

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**DESEMPENHO DE UM EMPILHAMENTO DRENADO
DE TUBOS GEOTÊXTEIS PREENCHIDOS COM
REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO**

Fernanda Taysa de Castro Morais

Belo Horizonte - MG

2020

Fernanda Taysa de Castro Morais

**DESEMPENHO DE UM EMPILHAMENTO DRENADO
DE TUBOS GEOTÊXTEIS PREENCHIDOS COM
REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO**

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

Orientadora: Maria das Graças Gardoni Almeida

Coorientador: Ennio Marques Palmeira

Belo Horizonte - MG
Escola de Engenharia da UFMG

2020

M827d

Morais, Fernanda Taysa de Castro.

Desempenho de um empilhamento drenado de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração de ouro [recurso eletrônico] / Fernanda Taysa de Castro Moraes. - 2020.

1 recurso online (xi, 187 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Maria das Graças Gardoni Almeida.

Coorientador: Ennio Marques Palmeira.

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

Apêndices: f. 159-187.

Bibliografia: f. 152-158.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Mecânica do solo - Teses. 2. Desempenho - Teses. 3. Ouro - Mineração - Teses. 4. Resíduos de mineração - Teses. I. Gardoni, Maria das Graças A. II. Palmeira, Ennio Marques, 1953-. 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

UFMG

FOLHA DE APROVAÇÃO

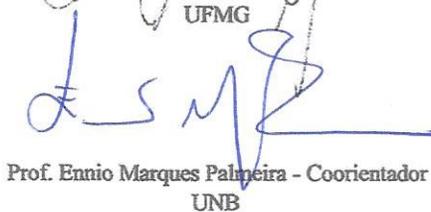
DESEMPENHO DE UM EMPILHAMENTO DRENADO DE TUBOS GEOTÊXTEIS PREENCHIDOS
COM REJEITO DE OURO

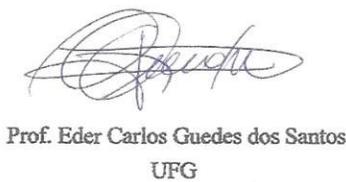
FERNANDA TAYSA DE CASTRO MORAIS

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 18 de dezembro de 2020, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Maria das Graças Gardoni Almeida - Orientadora
UFMG


Prof. Ennio Marques Palmeira - Coorientador
UNB


Prof. Eder Carlos Guedes dos Santos
UFG


Prof. Luis Fernando Martins Ribeiro
UNB

Belo Horizonte, 18 de dezembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a nossa Senhora d'Abadia pela conclusão desta etapa!

Aos meus pais, Maria e Belmiro, a quem dedico esta dissertação de mestrado, por todo o apoio e por terem vivido uma vida de sacrifícios para que eu pudesse estudar e conseguisse concluir este trabalho.

À minha irmã Roberta, por ser meu exemplo, ter auxiliado na minha educação junto aos meus pais e ao meu cunhado, Pedro pela presença e apoio constantes.

Ao meu querido Fábio, todo o meu amor! Sou grata pela sua compreensão, auxílio nos momentos difíceis, por todo o amor, companheirismo e por trazer sentido a este trabalho.

Ao querido tio José Orlando, por ensinar a mim e à nossa família sobre amor desinteressado e confiança em Deus.

À professora Maria das Graças Gardoni, pela confiança que depositou em mim, pela paciência maternal na orientação dessa dissertação, e por ter se empenhado ao máximo para que eu conseguisse concluir este trabalho. Isso só foi possível pela sua garra que venceu a barragem de Fundão, comandou a exumação de uma obra dentro de uma barragem, e viajou para onde fosse necessário (do Paraná à Bahia).

Ao professor Ennio Palmeira, pela contribuição valiosa na coorientação deste trabalho.

