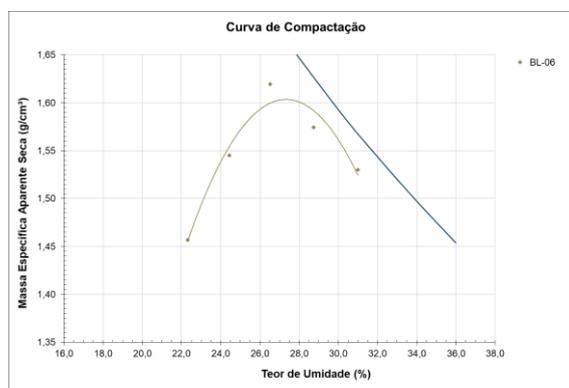
BL – 03 – Grupo 2



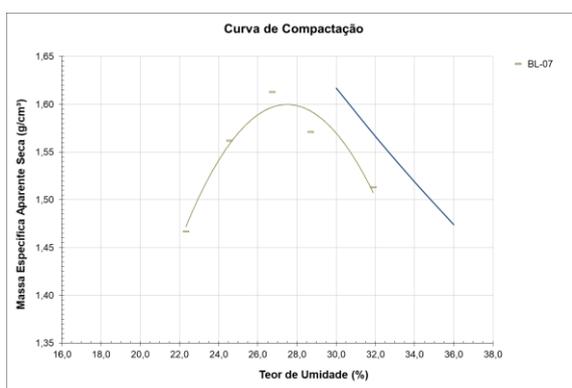
BL – 04 – Grupo 2



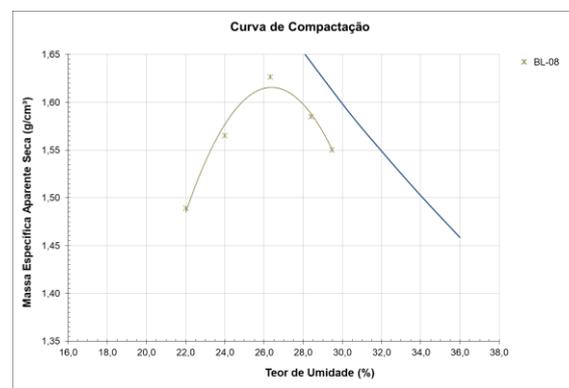
BL – 05 – Grupo 2



BL – 06 – Grupo 2

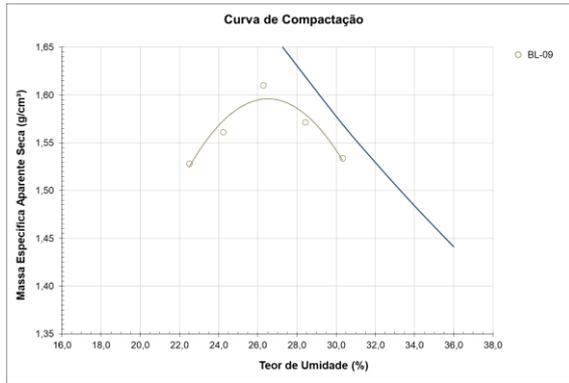


BL – 07 – Grupo 2

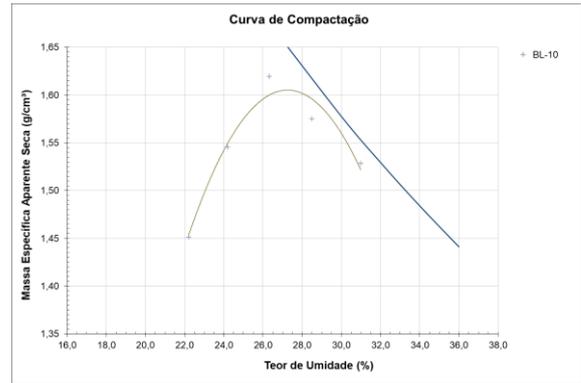


BL – 08 – Grupo 2
Continua

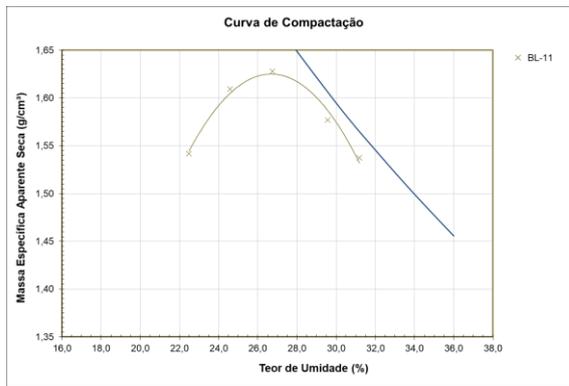
Figura 4-5: Curvas de Compactação das amostras de resíduo Grupo 2 (Continuação)



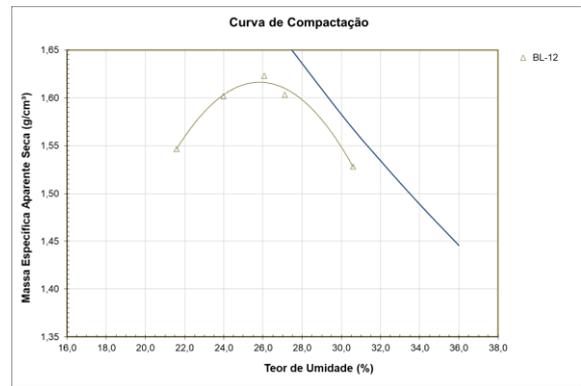
BL – 09 – Grupo 2



BL – 10 – Grupo 2



BL – 11 – Grupo 2



BL – 12 – Grupo 2

4.1.3 Ensaios de Adensamento Unidimensional

Os resultados dos ensaios de adensamento unidimensional realizados em amostras do Grupo 1, moldadas a diferentes condições de grau de compactação em relação ao Proctor Normal, são apresentadas na Tabela 4.4, onde também são sumarizados os resultados dos ensaios realizados em amostras do Grupo 2 talhadas a partir dos blocos indeformados, coletados em aterro experimental.

Nas Figuras 4-6 e 4-7 são ilustradas as curvas tensão efetiva *versus* índice de vazios representativas dos ensaios realizados nas amostras do Grupo 1 para as condições de moldagem iguais a 95% e 90% de grau de compactação em relação ao Proctor Normal, respectivamente.

As curvas obtidas no ensaio de adensamento unidimensional realizados nas amostras do resíduo do Grupo 2 são apresentadas na Figura 4-8, onde são indicados os graus de compactação individuais encontrados para os blocos retirados do aterro experimental. Nela é

possível observar a tendência de redução dos índices de vazios com o aumento do grau de compactação inicial das amostras.

Tabela 4.4: Resultados dos Ensaios de Adensamento Oedométrico com Medida de Permeabilidade

Grupo	Identificação	Condição da Amostra	γ (kN/m ³)	e_0	w_0 (%)	w_r (%)	γ_d (kN/m ³)	Cc	Cr	Ce	Pressão	k_{20} (cm/s)	av(kPa ⁻¹)	mv(kPa ⁻¹)	Cv(cm ² /s)	
Grupo 1	AM-01	Wot, GC=95%	18,2	1,0	27,2	51,6	14,3	0,39	0,05	0,08	100	2,2X10 ⁻⁰⁶	7,27X10 ⁻⁰⁴	3,67X10 ⁻⁰⁴	6,14X10 ⁻⁰³	
											400	5,0X10 ⁻⁰⁷	4,44X10 ⁻⁰⁴	2,36X10 ⁻⁰⁴	8,60X10 ⁻⁰³	
											800	3,2X10 ⁻⁰⁷	2,42X10 ⁻⁰⁴	1,35X10 ⁻⁰⁴	7,72X10 ⁻⁰³	
											1.600	5,1X10 ⁻⁰⁸	1,58X10 ⁻⁰⁴	9,33X10 ⁻⁰⁵	6,78X10 ⁻⁰³	
	AM-02	Wot+6%, GC=90%	18,1	1,1	32,8	51,6	13,7	0,65	0,03	0,10	100	1,5X10 ⁻⁰⁶	6,73X10 ⁻⁰⁴	3,23X10 ⁻⁰⁴	9,11X10 ⁻⁰³	
											400		4,69X10 ⁻⁰⁴	2,37X10 ⁻⁰⁴	1,13X10 ⁻⁰²	
											800		3,44X10 ⁻⁰⁴	1,82X10 ⁻⁰⁴	3,91X10 ⁻⁰³	
											1.600		2,63X10 ⁻⁰⁴	1,51X10 ⁻⁰⁴	7,90X10 ⁻⁰³	
	AM-03	Wot+2%, GC=95%	18,6	1,0	28,9	51,6	14,5				100	3,6X10 ⁻⁰⁶	5,68X10 ⁻⁰⁴	2,89X10 ⁻⁰⁴	7,81X10 ⁻⁰³	
											400	5,9X10 ⁻⁰⁸	4,78X10 ⁻⁰⁴	2,54X10 ⁻⁰⁴	9,84X10 ⁻⁰³	
											800		4,89X10 ⁻⁰⁴	2,73X10 ⁻⁰⁴	8,38X10 ⁻⁰³	
											1.600		3,27X10 ⁻⁰⁴	2,04X10 ⁻⁰⁴	6,17X10 ⁻⁰³	
	AM-04	Wot+4%, GC=90%	17,4	1,2	30,9	24,2	13,3				100	7,7X10 ⁻⁰⁷	1,18X10 ⁻⁰³	5,71X10 ⁻⁰⁴	1,00X10 ⁻⁰²	
											400		2,7X10 ⁻⁰⁷	3,79X10 ⁻⁰⁴	1,96X10 ⁻⁰⁴	8,69X10 ⁻⁰³
											800		1,1X10 ⁻⁰⁷	1,93X10 ⁻⁰⁴	1,04X10 ⁻⁰⁴	8,05X10 ⁻⁰³
											1.600		5,7X10 ⁻⁰⁸	1,35X10 ⁻⁰⁴	7,58X10 ⁻⁰⁵	4,97X10 ⁻⁰³
	AM-05	Wot+2%, GC=90%	17,5	1,2	29,4	25,1	13,5	0,37	0,06	0,07	100	3,5X10 ⁻⁰⁶	8,22X10 ⁻⁰⁴	3,89X10 ⁻⁰⁴	2,06X10 ⁻⁰²	
											400	2,2X10 ⁻⁰⁷	3,89X10 ⁻⁰⁴	1,94X10 ⁻⁰⁴	8,08X10 ⁻⁰³	
											800		2,30X10 ⁻⁰⁴	1,19X10 ⁻⁰⁴	1,07X10 ⁻⁰²	
											1.600		1,41X10 ⁻⁰⁴	7,67X10 ⁻⁰⁵	6,60X10 ⁻⁰³	
	AM-06	Wot, GC=90%	17,3	1,2	27,5	32,0	13,6	0,56	0,06	0,09	100	2,7X10 ⁻⁰⁶	1,07X10 ⁻⁰³	5,16X10 ⁻⁰⁴	1,27X10 ⁻⁰²	
											400	7,3X10 ⁻⁰⁷	6,29X10 ⁻⁰⁴	3,23X10 ⁻⁰⁴	1,05X10 ⁻⁰²	
											800	5,1X10 ⁻⁰⁷	3,77X10 ⁻⁰⁴	2,07X10 ⁻⁰⁴	8,82X10 ⁻⁰³	
											1.600	2,9X10 ⁻⁰⁷	2,24X10 ⁻⁰⁴	1,34X10 ⁻⁰⁴	7,24X10 ⁻⁰³	
	AM-07	Wot-2%, GC=95%	17,5	1,1	25,5	26,6	13,9	0,30	0,04	0,06	100		6,30X10 ⁻⁰⁴	3,08X10 ⁻⁰⁴	1,31X10 ⁻⁰²	
											400		4,28X10 ⁻⁰⁴	2,19X10 ⁻⁰⁴	1,15X10 ⁻⁰²	
											800		2,22X10 ⁻⁰⁴	1,19X10 ⁻⁰⁴	1,09X10 ⁻⁰²	
											1.600		1,40X10 ⁻⁰⁴	7,88X10 ⁻⁰⁵	9,61X10 ⁻⁰³	

Continua

Tabela 4.4 - Resultados dos Ensaio de Adensamento Oedométrico com Medida de Permeabilidade (Continuação)

Grupo	Identificação	Condição da Amostra	γ (kN/m ³)	e_0	W_0 (%)	W_f (%)	γ_d (kN/m ³)	Cc	Cr	Ce	Pressão	K_{20} (cm/s)	av (kPa ⁻¹)	mv (kPa ⁻¹)	C_v (cm ² /s)
Grupo 1	AM-08	Wot+4%, GC=95%	18,9	1,0	31,3	24,0	14,4		0,04	0,07	100	1,5X10 ⁻⁰⁸	3,62X10 ⁻⁰⁴	1,80X10 ⁻⁰⁴	2,17X10 ⁻⁰²
											400		1,66X10 ⁻⁰⁴	8,44X10 ⁻⁰⁵	1,32X10 ⁻⁰²
											800		1,26X10 ⁻⁰⁴	6,51X10 ⁻⁰⁵	1,27X10 ⁻⁰²
											1.600		1,16X10 ⁻⁰⁴	6,15X10 ⁻⁰⁵	1,17X10 ⁻⁰²
	BLOCO-01	Wot + 4,5%	20,307	0,93	29,8	31,0	15,647	0,19	0,08	0,12	100	2,81X10 ⁻⁰⁶	1,18X10 ⁻⁰³	6,31X10 ⁻⁰⁴	2,86X10 ⁻⁰²
											200	7,88X10 ⁻⁰⁷	5,71X10 ⁻⁰⁴	3,16X10 ⁻⁰⁴	8,32X10 ⁻⁰³
											400	7,79X10 ⁻⁰⁹	3,87X10 ⁻⁰⁴	2,21X10 ⁻⁰⁴	2,08X10 ⁻⁰²
											800		3,77X10 ⁻⁰⁴	2,25X10 ⁻⁰⁴	8,65X10 ⁻⁰³
	BLOCO-02	Wot - 1,5%,	17,654	1,24	28,9	32,4	13,694	0,28	0,11	0,10	100	1,08X10 ⁻⁰⁶	1,34X10 ⁻⁰³	6,22X10 ⁻⁰⁴	1,20X10 ⁻⁰²
											200	2,46X10 ⁻⁰⁸	6,13X10 ⁻⁰⁴	2,93X10 ⁻⁰⁴	2,68X10 ⁻⁰²
											400	7,84X10 ⁻⁰⁹	5,22X10 ⁻⁰⁴	2,57X10 ⁻⁰⁴	1,72X10 ⁻⁰²
											800		5,37X10 ⁻⁰⁴	2,78X10 ⁻⁰⁴	2,13X10 ⁻⁰²
	BLOCO-03	Wot	20,089	0,84	23,2	27,9	16,311	0,12	0,06	0,10	100	5,01X10 ⁻⁰⁷	3,74X10 ⁻⁰⁴	2,08X10 ⁻⁰⁴	4,69X10 ⁻⁰²
											200	1,49X10 ⁻⁰⁷	3,97X10 ⁻⁰⁴	2,23X10 ⁻⁰⁴	1,95X10 ⁻⁰²
											400	1,36X10 ⁻⁰⁸	2,85X10 ⁻⁰⁴	1,64X10 ⁻⁰⁴	1,90X10 ⁻⁰²
											800		2,80X10 ⁻⁰⁴	1,66X10 ⁻⁰⁴	9,53X10 ⁻⁰³
Grupo 2	BLOCO-07	Wot - 1,5%	18,179	1,15	26,9	29,8	14,323	0,27	0,10	0,15	100	3,75X10 ⁻⁰⁶	1,00X10 ⁻⁰³	4,87X10 ⁻⁰⁴	1,97X10 ⁻⁰²
											200	1,72X10 ⁻⁰⁶	5,84X10 ⁻⁰⁴	2,90X10 ⁻⁰⁴	1,87X10 ⁻⁰²
											400	1,34X10 ⁻⁰⁶	4,83X10 ⁻⁰⁴	2,47X10 ⁻⁰⁴	2,49X10 ⁻⁰²
											800		4,74X10 ⁻⁰⁴	2,55X10 ⁻⁰⁴	1,47X10 ⁻⁰²
	BLOCO-09	Wot	19,077	1,02	31,1	31,3	14,548	0,27	0,06	0,15	100	9,4X10 ⁻⁰⁷	6,39X10 ⁻⁰⁴	3,24X10 ⁻⁰⁴	3,05X10 ⁻⁰²
											200	4,3X10 ⁻⁰⁷	5,65X10 ⁻⁰⁴	2,91X10 ⁻⁰⁴	8,77X10 ⁻⁰³
											400	3,2X10 ⁻⁰⁸	4,76X10 ⁻⁰⁴	2,52X10 ⁻⁰⁴	2,63X10 ⁻⁰²
											800		5,40X10 ⁻⁰⁴	3,02X10 ⁻⁰⁴	6,67X10 ⁻⁰³
	BLOCO-11	Wot + 2%	18,820	1,03	26,7	28,4	14,853	0,12	0,07	0,08	100	7,2X10 ⁻⁰⁷	6,37X10 ⁻⁰⁴	3,24X10 ⁻⁰⁴	4,57X10 ⁻⁰²
											200	9,6X10 ⁻⁰⁸	3,56X10 ⁻⁰⁴	1,84X10 ⁻⁰⁴	4,42X10 ⁻⁰²
											400	6,2X10 ⁻⁰⁸	3,09X10 ⁻⁰⁴	1,63X10 ⁻⁰⁴	2,21X10 ⁻⁰²
											800		3,27X10 ⁻⁰⁴	1,78X10 ⁻⁰⁴	6,73X10 ⁻⁰²
	BLOCO-12	Wot	20,435	0,82	23,5	29,6	16,551	0,16	0,04	0,10	100	1,0X10 ⁻⁰⁶	7,33X10 ⁻⁰⁴	4,11X10 ⁻⁰⁴	3,90X10 ⁻⁰³
											200	1,5X10 ⁻⁰⁷	5,02X10 ⁻⁰⁴	2,87X10 ⁻⁰⁴	1,10X10 ⁻⁰²
											400	7,5X10 ⁻⁰⁸	4,01X10 ⁻⁰⁴	2,36X10 ⁻⁰⁴	3,81X10 ⁻⁰³
											800		4,29X10 ⁻⁰⁴	2,65X10 ⁻⁰⁴	9,87X10 ⁻⁰³

Figura 4-6: Ensaio de Adensamento Unidimensional - Curvas de tensão efetiva x índice de vazios – Amostras Grupo 1 - GC - 95% Proctor Normal

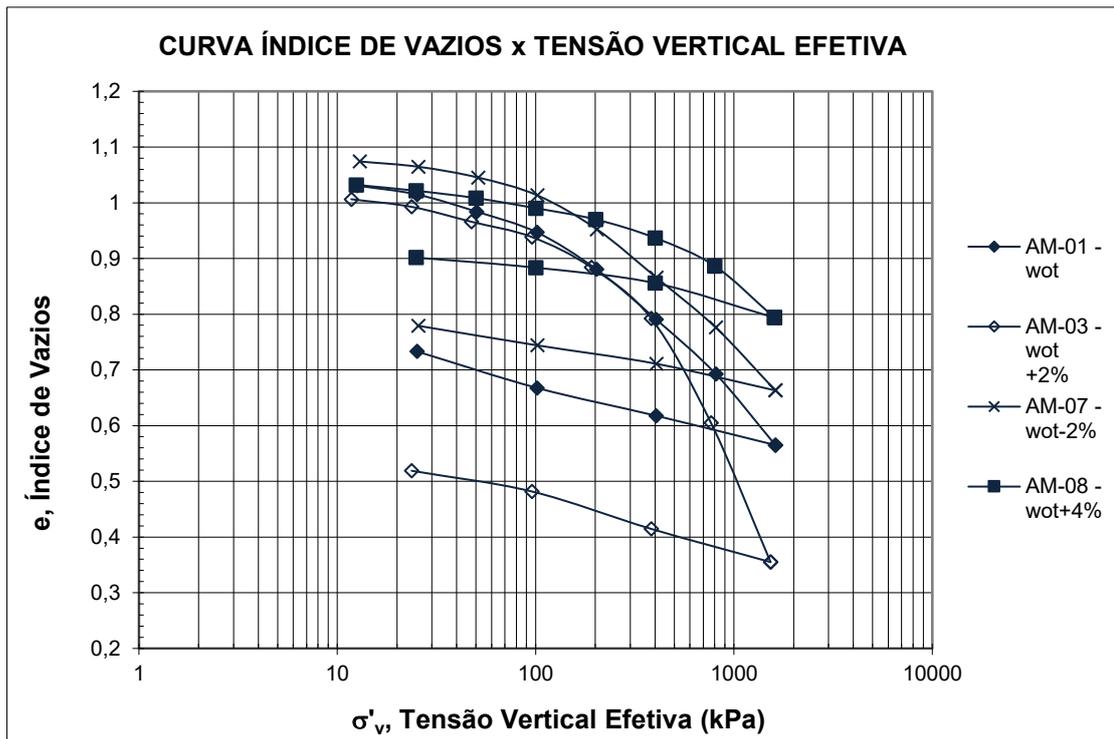


Figura 4-7: Ensaio de Adensamento Unidimensional - Curvas de tensão efetiva x índice de vazios – Amostras Grupo 1 - GC - 90% Proctor Normal

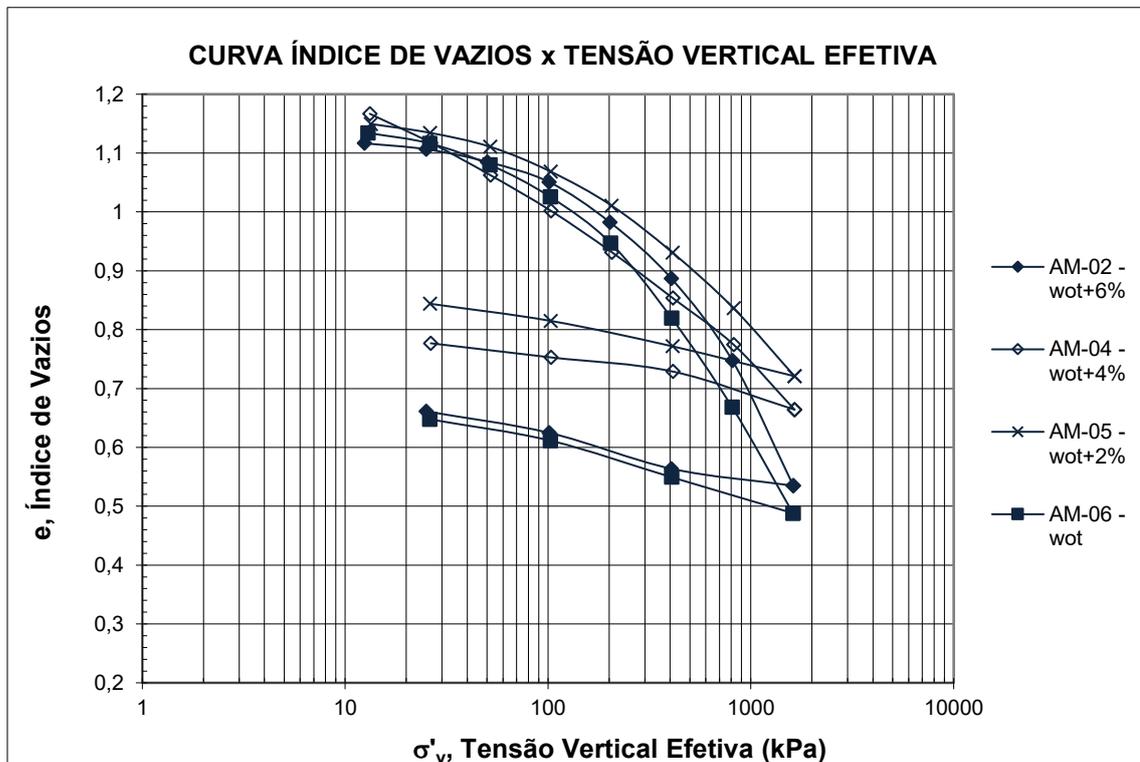
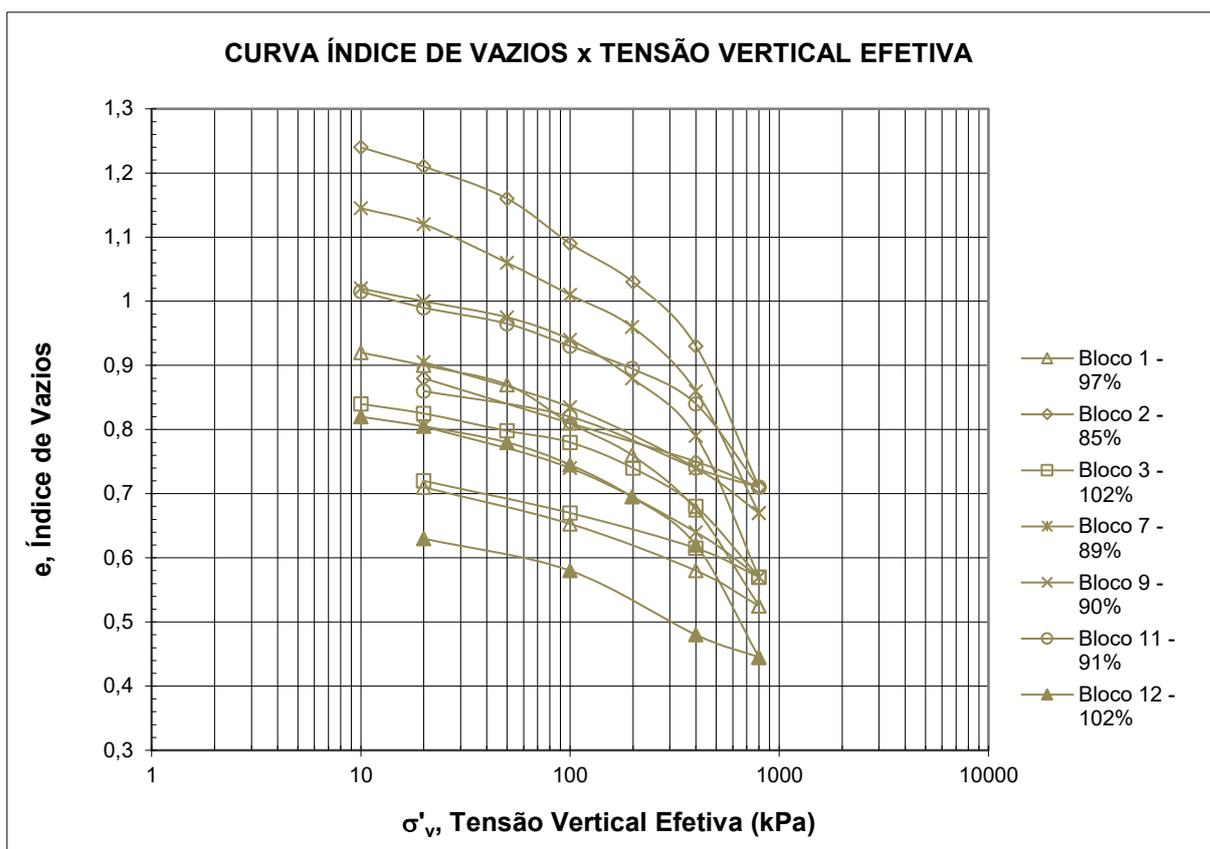


Figura 4-8: Ensaio de Adensamento Unidimensional - Curvas de tensão efetiva x índice de vazios – Amostras Grupo 2



O índice de compressão (c_c) variou entre 0,30 e 0,65 para o Grupo 1, superior à faixa encontrada para o Grupo 2, que variou entre 0,12 e 0,28. Por outro lado, a faixa definida para o índice de recompressão (c_r) das amostras do Grupo 1 variou entre 0,03 a 0,06, indicando valores inferiores àqueles encontrados para o Grupo 2, entre 0,04 e 0,11.

Os resultados de ensaios de adensamento unidimensional indicaram faixas semelhantes para o coeficiente de adensamento (c_v) nos diferentes grupos avaliados, variando entre $3,81 \times 10^{-03} \text{ cm}^2/\text{s}$ e $6,73 \times 10^{-02} \text{ cm}^2/\text{s}$. As amostras do Grupo 1 indicaram coeficiente de adensamento médio igual a $9,84 \times 10^{-03} \text{ cm}^2/\text{s}$ enquanto as do Grupo 2 resultaram em coeficiente de adensamento médio igual a $2,13 \times 10^{-02} \text{ cm}^2/\text{s}$, próximos aos valores referenciados na literatura (Rubinos *et al.*, 2015).

Com base nos resultados dos ensaios de adensamento unidimensional é possível aferir o comportamento da condutividade hidráulica k , obtida a partir da Equação 4.2, pela tensão vertical. A Figura 4.9 apresenta os resultados de condutividade hidráulica obtidos nos ensaios de adensamento unidimensional. Nesse caso, embora seja evidente a redução dos valores de condutividade hidráulica com o aumento da tensão vertical, é notada elevada dispersão dos resultados para as amostras do Grupo 2.

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (4.2)$$

Em que:

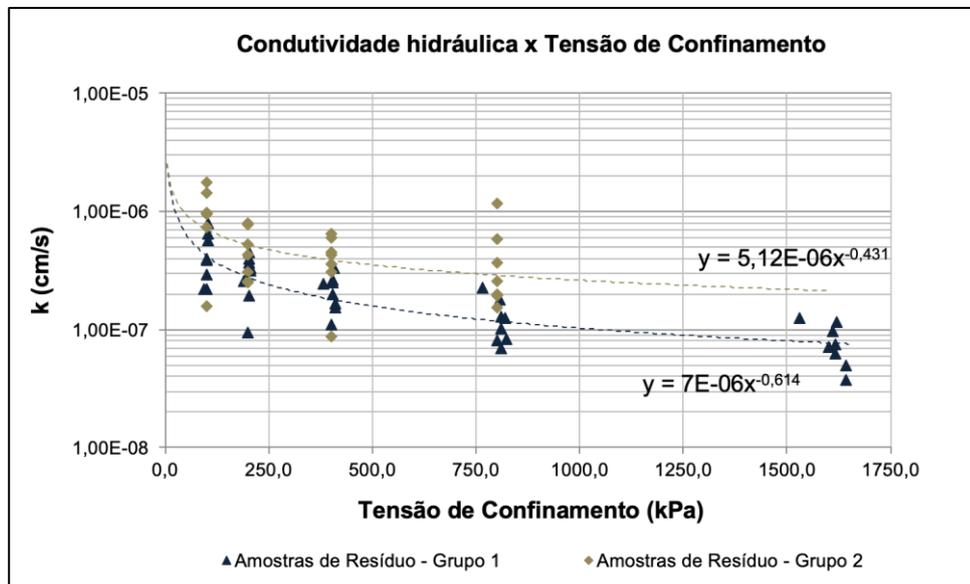
k é a condutividade hidráulica (m/s);

c_v é coeficiente de adensamento;

m_v é o coeficiente de compressibilidade volumétrica;

γ_w é o peso específico da água.

Figura 4-9: Condutividade Hidráulica x Tensão de Confinamento - Ensaio de Adensamento Unidimensional



4.1.4 Ensaios de Permeabilidade de Carga Variável

Foram realizados ensaios de permeabilidade de carga variável com fluxo vertical, perpendicular à direção das camadas de compactação, em amostras moldadas do Grupo 1, além das amostras talhadas a partir de blocos indeformados, essas pertencentes ao Grupo 2.

A partir dos ensaios de permeabilidade de carga variável realizados, foi possível observar para as amostras de resíduo do Grupo 1 um valor de condutividade hidráulica médio de $2,48 \times 10^{-5}$ cm/s e desvio padrão de $7,39 \times 10^{-6}$ cm/s. Por outro lado, os ensaios realizados nas amostras de resíduo do Grupo 2 resultaram em uma permeabilidade média de $2,86 \times 10^{-6}$ cm/s com desvio padrão igual a $6,65 \times 10^{-7}$ cm/s. As amostras do Grupo 2 (filtros prensa) resultaram em permeabilidades mais baixas, em geral uma ordem de grandeza, quando comparadas ao Grupo 1 (filtros rotativos), coerente com as distribuições granulométricas

apresentadas na Figura 4-1, ou seja, dentre as amostras ensaiadas, o resíduo desaguado por filtros prensa (Grupo 2) apresentou graduação mais fina que o resíduo desaguado por filtros tambor (Grupo 1), de um modo geral. Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados de coeficiente de condutividade hidráulica das amostras ensaiadas.

Tabela 4.5: Resultados dos Ensaio de Permeabilidade a Carga Variável

Grupo	Identificação	k_{20} (cm/s)	k_{med} (cm/s)	Desvio padrão (σ) (cm/s)
Grupo 1	AM-01	$1,15 \times 10^{-05}$	$2,48 \times 10^{-05}$	$7,39 \times 10^{-06}$
	AM-02	$3,12 \times 10^{-05}$		
	AM-03	$2,37 \times 10^{-05}$		
	AM-04	$1,62 \times 10^{-05}$		
	AM-05	$3,12 \times 10^{-05}$		
	AM-06	$3,13 \times 10^{-05}$		
	AM-07	$2,61 \times 10^{-05}$		
	AM-08	$2,73 \times 10^{-05}$		
Grupo 2	BL-01	$1,70 \times 10^{-06}$	$2,86 \times 10^{-06}$	$6,65 \times 10^{-07}$
	BL-02	$3,56 \times 10^{-06}$		
	BL-07	$2,69 \times 10^{-06}$		
	BL-09	$3,25 \times 10^{-06}$		
	BL-11	$3,26 \times 10^{-06}$		
	BL-12	$2,70 \times 10^{-06}$		

4.1.5 Ensaio de Compressão Triaxial Adensado Isotropicamente, Não Drenado, Saturado – CIUsat

Os parâmetros de resistência totais e efetivos obtidos a partir dos ensaios de compressão triaxial adensado isotropicamente, não drenado, saturado (CIUsat), realizados no resíduo são apresentados na Tabela 4.6, onde são indicados ainda os parâmetros efetivos médios e seu respectivo desvio padrão.

Tabela 4.6: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial CIUsat

Identificação	Condição da Amostra	Parâmetros Totais		Parâmetros Efetivos		Parâmetros ef. médios		Desvio padrão (σ)		
		c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	(kPa)	(°)	
AM-01	w _{otm} +4% com 95%	0	21,18	5,42	33,38					
AM-02	w _{otm} +2% com 95%	11,53	16,94	7,78	32,37					
AM-03	w _{otm} com 95%	4,05	18,88	0	34,82					
Grupo 1	AM-04	w _{otm} -2% com 95%	18,55	17,61	5,67	33,13	6	31	4,68	4,31
	AM-05	w _{otm} +6% com 90%	0	21,67	8,53	29,40				
	AM-06	w _{otm} +4% com 90%	15,60	10,38	12,91	22,59				
	AM-07	w _{otm} +2% com 90%	18,60	10,40	11,01	25,18				
	AM-08	w _{otm} com 90%	2,06	14,11	0	31,43				
Grupo 2	BL-1	w _{otm} + 4,5%	0,00	37,50	77,54	30,82	0	37	27,91	9,68
	BL-2	w _{otm} - 1,5%	13,03	33,13	22,74	19,19				
	BL-7	w _{otm}	13,41	31,42	39,60	17,63				
	BL-8	w _{otm} - 1,5%	0,00	35,23	3,52	25,51				
	BL-11	w _{otm}	9,09	37,80	22,40	42,94				
	BL-12	w _{otm} + 2%	0,00	36,35	63,76	34,89				

Os resultados de ângulo de atrito interno efetivo (ϕ') dos ensaios CIUsat enquadraram-se próximos à faixa apresentada em literatura para esse tipo de ensaio (Gore *et al.*, 2016). Os valores de intercepto de coesão também se mostraram coerentes com aqueles apontados em referências literárias (Reddy *et al.*, 2020).

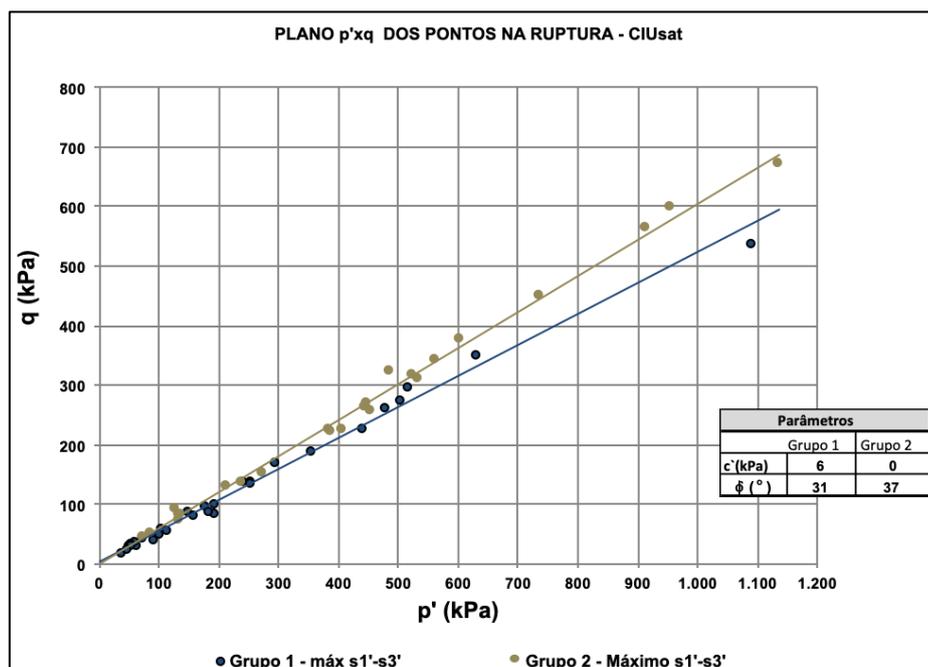
Na Figura 4-10 são indicadas as envoltórias dos planos $p'xq$ dos pontos na ruptura, definidos pelas equações 4.3 e 4.4 pelo critério de máxima tensão desviadora, obtidos a partir dos ensaios CIUsat, representadas entre as amostras do Grupo 1 e do Grupo 2.

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (4.3)$$

$$q' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (4.4)$$

As trajetórias de tensões totais e efetivas referentes aos ensaios CIUsat realizados são apresentadas no Anexo A.1, as curvas tensão-deformação e variação de poropressão-deformação para o mesmo ensaio são apresentadas no Anexo A.2.

Figura 4-10: Envoltórias de resistência dos Ensaios de Compressão Triaxial CIUsat



Com base nos resultados dos ensaios CIUsat, foi possível estimar a razão de resistência não drenada do resíduo, S_u/σ'_{vo} , de modo que foram encontrados os valores médios de S_u/σ'_{vo} iguais a 0,342 para as amostras de resíduo moldadas com 90% de GC em relação ao Proctor Normal, e 0,479 para as amostras de resíduo preparadas com 95% de GC.

4.1.6 Ensaios de Compressão Triaxial Adensado Isotropicamente, Não Drenado, Não Saturado – CIUunsat

Na Tabela 4.7 são apresentadas as condições de moldagem, grau de saturação e os parâmetros de resistência totais obtidos a partir dos ensaios de compressão triaxial adensado isotropicamente, não drenado, não saturado (CIUunsat), para cada amostra ensaiada do resíduo do Grupo 1.

Destaca-se que, embora as amostras tenham sido ensaiadas em condição não saturada, ou seja, não havendo a saturação previamente à fase de adensamento, não houve controle da sucção matricial durante o ensaio, de modo que apenas a parcela das poropressões desenvolvida na água foi monitorada.

Tabela 4.7: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial CIUunsat

Id.	Condição da Amostra	Grau de Saturação* (%)	Parâmetros Totais	
			c (kPa)	ϕ (°)
AM-01	w _{otm} +4% com 95%	CP1 – 87/100	0	31,43
		CP2 – 87/96		
		CP3 – 87/100		
		CP4 – 88/100		
AM-02	w _{otm} +2% com 95%	CP1 – 46/50	69,47	27,31
		CP2 – 46/51		
		CP3 – 79/91		
		CP4 – 79/100		
AM-03	w _{otm} com 95%	CP1 – 69/78	0	31,10
		CP2 – 75/89		
		CP3 – 75/92		
		CP4 – 74/100		
AM-04	w _{otm} -2 % com 95%	CP1 – 70/87	83,61	26,65
		CP2 – 70/78		
		CP3 – 70/83		
		CP4 – 70/88		
AM-05	w _{otm} +6% com 90%	CP1 – 83/95	26,76	27,46
		CP2 – 83/97		
		CP3 – 83/100		
		CP4 – 83/100		
AM-06	w _{otm} +4% com 90%	CP1 – 78/85	14,36	29,71
		CP2 – 79/92		
		CP3 – 68/85		
		CP4 – 91/100		
AM-07	w _{otm} +2% com 90%	CP1 – 73/81	56,19	25,40
		CP2 – 72/85		
		CP3 – 72/90		
		CP4 – 73/94		
AM-08	w _{otm} com 90%	CP1 – 68/75	30,08	24,89
		CP2 – 69/81		
		CP3 – 68/92		
		CP4 – 68/100		
Média			26 kPa	29 °
Desvio padrão (σ)			31,55 kPa	2,49 °

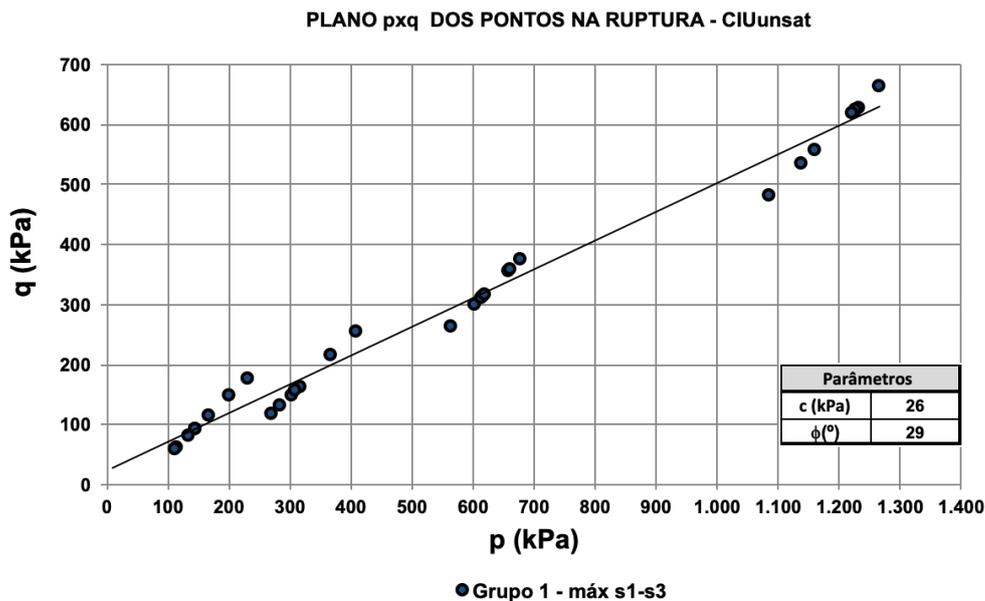
(*) Grau de saturação antes/após a fase de adensamento.

A envoltória de resistência dos planos p x q dos pontos na ruptura correspondente aos ensaios CIUunsat realizados é apresentada na Figura 4-11. A partir da envoltória de resistência foram estabelecidos os parâmetros de resistência totais $c = 26 \text{ kPa}$ e $\phi = 29^\circ$, com desvios padrão

em relação ao intercepto de coesão e ângulo de atrito iguais a 31,55 kPa e 2,49 °, respectivamente.

As trajetórias de tensões totais referentes aos ensaios CIUunsat realizados são apresentadas no Anexo B.1. No Anexo B.2 são indicadas as curvas tensão-deformação e variação da poropressão-deformação dos referidos ensaios.

Figura 4-11: Envoltória de resistência dos Ensaios de Compressão Triaxial CIUunsat



4.1.7 Ensaios de Compressão Triaxial não adensado, não drenado, não saturado, UUunsat

Para a realização dos ensaios os corpos de prova do Grupo 2 foram submetidos ao carregamento axial sem que houvesse o adensamento previamente à fase de cisalhamento, tampouco a drenagem de água do corpo de prova durante seu cisalhamento. Para tanto, as amostras foram submetidas às tensões confinantes de 50 kPa, 150 kPa e 300 kPa. Os parâmetros de resistência totais obtidos a partir dos ensaios de compressão triaxial não adensado, não drenado, não saturado (UUunsat) são apresentados na Tabela 4.8. A partir da envoltória de resistência foram estabelecidos os parâmetros de resistência médios $c = 69 \text{ kPa}$ e $\varphi = 38^\circ$, com desvios padrão em relação ao intercepto de coesão e o ângulo de atrito iguais a 134,8 kPa e 10,85 °, respectivamente.

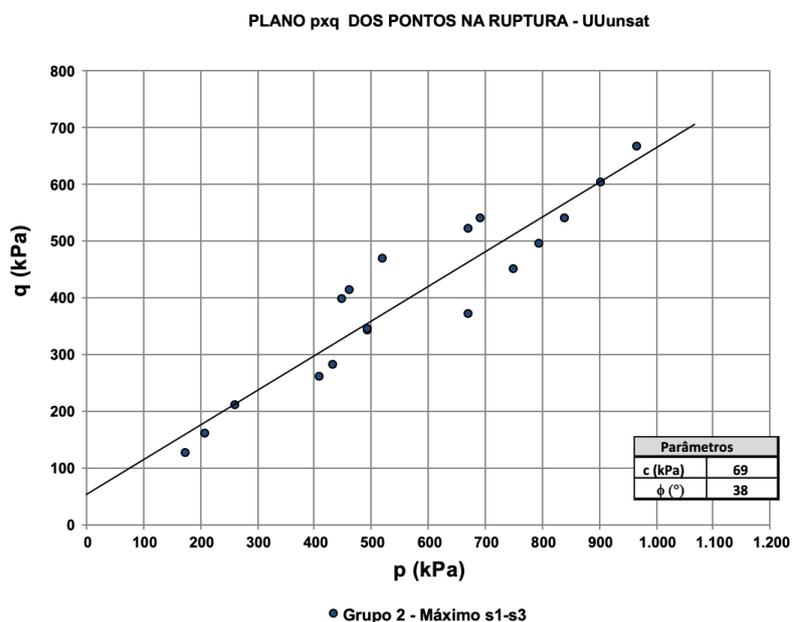
Tabela 4.8: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial UUunsat

Identificação	Condição da Amostra	Grau de Saturação* (%)	Parâmetros Totais		
			c (kPa)	ϕ (°)	
Grupo 2	BL-1	$w_{otm} + 4,5\%$	CP1 – 87,2	278,85	19,52
			CP2 - 86,6		
			CP3 – 88,9		
	BL-2	$w_{otm} - 1,5\%$,	CP1 - 69,7	7,18	42,80
			CP2 – 26,5		
			CP3 – 92,4		
	BL-7	w_{otm}	CP1 – 82,8	307,25	20,37
			CP2 – 82,2		
			CP3 – 75,1		
	BL-8	$w_{otm} - 1,5\%$	CP1 – 89,8	48,11	21,67
			CP2 – 88,8		
			CP3 – 90		
BL-11	w_{otm}	CP1 – 83,1	271,62	14,12	
		CP2 – 88,9			
		CP3 – 88,8			
BL-12	$w_{otm} + 2\%$	CP1 – 81,7	76,51	34,64	
		CP2 – 88,2			
		CP3 – 82,3			
Parâmetros Médios			69 kPa	38 °	
Desvio padrão (σ)			134,88 kPa	10,85 °	

(*) Correspondente ao grau de saturação ao início do ensaio.

Na Figura 4-12 são indicadas as envoltórias de resistência em termos de tensões totais, obtidas a partir dos ensaios UUunsat realizados em amostras do Grupo 2. As trajetórias de tensões totais eferentes aos ensaios são apresentadas no Anexo C.1. No Anexo C.2 são ilustradas as curvas tensão-deformação e variação de poropressão-deformação para os referidos ensaios.

Figura 4-12: Envoltória de resistência dos Ensaios de Compressão Triaxial UUunsat



4.1.8 Ensaios de Compressão Triaxial Adensado, Drenado, Saturado CIDsat

Os corpos de prova preparados com resíduo do Grupo 1 foram submetidos ao ensaio de compressão triaxial adensado isotropicamente, drenado. Para tanto, durante a realização dos ensaios as amostras saturadas foram submetidas às tensões confinantes de 50 kPa, 150 kPa, 300 kPa e 600 kPa. Os parâmetros de resistência efetivos obtidos a partir dos ensaios CIDsat, realizados nas amostras do resíduo são apresentados na Tabela 4.9. A partir da envoltória de resistência foram estabelecidos os parâmetros de resistência efetivos $c' = 7\text{ kPa}$ e $\varphi' = 32^\circ$, com desvios padrão em relação ao intercepto de coesão e o ângulo de atrito efetivos iguais a 7,07 kPa e 1,21 °, respectivamente.

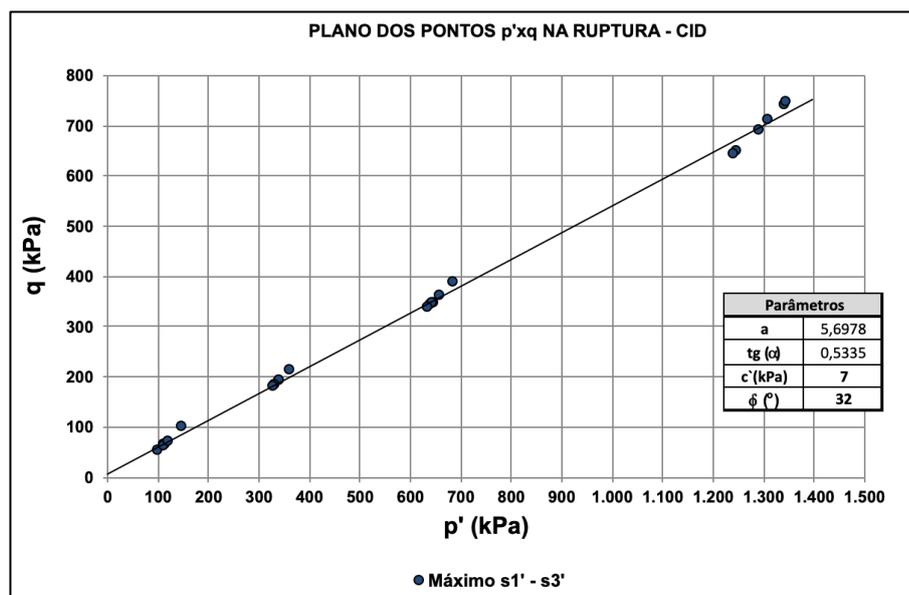
Tabela 4.9: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial CIDsat

Identificação	Condição da Amostra	Parâmetros Efetivos	
		c' (kPa)	φ' (°)
AM-01	$w_{otm} +4\%$ com 95%	15,49	32,36
AM-02	$w_{otm} +2\%$ com 95%	0,00	33,36
AM-03	w_{otm} com 95%	15,54	31,47
AM-06	$w_{otm} +4\%$ com 90%	0,00	33,57
AM-07	$w_{otm} +2\%$ com 90%	11,03	30,89
AM-08	w_{otm} com 90%	9,08	30,81
Parâmetros Médios		7 kPa	32 °
Desvio padrão (σ)		7,07 kPa	1,21 °

A envoltória de ruptura em termos de tensões efetivas para o resíduo do Grupo 1 pelo critério máxima tensão desviadora, obtida a partir dos ensaios CIDsat, é ilustrada na Figura 4-13. As trajetórias de tensões totais e efetivas referentes aos ensaios e as respectivas curvas tensão-deformação e de variação volumétrica-deformação axial são apresentadas nos Anexos D.1 e D.2, respectivamente.

A partir de análise dos resultados indicados nas curvas tensão-deformação é possível afirmar que, para os níveis de tensão confinante estudados, todas as amostras do material apresentaram comportamento dúctil durante o cisalhamento, portanto, não houve evidência da perda de resistência abrupta com o aumento das deformações.

Figura 4-13: Envoltória de resistência dos Ensaios de Compressão Triaxial CIDsat



4.1.9 Ensaios de Cisalhamento Direto

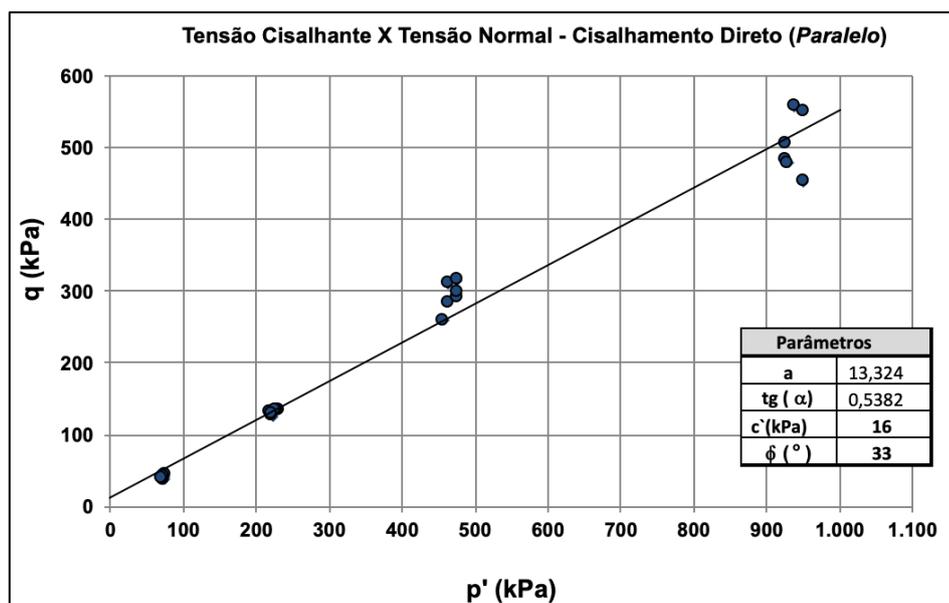
Os ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova moldados com o resíduo do Grupo 1 foram realizados em duas condições, a saber, a primeira com o plano de ruptura estabelecido paralelo à direção de compactação das amostras, e a segunda, com o plano de ruptura perpendicular a essa direção.

Os parâmetros de resistência efetivos obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto em ambas as direções apresentaram resultados dentro da faixa indicada na literatura Reddy *et al.* (2020). Na Tabela 4.10 são apresentados os resultados individuais dos ensaios de cisalhamento direto realizados nas amostras cujo plano da superfície de ruptura foi estabelecido em paralelo à direção de compactação durante o preparo da amostra. A envoltória de resistência para esses ensaios é ilustrada na Figura 4-14.

Tabela 4.10: Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto (*Paralelo*) – Grupo 1

Identificação	Condição da Amostra	Parâmetros Efetivos	
		c' (kPa)	φ' (°)
AM-01	w _{otm} +4% com 95%	17,81	27,19
AM-02	w _{otm} +2% com 95%	7,93	30,31
AM-03	w _{otm} com 95%	7,73	30,84
AM-06	w _{otm} +4% com 90%	21,92	24,98
AM-07	w _{otm} +2% com 90%	13,97	27,53
AM-08	w _{otm} com 90%	10,69	28,64
Parâmetros Médios		16 kPa	33 °
Desvio padrão (σ)		5,69 kPa	2,17 °

Figura 4-14: Cisalhamento Direto - Plano de Ruptura paralelo à direção de compactação

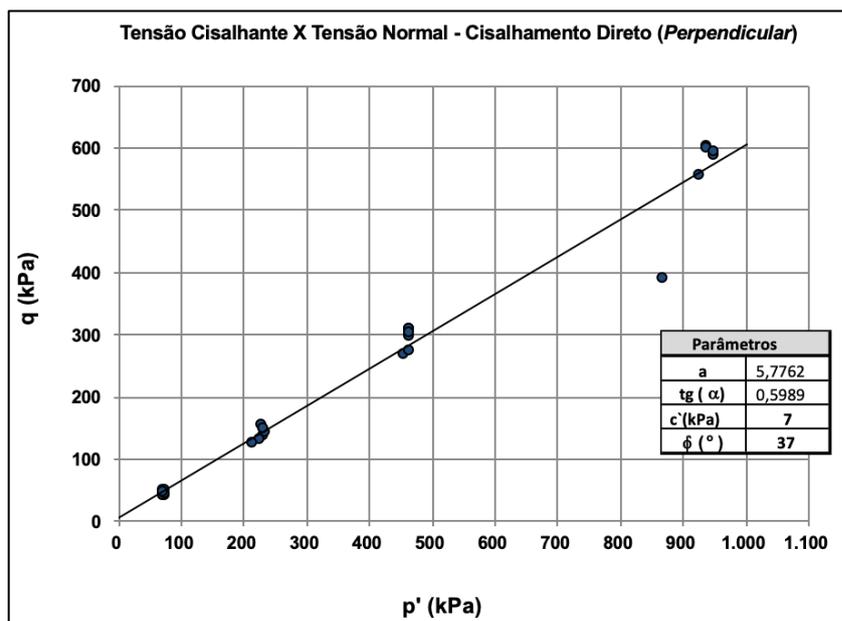


Na Tabela 4.11 são apresentados os parâmetros de resistência efetivos obtidos para as amostras cujo plano da superfície de ruptura foi estabelecido perpendicularmente à direção da compactação. A respectiva envoltória de resistência é ilustrada na Figura 4-15.

Tabela 4.11: Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto (*Perpendicular*) – Grupo 1

Identificação	Condição da Amostra	Parâmetros Efetivos	
		c' (kPa)	ϕ ' (°)
AM-01	w _{otm} +4% com 95%	6,48	31,85
AM-02	w _{otm} +2% com 95%	0,14	32,75
AM-03	w _{otm} com 95%	7,53	32,55
AM-06	w _{otm} +4% com 90%	0,00	31,14
AM-07	w _{otm} +2% com 90%	0,00	31,84
AM-08	w _{otm} com 90%	42,49	23,33
Parâmetros Médios		7 kPa	37 °
Desvio padrão (σ)		16,55 kPa	3,60 °

Figura 4-15: Cisalhamento Direto – Plano de Ruptura perpendicular à direção de compactação



4.1.10 Ensaio de Cisalhamento Simples (*Direct Simple Shear - DSS*)

Para o presente trabalho foram tomadas amostras com o resíduo do Grupo 1, moldadas segundo as condições de umidade e grau de compactação apresentados na Tabela 4.12, sendo todas submetidas à tensão axial de 300 kPa, tensão essa adotada em função do estado de tensões estimado para a região próxima à faixa mais externa à pilha hipotética, no contato entre a fundação e o maciço, região onde se espera a ocorrência de cisalhamento puro.

Nesse ensaio procura-se aplicar um estado de deformação e tensão uniformes na amostra. As deformações radiais no corpo-de-prova cilíndrico são impedidas lateralmente a partir da adoção de anéis metálicos ou membrana de borracha, as quais permitem apenas deformações verticais durante o adensamento.

Durante a etapa de adensamento foi aplicada uma tensão de sobre-adensamento σ'_{vm} até que fosse atingida a tensão de 300 kPa. Finalizada a etapa de adensamento, deu-se início à etapa de cisalhamento com a aplicação de uma tensão cisalhante horizontal ao topo do corpo-de-prova. Nessa fase simulou-se a condição não-drenada de carregamento mantendo o volume constante do corpo-de-prova.

A taxa de deformação aplicada durante o ensaio foi de 5% de deformação cisalhante por hora.

Conforme observado, as resistências indicadas variaram entre 86,6 kPa e 110,0 kPa, para o estado de tensão ensaiado. Verifica-se valores significativamente inferiores aos comparados aos variados ensaios de compressão triaxial e de cisalhamento direto, realizados no mesmo

resíduo. Segundo Mayne (1995), em solos argilosos normalmente adensados e pré-adensados, a resistência indicada pelo ensaio de cisalhamento simples (DSS) é da ordem de $0,7 \pm 0,2$ da resistência indicada em ensaios de compressão triaxial para o mesmo material.

O fato decorre da metodologia empregada no ensaio aplicar uma tensão cisalhante horizontal ao corpo de prova, sobretudo, sem aplicação lateral de tensão confinante na amostra, implicando na reduzida resistência ao cisalhamento quando comparada aos resultados obtidos nos ensaios triaxiais e cisalhamento direto.

As curvas tensão-deformação obtidas a partir dos ensaios de cisalhamento simples realizados em seis corpos de prova moldados a partir de amostras deformadas de resíduo do Grupo 1 são compiladas no Apêndice F.

Tabela 4.12: Resultados dos Ensaio de Cisalhamento Simples (DSS)

Id.	Condição da Amostra	σ'_{v0} (kPa)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w_o (%)	w_f (%)	Su_{DSS} (kPa)
AM-01	w_{otm} com 95%	300	18,3	14,4	27,1	26,7	96,8
AM-03	$w_{otm} + 2\%$ com 95%	300	18,9	14,6	29,4	28,6	110,0
AM-04	$w_{otm} + 4\%$ com 90%	300	17,9	13,7	30,6	30,2	94,2
AM-05	$w_{otm} + 2\%$ com 90%	300	17,6	13,7	28,7	28,2	103,9
AM-06	w_{otm} com 90%	300	17,3	13,7	26,8	27,9	94,2
AM-08	$w_{otm} + 4\%$ com 95%	300	18,9	14,4	31,0	30,1	86,6
Su _{DSS} méd							97,6 kPa
Desvio padrão (σ)							8,22 kPa

4.1.11 Ensaio de Compressão Triaxial PN

Com a finalidade de estimar a geração de poropressão no resíduo sob carregamento axial em condição controlada, foram realizados ensaios de compressão triaxial PN, segundo as condições apresentadas na Tabela 4.13, sem saturação prévia. As amostras do Grupo 1, moldadas em laboratório, foram identificadas com o prefixo AM, enquanto as do Grupo 2, talhadas a partir de blocos indeformados, foram identificadas com o prefixo BL. As Figuras 4-16 e 4-17 apresentam os resultados de geração de poropressão Δu (kPa) versus a tensão principal maior σ_1 (kPa).

Conforme pode ser observado, todas as amostras de resíduo indicaram valores positivos para a geração de poropressões decorrentes do carregamento vertical, embora seja observada grande variabilidade no parâmetro de geração de poropressão (r_u). Para as amostras do Grupo

1 (Figura 4-16), observou-se maior geração de poropressão, variando entre 0,23, 0,40 e 0,51, para as amostras AM-01, AM-06 e AM-05, que apresentaram umidade de compactação durante a moldagem dos corpos de prova com desvio acima da umidade ótima de 4% a 6%. Por outro lado, as demais amostras ensaiadas indicaram parâmetro de geração de poropressão (r_u) da ordem de 0,04.

A Figura 4-17 ilustra os ensaios realizados no Grupo 2. A amostra BL-08 apresentou o parâmetro de geração de poropressão mais elevado, da ordem de 0,37, enquanto as demais amostras variaram entre 0,01 e 0,13 (valor médio de 0,06). Embora os resultados obtidos para as amostras do Grupo 2 apresentaram-se dentro dos limites máximo e mínimo estabelecidos a partir do ensaio no Grupo 1, diferentemente dos resultados do Grupo 1, não ficou evidente nessas amostras a dependência do parâmetro de geração de poropressão em relação à umidade de compactação, possivelmente por se tratar de corpos de prova talhados a partir de amostras indeformadas, com controle de umidade menos eficiente se comparado às amostras do Grupo 1, moldadas em laboratório. Cabe dar relevo ao fato que as amostras do Grupo 2, talhadas a partir de blocos indeformados coletados em aterro teste, diferem das amostras do Grupo 1 no que tange sua microestrutura principalmente por serem resultado de processo de desaguamento por filtros prensa, além das próprias atividades de compactação observadas na execução do aterro.

Apesar disso, com base nos ensaios apresentados, conclui-se que a depender da umidade de compactação do resíduo, o parâmetro de geração de poropressões (r_u) varia entre 0,03 e 0,51, conforme mostram os limites mínimo e máximo nas Figuras 4-16 e 4-17, respectivamente.

Figura 4-16: Resultados dos ensaios PN em amostras do Grupo 1

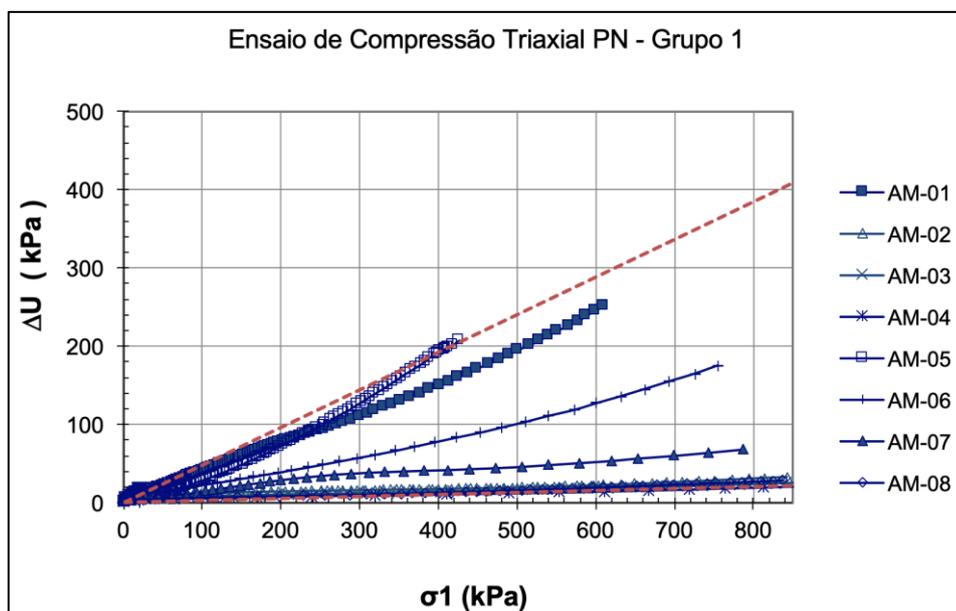
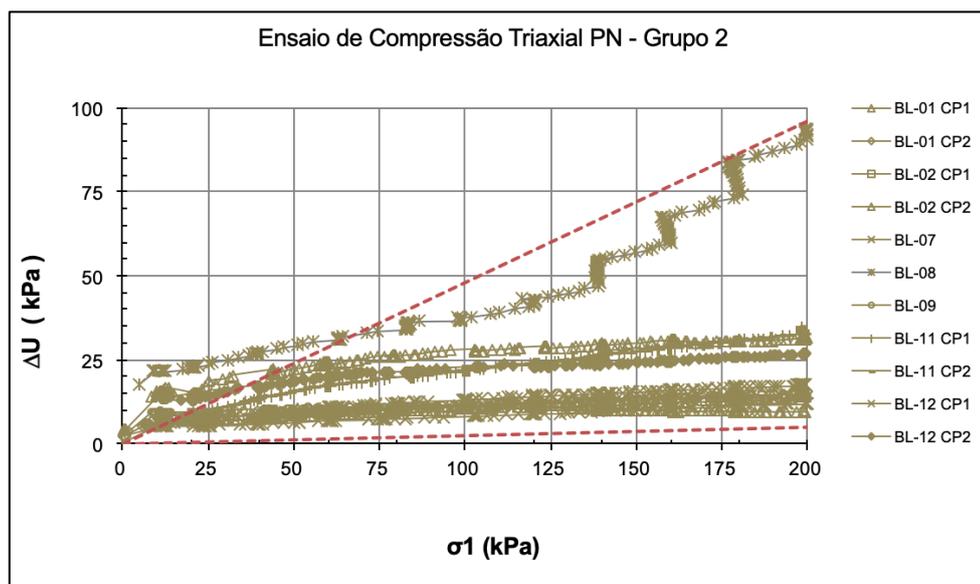


Figura 4-17: Resultados dos ensaios PN em amostras do Grupo 2



Observou-se, para os níveis de tensão vertical aplicada mais baixos, inferiores a 75 kPa, taxas de geração de poropressão superiores em parte das amostras ensaiadas. Esse comportamento pode ter decorrido de aspectos tais como acomodação da estrutura do resíduo quando iniciada a aplicação de tensão vertical, além do estado inicial do ensaio, em que a amostra se encontra não saturada. Recomenda-se que o fenômeno seja analisado em estudos posteriores.

Tabela 4.13: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial PN

Identificação*	Condição da Amostra	Umidade inicial (w_0 ,%)	σ_1/σ_3	r_u
AM-01	$w_{otm} +4\%$ com 95%	31,1	2,1	0,40
AM-02	$w_{otm} +2\%$ com 95%	30,1	1,6	0,04
AM-03	w_{otm} com 95%	26,7	2,1	0,03
AM-04	$w_{otm} -2\%$ com 95%	25,4	1,9	0,04
AM-05	$w_{otm} +6\%$ com 90%	32,6	2,0	0,51
AM-06	$w_{otm} +4\%$ com 90%	30,2	2,1	0,23
AM-07	$w_{otm} +2\%$ com 90%	29,8	2,1	0,17
AM-08	w_{otm} com 90%	27,7	1,7	0,04
r_u méd				0,18
Desvio padrão (σ)				0,19

Tabela 4.13: Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial PN – Continuação

Identificação*	Condição da Amostra	Umidade inicial ($w_o, \%$)	σ_1/σ_3	r_u
BL-01	$w_{otm} + 4,5\%$	24,2	2,0	0,09
BL-01	$w_{otm} + 4,5\%$	24,3	1,7	0,05
BL-02	$w_{otm} - 1,5\%$,	26,7	2,0	0,04
BL-02	$w_{otm} - 1,5\%$,	26,9	1,7	0,01
BL-07	$w_{otm} - 1,5\%$	25,0	1,7	0,04
BL-08	w_{otm}	29,5	1,7	0,37
BL-09	w_{otm}	30,3	1,7	0,03
BL-11	$w_{otm} + 2\%$	25,8	2,0	0,13
BL-11	$w_{otm} + 2\%$	18,5	1,7	0,06
BL-12	w_{otm}	23,5	2,0	0,03
BL-12	w_{otm}	23,6	1,7	0,07
r_u méd				0,08
Desvio padrão (σ)				0,10

4.1.12 Ensaios de Papel Filtro para Determinação da Curva de Retenção de Água

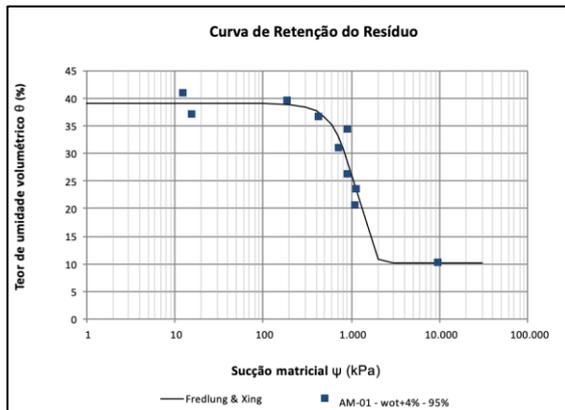
As curvas de retenção de secagem (dessorção) obtidas para os corpos de prova ensaiados, moldados a partir de amostras deformadas de resíduo do Grupo 1, são compiladas na Figura 4-18, onde é ilustrado o modelo de ajuste de curva para cada um dos ensaios. Para tanto, utilizou-se a Equação 2.13, Item 2.10.2, para obtenção dos parâmetros de calibração.

De um modo geral, de acordo com os gráficos obtidos, os corpos de prova moldados com um peso específico seco maior, controlado pelo grau de compactação (GC 95%), apresentaram valores de entrada de ar mais acentuados, quando comparados às amostras moldadas com grau de compactação menores (GC 90%).

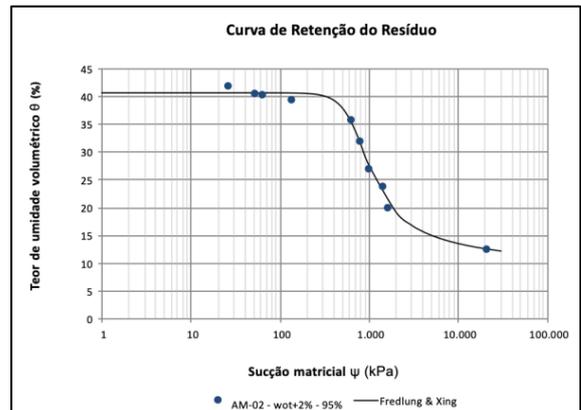
Foi possível observar que as amostras moldadas no ramo úmido, com desvio de teor de umidade acima da ótima em +4 e +6%, apresentaram comportamento da curva característica de sucção com menor capacidade de retenção que aquelas resultantes para as amostras moldadas no ramo seco (maior capacidade de retenção). Uma vez que em projetos de pilhas de resíduo filtrado é desejável que se atinja a condição do resíduo com menor retenção de água, ou mais permeável quanto possível, deve-se procurar durante a compactação em campo, condições com grau de compactação elevado e desvio de umidade no ramo úmido, próximo à umidade ótima de compactação.

O conhecimento da curva característica de sucção contribuirá na definição da condutividade hidráulica do resíduo em sua condição não saturada, esperada de ocorrer nas etapas iniciais de carregamento durante a disposição em pilhas de aterro compactado.

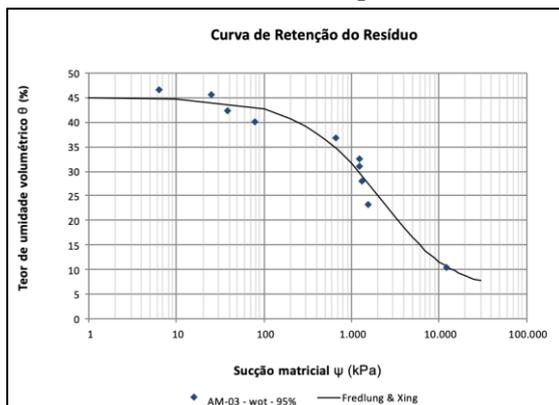
Figura 4-18: Curvas Características de Retenção do Resíduo – Grupo 1



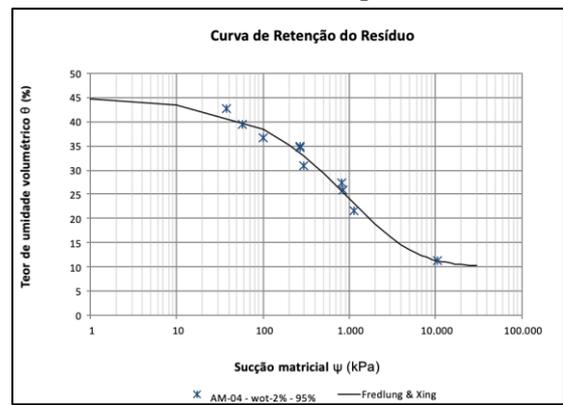
AM – 01 – Grupo 1



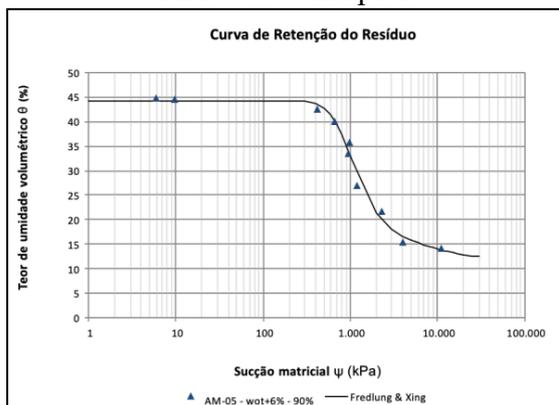
AM – 02 – Grupo 1



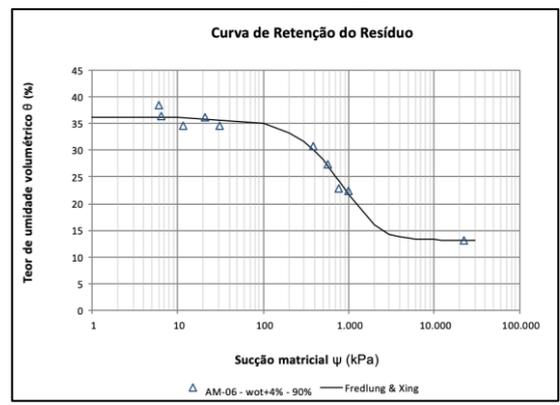
AM – 03 – Grupo 1



AM – 04 – Grupo 1



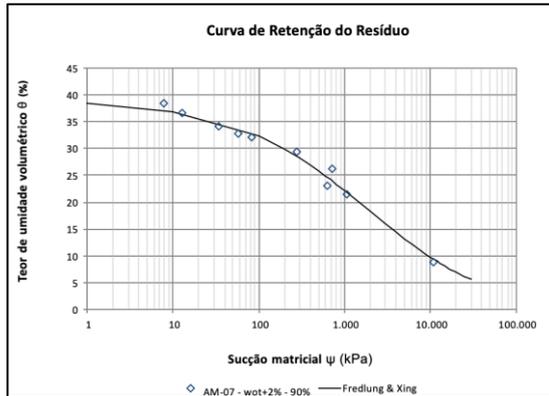
AM – 05 – Grupo 1



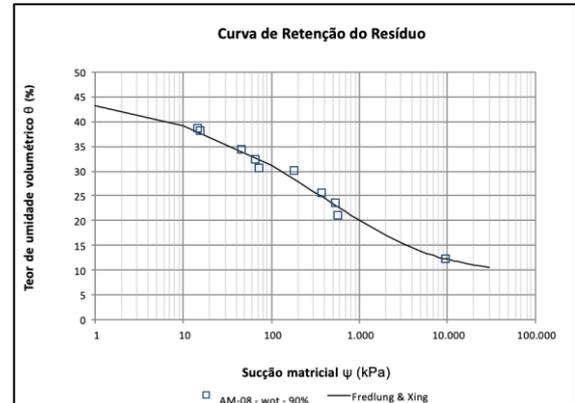
AM – 06 – Grupo 1

Continua

Figura 4.18: Curvas Características de Retenção do Resíduo – Grupo 1 (Continuação)



AM – 07 – Grupo 1



AM – 08 – Grupo 1

4.2 Construção do Modelo Numérico

4.2.1 Aplicação do Modelo Cam-Clay Modificado

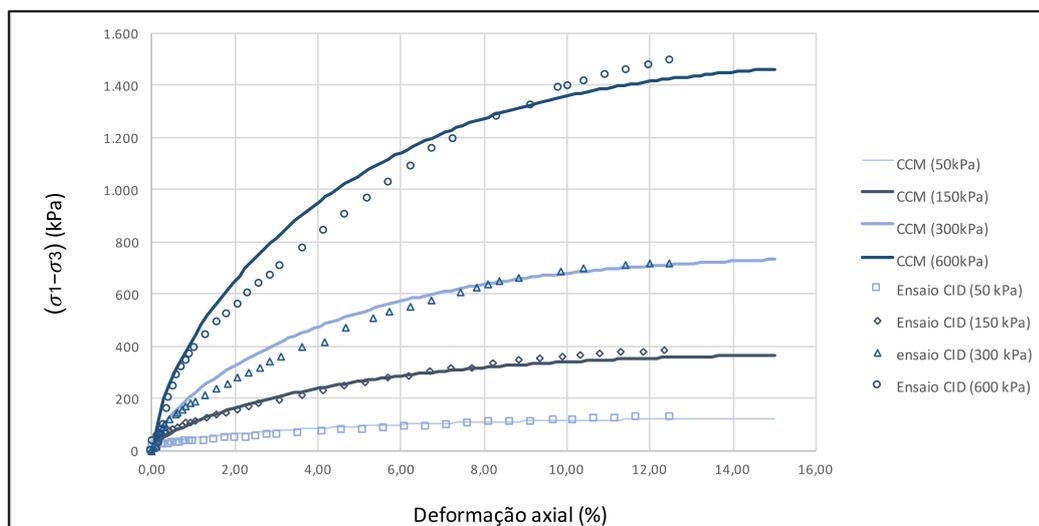
Para definição do modelo constitutivo do resíduo estudado, foi aplicado o modelo Cam-Clay Modificado a partir da definição dos parâmetros λ e κ fornecidos pelas curvas de compressão oedométrica, além do parâmetro M , fornecido pelo ensaio CIDsat. Os coeficientes da reta virgem de compressão e das retas de descompressão-recompressão para o estado crítico são $-\lambda$ e $-\kappa$, respectivamente, e portanto, são obtidos a partir da curva $e \times \ln(p')$. Por sua vez, o parâmetro M foi definido a partir da inclinação da reta que representa os estados de tensão no estado crítico, passando pela origem.