À Laís Freitas, que iniciou esse projeto de pesquisa de tubos geotêxteis com muita coragem e abriu caminhos para que essa etapa da pesquisa fosse concluída. Sou muito grata pela sua paciência na época em que trabalhamos juntas e pela oportunidade de realizar o mestrado a partir da sua pesquisa.

À Bruna, Fred e Zi, por terem me acolhido e apoiado em Belo Horizonte e terem feito essa etapa do mestrado mais leve.

Aos amigos Fabiano, Ágatha, Cristiano, Nathália, João, Dani, Graziane, Warley, Samira, Taniris, Esther e Pedro pelo apoio e amizade.

Aos professores do ETG, em especial à professora Karla Maia, pela amizade e pelos conhecimentos compartilhados ao longo do período da pesquisa.

Ao Cesar Botelho, pelos conhecimentos compartilhados sobre aplicação de geossintéticos em mineração, pela disponibilidade e amizade.

Aos amigos do mestrado, Ana, Isa, Domingos, Tania, Wesley, Mateus, Vitor, Dani, Paulo e Izabela, pela feliz convivência.

À amiga Luiza Nicolato, pelo apoio e amizade de sempre.

Às alunas Rafaela e Franciele, pelo apoio nos ensaios de laboratório no LabGeo.

À coordenação do mestrado, na pessoa da professora Leise, pelos esforços em auxiliar os alunos e o programa de mestrado.

Ao Instituto Yamana, pelo apoio financeiro à pesquisa e ao Rafael Jabour por ter acreditado no projeto. Às empresas Brio Gold e Leagold nas pessoas do Rafael Magno, Tiandra, Gabriel e Pollyana por todo o apoio à pesquisa.

Ao laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos, ao Matheus Cardoso e aos professores Natalia Correia e Fernando Portelina pela presteza e disponibilidade em auxiliar com ensaios para a pesquisa.

Ao Centro de Microscopia da UFMG, pelos ensaios de microscopia eletrônica e ao Instituto de Geociências da UFMG, pelos ensaios de difração de Raio-X.

À Huesker, na pessoa do André Estêvão, pela troca de conhecimentos e apoio à pesquisa com materiais e equipamentos valiosos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro e à Fundep, pela gestão do projeto de pesquisa.

Tive o privilégio de contar com a infraestrutura de laboratórios externos à UFMG que realizaram ensaios de forma gratuita para auxiliar a pesquisa. Por isso agradeço:

- Ao laboratório Pattrol, nas pessoas do Bruno Castro, Fernando, Wanderson e Roberto pela realização de ensaios de laboratório para a pesquisa _ compressão triaxial;
- Ao laboratório Loctest nas pessoas do Leonardo Ventura e Lineker pelo apoio na realização de ensaios de laboratório para a pesquisa _ adensamento convencional;
- Ao CDTN, pela realização dos ensaios de granulometria a laser;

Agradeço a todos que, porventura, não tenham sido citados aqui, mas que contribuíram direta ou indiretamente para a superação desta etapa em minha vida. Meus sinceros agradecimentos a todos!

*"[...] caminante, no hay camino:
se hace camino al andar.
Al andar se hace camino,
Y al volver la vista atrás
Se ve la senda que nunca
Se ha de volver a pisar."*

(Antonio Machado) *in* (Proverbios e cantares)

RESUMO

Os tubos geotêxteis são uma alternativa para disposição de rejeitos de mineração, permitindo a redução da área necessária para dispor os rejeitos e diminuindo os riscos de um potencial ruptura. Dessa forma, o principal objetivo desta dissertação foi verificar o desempenho de um empilhamento drenado de três níveis de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito fino de mineração de ouro. Essa estrutura, construída no topo de uma pilha de rejeitos da mina Fazenda Brasileiro, foi o protótipo de larga escala construído e avaliado no trabalho de Freitas Silva (2017). A estrutura foi monitorada e passou por um levantamento topográfico realizado após um ano da construção, o qual constatou que a altura dos tubos geotêxteis não sofreu modificações consideráveis nesse período. Um plano de exumação da estrutura foi elaborado e executado dois anos após o fim da construção do empilhamento. A estrutura foi monitorada em relação às deformações, as quais ocorreram principalmente nas junções dos tubos geotêxteis e no tubo geotêxtil localizado no topo do empilhamento. Adicionalmente foram observados aspectos de textura, umidade e densidade do rejeito confinado, bem como a aparência do geotêxtil tecido dos tubos geotêxteis. Amostras de geotêxtil e de rejeito foram coletadas de três tubos geotêxteis selecionados para serem exumados. O material coletado em campo foi levado ao laboratório, onde foram realizados ensaios de caracterização geotécnica no rejeito, como: massa específica dos grãos, granulometria, ensaios de adensamento edométrico convencional, ensaios de compressão triaxial do tipo CIU_{sat} e permeabilidade, além de análises microestruturais dos grãos. O estudo da segregação de partículas, realizado a partir dos dados de granulometria, mostrou que não houve uma tendência clara de comportamento de segregação ao longo do eixo dos tubos geotêxteis. O geotêxtil exumado foi caracterizado em relação à espessura e massa por unidade de área e foi submetido a ensaios de tração do tipo faixa larga. Os resultados dos ensaios de tração foram analisados por meio da ferramenta estatística ANOVA e mostraram que os espécimes geotêxteis que foram expostos às intempéries e radiação UV foram os que apresentaram maior redução de resistência à tração e redução do alongamento na ruptura. Assim, conclui-se que a exposição ao sol e às altas temperaturas da região da mineradora impactaram na diretamente na durabilidade do geotêxtil utilizado na fabricação dos tubos, o que demonstra a importância da sua proteção nos casos em que forem utilizados como reforço ou no alteamento de barragens.

Palavras-Chaves: tubos geotêxteis, rejeitos de mineração de ouro, empilhamento drenado.

ABSTRACT

Geotextile tubes are an alternative for disposal of mining tailings, allowing the reduction of the area necessary to dispose tailings and reducing the risks of a potential failure. This dissertation aimed to verify the performance of a three-level stacked geotextile tubes filled with fine gold mining tailings. The structure is the large-scale prototype built and evaluated in the work of Freitas Silva (2017) and was installed on the top of a tailings pile located at the Fazenda Brasileiro mine. The structure was monitored and underwent a topographic survey carried out after one year of construction in which it was found that the height of the geotextile tubes did not undergo considerable changes in that period. An exhumation plan for the structure was developed and executed two years after the end of the stack construction. Throughout the exhumation process, the structure was observed regarding deformations, which occurred mainly at the junctions of the geotextile tubes and in the geotextile tube located at the top of the stack. Additionally, aspects of texture, moisture and density of the confined waste were observed, as well as the appearance of the woven geotextile skin. Samples of tailings and woven geotextile were collected from three geotextile tubes selected to be exhumed. The material collected in the field was taken to the laboratory where geotechnical characterization tests were carried out on the tailings, such as specific gravity of tailings particles, size distribution, conventional settlement tests, CIUsat triaxial compression tests, permeability and also microstructural analyzes of tailings particles. The particle-size distribution data was used to evaluate the particle segregation inside the geotextile tubes. However, there was no clear trend in segregation behavior along the axis of the geotextile tubes. The exhumed geotextile had its thickness and mass per unit area measured and was subjected to wide width tensile tests. The results of the tensile tests were analyzed by means of ANOVA statistical tool and the results showed that the geotextile specimens that were exposed to the weather and UV radiation presented the greatest reduction in tensile strength and in elongation at break. Thus, exposure to the sun light and high temperatures in the mining area directly impacted on the geotextile properties.