Para a determinação desses parâmetros, foram tomados como representativos do resíduo os resultados dos ensaios realizados na amostra cuja umidade de moldagem indicava desvio de +4% em relação à ótima no ramo úmido e 90% da energia do Proctor Normal. Os parâmetros utilizados para calibração do modelo Cam-Clay Modificado são apresentados na Tabela 4.14, enquanto as curvas tensão desviadora *versus* deformação axial para as tensões de confinamento 50kPa, 150kPa, 300 kPa e 600 kPa são indicadas na Figura 4-19.

Tabela 4.14: Parâmetros para calibração do Modelo Cam-Clay Modificado

Parâmetro	Valor de calibração
λ	0,067
κ	0,001
M	1,37
γ_{nat}	18,20 kN/m ³
e_0	1,19

Figura 4-19: Aplicação do Modelo Cam-Clay Modificado



4.2.2 Aderência e Calibração do Modelo Numérico

Os resultados dos ensaios de compressão Triaxial PN foram utilizados para a verificação da aderência do modelo, enquanto os dados de monitoramento do aterro experimental foram considerados na validação das hipóteses adotadas para previsão das poropressões construtivas.

Nos itens a seguir estão apresentados os procedimentos e resultados das verificações para aplicação do modelo numérico desenvolvido.

4.2.2.1 Aderência do Modelo

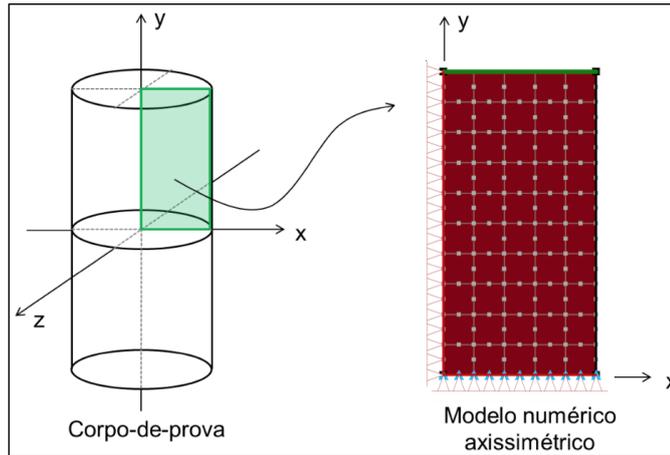
A aderência do modelo numérico foi testada a partir da simulação do ensaio triaxial PN. Foram modelados numericamente os ensaios AM-03 e AM-05, cujas condições de preparação são apresentadas na Tabela 4.15. O modelo constitutivo considerado para o resíduo filtrado por filtros prensa na análise foi adotado conforme apresentado no Item 4.2.1.

Tabela 4.15: Condição da Amostra – Ensaio Triaxial PN Reconstituído

Identificação	Condição Moldagem
AM-03	$w_{otm} + 2\%$ e GC 95%
AM-05	$w_{otm} + 6\%$ e GC=90%

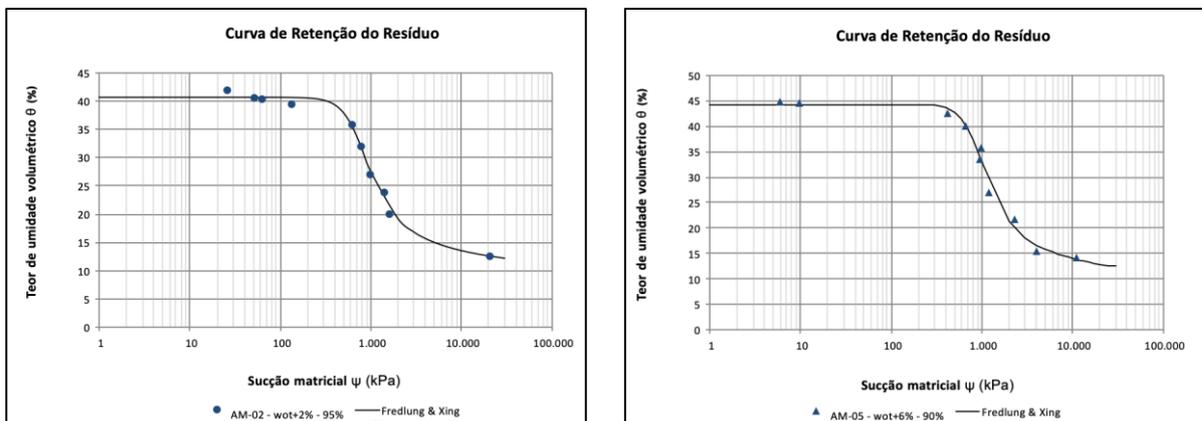
As simulações numéricas dos ensaios PN foram realizadas objetivando avaliar a capacidade do modelo de simular a geração de poropressões verificadas em laboratório. A Figura 4-20 apresenta o modelo numérico utilizado na análise plana axissimétrica. As relações de carregamento σ_1/σ_3 adotadas na simulação foram similares às registradas no ensaio.

Figura 4-20: Simulação Numérica do Ensaio Triaxial PN



Como o ensaio ocorre de forma não saturada, foram adotadas as curvas características de retenção de água obtidas para as condições de moldagem acima descritas, e são apresentadas na Figura 4-21. Nesse caso, foi aplicada a todo o material a condição inicial de sucção, obtida a partir da curva característica de retenção de água, correspondente à umidade de moldagem para cada ensaio simulado. Além da sucção inicial, a curva característica também é responsável por indicar a permeabilidade do material, como resultado dos excessos de poropressão observados durante o carregamento.

Figura 4-21: Curva de Retenção de Umidade do Resíduo do Grupo 01



(a) Amostra moldada wot+2% e GC 95% PN

(b) Amostra moldada wot+6% e GC 90% PN

As simulações numéricas reproduziram de forma satisfatória os resultados dos ensaios triaxiais PN. Na Figura 4.22 é ilustrada a comparação entre a evolução das tensões aplicadas nos ensaios de laboratório e aquelas aplicadas nas simulações numéricas, em termos de tensões *desviadora x confinante*. Por sua vez, as gerações de poropressão obtidas nas simulações são comparadas aos resultados dos ensaios na Figura 4.23, onde são ilustradas as curvas de acréscimo de *poropressão x tensão principal maior* para os respectivos ensaios.

Figura 4-22: Simulação do ensaio triaxial PN – Tensão desviadora

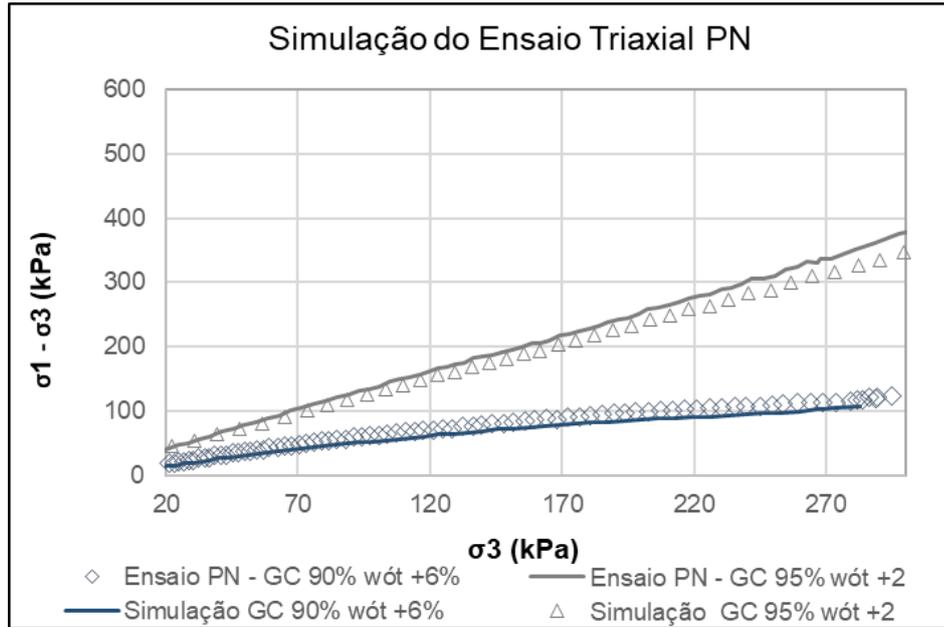
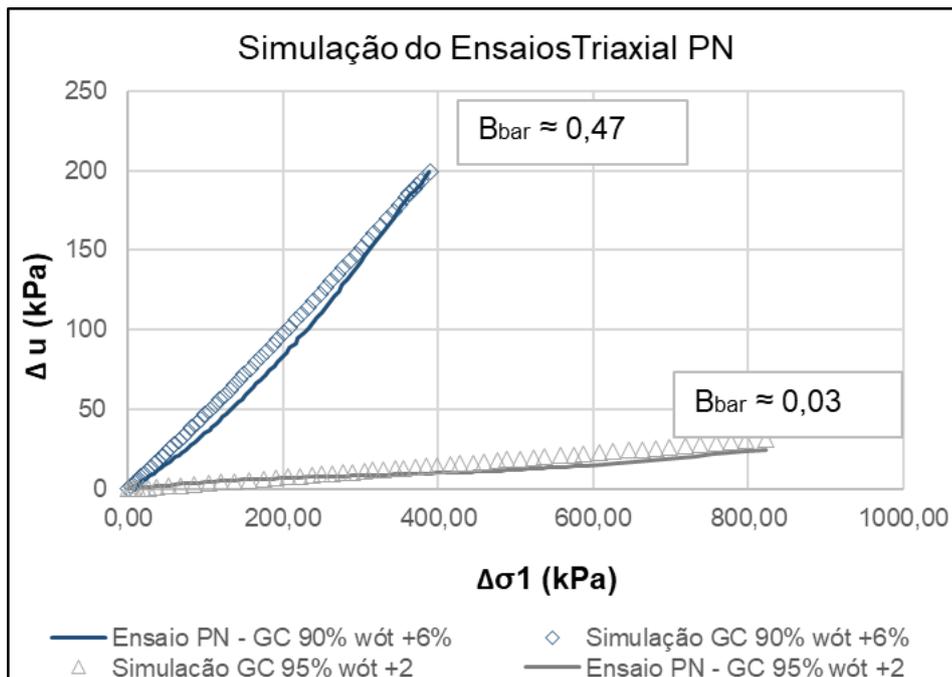


Figura 4-23: Simulação do ensaio triaxial PN – Parâmetro \bar{B}



4.2.2.2 Calibração do Modelo

Com a finalidade de expandir o potencial desta ferramenta para previsão de excessos de poropressão gerados durante a construção de pilhas, a calibração do modelo foi realizada a partir de dados de monitoramento geotécnico instalado em um aterro teste, conforme discutido no Item 3.2. Esse modelo considerou o comportamento acoplado das relações

constitutivas (tensão-deformação e fluxo), levando em conta a influência dos contornos drenantes, bem como a dissipação das poropressões durante e após sua construção.

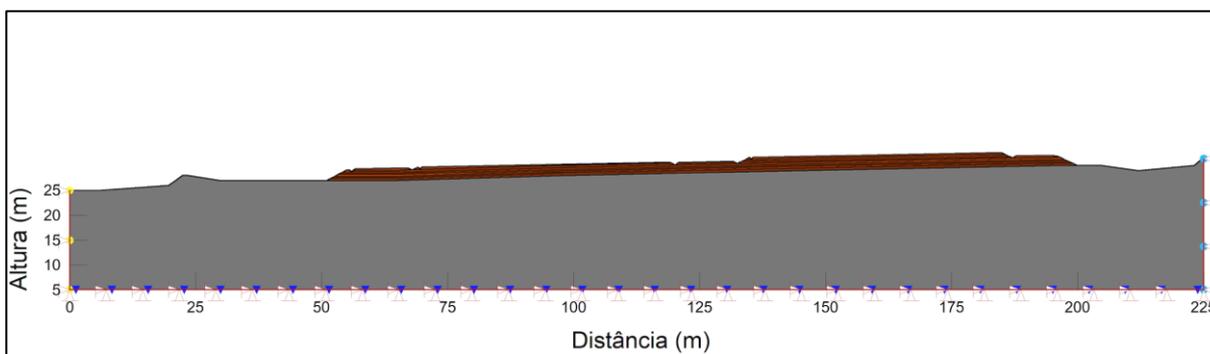
O aterro denominado área 2A-2B, com a seção instrumentada A-A (Figura 3-3), foi reproduzido de modo a permitir a comparação dos resultados de geração de poropressões desenvolvidas no resíduo durante sua construção, monitorados por instrumentação geotécnica, com aqueles obtidos a partir do modelo numérico.

Foi utilizada condição de contorno impermeável ($Q=0$) aplicada à fundação do aterro, que simula o sistema de impermeabilização existente entre o maciço e sua fundação. Como o aterro teste em questão é coberto por um sistema impermeabilizante em geomembrana PEAD, não foi considerada a ocorrência de recarga superficial decorrente de deflúvio na área, tampouco condições climáticas, tais como, temperatura, umidade do ar, radiação solar, velocidade do vento, entre outras. Para este estudo, foi considerada a existência de uma linha freática estabelecida na camada de resíduo subjacente ao aterro anteriormente à construção do aterro teste. O nível d'água presente deve-se ao método de disposição do resíduo que compõe a fundação do aterro teste, em que o resíduo filtrado por filtros rotativos era disposto saturado ($S=1$), e teor de sólidos de aproximadamente $TS=60\%$.

Para simular sua construção, o aterro foi dividido em nove camadas com altura aproximada de 0,40 m cada, as quais são computadas no cálculo progressivamente, simulando o carregamento sobre as camadas inferiores. A partir de levantamentos topográficos cadastrais na área foi possível estimar o tempo de construção médio de cada camada igual a 7 dias.

As condições de contorno de deslocamento e fluxo adotadas estão ilustradas na Figura 4-24.

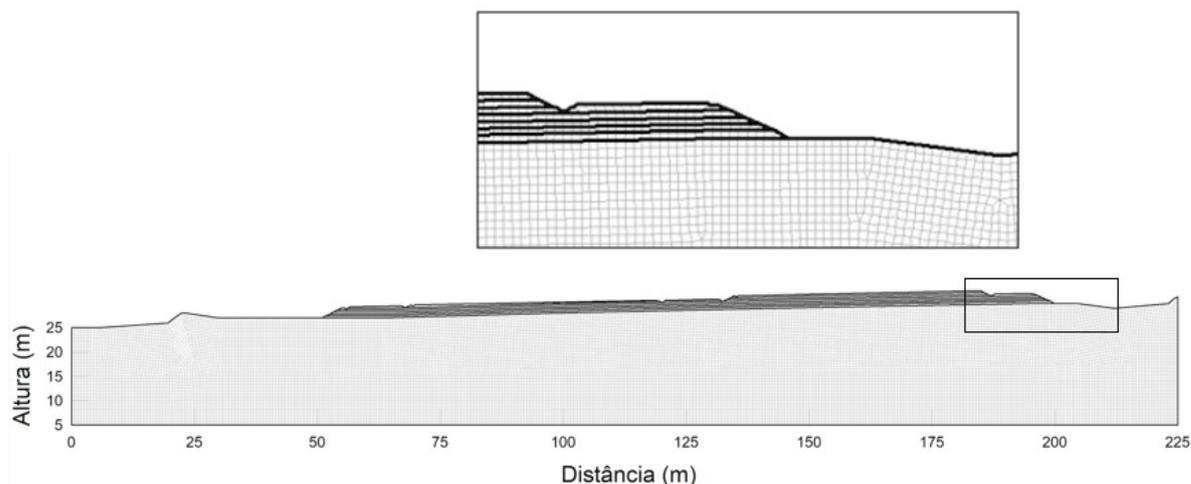
Figura 4-24: Seção A-A' – Condições de Contorno



O domínio do modelo é ilustrado na Figura 4-25, onde a seção típica da pilha é discretizada em 68.900 nós, distribuídos entre 22.651 elementos quadrangulares e triangulares de ordem quadrática de interpolação. Maior detalhamento da malha foi atribuído ao elemento de

principal interesse, a saber, a região do aterro teste construído com o resíduo filtro desaguado por filtros prensa.

Figura 4-25: Seção A-A' – Domínio do Modelo e Malha de Elementos Finitos



O resíduo desaguado por filtros rotativos (Resíduo Frt) depositado na fundação do aterro teste foi caracterizado a partir de campanha de ensaios de laboratório em que foram definidos os parâmetros de compressibilidade, permeabilidade e resistência. Por sua vez, os parâmetros geotécnicos adotados para o material do aterro em resíduo de filtro prensa (Resíduo Fpr) foram obtidos a partir dos resultados dos ensaios descritos no Item 4.1. Cabe dar relevo à atribuição de anisotropia da permeabilidade do resíduo compactado, estimada de ser 10 vezes maior na direção das camadas de compactação. A Tabela 4.16 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados na modelagem. Faz parte ainda dos parâmetros de entrada do modelo numérico a relação constitutiva descrita no Item 4.2.1.

Tabela 4.16: Parâmetros geotécnicos adotados

Material	E (kPa)	ν	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k_{sat} (m/s)	k_v (m/s)
Fundação Resíduo Frt	$14.095 \cdot \sigma'_v + 3.400,7$	0,25	18,2	2	37	$3,00 \times 10^{-07}$ ($k_y = k_x$)	$3,5 \times 10^{-04} \cdot \sigma'_v$ _{0,592}
Aterro Resíduo Fpr	*	0,25	19,6	0	34	$2,86 \times 10^{-08}$ ($k_y = 0,1 \cdot k_x$)	$7,1 \times 10^{-06} \cdot \sigma'_v$ _{0,614}

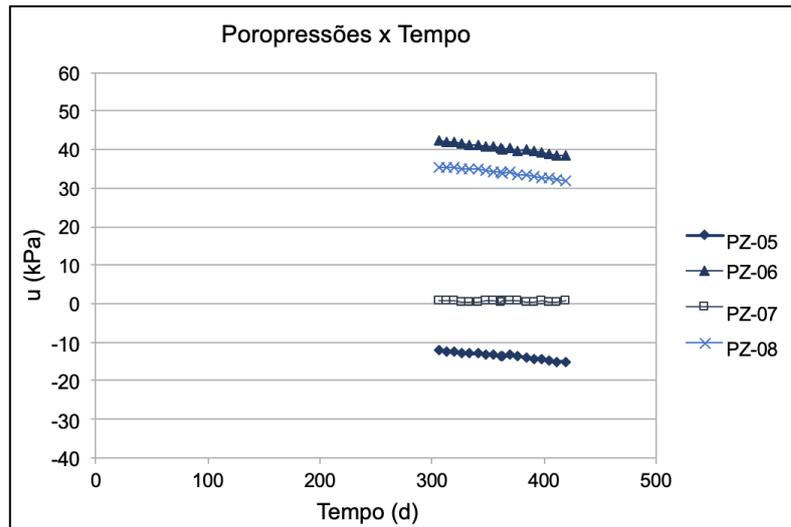
(*) Modelo constitutivo descrito no item 4.2.1.

4.2.2.3 Geração de poropressões no aterro teste

Neste item são apresentados os dados de poropressão registrados no aterro experimental, obtidos a partir de instrumentação geotécnica composta por piezômetros elétricos de corda

vibrante. As leituras tiveram início imediato após a instalação dos instrumentos, que aconteceu após a completa finalização das atividades de terraplenagem necessárias à construção do aterro experimental. Os registros compreendem as leituras realizadas entre 05 de junho a 26 de setembro de 2019, completando um período igual a 113 dias. A Figura 4-26 ilustra graficamente as poropressões registradas pela instrumentação geotécnica instalada no aterro experimental.

Figura 4-26: Poropressões registradas no aterro experimental

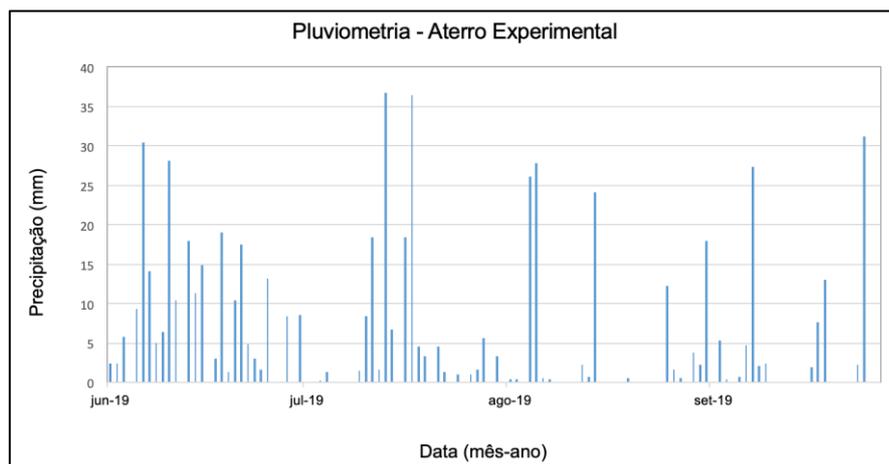


4.2.2.4 Pluviometria

Os quantis diários de precipitação sobre o aterro experimental foram registrados por meio de estação meteorológica dotada de pluviógrafo instalada nas adjacências da área.

Conforme apresentado na Figura 4-27, o período entre os meses de junho e setembro representa o período transicional do regime pluviométrico da região. Por essa razão, o registro da precipitação sobre o aterro experimental é necessário para a completa compreensão das leituras das poropressões no aterro.

Figura 4-27: Precipitação diária na área experimental

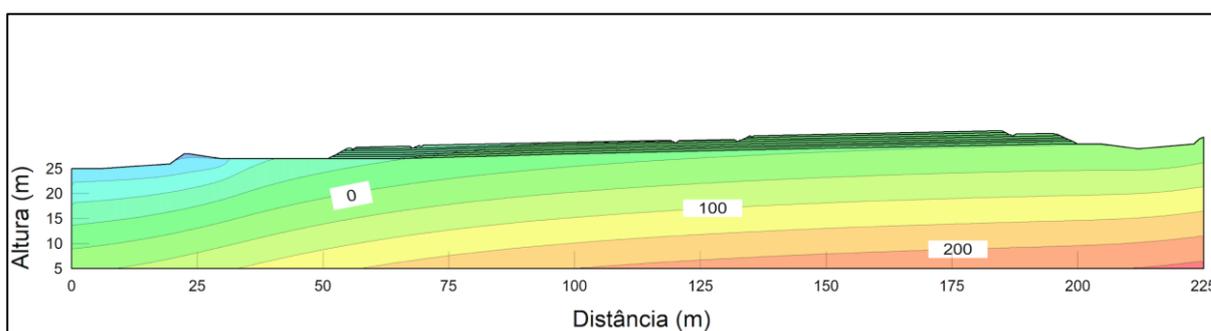


4.2.2.5 Estimativa de excessos de poropressões gerados no aterro teste

A partir dos parâmetros de compressibilidade, resistência e condutividade hidráulica apresentados na Tabela 4.16, foi possível aplicar o modelo numérico para estimativa das poropressões geradas no aterro experimental para o período de análise.

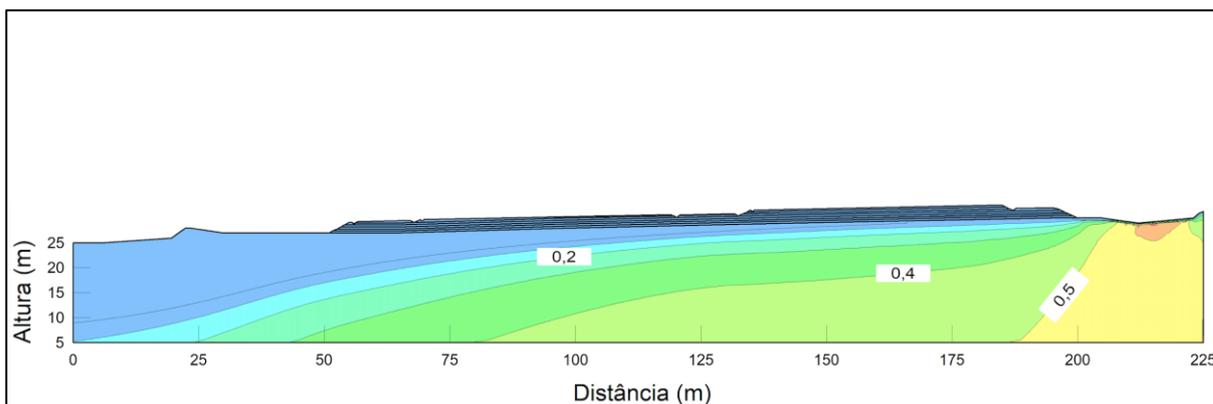
Na Figura 4-28 são ilustradas as isolinhas de poropressões geradas no aterro teste para o dia 419, referente ao final do monitoramento. Observa-se que as poropressões obtidas para o maciço do aterro teste em resíduo desaguado por filtros prensa indicam sucção. Tal fato decorre das condições de compactação, da existência de sistema de impermeabilização sobre a superfície do resíduo e ainda dos estados de tensão presentes no maciço.

Figura 4-28: Geração de poropressões no aterro teste (kPa) (t = 419 dias)



Conforme mencionado, tem-se tornado prática comum em projetos de barragens e pilhas a adoção de parâmetro r_u médio para estimativa de poropressões construtivas, desconsiderando entretanto, a influência de fatores como a umidade e o grau de compactação, a permeabilidade e a compressibilidade do material, os estados de tensão atuantes, a velocidade de construção, além das condições de drenagem no aterro e fundação. Na Figura 4-29 observa-se a distribuição do parâmetro r_u encontrada para o aterro teste no tempo $t = 419$ dias.

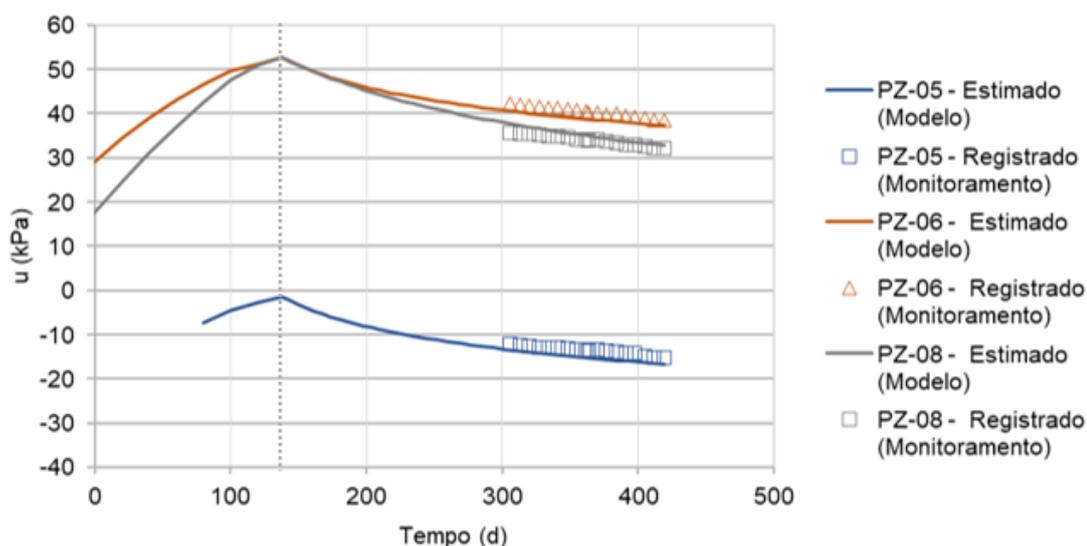
Figura 4-29: Estimativa do parâmetro r_u para o aterro teste (t = 419 dias)



É observada a ocorrência do parâmetro r_u nulo próximo aos contornos drenantes e fronteiras do modelo, exceto onde foi aplicada a condição de contorno de posição de linha freática inicial próxima à superfície do terreno, adotada com o objetivo de modelar a condição observada em campo anteriormente à execução do aterro experimental. Além disso, no resíduo desaguado por filtros prensa também se observa a ocorrência do parâmetro r_u nulo em função do baixo nível de tensões atuantes. Esses resultados são validados com os resultados dos ensaios triaxiais PN realizados no resíduo.

Os resultados obtidos a partir do modelo numérico para estimativa de poropressões foram comparados aos dados registrados em campo, individualmente. A seguir, na Figura 4-30, são apresentadas graficamente as poropressões estimadas pelo modelo bem como as poropressões registradas pela instrumentação de campo ao longo do tempo.

Figura 4-30: Poropressões Estimadas x Registradas



De acordo com os dados de registro, o instrumento PZ-05, cuja profundidade é de aproximadamente 1,5 m, instalado no resíduo desaguado por filtros prensa, apresentou leituras de sucção, em que as poropressões registradas variaram entre -12,19 kPa a -15,11kPa. Uma vez que o monitoramento se iniciou após a completa finalização das atividades de construção do aterro, as poropressões registradas pela instrumentação evidenciaram apenas a dissipação dos excessos gerados decorrentes do carregamento construtivo das camadas.

O modelo numérico, por sua vez, foi capaz de evidenciar os excessos de poropressões gerados na região de instalação do instrumento durante toda a etapa de construção. Em seguida, após a finalização da construção do aterro (dia 120) observa-se o início das dissipações dos excessos de poropressões, até a convergência com as poropressões indicadas em campo.

O instrumento PZ-06, instalado a uma profundidade de aproximadamente 7,0 m, no resíduo desaguado por filtros rotativos, apresentou leituras positivas de poropressão ao longo de todo histórico registrado, variando entre 42,25 kPa e 38,45 kPa. Ressalta-se que o resíduo desaguado por filtros rotativos fora disposto saturado pelo método *dry stacking*, cujo teor de sólidos durante o lançamento era de aproximadamente TS = 60%. Analogamente ao PZ-05, as poropressões registradas pelo PZ-06 evidenciaram apenas a dissipação dos excessos gerados decorrentes do carregamento construtivo das camadas de aterro, uma vez que o monitoramento teve início após a completa finalização das atividades de construção.

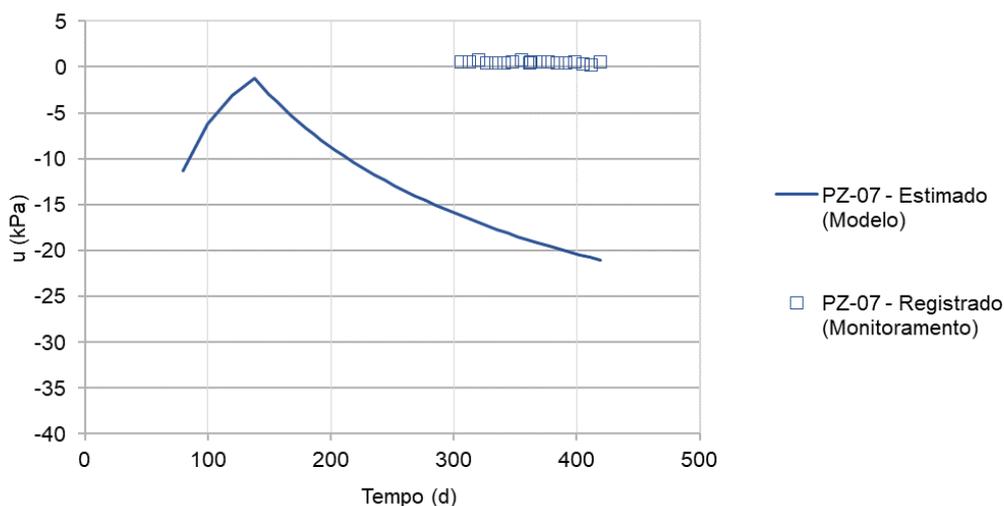
A partir do modelo, são evidenciados os excessos de poropressões na região durante toda a etapa de construção. O trecho correspondente à dissipação das poropressões converge com as poropressões indicadas em campo na região próxima ao PZ-06.

O piezômetro elétrico PZ-08 está instalado a uma profundidade de aproximadamente 7,0 m, no resíduo desaguado por filtros rotativos, justificando, portanto, as leituras de positivas de poropressão registradas. De acordo com o histórico, as poropressões nele registradas variaram entre 35,56 kPa e 31,01 kPa. Os resultados do modelo foram aderentes também às poropressões indicadas pelo PZ-08, conforme ilustrado na Figura 4-30.

Diferentemente dos demais instrumentos instalados no aterro teste, o piezômetro elétrico de corda vibrante PZ-07, equipado com pedra porosa de alta pressão de entrada de ar, indicou leituras positivas de poropressão, próximo de nulas, desde o início do monitoramento. Uma vez que o resíduo desaguado por filtros prensa, utilizado como material de construção do aterro, foi compactado em condição não saturada com o teor de umidade próximo à umidade ótima de compactação, era esperada a ocorrência de leituras de sucção, assim como observado

no instrumento PZ-05, instalado em condições similares e mesma profundidade. Dessa forma, as leituras registradas pelo instrumento PZ-07, variando entre 0,20 kPa a 0,74 kPa (Figura 4-31), sugerem a ocorrência de anomalia no funcionamento do instrumento, seja por dessaturação da pedra porosa, erro de instalação do instrumento ou ainda por falha de vedação do sistema de impermeabilização da cobertura do aterro experimental. Isso posto, o instrumento PZ-07 não será considerado nas análises para fins de calibração do modelo proposto.

Figura 4-31: Poropressões Estimadas x Registradas – PZ-07



4.3 Simulação da Construção de uma Pilha

4.3.1.1 Geometria

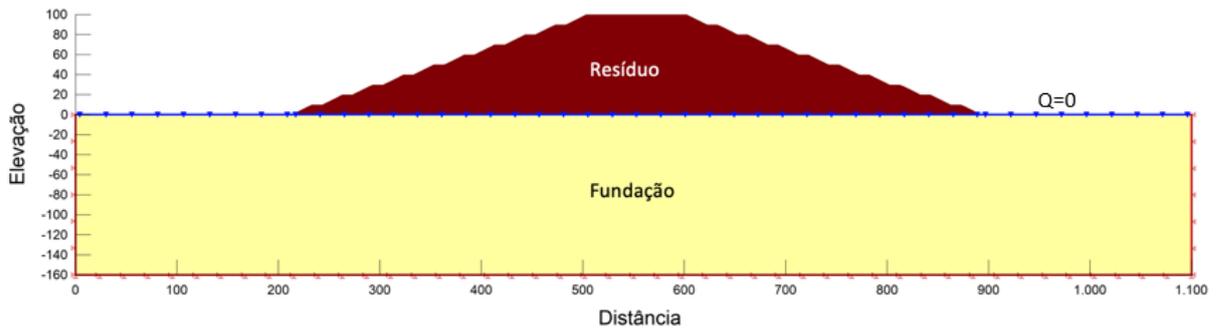
A geometria de pilha considerada nas análises possui altura igual a 100,0 metros, com inclinação de taludes 2,0H:1,0V, dotados de bermas a cada 10,0 metros. A condição de contorno impeditiva de fluxo no contato da fundação ($Q=0$) foi aplicada a todas as análises.

Embora a espessura de camadas de compactação comumente adotada na execução de aterros de pilha ou barragem em solo seja da ordem de 20 a 30 cm, a depender do material de construção e equipamentos utilizados durante a compactação, para simular sua construção, o aterro foi particionado em 25 camadas com altura de 4,0 m cada. Essa definição de espessura de camadas modeladas, embora apresente desvio com relação às esperadas de serem executadas *in situ*, tem por objetivo otimizar o tempo de processamento das análises numéricas. Essas camadas são computadas no cálculo progressivamente, com carregamento sobre as camadas inferiores. Durante a ativação da camada, o modelo numérico computa um

acréscimo de tensão total e de excessos de poropressões. Cada etapa construtiva corresponde a um problema transiente para o qual as equações de governo são resolvidas numericamente.

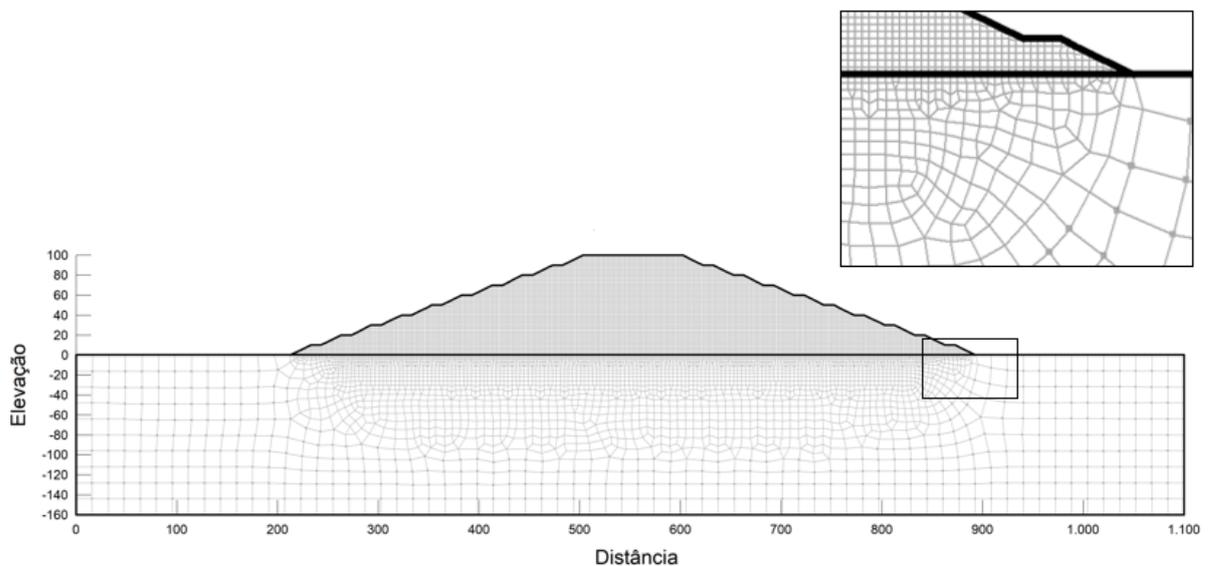
A seção típica da pilha e as condições de contorno consideradas estão ilustradas na Figura 4-32.

Figura 4-32: Pilha Hipotética – Condições de Contorno



O domínio do modelo é ilustrado na Figura 4-33, onde a seção típica da pilha é discretizada utilizando uma malha com 13.449 nós, distribuídos entre 13.335 elementos quadrangulares e triangulares de ordem quadrática de interpolação. Maior detalhamento da malha foi atribuído ao elemento de principal interesse da análise, a saber, a região da pilha de resíduo filtrado.

Figura 4-33: Pilha Hipotética – Domínio do Modelo e Malha de Elementos Finitos



Uma vez que os objetos de avaliação das análises são as poropressões construtivas desenvolvidas no resíduo da pilha, a fundação considerada no modelo foi tomada de forma simplificada, uma superfície plana e horizontal na El. 0,00 m, e é composta de um material

elástico-linear, com resistência infinita, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 4.17. Adicionalmente, não foi considerada a ocorrência de recarga superficial decorrente de deflúvio na área, tampouco condições climáticas, tais como, temperatura, umidade do ar, radiação solar, velocidade do vento, entre outras.

Tabela 4.17: Parâmetros geotécnicos da fundação

Material	E (kPa)	ν	γ_{nat} (kN/m³)
Fundação	90.000	0,33	20,00

As análises de simulação de construção de pilha de resíduos filtrados são detalhadas a seguir. Elas foram realizadas com vistas a avaliar dois aspectos fundamentais à geração das poropressões durante a construção do aterro, quais sejam:

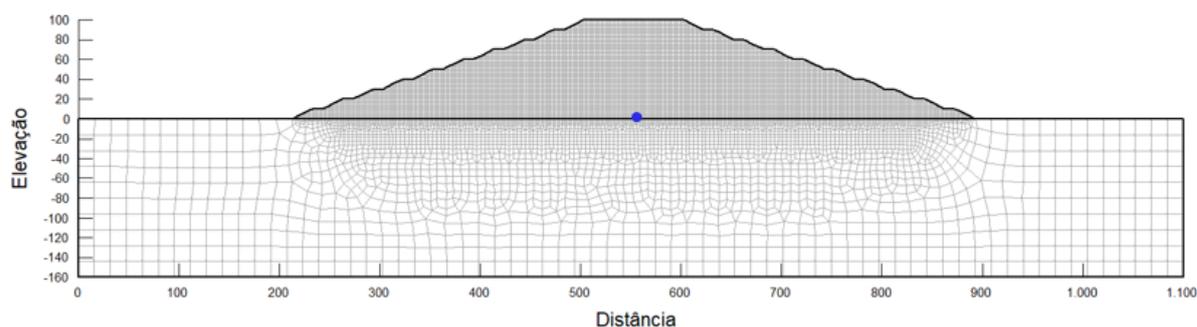
- I. Influência do tempo de construção nas poropressões
- II. Influência da umidade de compactação do resíduo nas poropressões

4.3.1.2 Influência do Tempo de Construção nas Poropressões

De maneira a avaliar a influência que o tempo de construção das camadas de compactação exerce nas poropressões desenvolvidas no maciço de resíduo filtrado, foram realizadas análises numéricas em que o tempo total de construção do depósito foi arbitrado em 1, 5, 10 e 20 anos. Esses tempos construtivos têm caráter hipotético, e não consideram, por exemplo, restrições operacionais associadas às velocidades de construção mais elevadas, como disponibilidade de equipamentos ou pessoal para atendimento a essas taxas. Além disso, foram analisadas as poropressões em todos os cenários de construção para o período de 20 anos após o início da construção.

Nas análises, foram registrados os excessos de poropressão computados em um nó localizado na base da pilha, na projeção do eixo central (Figura 4-34). Nessa análise, foi desconsiderada a presença de qualquer dispositivo de drenagem interna.

Figura 4-34: Ponto de análise das poropressões



Os parâmetros geotécnicos adotados para o resíduo são apresentados na Tabela 4.18.

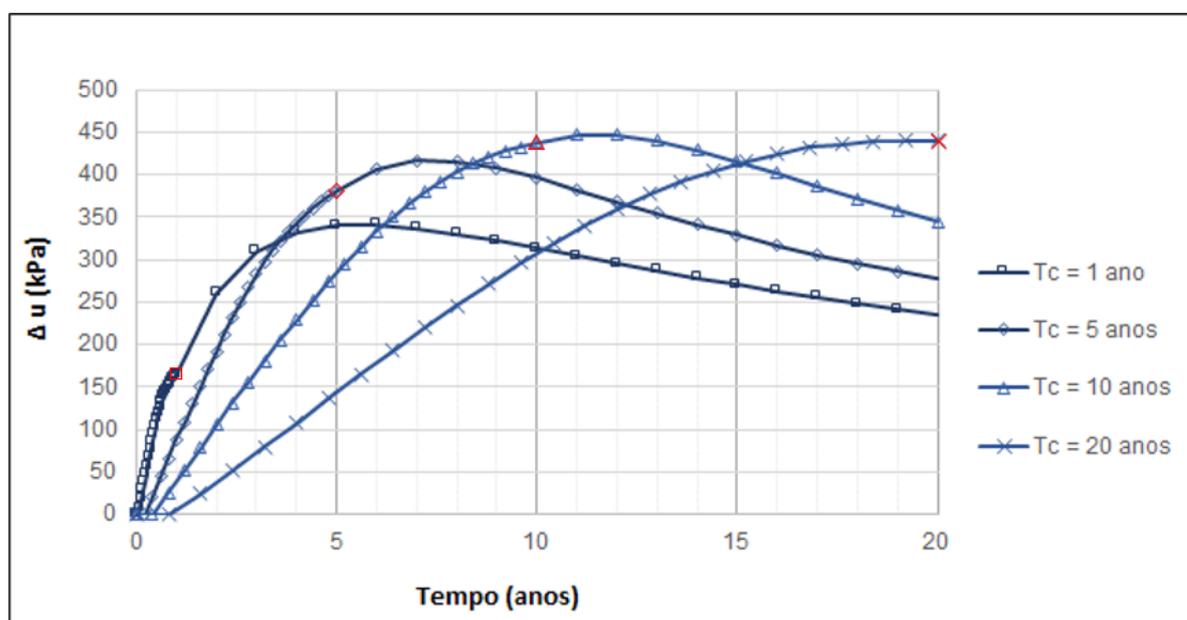
Tabela 4.18: Parâmetros geotécnicos adotados na análise

Material	E (kPa)	ν	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k_{sat} (m/s)	k_v (m/s)	u inicial
Resíduo "seco"	*	0,25	18,9	6	33	$2,86 \times 10^{-08}$ ($k_y=0,1.k_x$)	$7,1 \times 10^{-06} \cdot \sigma'v_{0,614}$	-50 kPa

(*) Modelo constitutivo descrito no item 4.2.1.

Com o objetivo de entender o comportamento das poropressões geradas no resíduo ao longo do tempo, são apresentadas na Figura 4 35 as poropressões registradas em um nó na base da pilha, no alinhamento do eixo central, resultante de diferentes taxas (ou velocidades) de construção.

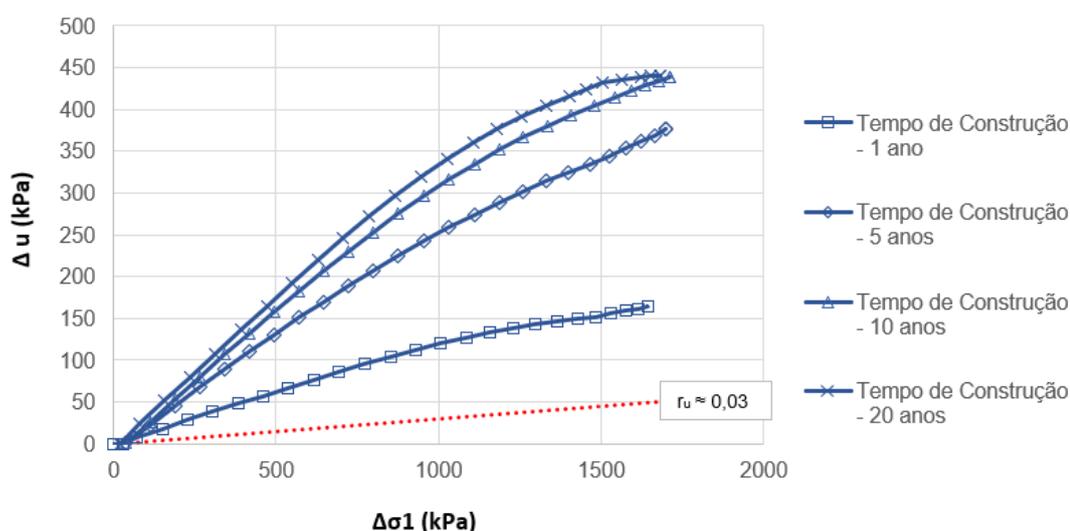
Figura 4-35: Poropressões na pilha versus tempo



A Figura 4 35 evidencia, para cada um dos cenários, o tempo de resposta para o registro das poropressões de pico, e sua magnitude, quando comparada à poropressão imediatamente atingida ao final de construção. Na análise com tempo de construção (T_c) igual a 1 ano, a poropressão atingiu valor máximo igual a 283,48 kPa ($\Delta u = 340,79$ kPa) quando completados 6 anos desde o início de sua construção. Esse cenário representa dentre todos os avaliados, aquele com o tempo mais curto para a ocorrência do pico das poropressões, ou seja, com inclinação da curva $\Delta u \times tempo$ mais acentuado durante o carregamento. Por sua vez, a curva correspondente ao T_c igual a 5 anos mostrou-se menos inclinada se comparada à curva de T_c igual a 1 ano, sendo que, o pico das poropressões foi observado 7 anos após o início da construção, quando registrou poropressão igual a 367,77 kPa ($\Delta u = 416,55$ kPa). Em seguida, a análise com T_c igual a 10 anos teve o pico das poropressões registradas 11 anos após o início da construção registrando poropressão igual a 397,65 kPa ($\Delta u = 446,42$ kPa) na base da pilha. Seguindo a mesma tendência, a análise com T_c igual a 20 anos indicou poropressão de pico igual a 372,72 kPa ($\Delta u = 439,92$ kPa) em 19,2 anos desde o início da construção. Portanto, com base nessas observações conclui que, o cenário com taxa de geração de poropressão mais elevado corresponde ao cenário com tempo de construção mais curto ($T_c = 1$ ano), portanto, quanto mais curto o tempo de construção mais alta é a taxa de geração de poropressões. Dessa forma, à medida que o tempo de construção é aumentado, ocorre a redução da taxa na geração das poropressões. Além disso, as poropressões de pico tendem a aproximar-se do final da construção do aterro à medida em que se aumenta o tempo de construção, convergindo a um valor da ordem de 460 kPa para a geometria e cenários avaliados.

Adicionalmente, as poropressões ao final de construção são ilustradas na Figura 4-36 em termos do parâmetro r_u , para cada um dos cenários estudados. Nela, é indicado o intervalo limítrofe inferior de r_u 0,03 obtido a partir do ensaio de compressão triaxial PN durante o carregamento, para o resíduo considerado no modelo.

Figura 4-36: Influência do tempo de construção da pilha no parâmetro r_u

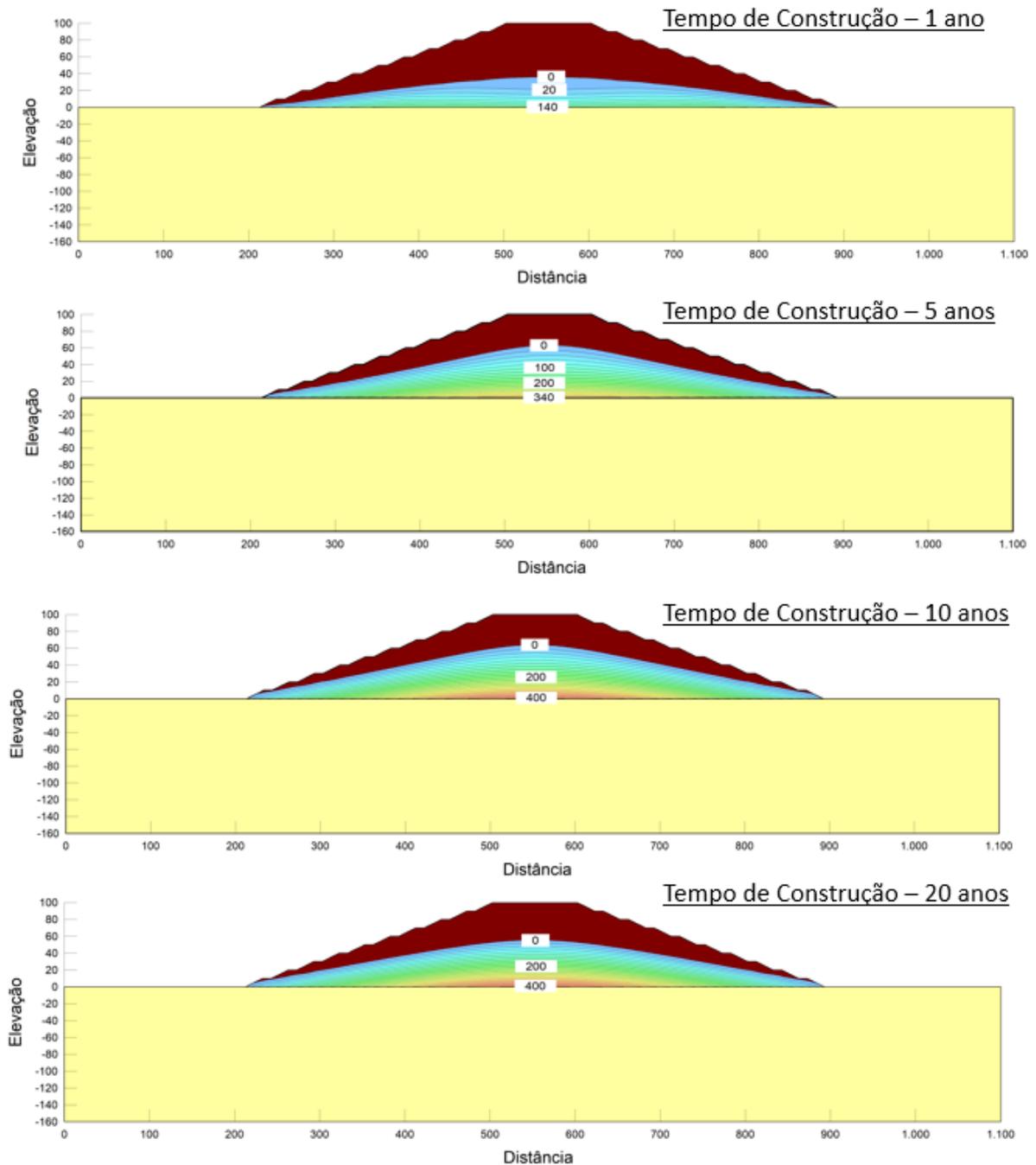


Com base nos resultados apresentados na Figura 4-36, conclui-se que quanto mais rápida é a taxa de carregamento, ou seja, a construção da pilha, menor a influência de fluxos horizontal e vertical nas poropressões, esse último estabelecido a partir das camadas superiores em direção à base da pilha. Por essa razão, os resultados das poropressões obtidos ao final de construção na base da pilha em simulações de construção mais rápidas tendem a aproximar-se aos resultados do ensaio triaxial PN, aqui representados como a reta correspondente ao $r_u = 0,03$.

Além disso, cabe dar relevo ao fato que, embora tenha sido observada baixa geração de poropressão durante o ensaio de compressão triaxial PN, ao simular sua disposição em pilha o modelo numérico indicou a geração de poropressões de ordem superiores àquelas encontradas no ensaio. Esse fato decorre de as condições de operação de uma pilha de rejeitos filtrados distanciarem de hipóteses consideradas no ensaio de laboratório, como por exemplo, o estabelecimento do fluxo descendente, decorrente da drenagem vertical das camadas superiores. Na Figura 4-37 são ilustrados os mapas de poropressões desenvolvidas no maciço, ao final da construção, para os diferentes tempos de construção estudados.

É possível considerar que para períodos de construção mais longos, aqui indicados nas curvas correspondentes a 10 e 20 anos, as poropressões desenvolvidas na base do maciço tendem a convergir-se ao final de construção. Ademais, foi observado ainda que, no longo prazo, as poropressões desenvolvidas no ponto de análise tendem a convergir independente da trajetória inicial adotada (1, 5, 10 ou 20 anos).

Figura 4-37: Poropressões desenvolvidas no maciço ao final de construção



4.3.1.3 Influência da Umidade de Compactação do Resíduo nas Poropressões

Conforme apresentado no Item 4.1, a lama vermelha desaguada por filtros prensa possui propriedades físicas dependentes de fatores tais como teor umidade e índice de vazios, esse último expresso nas rotinas operacionais em termos de grau de compactação. Nessa etapa do estudo, foram consideradas duas faixas de umidade e compactação do resíduo como representativas das condições operacionais de uma pilha de resíduos filtrados, quais sejam, (i) “resíduo seco” como sendo os resíduos moldados com 95% de GC em relação ao Proctor Normal e desvio de umidade acima da ótima menor ou igual a 2% e (ii) “resíduo úmido”

como os resíduos moldados com 90% de GC em relação ao Proctor Normal e desvio de umidade entre 4 e 6% em relação à ótima, discutidos no Item 4.2.2.1. Embora ambos os resíduos possam apresentar teor de umidade correspondente ao ramo úmido da curva de compactação, a definição do agrupamento sugerida tem como objetivo permitir a distinção do resíduo de forma facilitada e expedita, por exemplos durante atividades de disposição, levando em conta o seu comportamento geomecânico observado nos resultados dos ensaios de laboratório, tanto em termos de resistência ao cisalhamento e deformabilidade, como à geração de poropressões durante o carregamento. A Tabela 4.19 sumariza os parâmetros considerados para a pilha hipotética.

Tabela 4.19: Parâmetros geotécnicos – Pilha Hipotética

Material	E (kPa)	ν	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	$S_u/\sigma'v$	k_{sat} (m/s)	k_v (m/s)	u inicial
Resíduo “seco”	*	0,25	18,9	6	33	0,479	$2,86 \times 10^{-08}$ ($k_y=0,1.k_x$)	$7,1 \times 10^{-06} \cdot \sigma'v$ _{0,614}	-50 kPa
Resíduo “úmido”	*	0,25	18,5	2	32	0,342	$2,86 \times 10^{-08}$ ($k_y=0,1.k_x$)	$7,1 \times 10^{-06} \cdot \sigma'v$ _{0,614}	- 6 kPa

(*) Modelo constitutivo descrito no item 4.2.1.

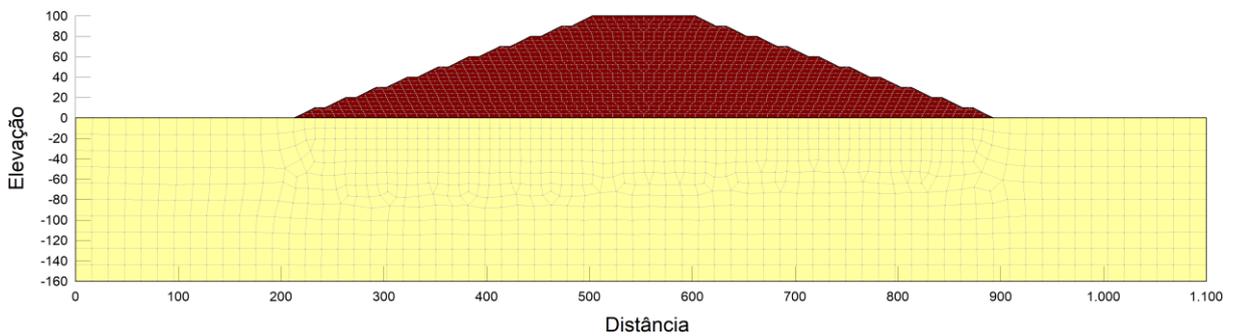
Foram definidos três cenários de análise, a saber:

- Cenário I – Pilha executada em sua totalidade com o “resíduo seco”;
- Cenário II – Pilha executada em sua totalidade com o “resíduo úmido”;
- Cenário III – Pilha executada com ambos os resíduos “seco” e “úmido” delimitados por faixas (ou zoneamentos).

Nos Cenários I e II, a pilha foi discretizada em 4.127 nós, distribuídos entre 1.983 elementos quadrangulares e triangulares de ordem quadrática de interpolação, com elementos com dimensões de aproximadamente 5 m na malha da região do maciço (Figura 4-38).

Com o objetivo de evitar influências do tempo de construção nos resultados das análises, em todos os cenários simulados foi considerado o tempo de construção de pilha igual a 10 anos. É oportuno informar que aspectos tais como dados de geração de resíduos pela planta industrial, regime pluviométrico na área do empreendimento, disponibilidade de equipamentos e pessoal para a operação da pilha, dentre outros, são aspectos fundamentais de serem avaliados para a definição da geometria da pilha e sua velocidade de construção.

Figura 4-38: Domínio do Modelo – Cenários I e II

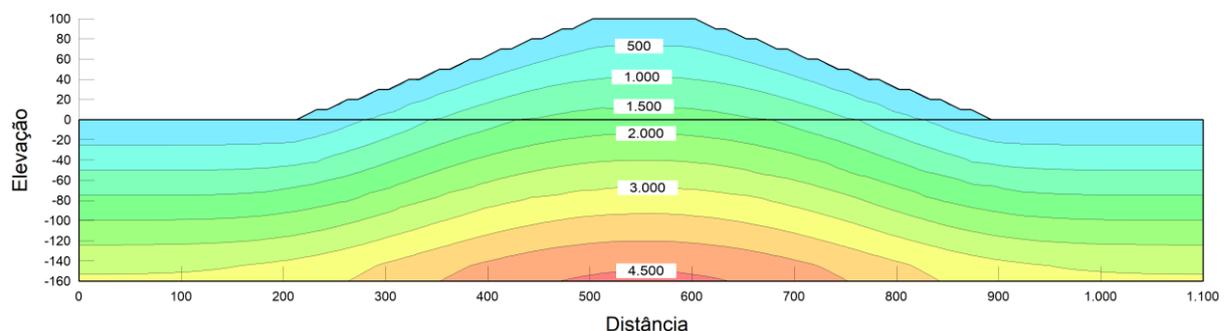


Cenário I – Pilha Executada com Resíduo “Seco”

Com a finalidade de caracterizar o resíduo de lama vermelha desaguado por filtros prensa segundo seu teor de umidade médio e grau de compactação em relação ao Proctor Normal durante a disposição, foi considerado “resíduo seco” aquele moldado com 95% de GC em relação ao Proctor Normal e desvio de umidade acima da ótima menor ou igual a 2%, conforme discutido anteriormente. O modelo numérico criado foi utilizado para a previsão das poropressões geradas no maciço da pilha, simulando sua construção com o resíduo nas condições supracitadas.

Após os estágios de carregamento, ao final da construção da pilha ($t = 10$ anos), foi analisada a malha de tensões totais desenvolvidas na pilha e fundação. A Figura 4-39 mostra que as tensões totais verticais partem de valor nulo nas fronteiras do modelo, e chegam a valores da ordem de 1.700 kPa na base da pilha, e 4.500 kPa na base da fundação, no alinhamento do eixo central.

Figura 4-39: Cenário I – Resíduo Seco – Tensões Totais



As poropressões desenvolvidas no resíduo filtrado decorrentes da construção do aterro iniciaram com valores negativos, indicando sucção matricial no material enquanto em condição não saturada, com inversão para valores positivos na base da pilha quando essa atingiu aproximadamente 8,7 m de altura. Ao final dos 10 anos de construção o topo da pilha

atingiu a cota El. 100,00 m, e as poropressões estimadas na base chegaram à ordem de 413,0 kPa. A Figura 4-40 ilustra graficamente o desenvolvimento das poropressões em um elemento da base da pilha, no alinhamento de seu eixo central *versus* cota de topo da pilha, e na Figura 4-41 é apresentada a distribuição de poropressões ao estágio de final de construção da pilha.

A partir das tensões desenvolvidas no aterro e as poropressões estimadas, é possível definir a distribuição espacial de r_u no material de aterro, que variou de 0 a 0,30, conforme ilustrado na Figura 4-42.

Figura 4-40: Cenário I – Resíduo Seco – Poropressões no centro da base da pilha x Cota de Topo

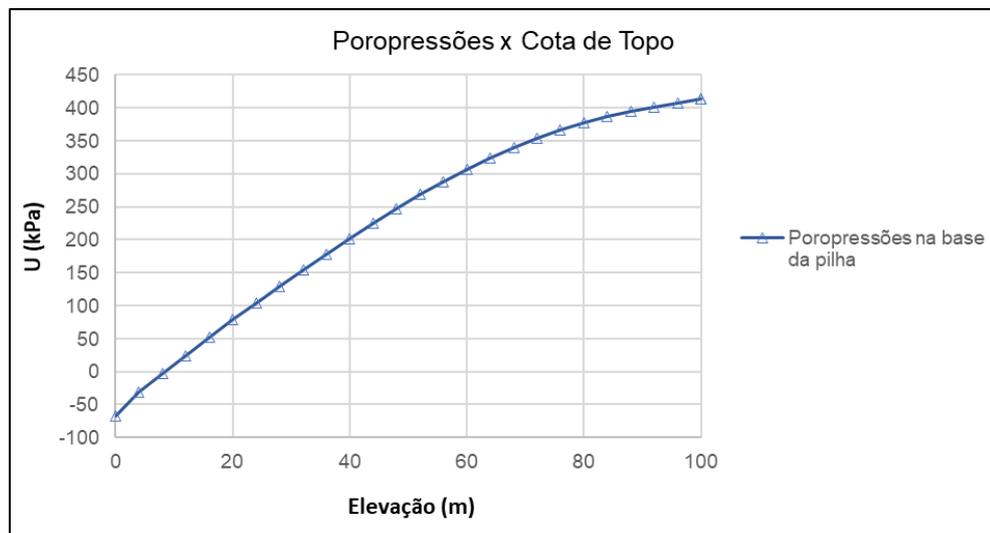


Figura 4-41: Cenário I – Resíduo Seco – Poropressões ao Final de Construção

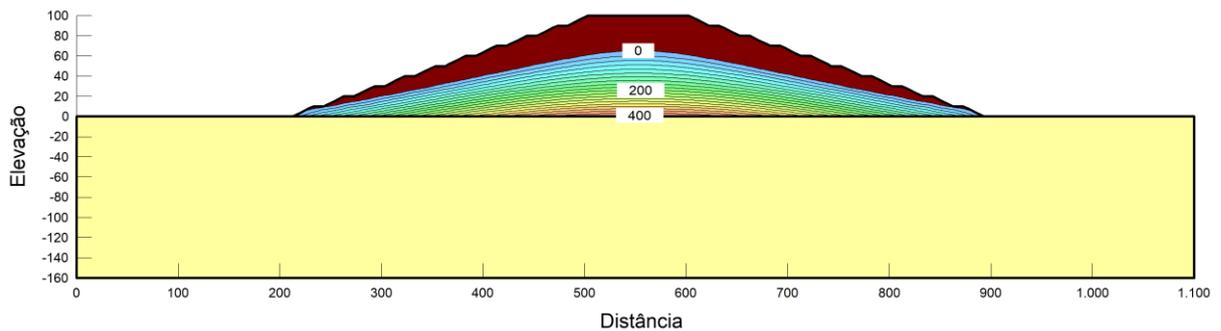
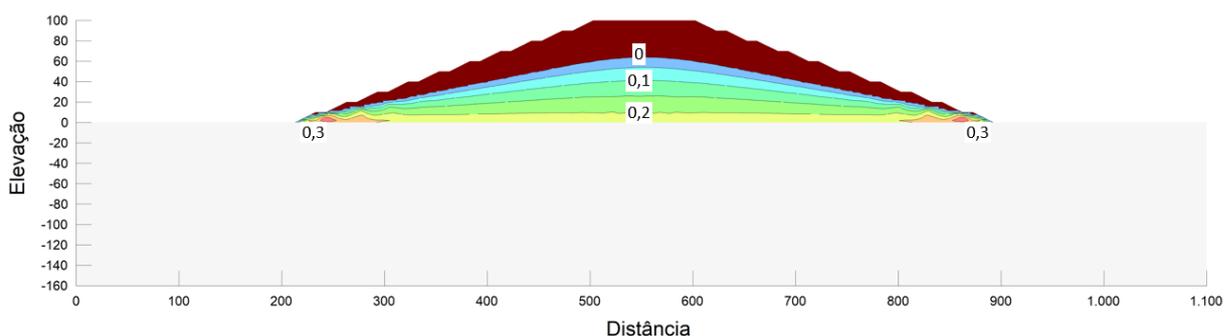


Figura 4-42: Pilha Hipotética – Resíduo Seco – Cenário I – Mapa de r_u

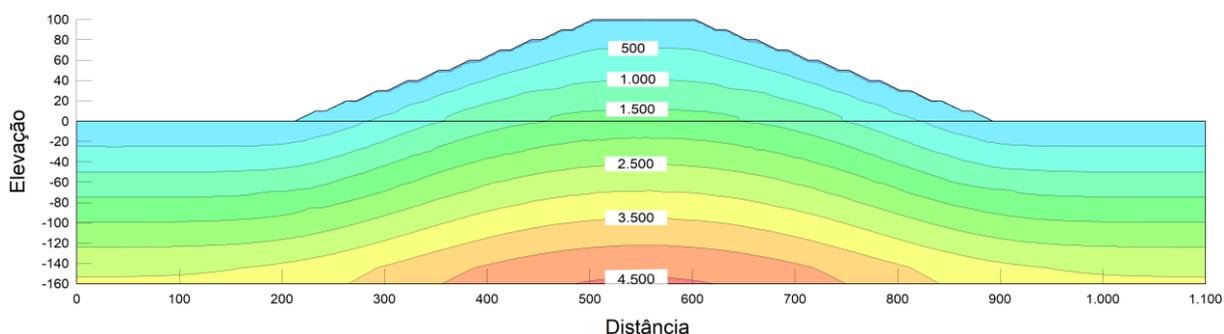


Cenário II – Pilha executada com o “Resíduo Úmido”

Para a modelagem, foi considerado “resíduo úmido” aquele moldado com 90% de GC em relação ao Proctor Normal e desvio de umidade acima da ótima igual a 6%. De semelhante modo, o tempo adotado para a construção da pilha foi de 10 anos.

As tensões totais desenvolvidas na pilha e fundação, próximas às observadas na pilha construída com resíduo seco, são ilustradas na Figura 4-43.

Figura 4-43: Cenário II – Resíduo Úmido – Tensões Totais



As poropressões desenvolvidas no resíduo filtrado decorrentes da construção da pilha iniciaram com valores negativos, indicando sucção mátrica inicial de -8kPa no ponto de análise do material. As poropressões no material de pilha tiveram seu pico quando a pilha atingiu a cota de topo aproximadamente na El. 71,52 m, registrando poropressão de 421,75 kPa em sua base.

Ao final dos 10 anos de construção a pilha atingiu cota de topo na El. 100,00 m, e as poropressões estimadas na base chegaram à ordem de 343,62 kPa, havendo a dissipação de parte dos excessos gerados. A Figura 4-44 ilustra graficamente o desenvolvimento das poropressões em um elemento da base da pilha, no alinhamento de seu eixo central *versus* cota de topo da pilha. Na Figura 4-45 é apresentada a distribuição de poropressões na pilha no

estágio de final de construção, e na Figura 4-46 é ilustrado graficamente o mapa de r_u no material da pilha, cujo valor máximo foi de 0,39, superior ao observado na pilha construída com resíduo “seco”, referente ao estágio mais próximo do pico de poropressões no aterro, a saber, quando o topo da pilha atingiu a cota El. 72,0 m.

É possível observar que na construção da pilha no Cenário I, em que a pilha é construída com o resíduo em condições mais secas, as poropressões geradas são superiores às do Cenário II ao final de construção ($t = 10$ anos), fenômeno esse associado ao aumento gradual da permeabilidade à medida que é aumentado o grau de saturação do resíduo, favorecendo portanto, a drenagem e dissipação dos excessos de poropressão causados pela própria construção.

Figura 4-44: Cenário II – Resíduo Úmido – Poropressões x Cota de Topo

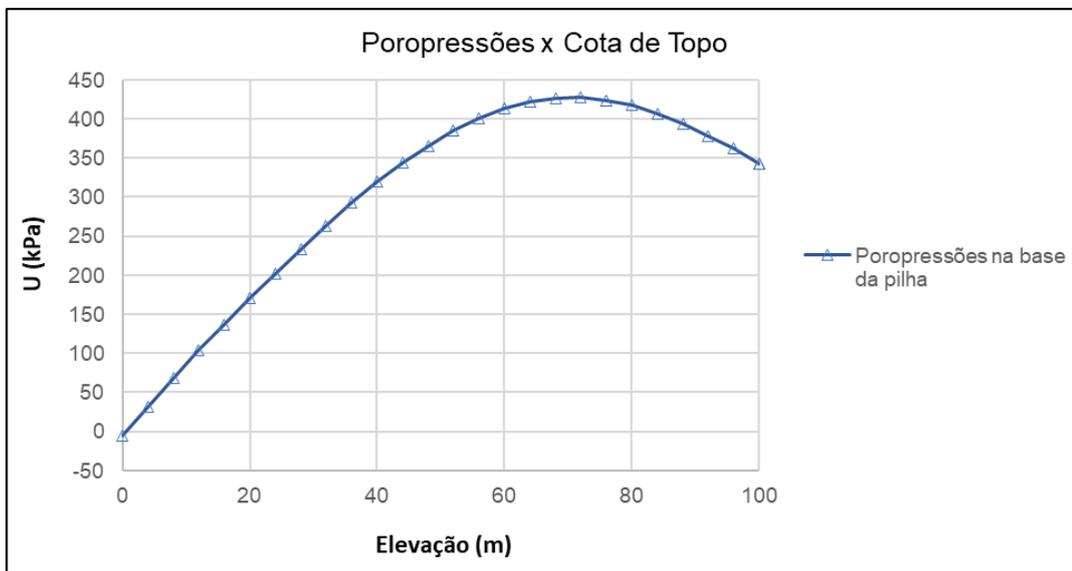


Figura 4-45: Cenário II – Resíduo Úmido – Poropressões ao Final de Construção

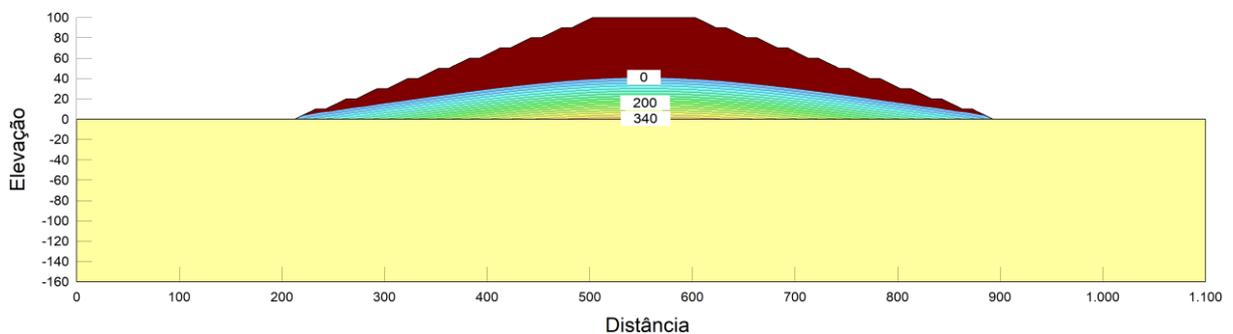
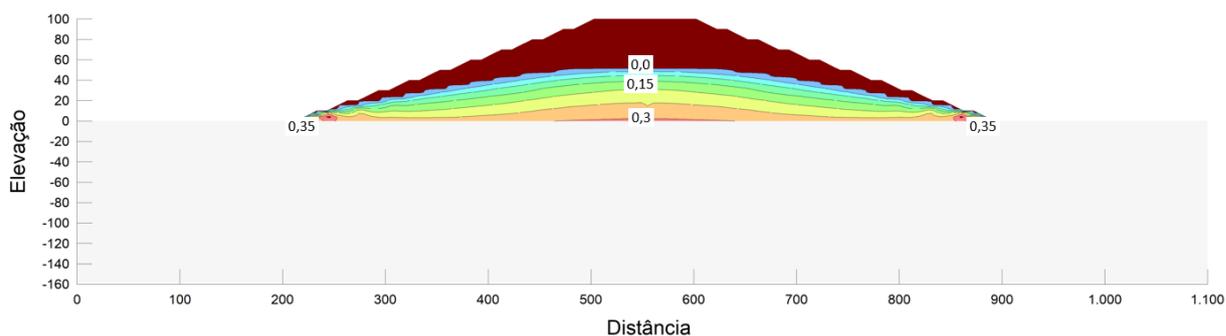


Figura 4-46: Cenário II – Resíduo Úmido – Mapa de r_u (El. 72,00m)



Cenário III – Pilha executada com os Resíduos “Seco e Úmido”

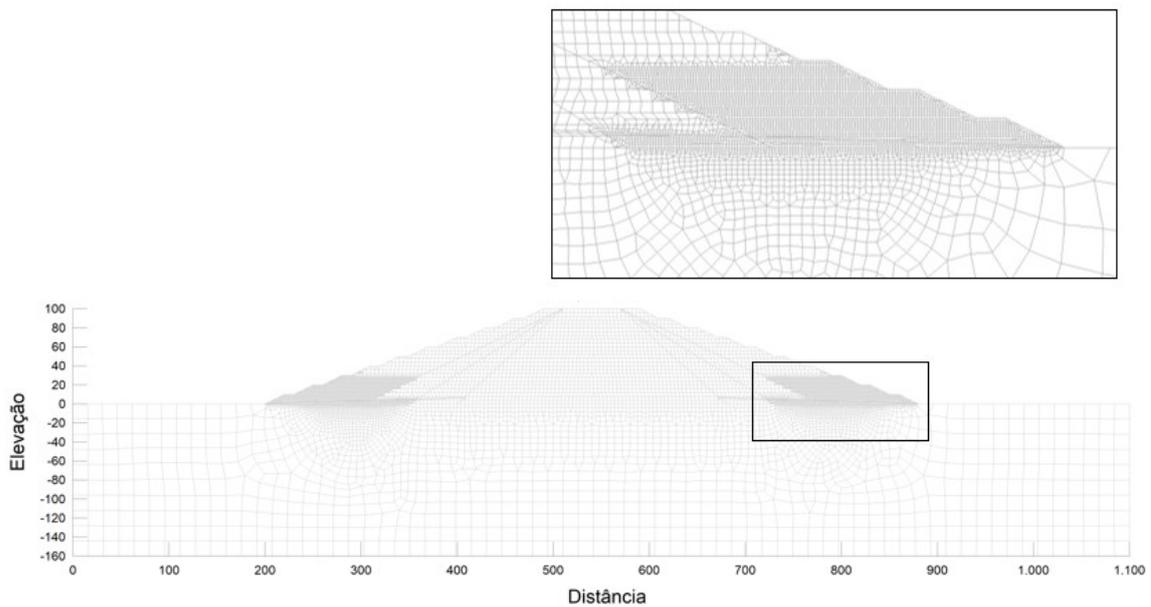
A partir das análises apresentadas nos Cenários I e II, observa-se, para determinado estágio de construção, o desenvolvimento de maiores poropressões na pilha compactada com resíduo úmido quando comparada à mesma pilha compactada com resíduo seco. Dessa forma, no cenário III foram analisados diferentes *layouts* com arranjo, ou zoneamento, da pilha segundo a umidade do resíduo durante a sua compactação, de tal modo que o resíduo com teor de umidade mais elevada (denominado resíduo “úmido”) foi posicionado no centro do depósito, enquanto as faixas externas são compostas pelo resíduo compactado com teor de umidade mais próximo da umidade ótima de compactação (ou resíduo “seco”). Nesses casos, foi avaliada ainda a influência de aspectos geométricos na faixa externa, executada com resíduo “seco”, na geração das poropressões ao final do estágio de construção, bem como a presença de um tapete drenante. As análises consideraram faixas construídas em resíduo seco com base igual a 100,00m, 150,00m e 200,00 (razão entre *altura da pilha:base da faixa seca* igual a 1,0H:1,0V, 1,5H:1,0V e 2,0H:1,0V, respectivamente). Cabe destacar que as geometrias para o zoneamento apresentadas nesse estudo têm caráter avaliativo, e não representam diretrizes ou critérios de projeto de pilhas de resíduo filtrado. A definição das faixas de zoneamento em projetos de pilha de resíduos filtrado deve levar em conta aspectos individuais do projeto, tais como, disponibilidade de área, balanço de massas dos resíduos gerados pela planta de beneficiamento, geometria da pilha (altura e inclinação de taludes) regime de chuvas na região, propriedades geomecânicas do resíduo gerado e do solo de fundação, entre outros.

Para todas as geometrias avaliadas foram obtidas as poropressões ao final de construção, bem como o fator de segurança para a referida condição. Nesse caso, foram realizadas análises tensão-deformação, em que as tensões na base de cada fatia são computadas de forma a possibilitar a análise da estabilidade de cada fatia individualmente, com base na resistência

disponível, por sua vez definida a partir dos modelos constitutivos indicados para cada material, fornecendo dessa maneira o fator de segurança para a estrutura.

A pilha foi discretizada com 21.928 nós, distribuídos entre 12.288 elementos quadrangulares e triangulares de ordem quadrática de interpolação (Figura 4-47). Maior detalhamento da malha foi atribuído ao elemento de principal interesse da análise, a saber, a região próxima aos taludes e nos drenos.