Key-words: geotextile tubes, fine gold ore tailings, stacked geotextile tubes.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE MINERAÇÃO	5
2.1.1 <i>Rejeitos de Mineração de Ouro</i>	7
2.1.2 <i>Análise microestrutural dos rejeitos de ouro - Fazenda Brasileiro (Bedin, 2010)</i>	9
2.1.3 <i>Granulometria, limites de Atterberg e índices físicos de rejeitos de ouro</i>	11
2.1.4 <i>Disposição dos rejeitos</i>	14
2.2 TUBOS GEOTÊXTEIS COMO ALTERNATIVA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO	14
2.2.1 <i>Processo de enchimento de tubos geotêxteis</i>	17
2.2.2 <i>Ensaio para avaliação da qualidade do desaguamento de tubos geotêxteis</i>	21
2.2.3 <i>Propriedades do Geotêxtil</i>	27
2.2.4 <i>Filtração e drenagem</i>	32
2.2.5 <i>Comportamento dos tubos geotêxteis sob solicitações mecânicas – Lawson (2008)</i>	34
2.2.6 <i>Uso de tubos geotêxteis na mineração</i>	35
3 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	38
3.1 LOCALIZAÇÃO	38
3.2 INFORMAÇÕES RELEVANTES.....	40
3.2.1 <i>Concepção do Projeto</i>	40
3.2.2 <i>Monitoramento e processo de enchimento</i>	41
4 METODOLOGIA DE PESQUISA	52

4.1	EXUMAÇÃO DO EMPILHAMENTO DE TUBOS GEOTÊXTEIS: COLETA DE AMOSTRAS DE REJEITO	53
4.1.1	<i>Exumação do tubo geotêxtil TG14</i>	55
4.1.2	<i>Exumação do tubo geotêxtil TG10</i>	58
4.1.3	<i>Exumação do tubo geotêxtil TG5</i>	60
4.1.4	<i>Coleta de amostras de geotêxtil</i>	64
4.1.5	<i>Caracterização física do rejeito</i>	66
4.1.6	<i>Estabilidade interna dos rejeitos</i>	67
4.1.7	<i>Caracterização mineralógica</i>	70
4.1.8	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i>	70
4.1.9	<i>Ensaio de Adensamento Edométrico Convencional</i>	71
4.1.10	<i>Ensaio de Adensamento Edométrico com Medida de Permeabilidade</i>	74
4.1.11	<i>Ensaio triaxiais CIU_{sat}</i>	75
4.2	ENSAIOS DE PARA AVALIAÇÃO DO GEOTÊXTEL COLETADO	78
4.2.1	<i>Preparação das amostras para os ensaios de tração faixa larga</i>	78
4.2.2	<i>Determinação da espessura</i>	83
4.2.3	<i>Determinação da gramatura</i>	84
4.2.4	<i>Microscopia eletrônica</i>	84
4.3	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	85
4.3.1	<i>ANOVA</i>	85
4.3.2	<i>Diagrama de caixas</i>	88
5	APRESENTAÇÃO RESULTADOS - EXUMAÇÃO	89
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS – REJEITO	96
6.1	ÍNDICES FÍSICOS	96

6.2	SEGREGAÇÃO HIDRÁULICA	97
6.3	PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS.....	107
6.4	ANÁLISE DA ESTABILIDADE INTERNA	108
6.5	ADENSAMENTO EDOMÉTRICO CONVENCIONAL.....	109
6.6	ADENSAMENTO EDOMÉTRICO COM MEDIDA DE PERMEABILIDADE.....	115
6.7	ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL - TIPO CIU	117
6.8	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	119
6.9	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	122
7	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS – GEOTÊXTIL.....	127
7.1	INTRODUÇÃO.....	127
7.2	PROPRIEDADES FÍSICAS	127
7.3	RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SIMPLES	132
7.3.1	<i>ANOVA</i>	139
7.3.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	142
	CONCLUSÕES.....	148
	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152
	APÊNDICE A – ENSAIOS TRIAXIAIS	159
	APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	168
	APÊNDICE C – ANOVA	178