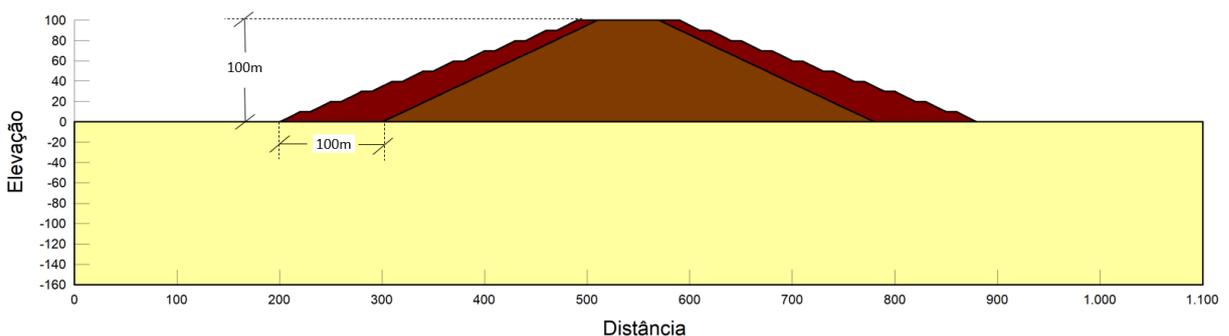
Figura 4-47: Cenário III – Domínio do Modelo e Malha de Elementos Finitos



Cenário III.1 – Razão altura:base da faixa seca igual a 1,0H:1,0V

Na presente análise a geometria da pilha conta com uma faixa externa executada em resíduo denominado “seco” com 100,0 m de comprimento em sua base. Por sua vez, o resíduo “úmido” foi posicionado ao centro da pilha, segundo geometria arbitrada com talude de inclinação igual a 2,1H:1,0V (ou 25,46°). A Figura 4-48 ilustra a geometria da seção típica analisada.

Figura 4-48: Cenário III.1 – Geometria da Pilha – (razão 1,0H:1,0V)



As poropressões decorrentes da construção da pilha segundo a geometria proposta para o Cenário III.1 tiveram seu pico igual a 460,5 kPa, registrando 435,4 kPa ao final de construção no elemento de base, no alinhamento do eixo central da pilha (Figura 4-49). O Fator de Segurança para a condição de final de construção para o Cenário III.1 foi de 1,16, abaixo dos limites aceitáveis para projetos de pilha dessa natureza. A superfície de ruptura obtida nessa condição é indicada na Figura 4-50.

Figura 4-49: Cenário III.1 – Poropressões ao Final de Construção – (razão 1,0H:1,0V)

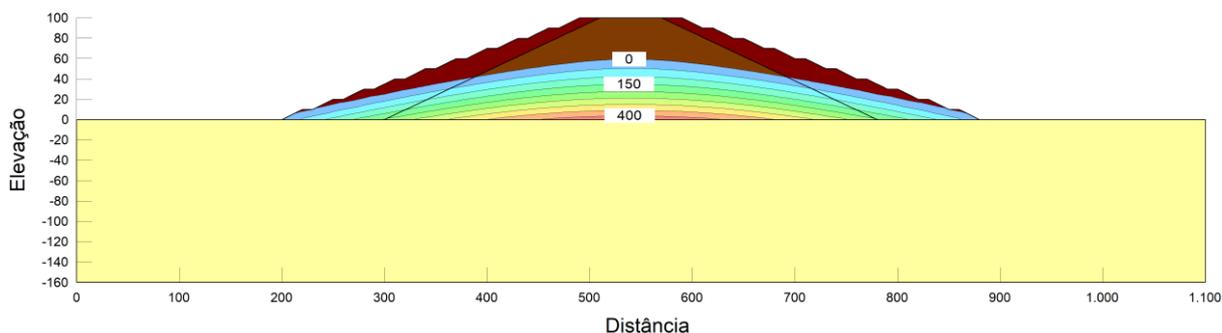
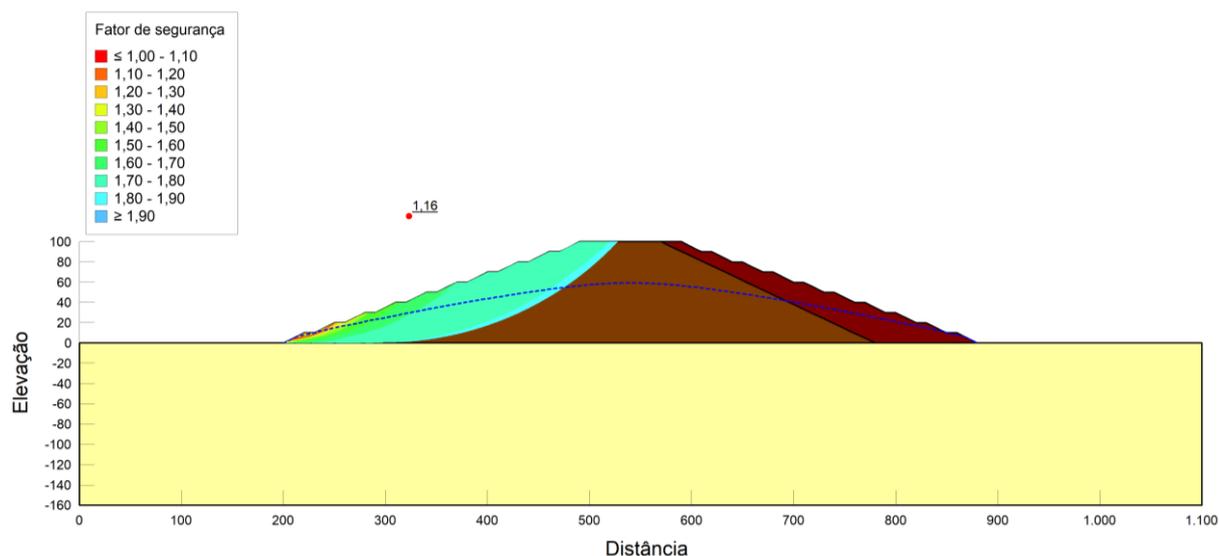


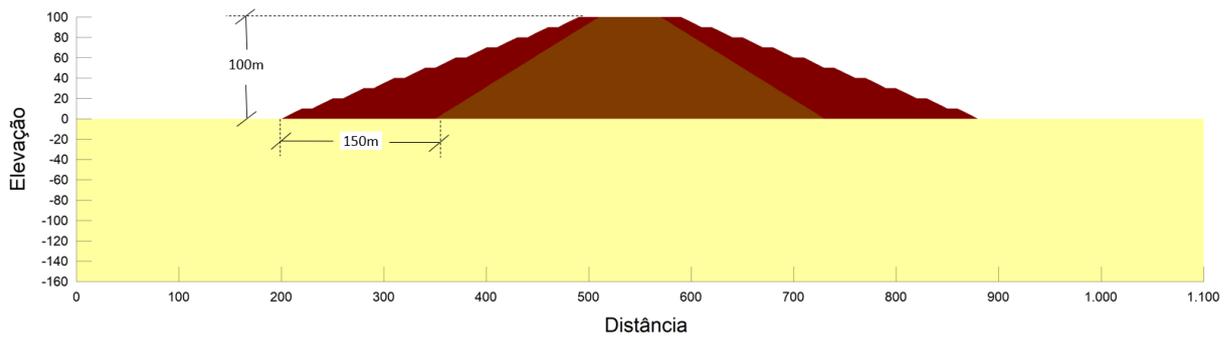
Figura 4-50: Cenário III.1 – Análise de Estabilidade – (razão 1,0H:1,0V)



Cenário III.2 – Razão altura:base da faixa seca igual a 1,5H:1,0V

No Cenário III.2, a geometria da pilha considerada possui uma faixa externa executada em resíduo denominado “seco” com 150 m de comprimento em sua base. Semelhante à análise anterior, o resíduo “úmido” foi posicionado ao centro da pilha, nesse caso com um talude resultante de inclinação igual a 1,6H:1,0V (ou 32,01°). A Figura 4-51 ilustra a geometria da seção típica analisada.

Figura 4-51: Cenário III.2 – Geometria da Pilha – (razão 1,5H:1,0V)



As poropressões referentes ao Cenário III.2 são apresentadas na Figura 4-52, em que foi indicado valor máximo igual a 457,0 kPa, e 440,4 kPa ao final de construção na base da pilha, no alinhamento do eixo central. O Fator de Segurança no final de construção para o Cenário III.2 foi de 1,25, ainda inferior aos limites de aceitabilidade de projetos de pilhas. A superfície de ruptura obtida nesse cenário é indicada na Figura 4-53.

Figura 4-52: Cenário III.2 – Poropressões ao Final de Construção – (razão 1,5H:1,0V)

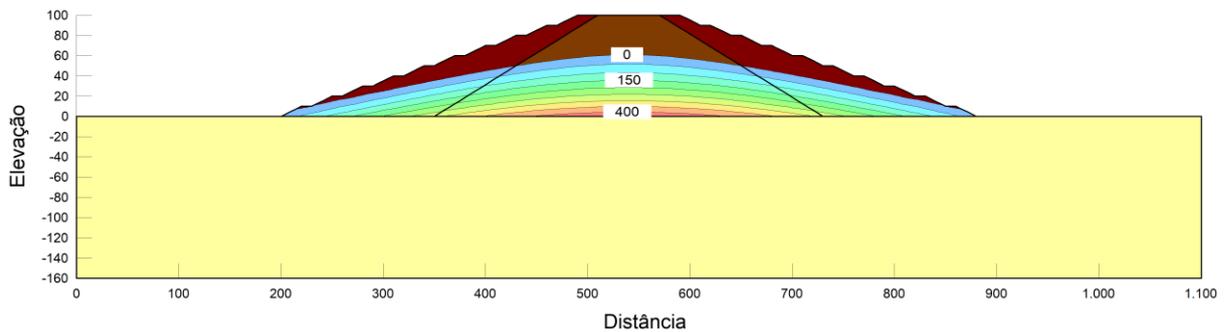
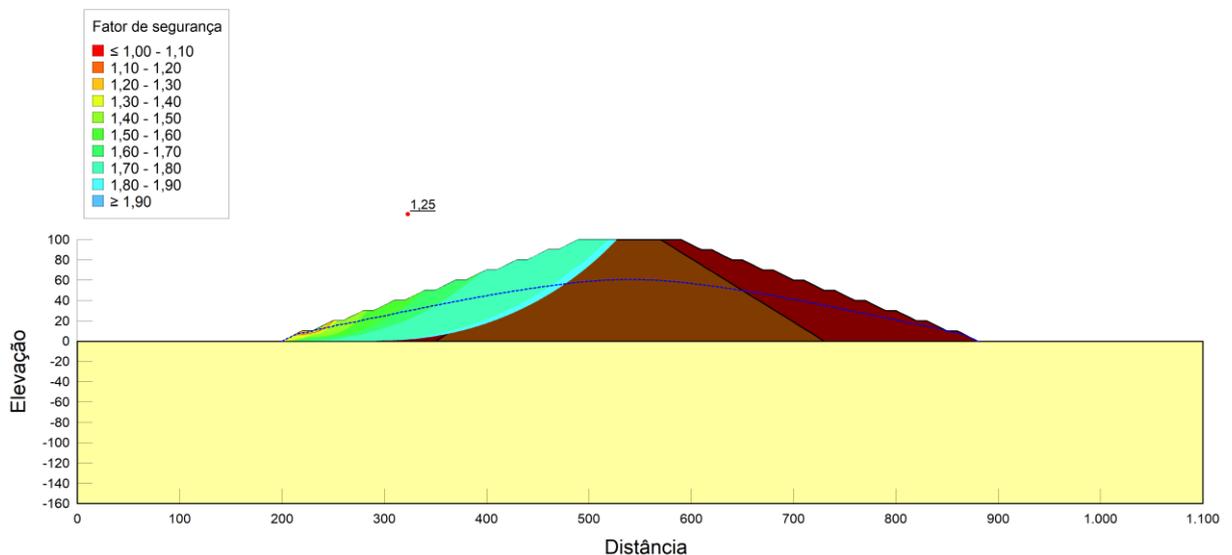


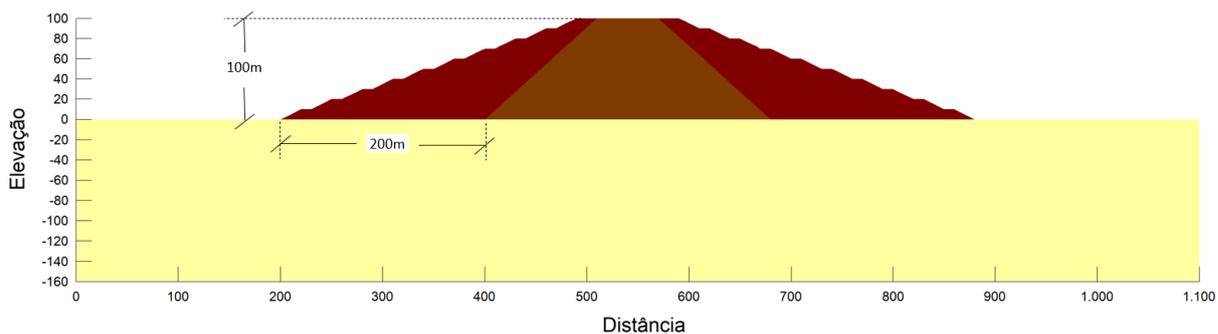
Figura 4-53: Cenário III.2 – Análise de Estabilidade – (razão 1,5H:1,0V)



Cenário III.3 – Razão altura:base da faixa seca igual a 2,0H:1,0V

O Cenário III.3 apresenta a geometria da pilha com faixa externa executada em resíduo denominado “seco” com 200,0 m de comprimento em sua base, e resíduo “úmido” posicionado ao centro da pilha, nesse caso com um talude de inclinação igual a 1,1H:1,0V (ou $42,27^\circ$), segundo ilustrado na Figura 4-54.

Figura 4-54: Cenário III.3 – Geometria da Pilha – (razão 2,0H:1,0V)



As poropressões referentes ao final de construção do Cenário III.3 são apresentadas na Figura 4-55. Segundo o modelo, as poropressões no maciço atingiram valor máximo igual a 449,0 kPa, dissipando para 440,0 kPa ao final de construção na base da pilha, no alinhamento do eixo central. O Fator de Segurança para a condição de final de construção encontrado foi de 1,30, limítrofe à faixa de aceitabilidade de projetos de barragens ABNT NBR 13.028/2017 quando considerada análise em final de construção, porém inferior à diretriz estabelecida para análises em condição normal de operação ($FS \geq 1,5$). A superfície de ruptura encontrada é indicada na Figura 4-56.

Figura 4-55: Cenário III.3 – Poropressões ao Final de Construção – (razão 2,0H:1,0V)

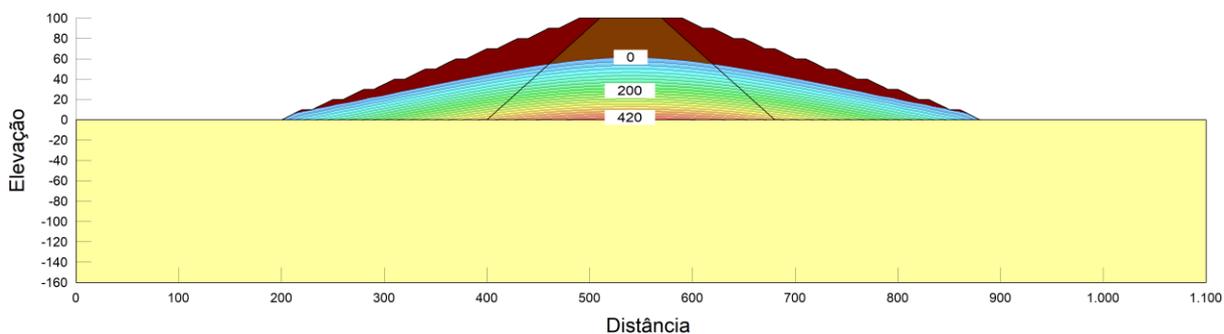
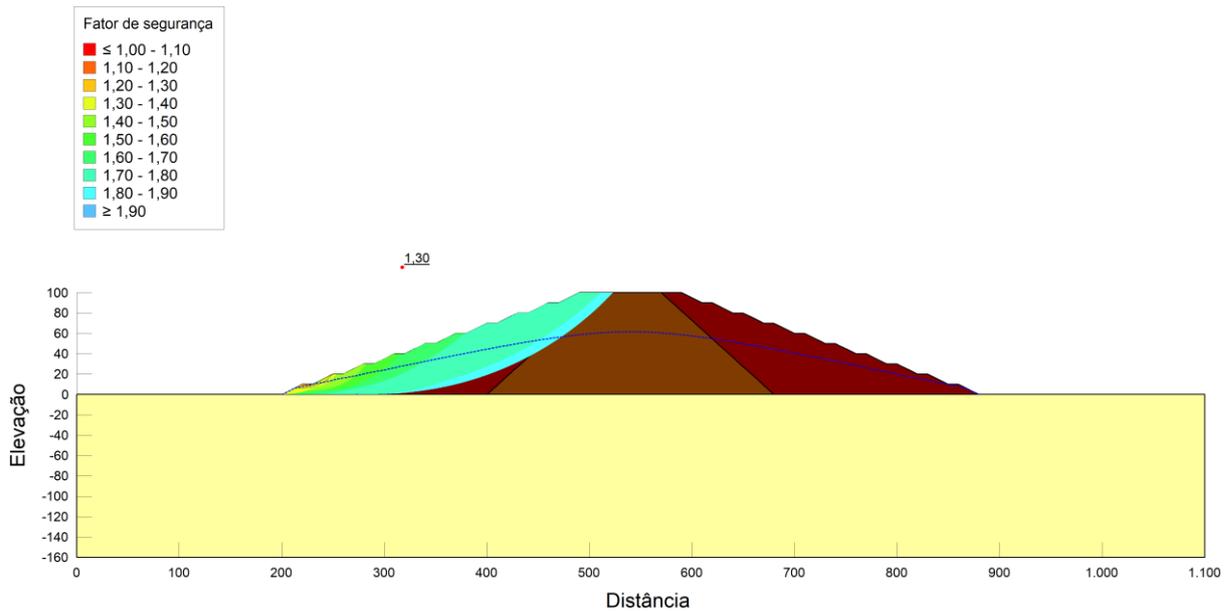
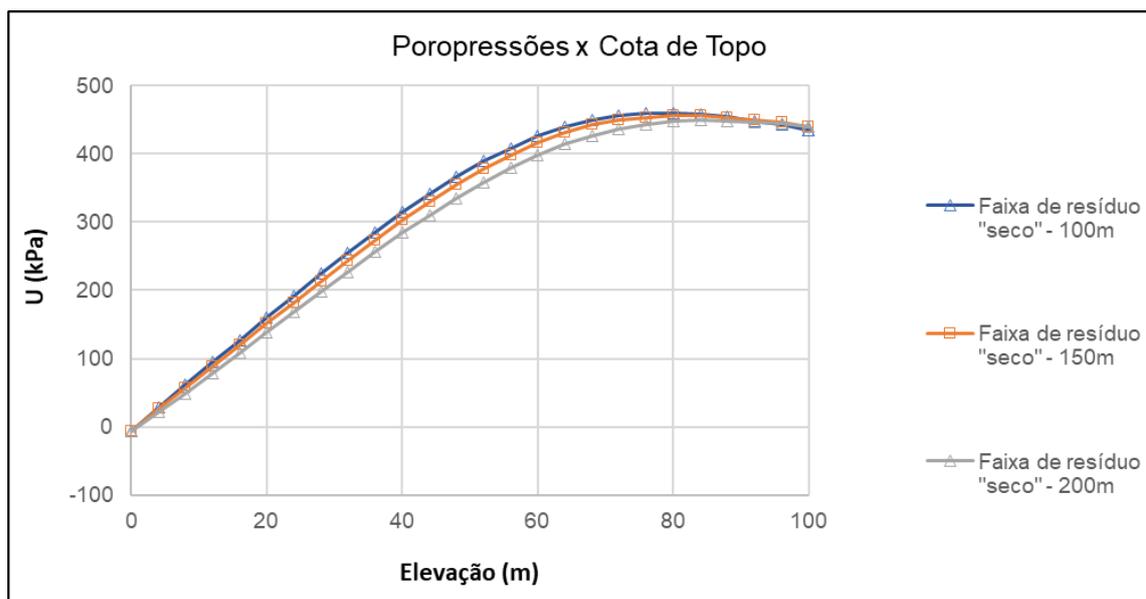


Figura 4-56: Cenário III.3 – Análise de Estabilidade – (razão 2,0H:1,0V)



Embora a definição de zonas para disposição de resíduos segundo suas condições de umidade apresente vantagens do ponto de estabilidade, evidenciado no aumento gradual do fator de segurança indicado pelas análises apresentadas, com base nos resultados obtidos nos três diferentes cenários, é possível observar que a construção da pilha com zoneamento do depósito segundo o teor de umidade de compactação do resíduo resultou em taxas de geração de poropressão próximas para ambos os cenários considerados no estudo, em que a faixa de resíduo “seco” apresentou base variando entre 100, 150 e 200 m (Figura 4-57).

Figura 4-57: Poropressões no centro da base da pilha ao final de construção x Cota de Topo



Com base nos cenários estudados, o zoneamento da pilha, com a locação de resíduos com menor teor de umidade durante a compactação e mais bem compactados (GC de 95%), não se mostraram suficientes para a melhoria expressiva do fator de segurança do maciço, evidenciado pelo baixo incremento do fator de segurança, tampouco em relação ao controle das poropressões geradas na pilha ao longo de sua construção.

Destaca-se que as normas brasileiras ABNT NBR 13.028/2017 – “Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos” e ABNT NBR 13.029/2017 – “Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha” estabelecem os limites mínimos de fator de segurança para barragens e pilhas de estéril, respectivamente. Uma vez que a pilha de resíduo filtrado não se enquadra nas estruturas abordadas nas normas supracitadas, sua consulta foi tomada apenas como referencial para a indicação de um fator de segurança mínimo admissível para estruturas geotécnicas dessa natureza, considerado adequado nesse estudo como $FS \geq 1,5$, independentemente do tipo de carregamento (drenado ou não drenado).

Análise III.4 – Influência do Tapete Drenante

Como alternativa à estabilização da pilha analisada foi considerada a implantação de um sistema de drenagem interna, composto por material drenante de permeabilidade constante $ksat = 0,001 \text{ m}^3/\text{s}$. Para a definição da geometria do dreno, foi tomada a geometria analisada no Cenário III.1, a saber, com a base da faixa em resíduo seco igual a 100 m de comprimento. A vazão percolada foi tomada no estágio cujo maior valor em módulo foi observado, e corresponde ao final de construção, quando a pilha atinge a cota 100,0 m (Figura 4-58). As vazões correspondentes são apresentadas na Tabela 4.20 e o dimensionamento do dreno é indicado na Tabela 4.21.

Figura 4-58: Cenário III.4 – Vazão Percolada – Final de Construção sem Drenagem Interna – (razão 1,0H:1,0V)

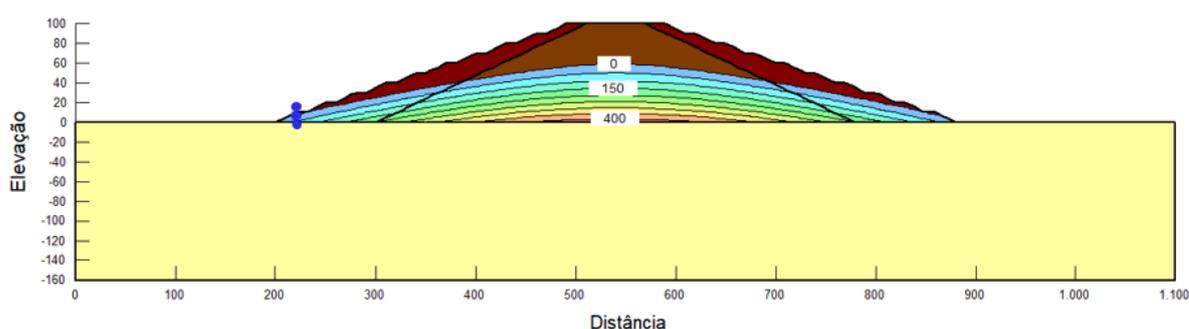


Tabela 4.20: Vazão de Projeto

Nó - El. (m)	Vazão Nodal ($m^3/s/m^2$)
0,00	$2,51 \times 10^{-08}$
3,96	$2,62 \times 10^{-08}$
7,96	$2,87 \times 10^{-08}$
10,00	$1,75 \times 10^{-08}$
Vazão Total – Q_{total} ($m^3/s/m^2$)	$9,76 \times 10^{-08}$
Fator de Segurança - FS	50
Vazão de Projeto - Q_{proj} ($m^3/s/m^2$)	$4,88 \times 10^{-06}$

Tabela 4.21: Dimensionamento do Dreno

Permeabilidade - k (m^3/s)	$1,00 \times 10^{-03}$
Gradiente - i (m/m)	$3,00 \times 10^{-02}$
Área – A (m^2)	0,16
Área de Projeto - A_{proj} (m^2)	0,75

A partir da definição da geometria do sistema de drenagem interna, considerada válida no estado plano de deformações, foram realizadas as análises de construção da pilha para avaliação das poropressões construtivas desenvolvidas no maciço.

O modelo numérico que simula a construção da pilha zoneada, construída com resíduo “seco” e “úmido” separados em faixas, dotada de sistema de drenagem interna, resultou em poropressões ao estágio de final de construção inferiores às análises avaliadas nos cenários III.1 (435,4 kPa), III.2 (440,4 kPa) e III.3 (440,0 kPa), de modo que as poropressões máximas registradas no interior da pilha foram inferiores a 393,4 kPa, e disciplinadas pelo sistema de drenagem, conforme ilustrado na Figura 4-59. O mapa de r_u encontrado para o Cenário III.4 apresenta valores entre 0 e 0,27 e é apresentado na Figura 4-60.

Figura 4-59: Cenário III.4 – Poropressões ao Final de Construção com Drenagem Interna – (razão 1,0H:1,0V)

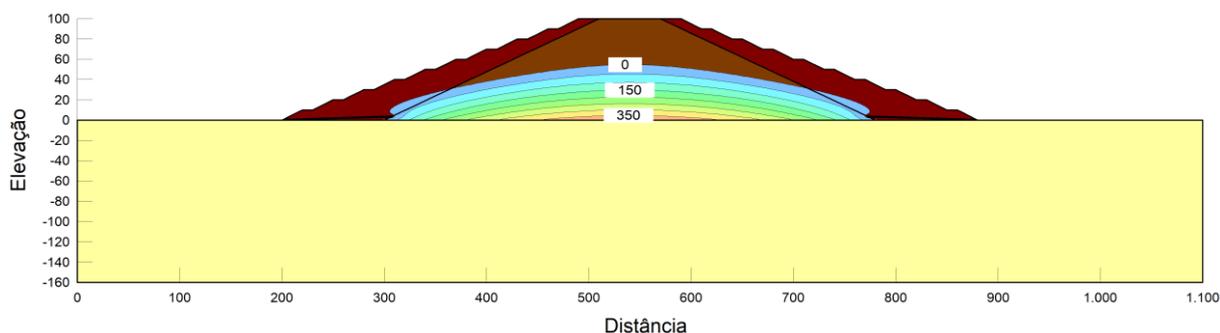
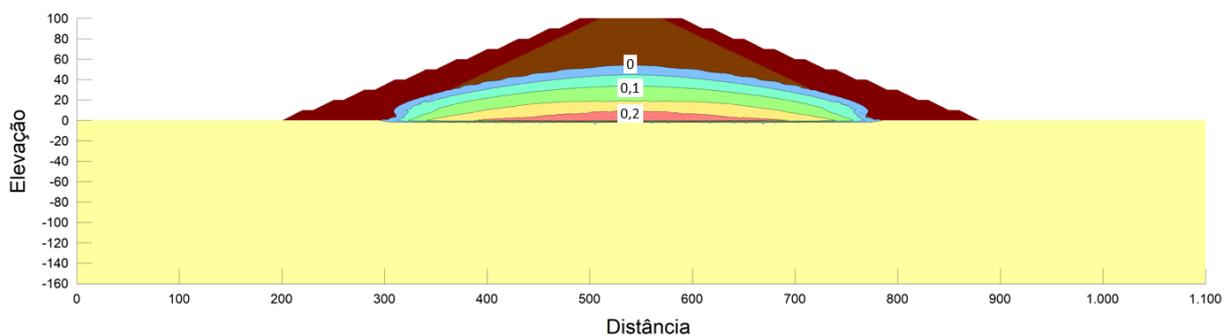


Figura 4-60: Cenário III.4 – Mapa de ru Final de Construção com Drenagem Interna – (razão 1,0H:1,0V)



A Figura 4-61 apresenta a malha MEF com as zonas de plastificação ao final da construção. Adicionalmente, foi realizada análise de estabilidade em que foram consideradas as tensões registradas na malha MEF, e que resultou em fator de segurança (FS) igual a 1,51 (Figura 4-62), evidenciando a efetividade da concepção de um sistema de drenagem interna em projetos de pilha de lama vermelha filtrada por filtros prensa.

Figura 4-61: Cenário III.4 – Plastificação na Malha MEF – Final de Construção – (razão 1,0H:1,0V)

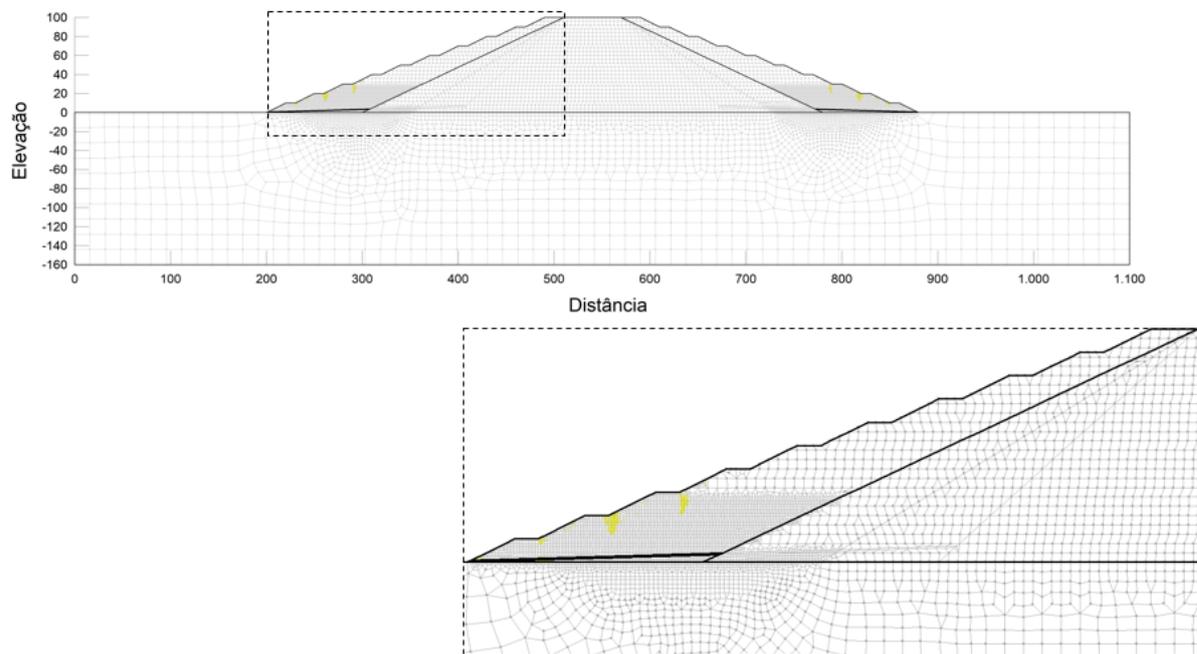
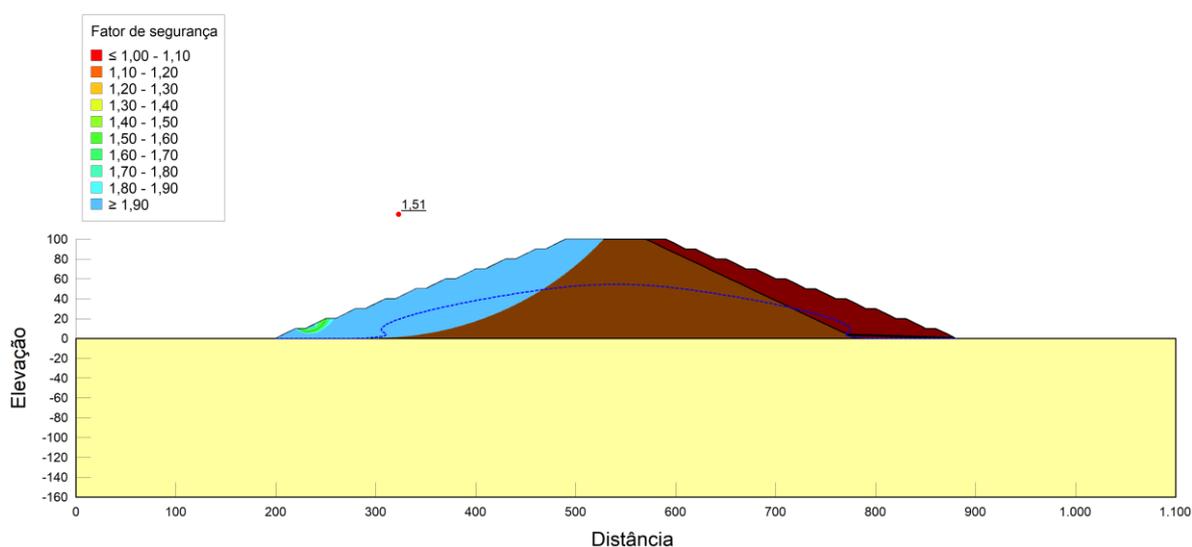


Figura 4-62: Cenário III.4 – Análise de Estabilidade com Drenagem Interna – (razão 1,0H:1,0V)



A partir dos resultados apresentados nesse item conclui-se que o zoneamento da disposição de resíduo com base nos desvios de umidade em relação à umidade ótima de compactação não é suficiente para garantir menores taxas de geração de poropressões na pilha, em especial nos casos em que o tempo de construção da pilha é elevado, caso em que pode haver o estabelecimento de fluxo a partir das camadas superiores em direção à base da pilha. Por outro lado, a existência de sistema de drenagem interna mostrou-se eficiente no controle da geração de poropressão, evidenciado pelo mapa de ru encontrado no Cenário III.4, que partiu de valor nulo na proximidade dos drenos e atingiu 0,27 ao centro da pilha. O sistema de drenagem foi responsável por disciplinar o fluxo e dissipar os excessos de poropressão desenvolvidos no maciço em toda extensão da faixa construída com o resíduo “seco”, reduzindo os valores de r_u desenvolvidos no maciço de modo sistemático, garantindo incremento no fator de segurança encontrado pelas análises de estabilidade realizadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho buscou analisar as poropressões construtivas desenvolvidas no maciço de uma pilha de resíduos do beneficiamento da bauxita para produção de alumina via processo Bayer (lama vermelha) desaguados por filtros prensa. A partir de modelagem computacional foi aplicado um modelo acoplado de deformações e fluxo que visou estimar de forma mais assertiva o comportamento do regime de fluxo e da poropressão no maciço de pilhas desse resíduo filtrado.

5.1 Caracterização Geotécnica do Resíduo

Para a caracterização geotécnica do resíduo filtrado e definição dos parâmetros de resistência, compressibilidade, curva de retenção de umidade e condutividade hidráulica, foi realizada campanha de ensaios de laboratório, em que foram analisados os resíduos provenientes de dois grupos, a saber, o Grupo 1, que consiste em amostras de resíduo desaguado por filtros rotativos à umidade de saída dos filtros prensa, e o Grupo 2 que é composto por amostras de resíduo desaguado por filtros prensa, proveniente de blocos indeformados coletados em pista teste.

Com base na campanha de caracterização do resíduo observou-se um peso específico dos grãos médio de $29,96 \text{ kN/m}^3$ para o Grupo 1 e $30,63 \text{ kN/m}^3$ para o Grupo 2, coerentes com a faixa reportada na literatura, variando entre 27 e 37 kN/m^3 . A classificação granulométrica do resíduo filtrado é de silte argiloso com areia fina, cuja fração argila foi considerada como inativa.

Os ensaios de compactação de Proctor Normal realizados indicaram em média massa específica aparente seca máxima igual a $15,17 \text{ kN/m}^3$ e umidade ótima igual a 27,3 % para o Grupo 1, e para o Grupo 2, massa específica aparente seca máxima de $16,17 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 26,52 %. De modo geral, todos os ensaios de compactação Proctor Normal realizados no Grupo 2 indicaram valores superiores para a massa específica aparente seca máxima quando comparados às amostras do Grupo 1. Além da própria metodologia de filtragem, cita-se como possíveis fatores influentes nas curvas de compactação as atividades de compactação às quais foram submetidas as amostras do Grupo 2. Adicionalmente, o efeito do tempo de exposição à radiação do resíduo nas áreas de retomada e área teste após sua compactação representa uma secagem prévia ao ensaio de compactação, que pode influenciar as curvas de compactação.

A condutividade hidráulica do resíduo foi definida com base nos ensaios de permeabilidade de carga variável, e indicaram resultados de condutividade hidráulica média de $2,48 \times 10^{-05}$ cm/s para o resíduo do Grupo 1 e $2,86 \times 10^{-06}$ cm/s para o resíduo do Grupo 2. Por sua vez, os ensaios de adensamento oedométrico com medida de permeabilidade indicaram redução nessa grandeza com o aumento da tensão confinante, em que foram definidas as curvas $k = 7,00 \times 10^{-06} \cdot \sigma_{v0}^{-0,614}$ para o resíduo do Grupo 1 e $k = 5,12 \times 10^{-06} \cdot \sigma_{v0}^{-0,431}$ para o resíduo do Grupo 2, para qual foi observada maior dispersão para tensões elevadas.

Ainda com relação ao ensaio de adensamento unidimensional, os valores encontrados para o índice de compressão (c_c) variaram entre 0,30 e 0,65 para o Grupo 1, superior à faixa encontrada para o Grupo 2, que variou entre 0,12 e 0,28. Além disso, a faixa definida para o índice de recompressão (c_r) das amostras do Grupo 1 variou entre 0,03 a 0,06, indicando valores inferiores àqueles encontrados para o Grupo 2, entre 0,04 e 0,11. O coeficiente de adensamento (c_v) mostrou-se coerente entre os grupos, variando entre $3,81 \times 10^{-03}$ cm²/s e $6,73 \times 10^{-02}$ cm²/s, próximos aos valores reportados na literatura.

Para a avaliação dos parâmetros de resistência do resíduo foram realizados ensaios de compressão triaxial CIUsat, CIUunsat, CIDsat, UUunsat. Os parâmetros de resistência médios indicados pelos diferentes ensaios no resíduo filtrado do Grupo 1 mostraram intercepto de coesão (c) variando entre 8,8 kPa e 26,0 kPa, em termos de tensões totais, e entre 6,0 kPa e 7,0 kPa em termos de tensões efetivas, enquanto o ângulo de atrito interno (φ) esteve presente na faixa entre 16° e 29°, em termos de tensões totais, e 31° e 32° em termos de tensões efetivas. O resíduo do Grupo 2, por sua vez, apresentou intercepto de coesão (c) entre 5,9 kPa e 69 kPa, e ângulo de atrito interno (φ) variando entre 29° a 38°, em termos de tensões totais. A envoltória de ruptura, em termos de tensões efetivas, para o Grupo 2 indicou ângulo de atrito interno (φ') igual a 37°, partindo da origem.

A partir da análise dos resultados do ensaio CIUsat realizado nas amostras do Grupo 1, foi possível estimar a razão de resistência não drenada do resíduo, S_u/σ'_{v0} , que forneceu valores médios iguais a 0,342 para as amostras de resíduo moldadas com 90% de GC em relação ao Proctor Normal, e 0,479 para as amostras de resíduo preparadas com 95% de GC.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados nas amostras de resíduo do Grupo 1 indicaram parâmetros de resistência $c' = 16$ kPa e $\varphi' = 33^\circ$ para as amostras ensaiadas com plano de ruptura paralelo à direção das camadas de compactação, e $c' = 7$ kPa e $\varphi' = 37^\circ$ para as amostras rompidas perpendicularmente às camadas de compactação. Os

parâmetros de resistência efetivos obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto em ambas as direções apresentaram resultados dentro da faixa indicada na literatura.

Os ensaios de *Direct Simple Shear* (cisalhamento simples), realizados com tensão confinante igual a 300 kPa, resultaram numa resistência não drenada média igual a $S_u = 97,6$ kPa.