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Participação das principais substâncias metálicas no valor de produção mineral comercializada em 2017. (Adaptado de DNMP, 2018)	6
Figura 2-2: Fluxograma simplificado da Usina Fazenda Brasileiro (Peres <i>et al.</i> , 2002)	9
Figura 2-3: Análise microestrutural de rejeito não-ciclonado da mina Fazenda Brasileiro (Bedin, 2010).....	10
Figura 2-4: Curvas granulométricas obtidas por Oliveira <i>et al.</i> (2018).	12
Figura 2-5: Características típicas de um tubo geotêxtil (adaptado de Lawson, 2008).	15
Figura 2-6: Dimensões relevantes de um tubo geotêxtil preenchido com material arenoso (adaptado de Palmeira, 2018).....	16
Figura 2-7: Esquema da plataforma de deságue de tubos geotêxteis (adaptado de Maurer, 2011).	17
Figura 2-8: Etapas de enchimento, deságue e adensamento no interior de um tubo geotêxtil (adaptado de Lawson, 2008).	18
Figura 2-9: Vazão de fluido que sai do sistema de tubos geotêxteis (adaptado de Yee & Lawson, 2012).....	19
Figura 2-10: Condições no interior do tubo geotêxtil durante as fases de enchimento e deságue: (a) início do primeiro enchimento; (b) início da primeira fase de deságue; (c) fim da primeira fase de deságue; (d) ao final do enchimento subsequente; (e) início da fase de deságue subsequente; (f) ao final da fase subsequente de deságue (adaptado de Yee & Lawson, 2012).	20
Figura 2-11: Segregação de partículas no interior de um tubo geotêxtil (Freitas Silva, 2017).	21
Figura 2-12: Sequência do ensaio do cone: (a) amostra de rejeito bruto, (b) aspecto da amostra de rejeito após a adição de floculação química; (c) vertimento da amostra de rejeito no cone, (d) material sólido retido no geotêxtil e (e) aspecto do líquido percolado (Freitas Silva, 2017).	22
Figura 2-13: Desenho esquemático do ensaio de filtração sob pressão. (Adaptado de Khachan e Bhatia, 2017)	23
Figura 2-14: Montagem ensaio de bolsa fechada (adaptado de ASTM, 2013).....	24
Figura 2-15: Montagem e execução do ensaio de bolsa suspensa de geotêxtil (HBT) (Martins, 2006).....	25
Figura 2-16: Protótipo de grande dimensão de tubo geotêxtil: (a) abertura do tubo geotêxtil na plataforma de desaguamento, (b) enchimento, (c) monitoramento e (d) abertura do tubo geotêxtil (Yee <i>et al.</i> (2012).	26
Figura 2-17: Resultados de ensaios de tração para espécimes com diferentes dimensões (Raumann, 1979).....	29
Figura 2-18: Modelos típicos de garras de ensaio de tração à faixa larga: (a) garra de pressão, (b) garra cilíndrica (ASTM, 2017).	30
Figura 2-19: Representação esquemática de materiais com elevada umidade (Adaptado de Gaffney, 2001).	33

Figura 2-20: Condições de Estado Limite Interno: (a) ruptura do geotêxtil; (b) perda da capacidade de retenção do geotêxtil; (c) deformações do material de enchimento.	34
Figura 2-21: Condições de estado limite externo de tubos geotêxteis: (a) deslizamento, (b) rotação ao redor do pé do tubo; (c) capacidade de carga do solo subjacente; (d) estabilidade global; (e) erosão junto à base; (f) recalque no solo de fundação (Lawson, 2008).....	35
Figura 2-22: Empilhamento de formas têxteis tubulares preenchidas com rejeito de mineração na mina de Talvivaara, Finlândia (Wilke <i>et al.</i> 2015).....	36
Figura 2-23: Tubos geotêxteis preenchidos para alteamento de barragem (Yang <i>et al.</i> , 2019).	37
Figura 2-24: Projeto de alteamento de barragem com tubos geotêxteis (Yang <i>et al.</i> , 2019)... ..	37
Figura 3-1: Vista panorâmica da FBDM com localização do empilhamento de tubos geotêxteis – julho/2017.....	39
Figura 3-2: Fotografia aérea do empilhamento de tubos geotêxteis – abril/2019.....	39
Figura 3-3: Layout do empilhamento de tubos geotêxteis (Freitas Silva, 2017).	40
Figura 3-4: Alguns instrumentos utilizados por Freitas Silva (2017) para monitorar a geometria do empilhamento antes e após o enchimento dos tubos geotêxteis: (a) câmera e mira-laser instalados de frente para a régua em pórtico; (b) localização da régua.....	41
Figura 3-5: Variação da forma em função da altura (H) dos TG: (a) primeira fase de enchimento, H~0,15 m; (b) segunda fase, H ~0,35 m; (c) terceira fase, H ~0,50 m; (d) quarta fase, H~0,75 m; (e) quinta fase, H ~ 0,90 m; (f) sexta fase, H ~1,00 m (Freitas Silva, 2017).....	42
Figura 3-6: Final do enchimento dos tubos geotêxteis da base do empilhamento (Freitas Silva, 2017).....	43
Figura 3-7: Espaço entre os TG da base do empilhamento preenchidos com rejeito de ouro .	44
Figura 3-8: Procedimento de construção do empilhamento drenado.	44
Figura 3-9: Deformações no tubo geotêxtil (Freitas Silva, 2017).....	44
Figura 3-10: Vista lateral do empilhamento.....	45
Figura 3-11: Procedimento de construção do empilhamento drenado.	46
Figura 3-12: Iminência de rolamento do TG 14 (Freitas Silva, 2017).....	47
Figura 3-13: Detalhe da amarração realizada na flange do TG14.....	47
Figura 3-14: Amarração utilizada no enchimento do TG13.	48
Figura 3-15: Empilhamento de tubos geotêxteis (Freitas Silva, 2017).....	48
Figura 3-16: Coleta de amostra de rejeito no interior do tubo geotêxtil (Freitas Silva, 2017).	49
Figura 3-17: Curva de dessecamento para amostras do ensaio de campo e de laboratório (Freitas Silva, 2017).	50
Figura 4-1: Seção transversal do empilhamento de tubos geotêxteis realizado na mina Fazenda Brasileiro. (adaptado de Freitas Silva, 2017).	54
Figura 4-2: Seção longitudinal de um tubo geotêxtil com indicação do plano de coleta de amostras de deformadas (D) e indeformadas (I).	54
Figura 4-3: Trincas observadas no rejeito confinado na lateral direita do tubo geotêxtil localizado no nível superior do empilhamento (TG14).	55