A partir dos resultados dos ensaios de compressão triaxial PN foi possível estabelecer o intervalo para a taxa de geração de poropressão (r_u) que varia entre 0,03 e 0,51. Segundo os resultados dos ensaios realizados para as amostras do Grupo 1, observou-se relação diretamente proporcional entre o parâmetro de geração de poropressão e o teor de umidade na preparação das amostras.

A partir da avaliação dos dados de caracterização do resíduo de obtenção de alumina via processo Bayer desaguado por filtros prensa recomenda-se que sejam realizados ao menos os seguintes ensaios para aplicação o modelo numérico bidimensional (MEF) de análises acopladas de deformação e fluxo:

- Caracterização física (teor de umidade, peso específico, granulometria completa, determinação da Massa Específica dos Grãos e limites de Liquidez e Plasticidade);
- Ensaio de compactação;
- Permeabilidade de carga variável;
- Adensamento oedométrico;
- Ensaio de compressão triaxial CIUsat e CIDsat;
- Ensaio de compressão triaxial PN;
- Ensaio de papel filtro para determinação da curva característica de retenção de água.

5.2 Monitoramento do aterro experimental

A instrumentação instalada no aterro teste após o término de sua construção registrou leituras no período entre 05 de junho a 26 de setembro de 2019. A instrumentação composta por piezômetros elétricos de corda vibrante com pedra porosa de alta pressão de borbulhamento (PZ-05 e PZ-07) e pedra porosa de baixa pressão de borbulhamento (PZ-06 e PZ-08) foram capazes de monitorar as poropressões desenvolvidas no resíduo do beneficiamento da bauxita para produção de alumina, seja ele desaguado por filtros prensa (material do aterro) ou ainda desaguado por filtros rotativos (fundação do aterro teste).

A partir de dados de monitoramento observou-se leituras de sucção no resíduo desaguado por filtros prensa variando entre -12,19 kPa a -15,11 kPa, reportadas pelo instrumento PZ-05,

instalado a aproximadamente 1,5 m de profundidade. Os instrumentos PZ-06 e PZ-08, instalados no resíduo desaguado por filtros rotativos, a uma profundidade de aproximadamente 7,0 m, indicaram poropressões positivas em função da metodologia de desaguamento empregada, a saber, por filtros rotativos. As leituras obtidas nesses instrumentos variaram entre 31,01 kPa a 45,25 kPa. O piezômetro PZ-07, diferentemente dos demais, registrou leituras próximas de nulo, entre 0,2 kPa e 0,74 kPa, sugerindo anomalia em seu funcionamento, seja por dessaturação da pedra porosa, por erro de instalação ou falha em sua vedação. De forma geral, os instrumentos instalados no aterro teste indicaram dissipação de excessos de poropressão durante todo o período de monitoramento.

5.3 Modelagem Numérica

Os resultados dos ensaios de laboratório realizados no resíduo, bem como os dados de monitoramento do aterro teste foram utilizados para aplicação e calibração do modelo acoplado.

As simulações dos ensaios de compressão triaxial PN foram utilizadas para verificação da aderência do modelo numérico. Para a verificação da aderência do modelo, as tensões principais maior e menor, aplicadas durante o ensaio foram reproduzidas no modelo numérico. Os resultados de geração de poropressões no resíduo não saturado, evidenciados por meio das leituras de poropressão *versus* tensão vertical efetiva, indicaram que o modelo é capaz de reproduzir os efeitos acoplados observados no ensaio satisfatoriamente.

Durante a etapa de calibração do modelo, buscou-se avaliar a aderência dos resultados indicados pelo modelo numérico aos dados de monitoramento do aterro teste registrados pelos piezômetros elétricos de corda vibrante PZ-05, PZ-06 e PZ-08. Uma vez que o aterro não contava com instrumentação para monitoramento das poropressões durante sua etapa de carregamento, ou construção, a geração de poropressões não foi registrada pela instrumentação de campo. Contudo, com base nos dados de monitoramento obtidos nos piezômetros elétricos, foi possível observar a dissipação dos excessos de poropressão desenvolvidos no aterro durante sua etapa de construção, com exceção apenas das leituras indicadas pelo instrumento PZ-07. Os resultados numéricos do modelo acoplado simularam tanto a etapa de carregamento, com geração de excessos de poropressão no resíduo filtrado, como o efeito de dissipação desses excessos, após o término de sua construção. Os resultados foram comparados para efeito de calibração do modelo.

Após a etapa de calibração, o modelo numérico foi utilizado para a análise de uma geometria hipotética de pilha, avaliando a influência de diferentes condições de umidade de compactação, tempos de construção da pilha, distribuições geométricas dos resíduos e presença de drenagem interna nas poropressões construtivas desenvolvidas no maciço. Em relação à aplicação do modelo a uma geometria de pilha hipotética, as principais conclusões obtidas foram:

- Na análise com tempo de construção (T_c) igual a 1 ano, a poropressão atingiu valor máximo igual a 283,48 kPa ($\Delta u = 340,79$ kPa) quando completados 6 anos desde o início de sua construção. Esse cenário representa aquele com a taxa de geração de poropressões mais elevada, e tempo mais curto para a ocorrência do pico das poropressões;
- A curva correspondente ao T_c igual a 5 indicou pico das poropressões 7 anos após o início da construção, quando registrou 367,77 kPa ($\Delta u = 416,55$ kPa);
- A análise com T_c igual a 10 anos teve o pico das poropressões registradas 11 anos após o início da construção registrando poropressões iguais a 397,65 kPa ($\Delta u = 446,42$ kPa) na base da pilha;
- Seguindo a mesma tendência, a análise com T_c igual a 20 anos indicou poropressão de pico igual a 372,72 kPa ($\Delta u = 439,92$ kPa) em 19,2 anos desde o início da construção.
- Com base nessas informações conclui que, o cenário com taxa de geração de poropressão mais elevado corresponde ao cenário com tempo de construção mais curto ($T_c = 1$ ano), de modo que, à medida que o tempo de construção é aumentado, ocorre a redução da taxa na geração das poropressões. Além disso, as poropressões de pico tendem a aproximar do período de final da construção à medida que se diminui a velocidade de construção, convergindo a um valor da ordem de 460 kPa para a geometria e cenários avaliados;
- Quanto mais rápida é a taxa de carregamento, ou seja, a construção da pilha, menor a influência dos fluxos horizontal e vertical, esse último estabelecido a partir das camadas superiores em direção à base da pilha, tendendo a aproximar-se aos resultados do ensaio triaxial PN;
- De modo geral, o modelo numérico indicou a geração de poropressões, na pilha hipotética, de ordem superior àquelas encontradas no ensaio triaxial PN;

- No longo prazo, as poropressões desenvolvidas no maciço da pilha decorrentes de sua construção tendem a convergir, independentemente do tempo de construção considerado;
- A classificação do resíduo em classes segundo suas características observadas em rotinas operacionais em termos de teor de umidade de compactação e grau de compactação, aqui apresentadas como “resíduo seco” e “resíduo úmido”, mostraram-se relevantes, em especial, para o agrupamento de amostras de resíduo em relação ao seu comportamento geomecânico, tanto em termos de resistência ao cisalhamento e deformabilidade, como à geração de poropressões durante o carregamento;
- As poropressões construtivas desenvolvidas no maciço da pilha, na proximidade da fundação, ao longo do eixo central, indicaram valores iniciais de sucção mátrica. À medida que ocorreram os estágios de carregamento, ou construção de camadas sobrepostas, foi observada a diminuição dos valores de sucção até atingir valores máximos da ordem de 400 kPa. A distribuição espacial de r_u no material de aterro variou de 0 a 0,39;
- O pico das poropressões registradas em um nó da base, no alinhamento do eixo central do modelo numérico que simula a construção de uma pilha executada com o resíduo “úmido” ocorreu quando seu topo atingiu a cota El. 72,00 m;
- Em relação ao zoneamento da pilha segundo as condições de umidade e compactação do resíduo, o estabelecimento de uma faixa externa executada em resíduo “seco” mostrou-se efetivo para o aumento do Fator de Segurança, embora pouco eficaz no controle das poropressões desenvolvidas na pilha. Para o Cenário III.1 que contou com 100 m de base da faixa externa o Fator de Segurança encontrado foi de $FS = 1,16$. No Cenário III.2, faixa externa com 150 m de base, o Fator de Segurança encontrado foi de $FS = 1,25$, enquanto que ao Cenário III.3, faixa externa com 200 m de base, correspondeu um $FS = 1,30$;
- As análises apresentadas nos cenários investigados apontaram para a necessidade de adoção de um sistema de drenagem interna em projetos de pilhas executadas com resíduo proveniente do processamento da Alumina, desaguado por filtros prensa. O sistema de drenagem proposto no Cenário III.4, teve como objetivo avaliar conceitualmente a influência de um tapete drenante construído nas faixas externas à pilha, com a função de direcionar o fluxo estabelecido no maciço e dissipar parte dos excessos de poropressões nele observados. Destaca-se que o conceito de tapete drenante não deve ser adotado como solução generalizada para projetos de tapetes drenantes em pilhas de resíduo do beneficiamento de bauxita para produção de

alumina desaguado por filtros prensa, de modo que soluções sejam desenvolvidas considerando os aspectos individuais de cada projeto;

- No Cenário III.4 foram observadas poropressões construtivas inferiores às análises avaliadas nos cenários anteriores, de modo que as poropressões máximas registradas no interior da pilha foram inferiores a 393,4 kPa, sendo conduzidas pelo sistema de drenagem. O mapa de r_u encontrado para o Cenário III.4 apresentou valores entre 0 e 0,27. A análise de estabilidade realizada nesse cenário, para a geometria e poropressões de final de construção, resultou em Fator de Segurança igual a $FS = 1,51$, evidenciando a efetividade da concepção de um sistema de drenagem interna em projetos de pilha de lama vermelha filtrada.

Conforme visto nas análises numéricas de construção da pilha hipotética, as poropressões desenvolvidas na base da pilha, ao longo do eixo central, são superiores àquelas inicialmente estimadas pelo ensaio PN, tanto para a condição de compactação do resíduo “seco” como “úmido”. Entende-se que o fato decorre do fenômeno de carregamento acoplado observado na construção de uma pilha diferenciar-se das condições observadas durante o ensaio triaxial PN, ou seja, a construção da pilha hipotética é suficientemente lenta para haver a migração da água dos interstícios do resíduo entre as camadas de construção, inicialmente compactado em estado não saturado, tendendo ao equilíbrio das poropressões no maciço. Dessa forma, o mapa de r_u observado na construção da pilha não se deve única e exclusivamente aos acréscimos de poropressões decorrentes da construção do maciço, mas sofre influência das camadas em sua vizinhança, sendo portanto, resultante entre as poropressões ditas construtivas, somadas às poropressões provenientes do fluxo estabelecido em direção à base da pilha a partir da sobreposição das camadas de compactação, descontando a parcela de fluxo decorrente da drenagem própria do elemento analisado. Por isso, esforços devem ser feitos para a construção de aterros experimentais bem monitorados durante as fases iniciais de projetos, os quais subsidiarão hipóteses mais realistas aos projetos de pilhas de lama vermelha filtrada.

Isso posto, e com base nos resultados obtidos a partir das análises numéricas, conclui-se que as poropressões desenvolvidas ao longo da construção de pilhas de resíduo de lama vermelha desaguada por filtros prensa demandam a concepção de sistema de drenagem interna.

5.4 Recomendações para Continuidade da Pesquisa

Alguns aspectos não explorados nesse trabalho poderão contribuir com a maior assertividade na estimativa das poropressões em pilhas de resíduo filtrado, garantindo maior confiabilidade

à condição de segurança dessas estruturas. Sugere-se que esses aspectos sejam objeto de estudos futuros, e fazem parte das recomendações:

- Avaliar outros instrumentos para monitoramento das poropressões construtivas, em especial instrumentos que sejam capazes de aferir a sucção em meios alcalinos de forma confiável e eficaz;
- Instrumentar uma pilha ao longo de sua construção, a fim de ratificar a geração de poropressões durante sua fase de enchimento;
- Realizar ensaios não saturados com controle da sucção para obtenção do parâmetro de resistência não saturado ϕ_B , e compará-lo a valores estimados a partir da curva característica;
- Avaliar a influência de fatores externos nas poropressões desenvolvidas no aterro tais como recarga superficial, temperatura, pluviometria, escoamento superficial, umidade relativa do ar, velocidade do vento, entre outras;
- Tendo em vista a notável importância da construção de um sistema de drenagem interna nessas pilhas, recomenda-se como estudo futuro a análise de potencial de colmatação e deterioração causados pela percolação de efluente do processo Bayer em materiais granulares, analisando possíveis reações químicas com os agregados, e ainda da influência do pH na aglomeração ou dispersão dos sólidos.

6 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 13.028. Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR 13.029. Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2017.

ABNT, NBR 7181. Solo: Determinação da granulometria. Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1988.

ABNT, NBR 7182. Solo: determinação da compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1988.

AGRAWAL, A.; SAHU, K. K. & PANDEY, B. D. Solid waste management in non-ferrous industries in India. *Resources, conservation and recycling*, v. 42, n. 2, p. 99-120, 2004.

ALEVA, G. J. J. Essential differences between the bauxite deposits along the southern and northern edges of the Guiana Shield, South America. *Economic Geology*, v. 76, n. 5, p. 1142-1152, 1981.

ALMEIDA, E. B. Geology of the bauxite deposits of the Poços de Caldas District, State of Minas Gerais. Ph.D.Thesis, Stanford University, p 256, 1977.

ANJOS, F. V. & SILVA, J. B. As Usinas de Produção de Alumínio da ALCAN no Brasil: Parte 1: Processo Bayer para a Produção de Alumina. Parte 2: O Processo Eletrolítico para a Produção de Alumínio - Public. da ALCAN Alumínio do Brasil, 1983.

ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T. & NAVARRO, G. R. B. Caracterização da lama vermelha brasileira (resíduo do refino da bauxita) e avaliação de suas propriedades para futuras aplicações. *In International Workshop Advances in Cleaner Production (Vol. 3)*, 2011.

ARSLAN, S.; UCBEYIAY, H.; CELIKEL, B.; BAYGUL, M.; AVCU, S. & DEMIR, G. K. ETI Aluminium red mud characteristics and evaluation of dewatering performance. In BR2015 – Bauxite Residue Valorisation and Best Practices Conference, Leuven. p. 5-7, 2015.

AUTHIER-MARTIN, M.; FORTÉ, G.; OSTAP, S. & SEE, J. The Mineralogy of Bauxite for Producing Smelter-Grade Alumina. *JOM*, v. 53, n. 12, p. 36-40, 2001.

ARRUDA FALCÃO, A. Análise Química de Resíduos Sólidos para Estudos Agroambientais, in Instituto de Química. Universidade Estadual de Campinas: Campinas. p. 97, 2005.

ASTM, D. 3. 9. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. D3080/D3080M, 2011.

ATKINSON, J.H. & BRANSBY. The mechanics of soils: An introduction to Critical State soil Mechanics, 1978.

ÁVILA, J. P. Discussões sobre as hipóteses de pressões neutras em análises de estabilidade de barragens de terra. (Dissertação de mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1980.

ÁVILA, J.P. Disposal Methods for Fine Tailings. Proceedings of the 19th International Symposium of ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Belém, PA, Brasil, 2012.

BACH, M. & WESTON, V. Red Mud Filtration Test Results using AFP. IVTM Automatic Filter Press, Bauxite Residue Seminar 2011 – ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Travaux Vol. 36 n° 40, Goa, Índia. p. 167-175, 2011.

BÁRDOSSY, G. Karst Bauxites. Bauxite deposits on carbonate rocks. Amsterdam, Elsevier Developments in Economic Geology 17, p.441, 1982.

BÁRDOSSY, G. Carboniferous to Jurassic bauxite deposits as paleoclimatic and paleogeographic indicators. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 17, p. 283–293, 1994.

BÁRDOSSY, G. & ALEVA, G. J. J. Lateritic bauxites. Amsterdam, Elsevier, Developments in Economic Geology 27, p. 624, 1990.

BARRAND, P.; GADEAU, R. & DUMAS, A. Enciclopedia del Aluminio: Produccion del Aluminio. v. 1.España: Ediciones URMO, 1967, 300 p, 1967.

BERMANN, C. Exportação brasileira de produtos intensivos em energia: implicações sociais e ambientais, Fórum Brasileiro de ONG's e Movimentos Sociais para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, Rede Brasileira pela Integração dos Povos (REBRIP), 2002.

BERNELL, L. Determination of pore pressures in earth dams during construction. 6th Congress on Large Dams, New York, United States of America, 21, p. 1171-1177. 1958.

- BIESINGER, M. & SLOTTEE, S. Tailings paste disposal – more than water recovery. *International Mining Supplement, Paste – Tailing Management*. p. 10-12. 2011.
- BIOT, M. A. General Theory of Three-Dimensional Consolidation, *Journal of applied physics*, Columbia University, New York, 12(2), 155-164, 1941.
- BISHOP, A. W. The stability of earth dams. Ph. D Thesis, University of London, 1952.
- BISHOP, A. W. The use of pore-pressure coefficients in practice. *Géotechnique*, 4 (4): p. 148-152, 1954.
- BISHOP, A. W. & MORGENSTERN, N. Stability coefficients for earth slopes. *Géotechnique*, 10 (4): p. 129-150, 1960.
- BJERRUM, L. Theoretical and Experimental Investigations on the Shear Strength of Soils. Publication n° 5, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 1954.
- BJERRUM, L. & LANDVA, A. Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay. *Geotechnique*, 16(1), 1-20, 1966.
- BRITTO, A. M. & GUNN, M. J. Critical state soil mechanics via finite elements. Ellis Harwood Series in Civil Engineering, Wiley, New York. doi: 10.1016/0045-7825(88)90119-3, 1987.
- BROOKS, R.H. & COREY A.T. Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Paper 3*. Colorado State Univ., Fort Collins, CO, USA, 1964.
- BRUNORI, C.; CREMISINI, C.; MASSANISSO, P.; PINTO, V. & TORRICELLI, L. “Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 117, n.1, pp. 55-63, 2005.
- BRUGGEMAN, J. R.; ZANGER, C. N. & BRAHTZ, J. H. A. Notes on Analytical Soil Mechanics. Technical Memorandum n° 592, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo, 1939.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; BARBOSA, M. C.; MENDONÇA, R. M. G.; FARIAS W. M. & CARDOSO F. B. F. Propriedades Químicas, Mineralógicas e Estruturais de Solos Naturais e Compactados. In: : CAMAPUM, C. J.; GITIRANA JR, G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A. & SILVA FILHO, F. C.(Eds). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1 ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1. cap. 3. 39-78p, 2015.

CARVALHO, A. As Bauxitas no Brasil: Síntese de um programa de pesquisa. Tese de Livre Docência. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo. 134p, 1989.

CASAGRANDE, A. & HIRSCHFELD, R. C. “Stress-deformation and strength characteristics of a clay compacted at a constant dry unit weight”, Proc. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, 359-417p, 1960.

CLOUGH, G. W. & SNYDER, J. W. Embankment pore pressures during construction. Technical Report 3-722, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps Of Engineers, Vicksburg, Mississippi, 1966.

COLLAZO, A.; FERNANDEZ, D.; IZQUIRDO, M.; NOVOA, X.R. & PEREZ, C. Evaluation of red mud as surface treatment for carbon steel painting. Process in Organic Coating. 52, 351-358, 2005.

COLLINI, D.; KASWALDER, F.; PARIS, F.; BABINI, E. & PEZZI, A. High Efficiency in Red Mud Filtration with Automatic Filterpress. Bauxite Residue Seminar 2011 – ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Travaux Vol. 36 n° 40, Goa, Índia, 2011. p. 161-166, 2011.

COSTA, A. M. Estudos de tensão deformação para o 3º alteamento da barragem do Itabiruçu. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, NUGEO), Ouro Preto, MG. 77p, 2009.

COSTA, M. L. Alumínio e Bauxita no Brasil. In.: MELFI, A. J.; MISI, A.; CAMPOS, D. A., & CORDANI, U. G. (2016). Recursos Minerais no Brasil. Problemas e Desafios. Academia Brasileira de Ciências. ISBN: 978-85-85761040-0. Rio de Janeiro, RJ, 420p, 2016.

CRUZ, G. S. Bauxita, horizonte nodular e cobertura argilosa da região de Paragominas e Juruti, Estado do Pará. Dissertação de mestrado em geoquímica, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém-PA-Brasil, 2014.

DAVIES, M. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals. Proceedings Tailings and Mine Waste 2011, Vancouver, BC, Canada, 2011.

DE LIMA, M. J.; ZORNBERG, J. G. & PALMEIRA, E. M. Barreiras capilares em coberturas evapotranspirativas. In: : CAMAPUM, C. J.; GITIRANA JR, G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A. & SILVA FILHO, F. C.(Eds). Solos não saturados no contexto geotécnico. 1 ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1. cap. 20. 555-580p, 2015.

- DENNEN, W. H. & NORTON, H. A. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon Basin. *Economic Geology*, 72 (1):82-89p, 1977.
- DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.*, 30(2): 211-223, 1994, doi:10.1029/93WR02676.
- DYVIK, R., BERRE, T., LACASSE, S., & RAADIM, B. Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests. *Geotechnique*, 37(1), 3-10, 1987.
- EVANS, K. The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 316-331, 2016.
- EVANS, K.; NORDHEIM, E. & TSESMELIS, K. Bauxite residue management. Suarez CE (ed) *Light Metals 2012*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, pp 63–66, 2012.
- FENG, Y. & YANG, C. Analysis on physical and mechanical properties of red mud materials and stockpile stability after dilatation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- FERENCZI, P. A. Iron ore, manganese and bauxite deposits of the Northern Territory: Northern Territory Geological Survey, Report B, p. 63–89, 2001.
- FITTON, T. G. & SEDDON, K. D. Paste and thickened tailings – myth busting and clarification. *Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. p. 37-45, 2013.
- FREDLUND, D.G. The emergence of unsaturated soil mechanics. The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture, College Station, Texas A&M University Press, 39 p, 1996.
- FREDLUND, D. G. & XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): p. 521-532, 1994, doi:10.1139/t94-061.
- FREYSSINET, P.; BUTT, C. R. M.; MORRIS, R. C. & PIANTONE, P. Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering. *Economic Geology*, v. 100th Anniversary, p. 681-722, 2005.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. Inventário de Resíduos Sólidos Industriais Ano base 2007, 2016. Minas Gerais. FEAM, 2016. Disponível em http://www.feam.br/images/stories/2018/RESIDUOS/Relat%C3%B3rio_Invent%C3%A1rio_Industria_2018_ano_base_2017.pdf. Acesso em 20 de dezembro de 2016.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. Inventário de resíduos sólidos da mineração: Ano-base 2017, 2018. Belo Horizonte, MG: Feam 47 p. Disponível em: <http://feam.br/declaracoes-ambientais/inventario-de-residuos-solidos-minerarios>.

GORE, M. S.; GILBERT, R. B.; McMILLAN, I. & PARKS, S. L. I. Geotechnical characterization of compacted bauxite residue for use in levees. In: Geo-Chicago, pp. 299-310, 2016.

GANCEV, R. K. Concentração de Bauxita por Flotação Reversa. (Dissertação de mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 92 p, 2009.

GARCIA, M. C. S. Modificação do resíduo de bauxita gerado no processo Bayer por tratamento térmico (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo. 102 p, 2012.

GENÇ-FUHRMAN. H.; TJELL, J. C. & MCCONCHIE, D. Increasing the arsenate adsorption capacity of neutralized red mud (Baouxsol), *Journal of Colloid and Interface Science*, n. 271, pp. 313-320, 2004.

GRAÇA, R. F. P. Avaliação em laboratório do comportamento de barreira capilar com utilização de diferentes tipos de geotêxteis. 173f. Dissertação de Mestrado. UFMG. Belo Horizonte, 2018.

GRÄFE, M.; POWER, G. & KLAUBER, C. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. *Hydrometallurgy*, 2011, doi:10.1016/j.hydromet.2011.02.004.

GRUBB, P. L. C. Genesis of bauxite deposits in the Lower Amazon basin and Guiana coastal plain. *Economic Geology* 74 (4), pp 735-750, 1973.

GUEDES, G. B. & SCHNEIDER, C. Disposição de Rejeitos de Mineração: As opções Tecnológicas para Redução dos Riscos em Barragens. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belém, PA, 2017.

GUIMARÃES, N. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 129 p, 2011.

GUIMARÃES, N. C.; VALADÃO, G. E. & PERES, A. E. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. *Rem: Revista Escola de Minas*, 65(4), 2012.

- HARRASSOWITZ, H. L. Laterit; Material und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung - Berlin : Gebrüder Borntraeger, 1926.
- HEAD, K. H. Manual of soil laboratory testing, Vol III, ELE. International limited. 1986.
- HENKEL, D. J.; SKEMPTON A. W. A landslide at Jackfield. Proceedings, European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm, vol I, p 90, 1955.
- HILF, J. W. Estimating Construction Pore Pressures in Rolled Earth Dams. Proceedings, Second International Conference on Soil Mechanics and Foudation Engineering, Rotterdam, vol 3. p. 234, 1948.
- HILL, V. G. & OSTOJIC, S. The Characteristics and Classification of Bauxites. In: JACOB Jr., L. Bauxite. Proceedings of the 1984 Bauxite Symposium, Los Angeles, California. New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1984, cap. 2, p. 31-48, 1984.
- HIND, R. A.; BHARGAVA, S. K. & GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review, Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, n. 146, pp.359-374, 1999.
- HOSE, H. R. The genesis of bauxites, the ores of aluminium. Proc. Int. Geol. Congress, XXI. Section. Part X VI Copenhagen pp 23-747, 1960.
- HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N. & WAGNER, A. M. Laboratory filter paper suction measurements. GTJODJ, ASTM. Vol. 17(2), 185-194, 1994.
- HYUN, J.; ENDOH, S.; MASUDA, K.; SHIN, H. & OHYA, H. Reduction of chlorine in bauxite residue by fine particle separation, International Journal of Mineral Processing, n. 76, pp. 13-20, 2005.
- KAHANE, R.; NGUYEN, T. & SCHWARZ, N. P. CFD modeling of thickeners at Worsley Alumina Pty Ltd, Applied Matchemtical Modelling, n. 26, pp. 281-296, 2002.
- KERKES, D. J. A Simple Model for Estimating End of Construction Pore Pressures: Part 1 – Foundation Pore Pressures. 19p, 2004.
- KINNARINEN, T.; LUBIENIECKI, B.; HOLLIDAY, L.; HELSTO, J. J.; & HÄKKINEN, A. Enabling safe dry cake disposal of bauxite residue by deliquoring and washing with a membrane filter press. *Waste Management & Research*, 33(3), 258-266, 2015.

- KINNARINEN, T., HUHTANEN, M., HOLLIDAY, L., & HÄKKINEN, A. Challenges related to solute analysis of bauxite residue filter cakes. *Minerals Engineering*, 120, 1-6, 2018.
- KLAUBER, C.; GRÄFE, M. & POWER, G., Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization. *Hydrometallurgy*, 2011, doi:10.1016/j.hydromet.2011.02.007.
- KLEIN C. & HURLBUT JR. C.S. *Manual of Mineralogy*, basado en la obra de Dana, Vol 2, 4ed. Barcelona, Editorial Reverté, 2003.
- KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 32: 2697-2703, 1996, doi:10.1029/96WR01776.
- KOTSCHOUBEY B. Geologia do Alumínio In: Carlos Schobbenhaus e Carlos Eduardo Silva Coelho. (Orgs.). *Principais depósitos minerais do Brasil*, 1. ed. Brasília. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral e Companhia Vale do Rio Doce. v.3, p 599-619, 1988.
- LAMBE, T. W., & WHITMAN, R. V. *Soil mechanics*. Massachusetts Institute of Technology, 553 p, 1969.
- LEE, H. C. & WRAY, W. K. Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable. In *UNSAT'95, Proc...* Paris, 1995. pp. 615-622.
- LELONG, F.; TARDY, Y.; GRANDIM, G.; TRESCASES, J.J. & BOULANGE, B. Pedogenesis, chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. In: Wolf, K.H. (Ed.). *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits.*, Amsterdam. Elsevier. v.3, p 93-173, 1976.
- LI, C. Y. Construction pore pressures in three earth dams. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 2: p. 01-27, 1967.
- LI, L. Y. Properties of red mud tailings produced under varying process conditions. *J. Environmental Engrg.* 124 (3): 254-264, 1998.
- LI, L. Y., & RUTHERFORD, G. K. Effect of bauxite properties on the settling of red mud. *International Journal of Mineral Processing*, 48(3-4), 169-182, 1996.
- LIGOCKI, L. P. Comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una, Pará. *Dissertação de Mestrado* (Departamento de Engenharia Civil – Área de Geotecnia), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 174 p, 2003.

- LIMA, J. S. Simulação numérica do processo de alteamento de áreas de deposição de resíduos pelo método a montante. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 118p, 2008.
- LIU, D. Y., & WU, C. S. Stockpiling and comprehensive utilization of red mud research progress. *Materials*, 5(7), 1232-1246, 2012.
- LIU, Y.; LIN, C. & WU, Y. Characterization of red mud derived from a combined Bayer Process and bauxite calcination method. *Journal of Hazardous materials*, 146(1-2), 255-261, 2007.
- LUMLEY, R.N. Introduction to aluminium metallurgy. In: Lumley R.N. (ed) *Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications*. (pp. 1-18). 1ed. Cornwall, UK: Woodhead Publishing, 2011.
- MANFROI, E.P. Avaliação da Lama Vermelha como material Pozolânico em Substituição ao Cimento para Produção de Argamassas, in Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis. p. 152, 2009.
- MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 3, Rio de Janeiro. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Rio de Janeiro, v2, 373-398p, 1997.
- MARZO, G. R. D. Aplicação do método dos elementos finitos na análise de tensões induzidas em cabos umbilicais (Dissertação de Mestrado), Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 106p, 2010.
- MATZIARIS, V.; VIMALAN, J. Development of a dynamic simple shear apparatus with confining pressure. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, 2019. doi:10.32075/17ECSMGE-2019-0999.
- MAYNE, P. W. A review of undrained strength in direct simple shear. *Soils and foundations*, 25(3), 64-72, 1985.
- McCONCHIE, D.; CLARK, M. & DAVIES-McCONCHIE, F. New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud), In: Proceedings of the 6th international alumina quality workshop, Brisbane, Australia, pp. 327-332, 2002.
- McGUIRE, S. T. Comparison of direct simple shear confinement methods on clay and silt specimens. RHODE ISLAND UNIVERSITY, Kingston, 2011.

- McPHAIL, G.; NOBLE, A.; PAPAGEORGIOU, G. & WILKINSON, D. Development and implementation of thickened tailings discharge at Osborne Mine, Queensland, Australia. International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 2004.
- MELFI, A. J. Brazilian Bauxite Deposits: A review. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas I. (eds). Brazilian Bauxites USP, FAPESP, Paris ORSTOM, Brazilian Bauxites. p 3-22, 1997.
- MELFI, A.J. & CARVALHO, A. Bauxitization of alkaline rocks in Southern Brazil. (kaolinization) Sciences géologiques: Mémoire 73:161-172, 1984.
- MELGAREJO, M. L.; RIDLEY, A. M. & DINEEN, K. A comparison of the soil water characteristic curves for reconstituted and undisturbed samples of a colluvium from Rio de Janeiro. In 3rd UNSAT 2002, Recife, Brasil, pp.313-316, 2002.
- MENDES, R. M.; MARINHO, F. A. M. & FUNARI, A. H. Avaliação do sensor de matriz granular (GMS) para medição de sucção. In UNSAT, 2007. Salvador, BA: UFBA, 2007.
- MOREIRA, E. A. S. Comportamento de uma área de resíduos de bauxite durante a operação de enchimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, 79p, 2015.
- NEWSON, T.; DYER, T.; ADAM, C. & SHARP, S. Effect of structure on the geotechnical properties of bauxite residue. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 132(2), 143-151, 2006.
- NERY, K. D. Caracterização Geotécnica e Compactação de um Resíduo da produção de Alumina (Lama Vermelha) desaguado por Filtro Prensa. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 112p, 2013.
- NEWMAN, P.; WHITE, R. & CADDEN, A. Paste – the future of tailings disposal? Golder Associates, 2001.
- NGUYEN, Q. D. & BOGER, D. V. Application of rheology to solving tailings disposal problems, International journal of Mineral Processing, n. 54, pp. 217-233, 1998.
- ORTIGÃO, J. A. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. 2ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 378 p, 1995.
- OSTAP, S. Control of Silica in the Bayer Process Used for Alumina Production. Canadian Metallurgical Quarterly, 25, p. 101-106, 1986.

PAJOVIĆ, M. Genesis and genetic types of karst bauxites: Iranian Journal of Earth Sciences, v. 1, p. 44–56, 2009.

PALOMINO, T. C. Caracterização geomecânica de um rejeito de mineração de bauxita. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, SP, 129p, 2017.

PARAMGURU, R. K., RATH, P. C., & MISRA, V. N. Trends in red mud utilization—a review. Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., 26(1), 1-29, 2004.

PAREKH, B. & GOLDBERGER, W. An Assessment of Technology for Possible Utilization of Bayer Process Muds. Ohio, United States. EPA-600/2-76-301, 1976.

PATTERSON, S. H. Bauxite reserves and potential aluminium resources of the world. U.S. Geological Survey. Bull. Washington 1228 p.176, 1967.

PATTERSON, S. H. Bauxite and Nonbauxite Aluminum Resources and Production: an Update. In: JACOB Jr., L. Bauxite. Proceedings of the 1984 Bauxite Symposium, Los Angeles, California. New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, cap. 1, p. 3-30, 1984.

PAZ, S. P. A. D. Desenvolvimento e otimização de métodos de controle de qualidade e de processo de beneficiamento para bauxitas gibbsíticas tipo-Paragominas (Tese de Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 202 p, 2016.

PEREIRA, D. A. Previsão de Poropressão Construtiva em Barragens Via Simulação Numérica. (Dissertação de Mestrado), Publicação G.DM-134/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112 p, 2005.

PEREIRA, D. A. & ASSIS, A. P. Previsão de poropressão construtiva em barragens via simulação numérica. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB, Goiânia, GO, 2005.

PINHEIRO, E. R.; FERNANDEZ, O. J. C.; MARGALHO, E. V.; JONAS, P.; & COSTA, J. C. Variações Granulométricas, Mineralógicas e Alcalinas em Resíduos Inertizados da Hydro Alunorte. *HOLOS*, 6, pp. 50-59, 2017.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos, 3ª Edição, Oficina de Textos, São Paulo – SP, 2006.

- POWER, G.; GRÄFE, M.; & KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy*, 108(1-2), 33-45, 2011.
- RAYZMAN, V. L.; PEVZNER, I. Z.; SIZYAKOV, V. M.; NI, L. P.; FILIPOVICH, I. K. & ATURIN, A. V. Extracting Silica and Alumina from Low-Grade Bauxite. *Extractive Metallurgy*, p. 47-50, 2003.
- REDDY, G. & RAO, H. Evaluation of the Compaction Characteristics of Untreated and Treated Red Mud N. pp. 23–32, 2016.
- REDDY, P. S.; REDDY, N. G.; SERJUN, V. Z.; MOHANTY, B.; DAS, S. K.; REDDY, K. & RAO, H. Properties and assessment of applications of red mud (bauxite residue): current status and research needs. *Waste and Biomass Valorization*. Springer Nature B.V, 2020, doi: 10.1007/s12649-020-01089-z
- RETALLAK, G. J. Laterization and bauxitization events. *Economic Geology*, v. 105, p. 655–667, 2010.
- RITCEY, G.M. *Tailings Management: Problems and Solutions in the Mining Industry*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers, B.U, 1989.
- RIVAS MERCURY, J. M.; GALDINO, L. G.; VASCONCELOS, N. S. L. S.; PAIVA, A. E. M.; CABRAL, A. A. & ANGÉLICA, R. S. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. *Revista Matéria*, 15(3), p. 445-460, 2010.
- ROSCOE, K. H.; SCHOFIELD, A. N. & WROTH C. P. On the Yielding of Soils. *Géotechnique*, 8, 22-53, 1958.
- ROUT, S. K.; SAHOO, T. & DAS, S. K. Design of tailing dam using red mud. *Central European, J. Engrg.* 3(2): 316-328, 2013.
- RUBINOS, D.; SPAGNOLI, G. & BARRAL, M. T. Assessment of bauxite refining residue (red mud) as a liner for waste disposal facilities. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 29(6): 433-452, 2015.
- RUFENACHT, A. Pore pressure assumptions for stability studies of earth dams. *Proceedings, Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam*, vol 3. pp 230-240, 1948.
- SANTORA, L.; CASTALDI, P. & MELIS, P. Evaluation of the interaction mechanisms between red muds and heavy metals, *Journal of Hazardous Materials*, 2006.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia das Argilas - vol 1, 2a ed., Ed. Edgard Blücher Ltda, 1989.

SANTOS, W. M. Mineralogia e geoquímica da bauxita derivada de anortosito, Barro Alto – GO. Dissertação de Mestrado em Geologia - Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Geociências, Brasília-DF. p 186, 2011.

SEGERLIND, L. J. Applied Finite Element Analysis. New York-London-Sydney-Toronto, John Wiley & Sons 1976. XIII, 422 S, 1976.

SEKI, K. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 4: 407-437, 2007, doi:10.5194/hessd-4-407-2007.

SHERARD, J.L., and others. Earth and Earth-rock Dams. Engineering Problems of Design and Construction. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1963.

SIGOLO, J.B. Geologia dos depósitos residuais bauxíticos de Lavrinhas, SP e sua viabilidade econômica. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências. da Universidade de São Paulo, 190p, 1979.

SILVA, J. P. S. Avaliação da influência do regime de fluxo no comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito alteada pelo método de montante. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 159p, 2014.

SILVA, S.A. Critérios de projeto de sistemas de disposição em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 172p, 2016.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M. & DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. Revista Matéria, 12(2), 322-338, 2007.

SINGH, D. N. & SREEDEEP, S. Critical review of the methodologies employed for soil suction measurement. International Journal of Geomechanics. 6p.April 2011, 2011.

SINGH, M.; UPADHAYAY, S. N. & PRASAD, P. M. Preparation of iron rich cements using red mud, Cement and Concrete Research, v. 27, n 7, pp. 1037-1046, 1997.

SKEMPTON, A. W. The effective stresses in saturated clays strained at constant volume.

Proceedings, Seventh International Congress of Applied Mechanics, vol I, pp. 378-392, 1948.

SKEMPTON, A. W. The colloidal "Activity" of clays. In: International Conference on Soilmechanics and Foundation Engineering, 3., Zurich. p.57-61, 1953.

SKEMPTON, A. W. The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique*, 4 (2): p 143-147, 1954.

SKEMPTON, A. W.; BISHOP, A. W. The gain in stability due to pore pressure dissipation in a soft clay foundation. Transactions, Fifth International Congress on Large Dams, Paris, vol I, Q 16, R57, 1955.

SMITH, P. The Processing of high sílica bauxites – Review of existing and potential processes. *Hydrometallurgy*, 98 p. 162-176, 2009.

SUTAR, H.; MISHRA, S. C.; SAHOO, S. K. & MAHARANA, H. S. Progress of red mud utilization: an overview. *Chemical Science International Journal*, pp. 255-279, 2014.

TAN, R. & KHOO, H. H. An LCA study of a primary aluminum supply chain, *Journal of Cleaner Production*, n.13, pp. 617-618, 2005.

USGS - U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2018: U.S. Geological Survey, 200 p., 2018, <https://doi.org/10.3133/70194932>.

VADÁSZ, E. Bauxite Geology. Akadémiai Kiadó. Budapest p 127, 1951.

VALETON, L. Bauxites - Developments in soil Science 1, Netherlands, Elsevier. 226p, 1972.

VALETON, L.; BEISSNER, H. & CARVALHO, A. The Tertiary bauxite belt on tectonic uplift areas in the Serra da Mantiqueira, South-East Brazil. In: Contributions to Sedimentology. H. Fuchtbauer, A. Lisitzin, J. D. Milliman and E. Seibold (eds.) E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p 1-99, 1991.

VAN DEURSEN, C. M. Métodos de Desaguamento e Disposição de Rejeito da Bauxita: Estudo de Caso e Avaliação Econômica. (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo Universidade de São Paulo, 127 p, 2016.

VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898, 1980.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo. 509 p, 1977.

VARAJÃO, C.A.C. Estudo comparativo das jazidas de bauxitas do Quadrilátero Ferrífero, MG. Micromorfologia, geoquímica, geomorfologia e sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, p. 213, 1988.

VICK, S. G. Planning, design and analysis of tailings dams. Nova York: John Wiley. p. 382, 1983.

VILLAR, L.F.S. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. (Tese de Doutorado). Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 485 p, 2002.

WANG, S.; BOYJOO, Y.; CHOUEIB, A. & ZHU, Z. H. Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud, *Water Research*, n 39, pp. 129-138, 2005.

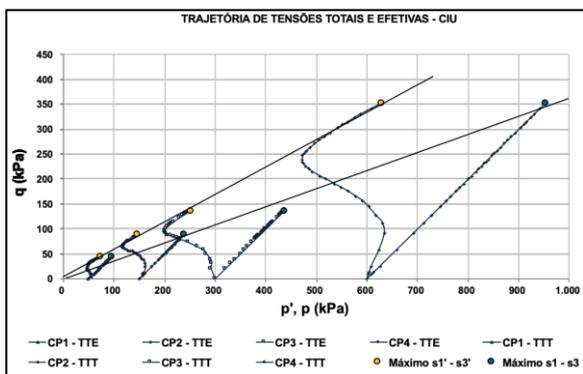
WORLD ALUMINIUM. Bauxite Residue Management: Best Practice, International Aluminium Institute. 31 p. 2015.

WORLD ALUMINIUM. Opportunities for use of bauxite residue in supplementary cementitious materials, International Aluminium Institute. 63 p. 2020.

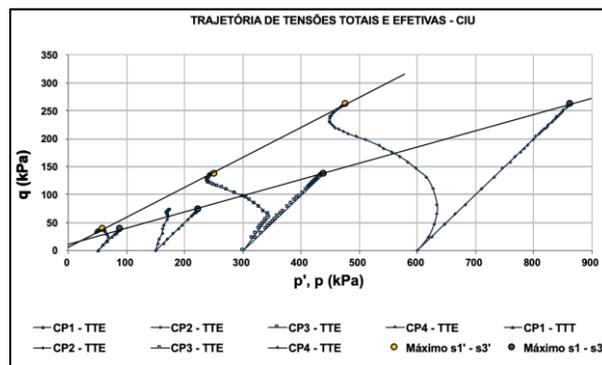
ZHAO, B.; HUANG, W.; SHU, Z.; HAN, M. & FENG, Y. Experimental and theoretical studies on the creep behavior of bayer red mud. *Advances in Civil Engineering*, vol 2018, ID 6327971, 9 p., 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6327971>.

**ANEXO A.1 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIUsat
TRAJETÓRIAS DE TENSÕES TOTAIS E EFETIVAS**

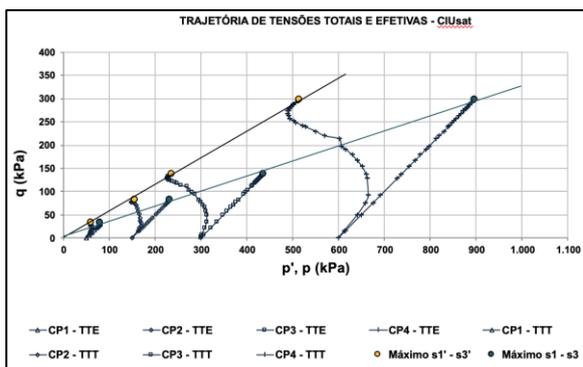
Figura A.1: Trajetórias de tensões totais e efetivas – CIUsat – Grupo 1



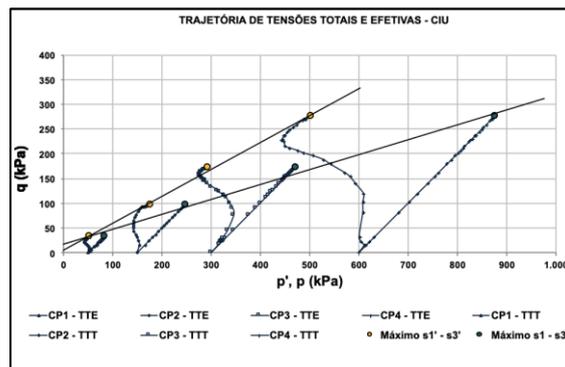
CIU sat – AM – 01 – Grupo 1



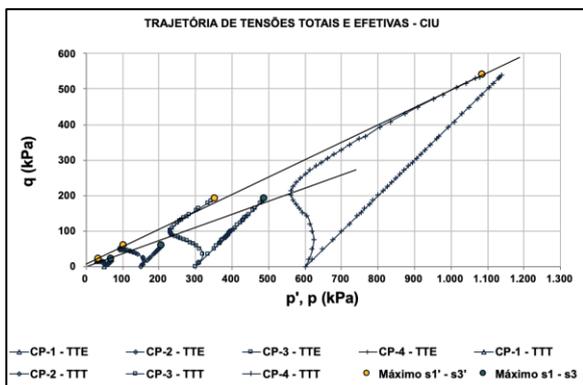
CIU sat – AM – 02 – Grupo 1



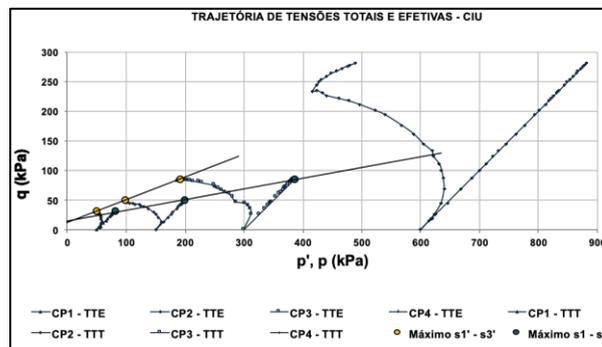
CIU sat – AM – 03 – Grupo 1



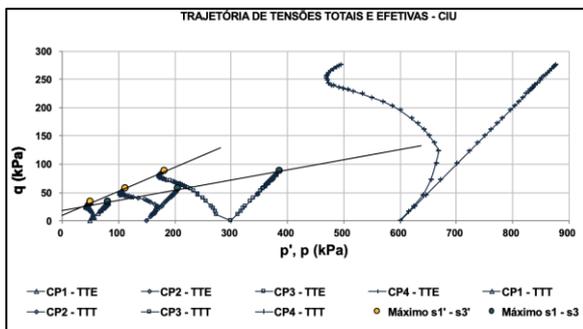
CIU sat – AM – 04 – Grupo 1



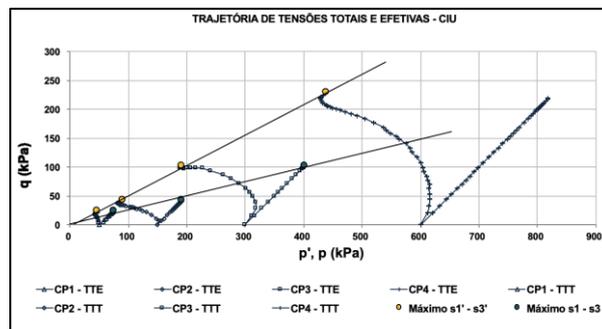
CIU sat – AM – 05 – Grupo 1



CIU sat – AM – 06 – Grupo 1

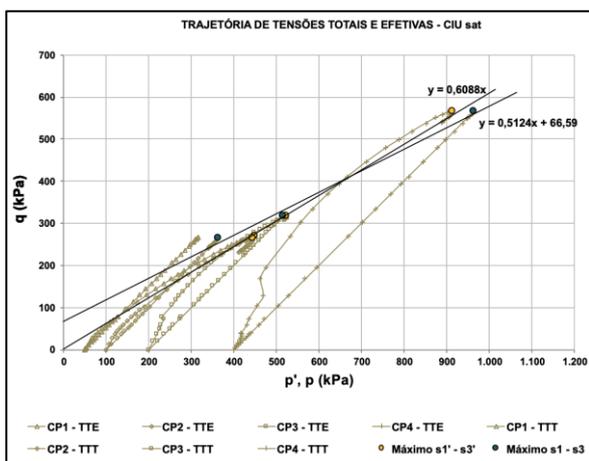


CIU sat – AM – 07 – Grupo 1

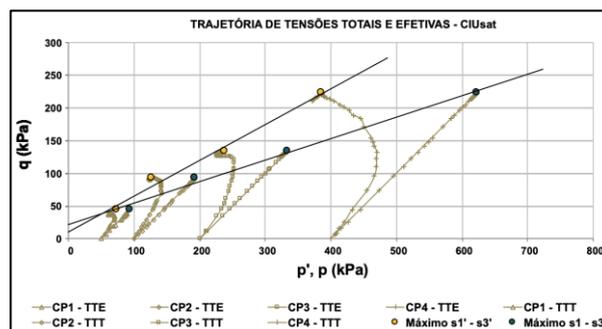


CIU sat – AM – 08 – Grupo 1

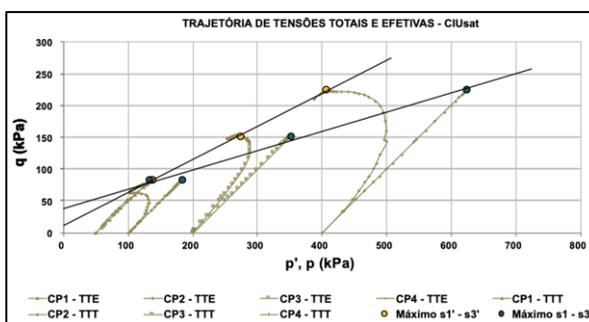
Figura A.2: Trajetórias de tensões totais e efetivas – CIUsat – Grupo 2



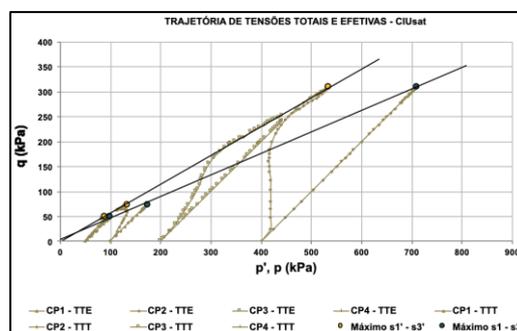
CIUsat -BL - 01 - Grupo 2



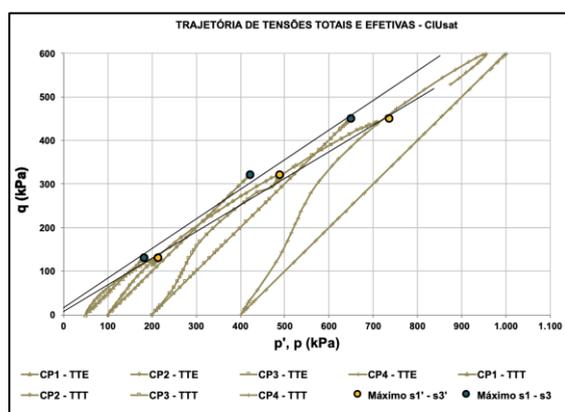
CIUsat -BL - 02 - Grupo 2



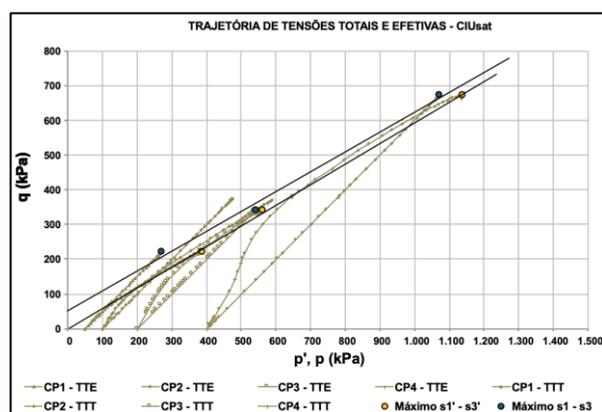
CIUsat -BL - 07 - Grupo 2



CIUsat -BL - 08 - Grupo 2



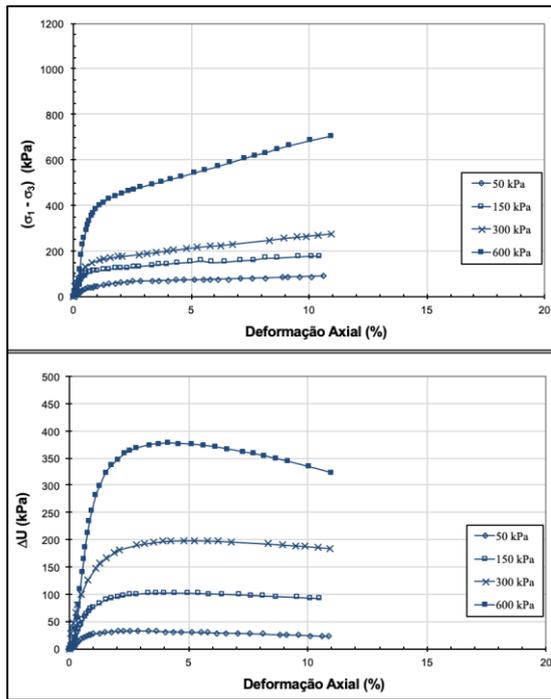
CIUsat -BL - 11 - Grupo 2



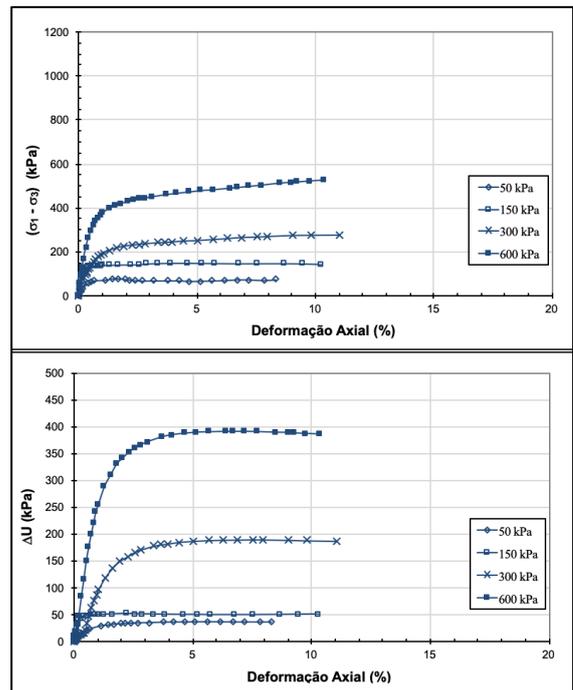
CIUsat -BL - 12 - Grupo 2

**ANEXO A.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIUsat
TENSÃO-DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO DA POROPRESSÃO-
DEFORMAÇÃO**

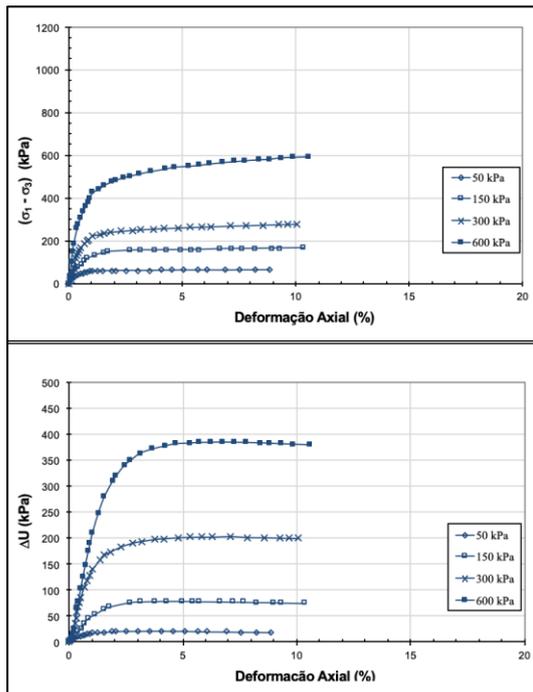
Figura A.3: Curvas Tensão-Deformação e Variação da Poropressão-Deformação – CIUsat – Grupo 1



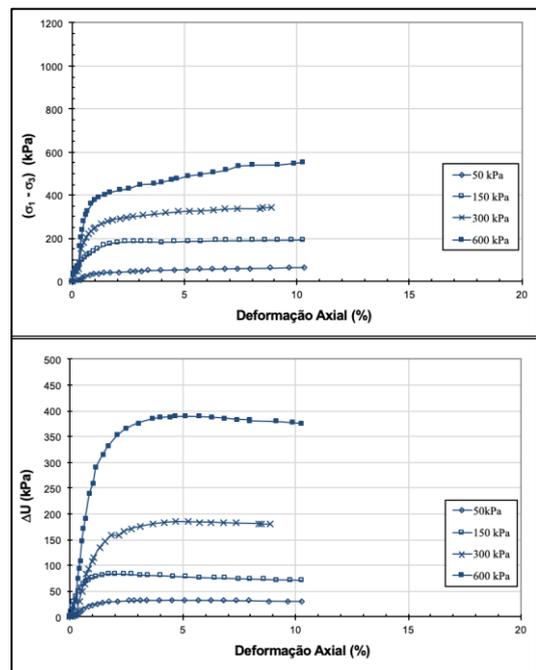
AM – 01 – Grupo 1



AM – 02 – Grupo 1



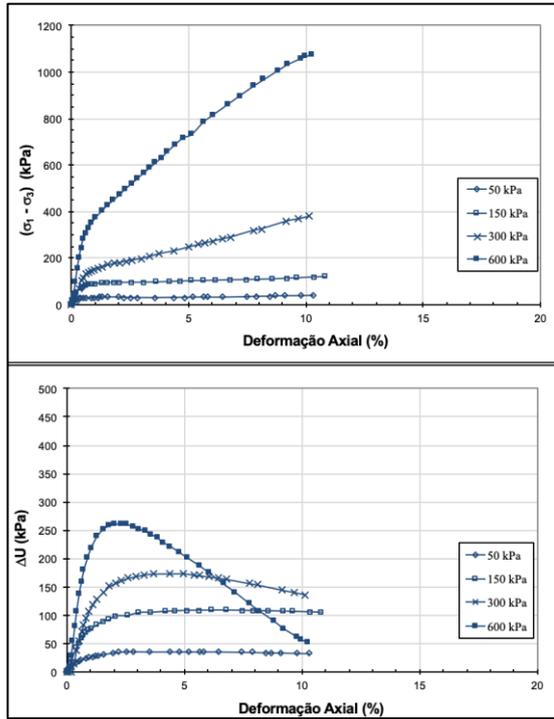
AM – 03 – Grupo 1



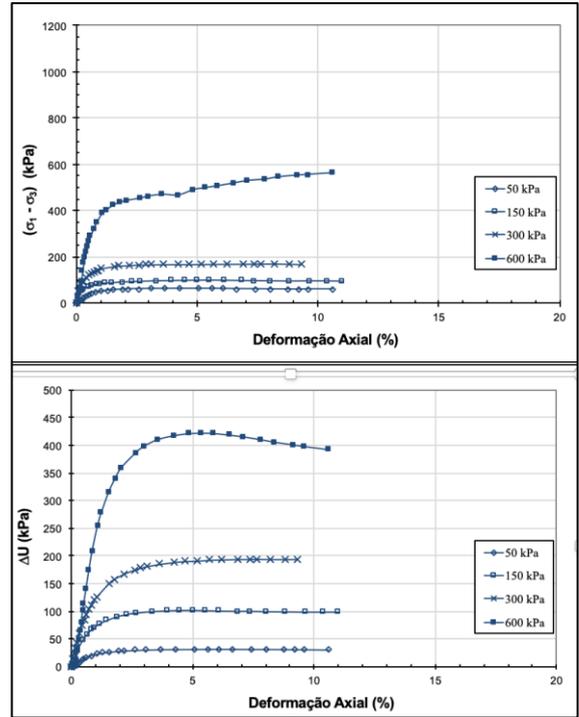
AM – 04 – Grupo 1

Continua

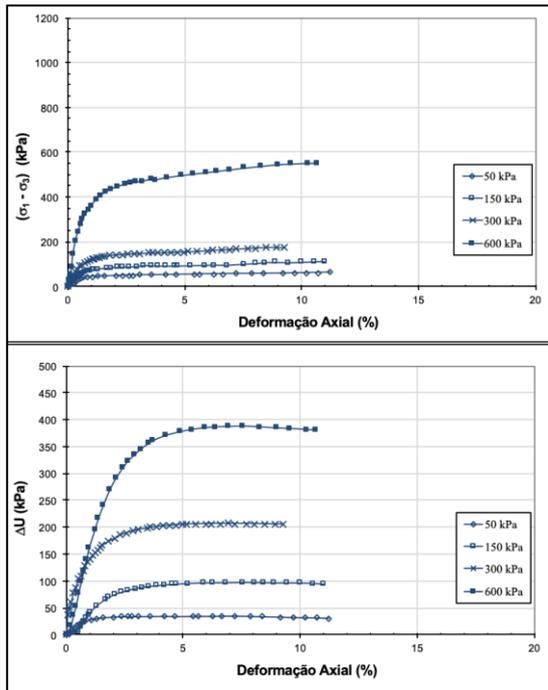
Figura A.3: Curvas Tensão-Deformação e Variação da Poropressão-Deformação – CIUsat – Grupo 1 (Continuação)



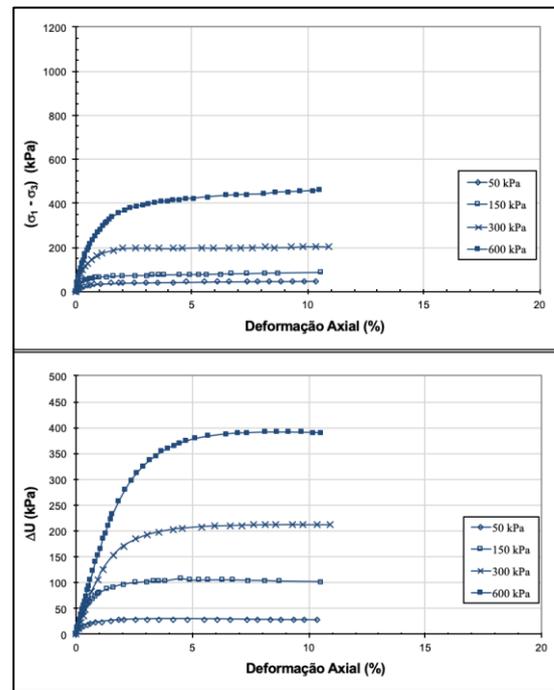
AM – 05 – Grupo 1



AM – 06 – Grupo 1

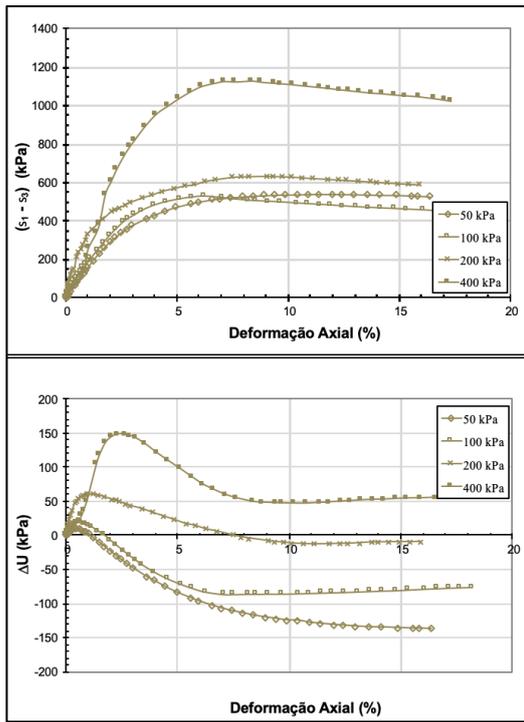


AM – 07 – Grupo 1

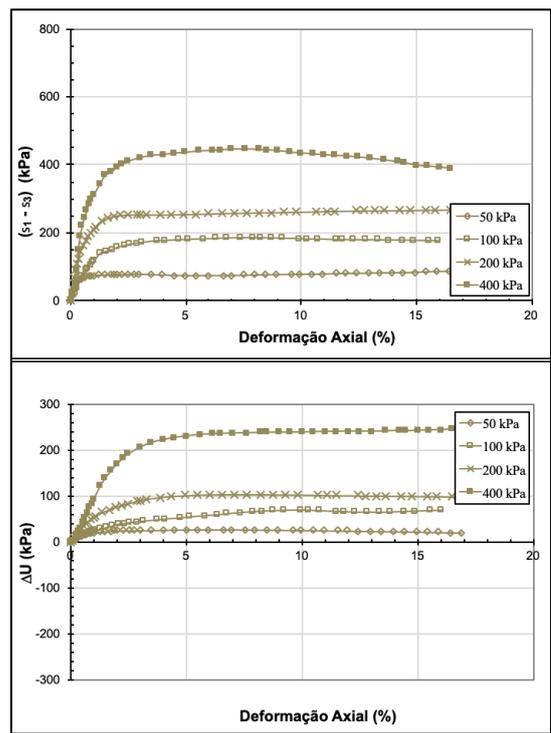


AM – 08 – Grupo 1

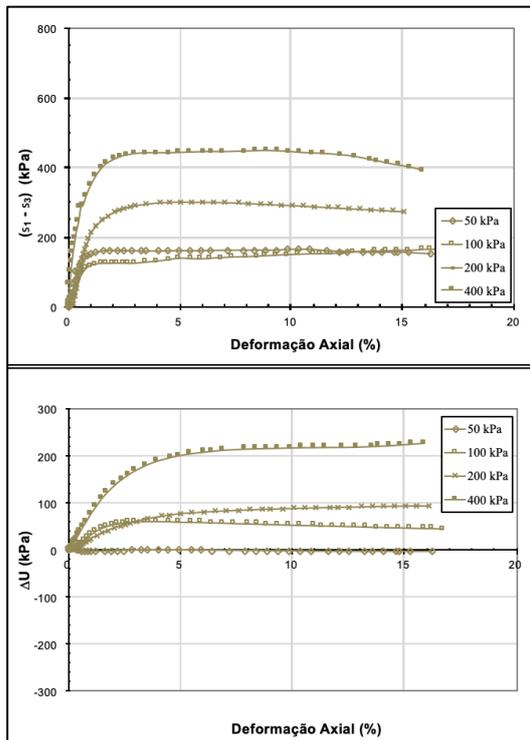
Figura A.4: Curvas Tensão-Deformação e Variação da Poropressão-Deformação – CIUsat – Grupo 2



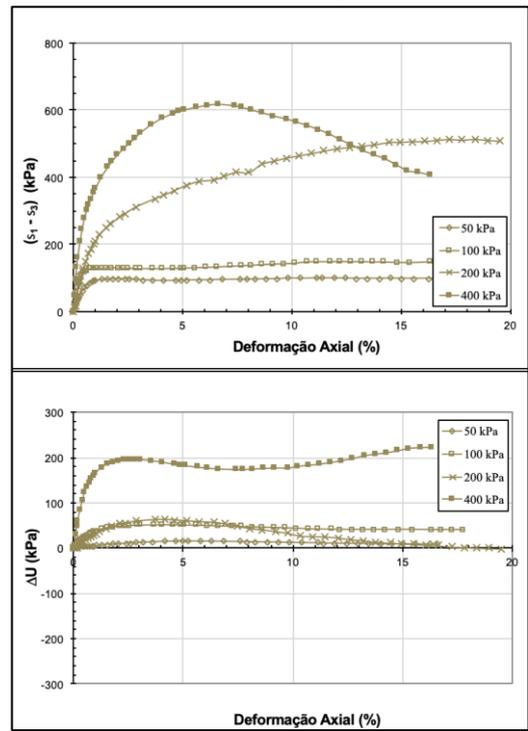
BL – 01 – Grupo 2



BL – 02 – Grupo 2



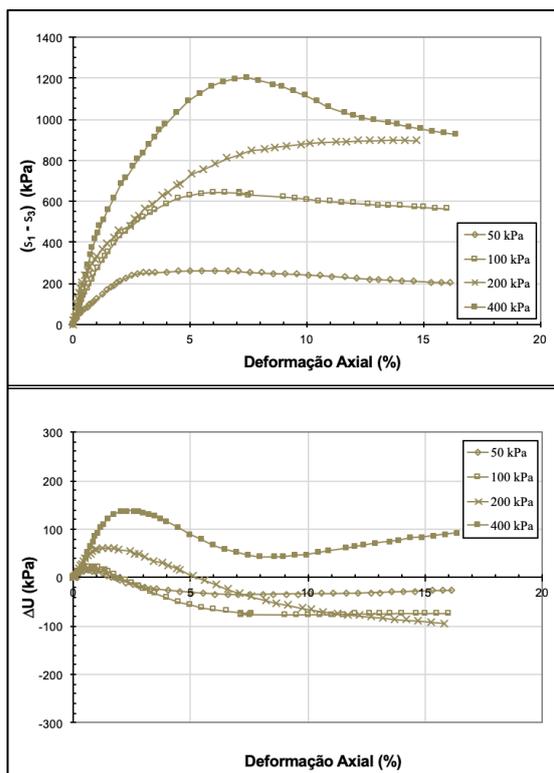
BL – 07 – Grupo 2



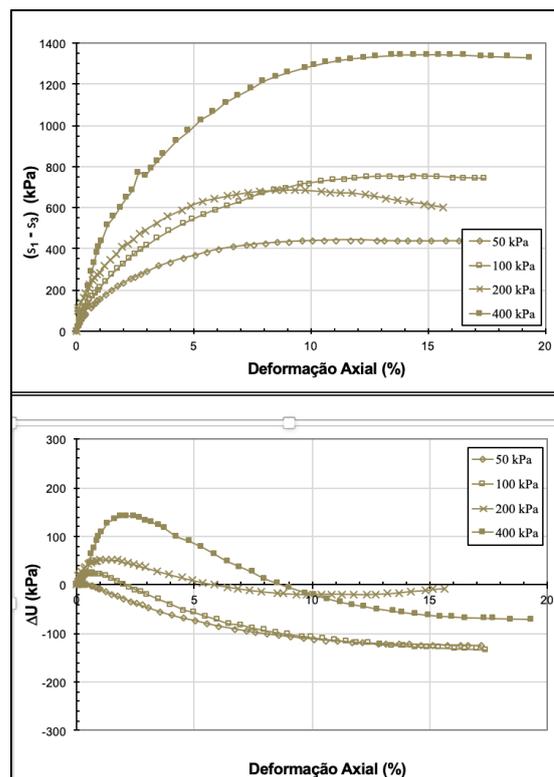
BL – 08 – Grupo 2

Continua

Figura A.4: Curvas Tensão-Deformação e Variação da Poropressão-Deformação – CIUsat – Grupo 2 (Continuação)



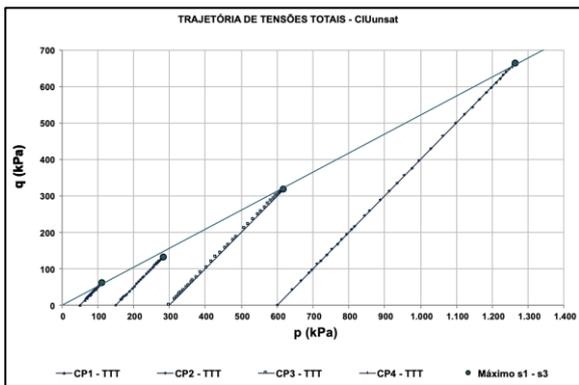
BL – 11 – Grupo 2



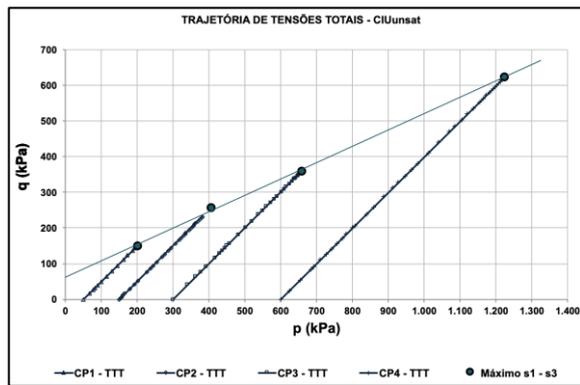
BL – 12 – Grupo 2

**ANEXO B.1 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIU_{unsat}
TRAJETÓRIAS DE TENSÕES TOTAIS**

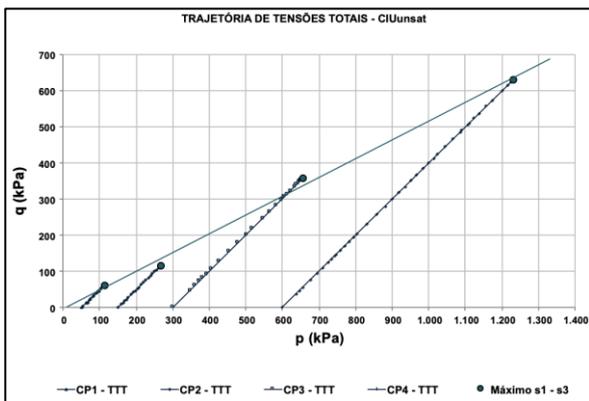
Figura B.1: Trajetórias de tensões totais e efetivas – CIUunsat – Grupo 1



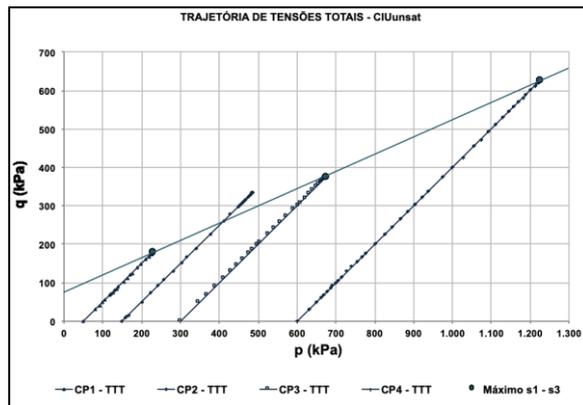
CIU unsat – AM – 01 – Grupo 1



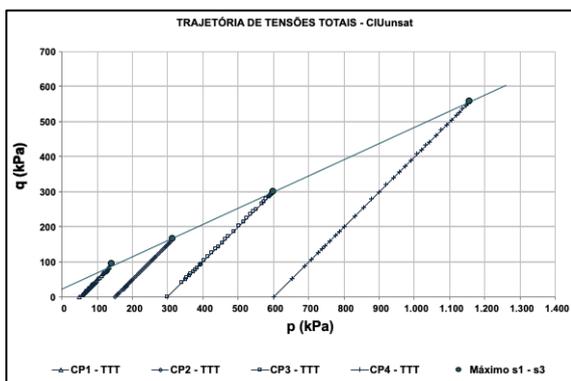
CIU unsat – AM – 02 – Grupo 1



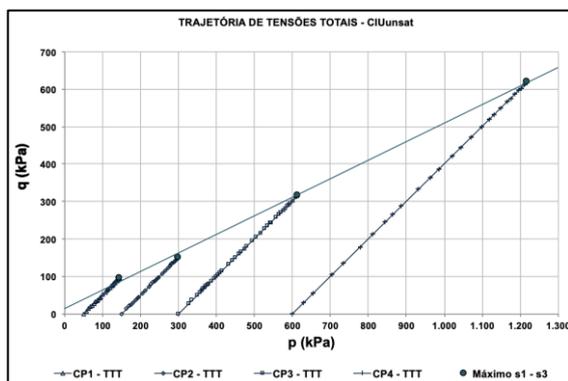
CIU unsat – AM – 03 – Grupo 1



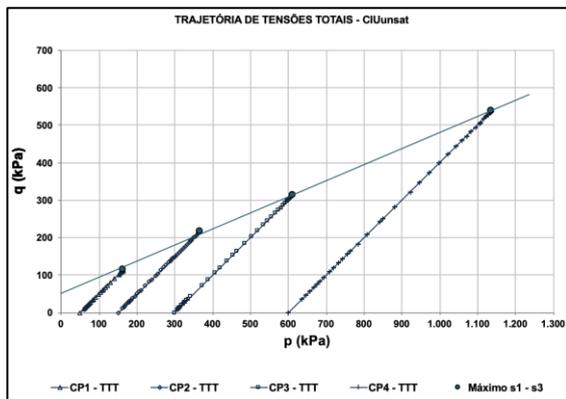
CIU unsat – AM – 04 – Grupo 1



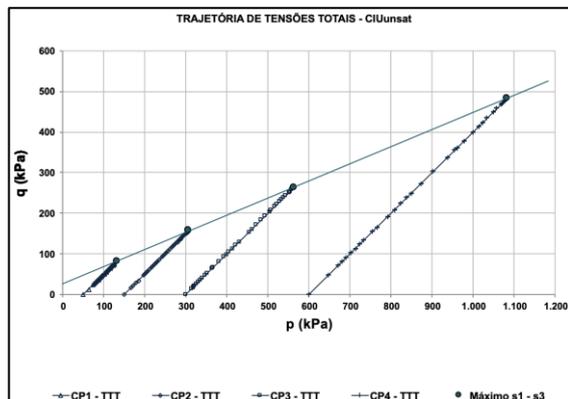
CIU unsat – AM – 05 – Grupo 1



CIU unsat – AM – 06 – Grupo 1



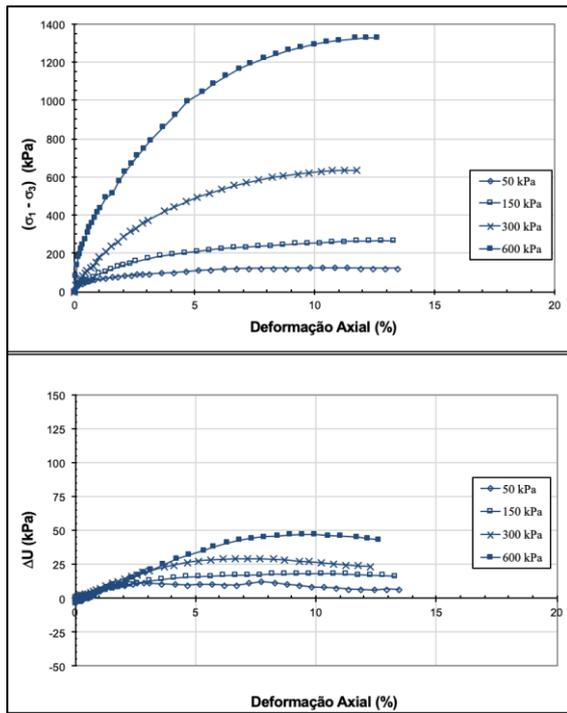
CIU unsat – AM – 07 – Grupo 1



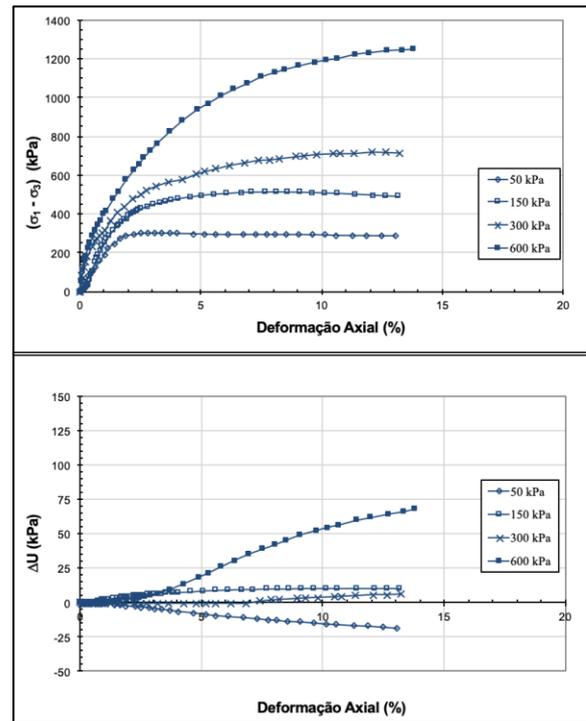
CIU unsat – AM – 08 – Grupo 1

**ANEXO B.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CIU_{unsat}
TENSÃO-DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO DA POROPRESSÃO-
DEFORMAÇÃO**