Figura 4-4: Trincas no rejeito confinado na lateral direita do tubo TG14.	56
Figura 4-5: Moldagem do bloco indeformado coletado no TG 14.	56
Figura 4-6: Exumação do TG 14.....	57
Figura 4-7: Esquema de seção longitudinal do TG 14: (a) nomenclatura das amostras de rejeito coletadas; (b) seção transversal do empilhamento com indicação TG14.....	57
Figura 4-8: Desmontagem do empilhamento com auxílio da retroescavadeira para retirada do TG 14.....	58
Figura 4-9: Esquema de seção longitudinal do TG 10: (a) nomenclatura das amostras de rejeito coletadas; (b) seção transversal do empilhamento com indicação TG10.....	59
Figura 4-10: Sequência de exumação do tubo geotêxtil G10: (a) Início de coleta de amostra deformada na extremidade esquerda do tubo; (b) ao final da coleta de amostra deformada; (c) início da moldagem do bloco indeformado; (d) bloco indeformado sendo parafinado geotêxtil.	60
Figura 4-11: Condições do rejeito utilizado para preencher os vazios entre os tubos geotêxteis durante o empilhamento.	61
Figura 4-12: Processo de desmontagem do empilhamento para acesso ao tubo geotêxtil TG5.	61
Figura 4-13: Acesso ao tubo geotêxtil TG5.	62
Figura 4-14: Coleta de amostras deformadas do TG5 – 1º nível do empilhamento.	62
Figura 4-15: (a) Seção longitudinal do TG5 com a nomenclatura das amostras de rejeito coletadas; (b) seção transversal do empilhamento com indicação do tubo geotêxtil G5.....	63
Figura 4-16: Moldagem do bloco indeformado do TG5 – 1º nível do empilhamento.	63
Figura 4-17: Vista superior do tubo geotêxtil com indicação dos locais de retirada de amostras geotêxteis.....	64
Figura 4-18: Retirada de amostras geotêxteis expostas à radiação UV.	65
Figura 4-19: Coleta de amostras de geotêxtil.....	65
Figura 4-20: Equipamento para ensaio de granulometria a laser: (a) Granulômetro a laser Cilas1190; (b) inserção de amostras; (c) imagem do equipamento aberto.	67
Figura 4-21: Classificação de curvas granulométrica de solos amplamente graduados (Lafleur <i>et al.</i> , 1989).....	68
Figura 4-22: Método de descrição da curva granulométrica de Kenney e Lau (1985).....	69
Figura 4-23: Microscópio Quanta 200 FEI.	71
Figura 4-24: Prensa de adensamento <i>Elle International</i> – Laboratório Loctest.	72
Figura 4-25: Preparação do ensaio edométrico: (a), (b) e (c) mostram a sequência de moldagem e inserção do corpo de prova no anel metálico; (d), (e), (f) e (g) mostram a inserção do corpo de prova na bacia de adensamento.	73
Figura 4-26: Prensa de adensamento tipo Bishop do LabGeo da UFMG.	74
Figura 4-27: Prensa de adensamento tipo Bishop do LabGeo da UFMG.	75

Figura 4-28: Preparação de corpo de prova para o ensaio triaxial: (a) o corpo de prova após ter sido talhado; (b) acerto do contorno do CP a partir do moldador; (c) inserção do CP na célula triaxial; (d) inserção da membrana de látex; (e) CP dentro da célula triaxial.....	76
Figura 4-29: Montagem do ensaio de permeabilidade a carga variável.....	77
Figura 4-30: Prensa universal Instron com garra de pressão pneumática.....	79
Figura 4-31: Ensaio de tração em geotêxtil tecido: (a) escorregamento de amostra na garra pneumática, (b) ruptura na região da garra.....	80
Figura 4-32: (a) Prensa universal Instron com garra de rolete; (b) espécime geotêxtil após a ruptura na garra de rolete.....	80
Figura 4-33: (a) Faca elétrica quente utilizada para cortar os espécimes geotêxteis e (b) espécimes cortados.....	82
Figura 4-34: Sequência de inserção do espécime geotêxtil na garra de rolete.....	82
Figura 4-35: Equipamento para medição de espessura de geossintéticos.....	83
Figura 4-36: Organograma das análises MEV das amostras exumadas.....	85
Figura 4-37: Classificação dos espécimes geotêxteis com relação à posição longitudinal.....	86
Figura 4-38: Classificação dos espécimes geotêxteis com relação à posição transversal.....	87
Figura 4-37: Diagrama de caixas ou <i>box plot</i>	89
Figura 5-1: Topografia do empilhamento de TG em maio/2018.....	90
Figura 5-2: Seção longitudinal do empilhamento.....	91
Figura 5-3: Vista da seção transversal do TG-14 e indicação do estado limite externo de deslizamento.....	92
Figura 5-4: Distorção do eixo do TG-14.....	93
Figura 5-5: Exemplo de deformações e dobras no geotêxtil nas junções dos tubos geotêxteis.....	94
Figura 5-6: Seção transversal da estrutura de tubos geotêxteis.....	95
Figura 5-7: Imagem lateral do empilhamento durante a exumação.....	95
Figura 6-1: Teor de umidade do material coletado no TG14 ao longo de 21 dias subsequentes ao enchimento (Freitas Silva, 2017).....	97
Figura 6-2: Variação de D_{10} nos tubos geotêxteis.....	100
Figura 6-3: Variação de D_{30} nos tubos geotêxteis.....	100
Figura 6-4: Variação de D_{60} nos tubos geotêxteis.....	100
Figura 6-5: Variação de D_{90} nos tubos geotêxteis.....	101
Figura 6-6: Curvas granulométricas das amostras coletadas no TG-14.....	103
Figura 6-7: Curva granulométrica de acordo com a NBR 7181 e à laser das amostras coletadas no TG-14.....	103
Figura 6-8: Curvas granulométricas das amostras coletadas no TG-10.....	104
Figura 6-9: Curva granulométrica de acordo com a NBR 7181 e à laser das amostras coletadas no tubo geotêxtil 10.....	105