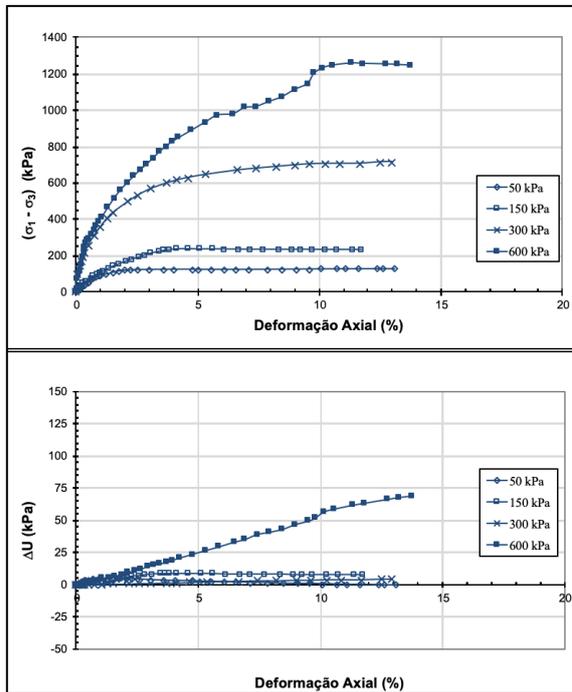
Figura B.2: Curvas Tensão-Deformação e Variação da Poropressão-Deformação – CIUunsat – Grupo 1



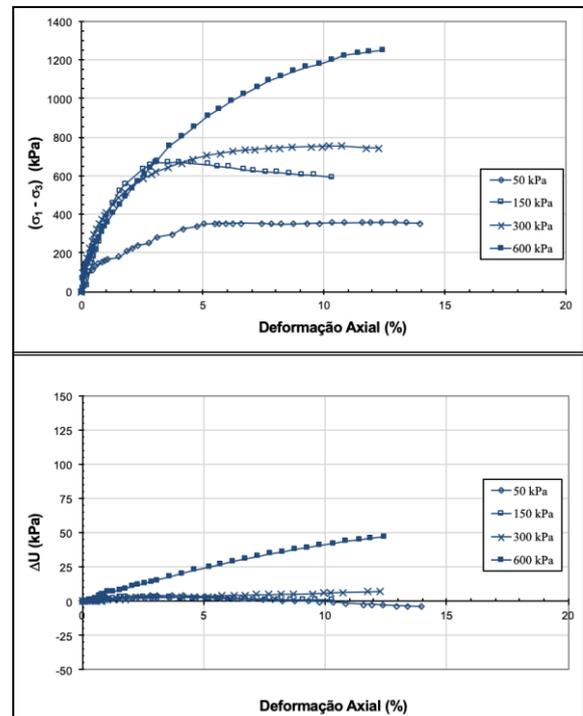
AM – 01 – Grupo 1



AM – 02 – Grupo 1



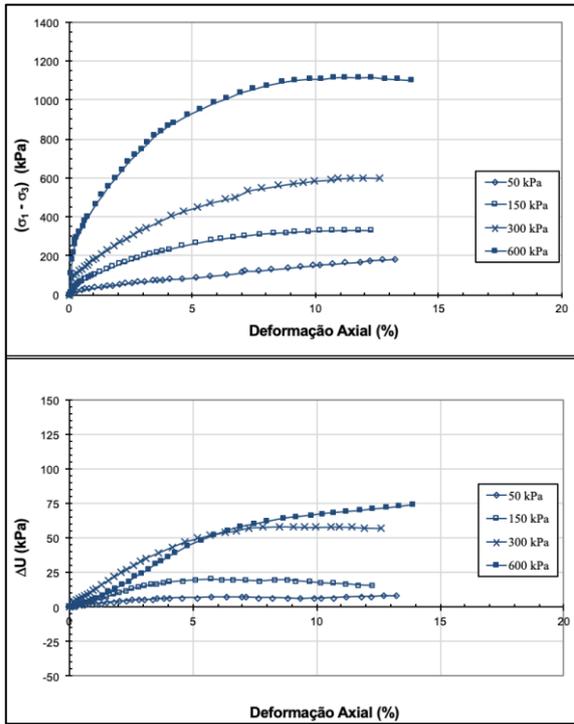
AM – 03 – Grupo 1



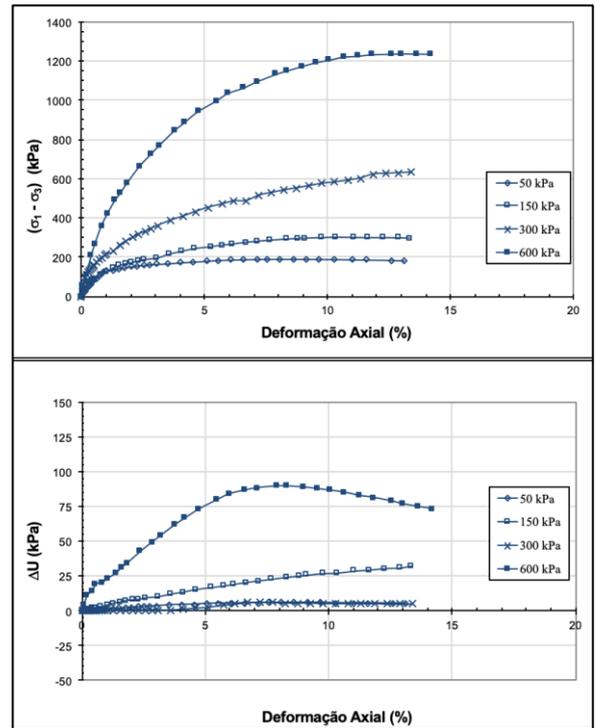
AM – 04 – Grupo 1

Continua

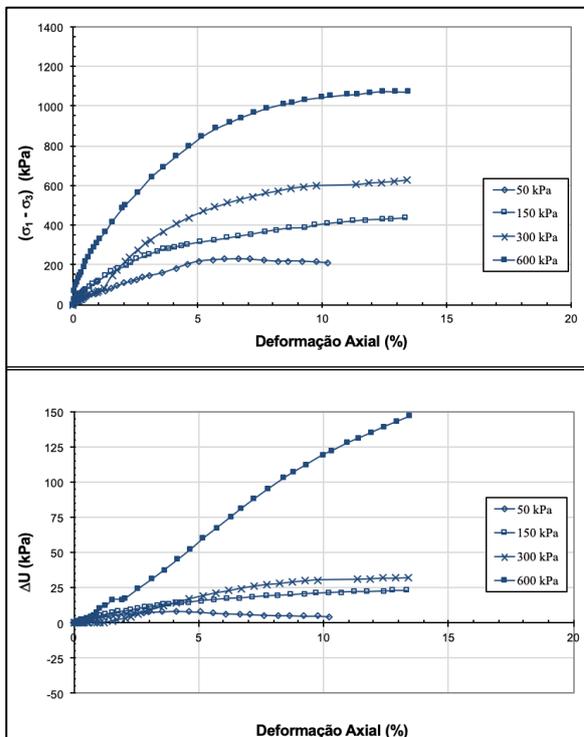
Figura B.3: Curvas Tensão-Deformação e Variação da Poropressão-Deformação – CIUunsat – Grupo 1



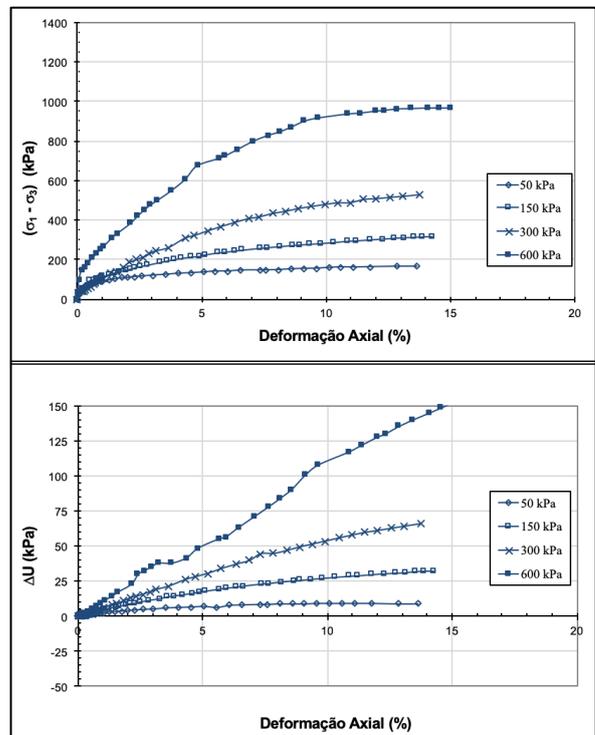
AM – 05 – Grupo 1



AM – 06 – Grupo 1



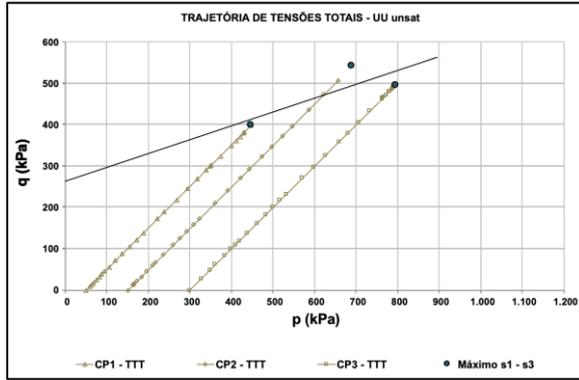
AM – 07 – Grupo 1



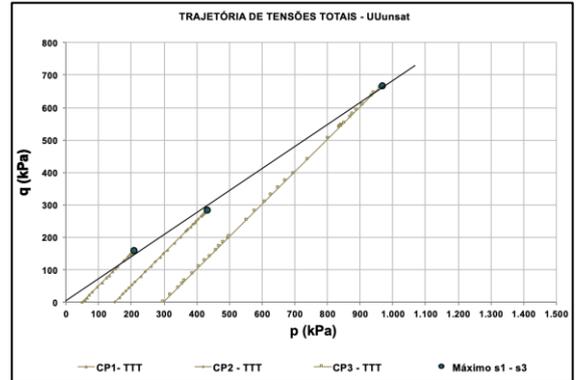
AM – 08 – Grupo 1

**ANEXO C.1 – TRAJETÓRIAS DE TENSÕES TOTAIS – ENSAIO DE
COMPRESSÃO TRIAXIAL UU_{unsat}**

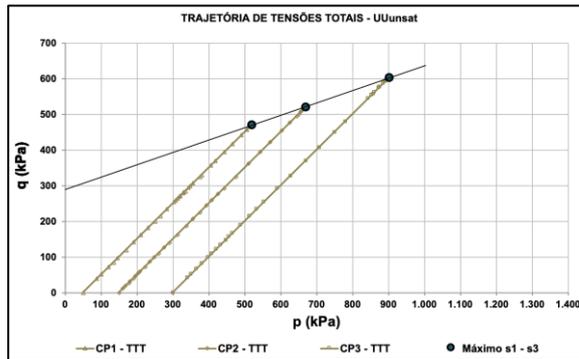
Figura C.1: Trajetórias de tensões totais – UUunsat – Grupo 2



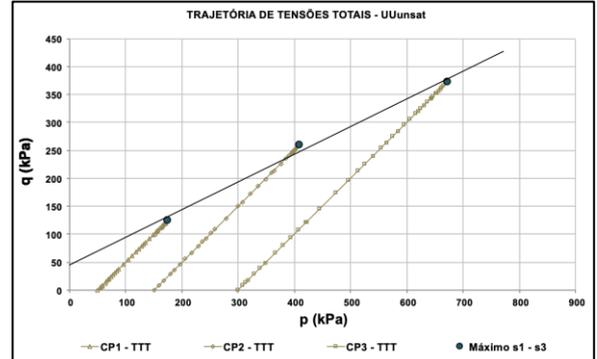
UU unsat – BL – 01 – Grupo 2



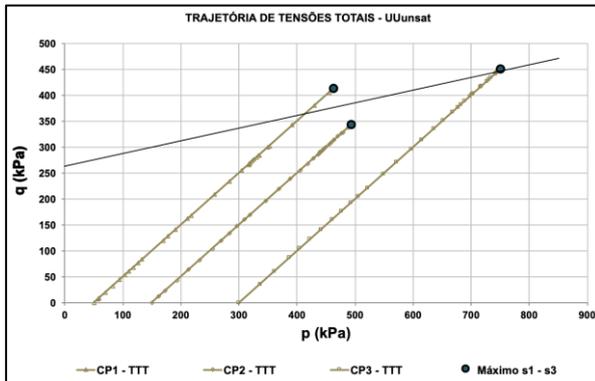
UU unsat – BL – 02 – Grupo 2



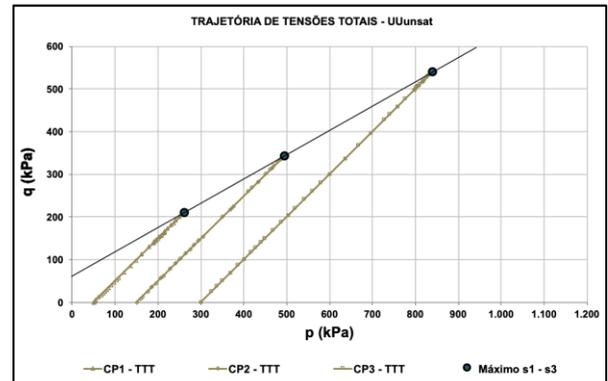
UU unsat – BL – 07 – Grupo 2



UU unsat – BL – 08 – Grupo 2



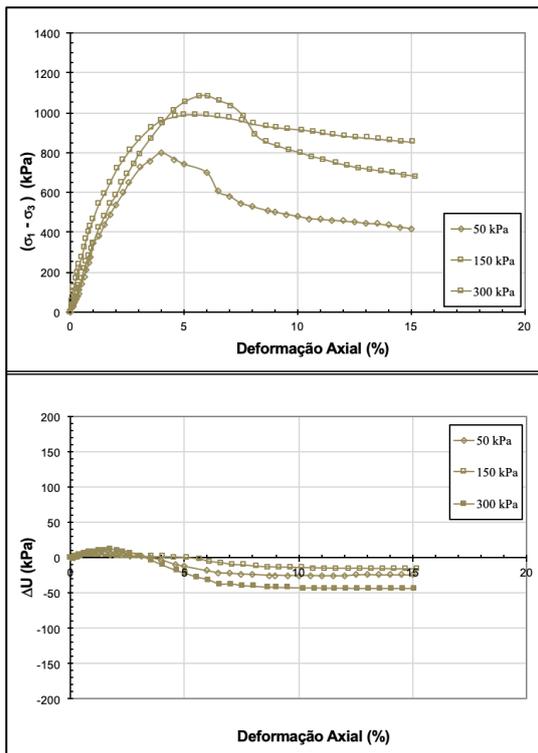
UU unsat – BL – 11 – Grupo 2



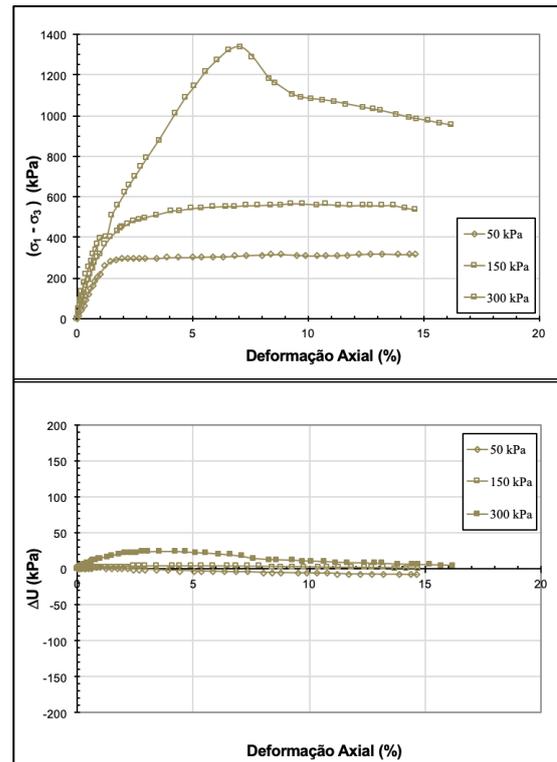
UU unsat – BL – 12 – Grupo 2

**ANEXO C.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL UU_{unsat}
TENSÃO-DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO DA POROPRESSÃO-
DEFORMAÇÃO**

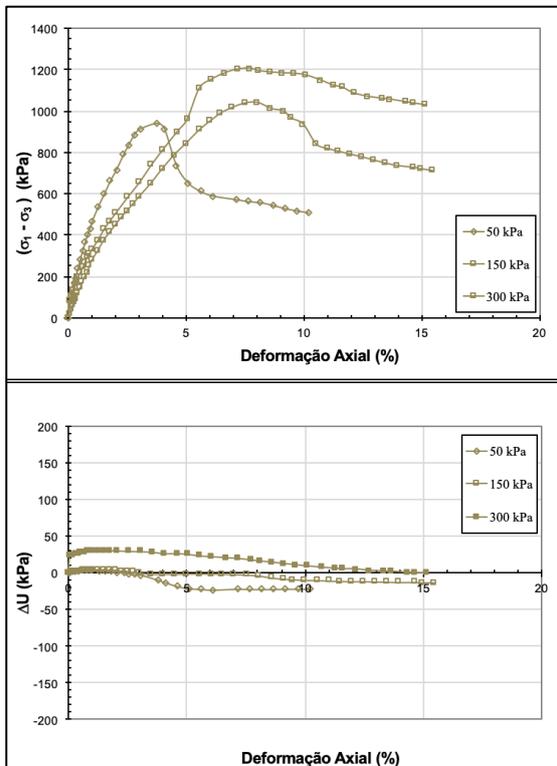
Figura C.2: Curvas Tensão-Deformação e Variação da Poropressão-Deformação – UUunsat – Grupo 2



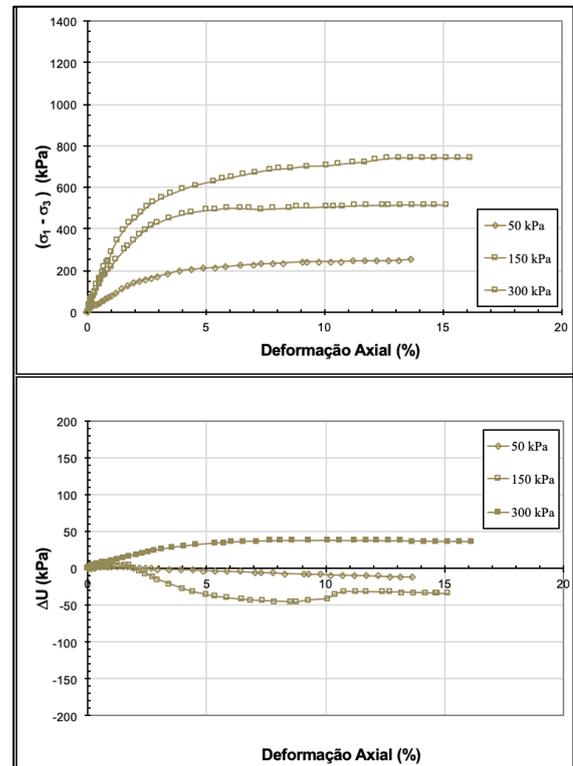
UU unsat – BL – 01 – Grupo 2



UU unsat – BL – 02 – Grupo 2



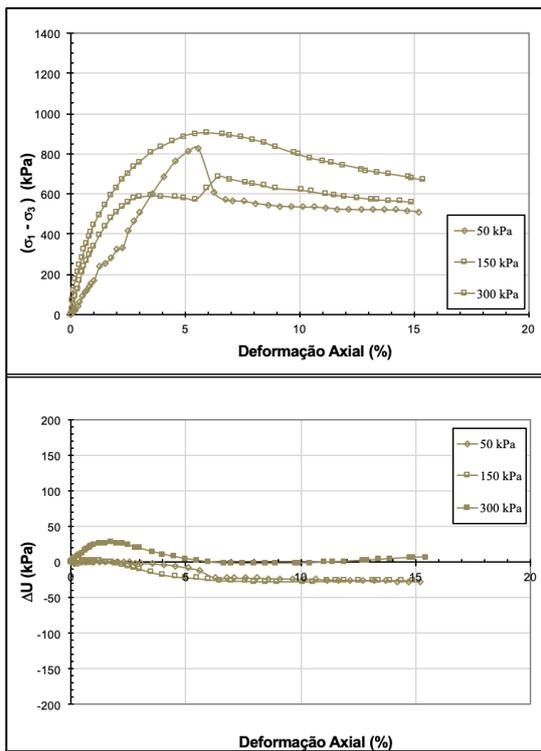
UU unsat – BL – 07 – Grupo 2



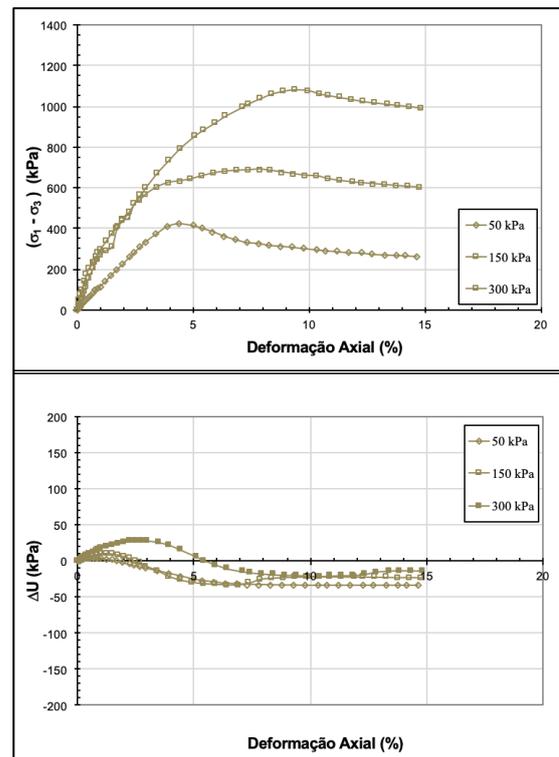
UU unsat – BL – 08 – Grupo 2

Continua

Figura C.2: Curvas Tensão-Deformação e Variação da Poropressão-Deformação – UUunsat – Grupo 2 (Continuação)



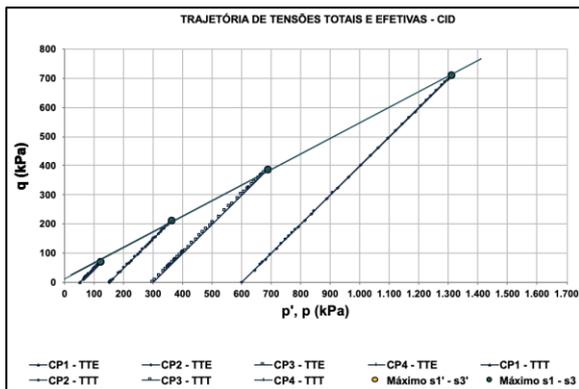
UU unsat – BL – 11 – Grupo 2



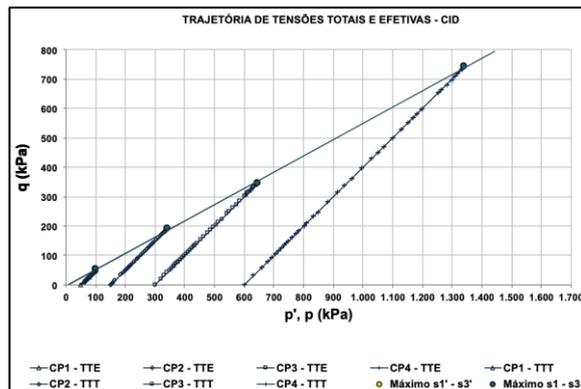
UU unsat – BL – 12 – Grupo 2

**ANEXO D.1 –ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CID_{sat}
TRAJETÓRIAS DE TENSÕES EFETIVAS**

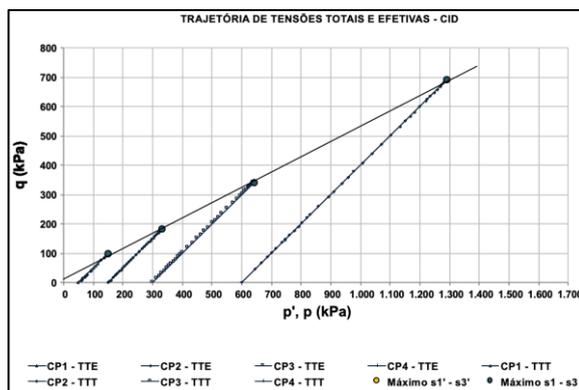
Figura D.1: Trajetórias de tensões totais e efetivas – CIDSat – Grupo 1



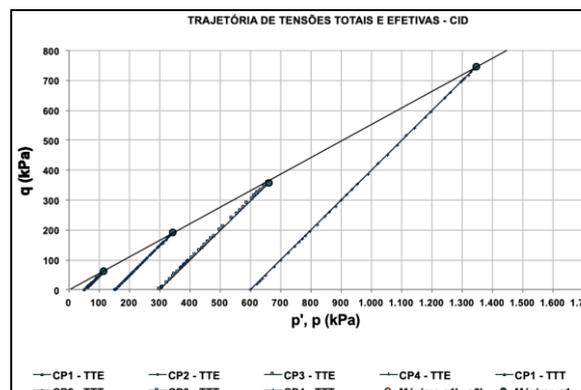
CID – AM – 01 – Grupo 1



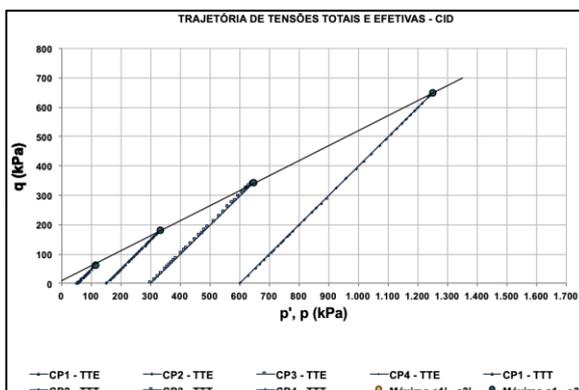
CID – AM – 02 – Grupo 1



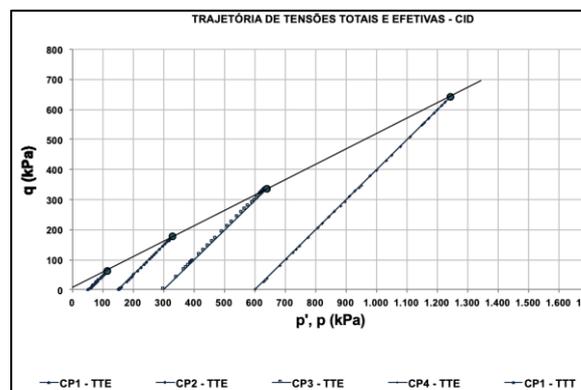
CID – AM – 03 – Grupo 1



CID – AM – 06 – Grupo 1



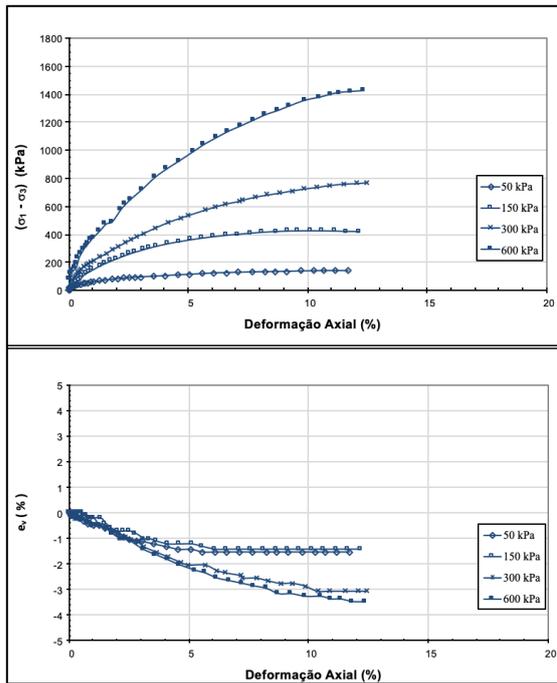
CID – AM – 07 – Grupo 1



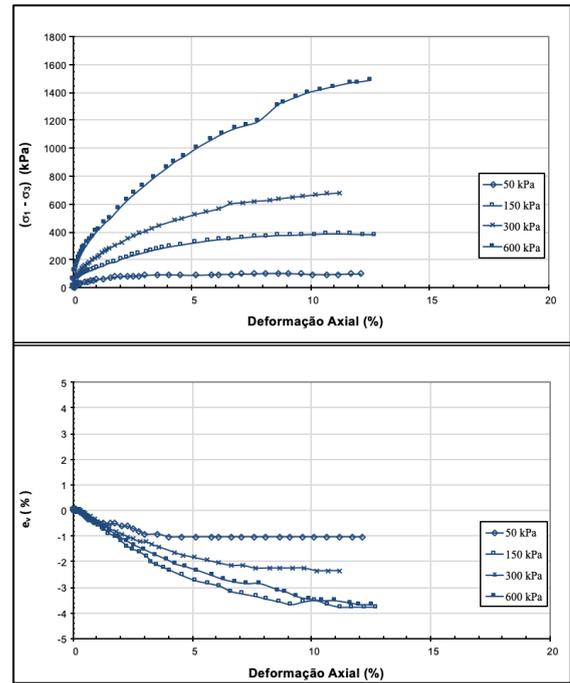
CID – AM – 08 – Grupo 1

**ANEXO D.2 – ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CID_{sat}
TENSÃO-DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA-
DEFORMAÇÃO**

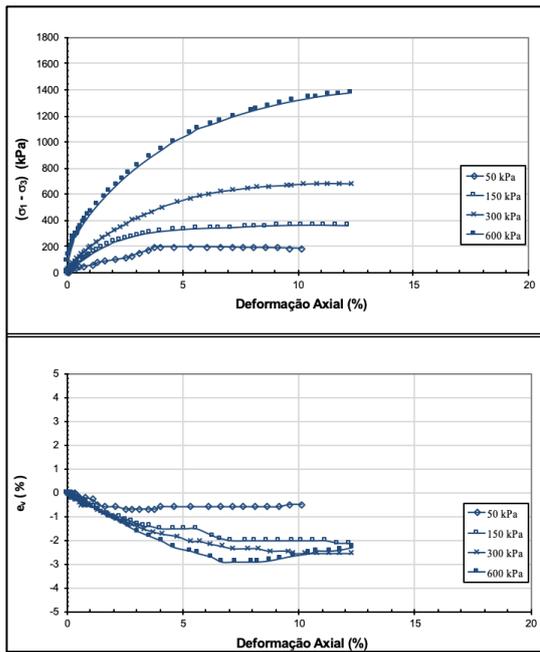
Figura D.2: Curvas Tensão-Deformação e Variação Volumétrica-Deformação – CIDsat – Grupo 1



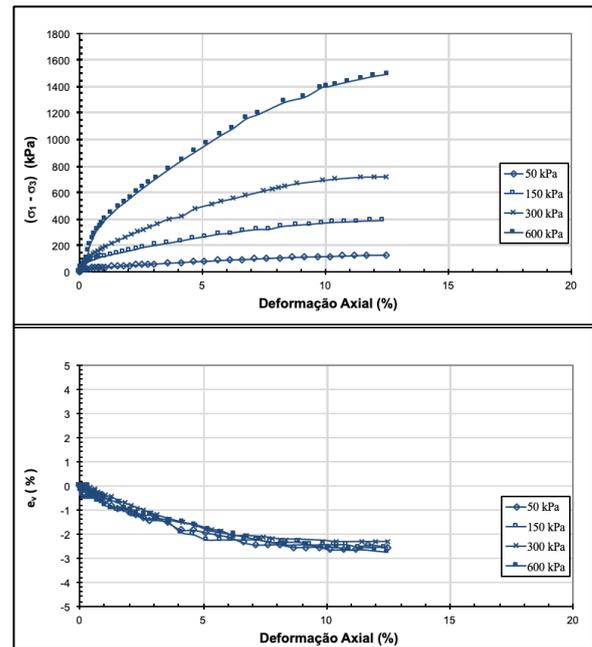
AM – 01 – Grupo 1



AM – 02 – Grupo 1



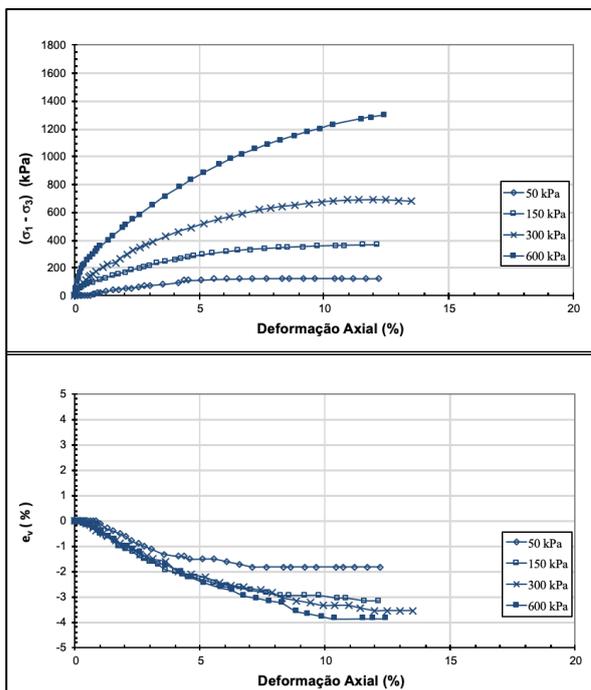
AM – 03 – Grupo 1



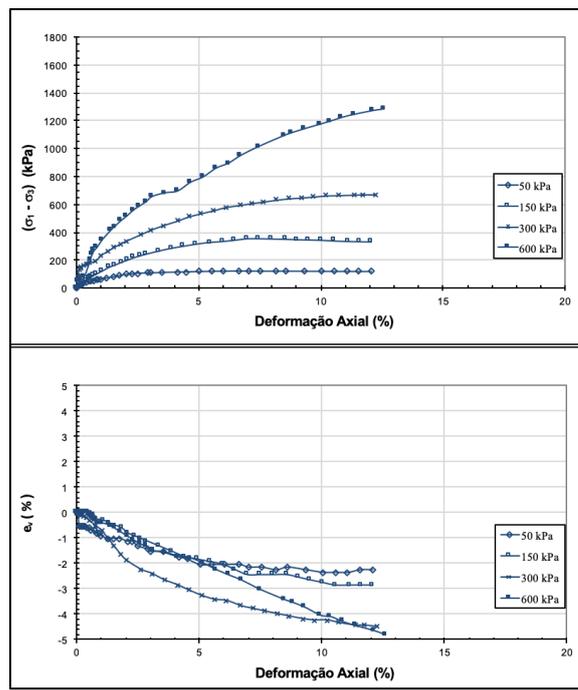
AM – 06 – Grupo 1

Continua

Figura D.2- Curvas Tensão-Deformação e Variação Volumétrica-Deformação – CIDsat – Grupo 1 (Continuação)



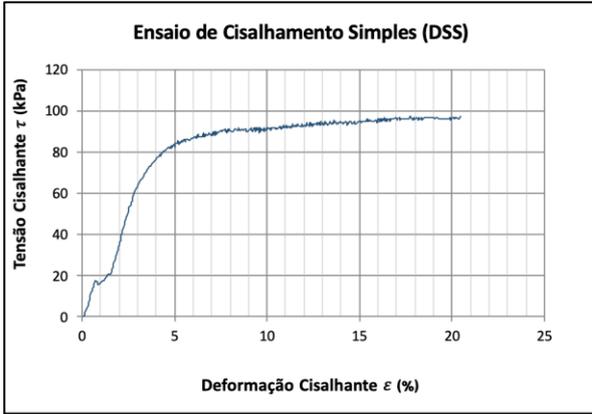
AM – 07 – Grupo 1



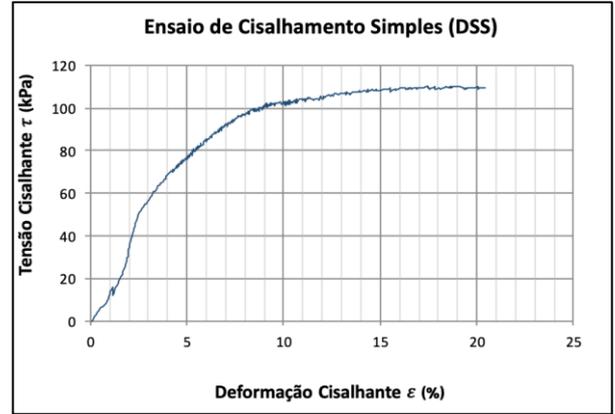
AM – 08 – Grupo 1

**ANEXO E – ENSAIO DE CISALHAMENTO SIMPLES ESTÁTICO
(DSS) - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO**

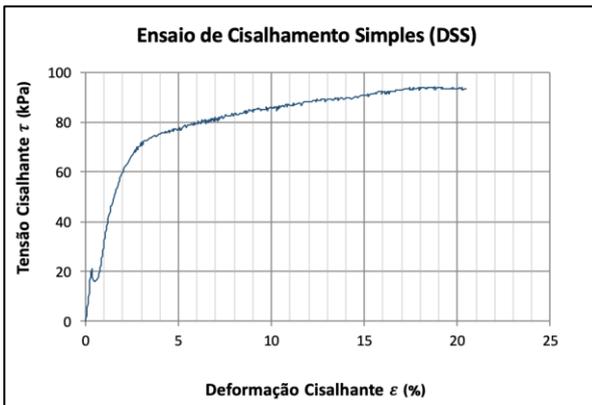
Figura E.1: Curvas Tensão x Deformação (DSS) – Grupo 1



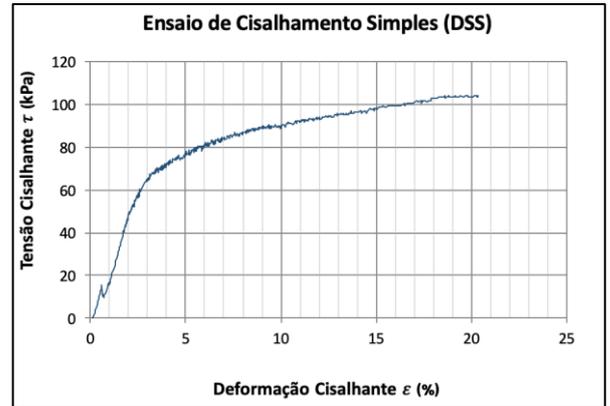
AM – 01 – Grupo 1



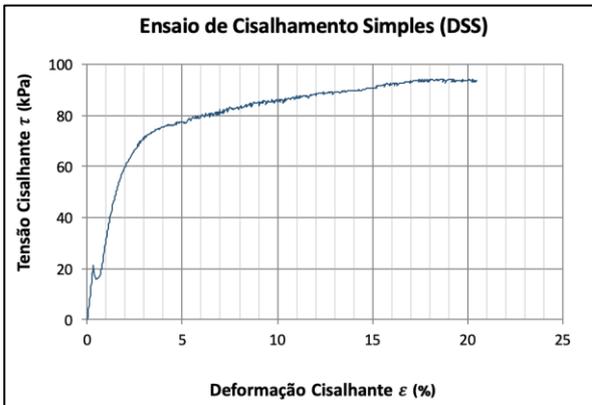
AM – 03 – Grupo 1



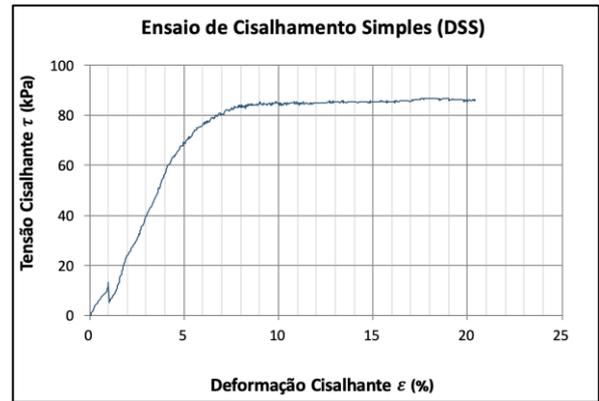
AM – 04 – Grupo 1



AM – 05 – Grupo 1



AM – 06 – Grupo 1



AM – 08 – Grupo 1