Figura 6-10: Curvas granulométricas das amostras coletadas no TG-5.....	106
Figura 6-11: Curva granulométrica de acordo com a NBR 7181 e à laser das amostras coletadas no TG-5.	106
Figura 6-12: Variação da massa específica dos grãos ao longo do eixo dos TG.	107
Figura 6-13: Gráfico resultante da avaliação de estabilidade interna.	108
Figura 6-14: Curva de adensamento para a amostra retirada do TG-14.	110
Figura 6-15: Curva de adensamento para a amostra retirada do TG-10.	111
Figura 6-16: Curva de adensamento para a amostra retirada do TG-5.	111
Figura 6-17: Comparação das curvas $\log \sigma' x$ e para os ensaios de adensamento Edométrico	112
Figura 6-18: Comparação das curvas $\log \sigma' x m_v$ para os ensaios de adensamento edométrico	113
Figura 6-19: Comparação das curvas $\log \sigma' x c_v$ para os ensaios de adensamento edométrico.	114
Figura 6-20: Variação do coeficiente de permeabilidade com o nível de carregamento.	115
Figura 6-21: Ensaio de adensamento a) Tensão de pré-adensamento por Casagrande e Pacheco Silva; b) Parâmetros de compressibilidade.	117
Figura 6-22: Amostras submetidas a ensaio de difração de raio-X.....	120
Figura 6-23: Difractometria de Raios-X realizada com o pó total da amostra D5-DI, retirada do TG-5.	121
Figura 6-24: Difractometria de Raios-X realizada com o pó total da amostra D5- M, retirada do TG-5.	121
Figura 6-25: Difractometria de Raio X realizada com o pó total da amostra D10-D, retirada do TG-10.	122
Figura 6-26: Difractometria de Raio X realizada com o pó total da amostra D14-D, retirada do TG-14.	122
Figura 6-27: MEV da amostra deformada de rejeito.....	123
Figura 6-28: Imagem das amostras indeformadas com ampliação de 100x para o TG-5; TG-10; tubo geotêxtil G14 e esquema da seção transversal do empilhamento.	124
Figura 6-29: Imagem das amostras indeformadas com ampliação de 500x para a) tubo geotêxtil 5; b) tubo geotêxtil 10; c) tubo geotêxtil 14 – tirar a imagem do tubo g14 e.....	125
Figura 6-30: Imagem das amostras indeformadas com ampliação de 1000x para a) tubo geotêxtil 5; b) tubo geotêxtil 10; c) tubo geotêxtil 14.	126
Figura 7-1: Vista superior do tubo geotêxtil com indicação da posição de coleta.....	127
Figura 7-2: Mapa de espécimes geotêxteis obtidos do TG-14 para ensaios de tração.....	128
Figura 7-3: Mapa de espécimes geotêxteis obtidos do TG 10 para ensaios de tração.	129
Figura 7-4: Mapa de espécimes geotêxteis obtidos do-TG 5 para ensaios de tração.....	129
Figura 7-5: Espessura dos espécimes geotêxteis.....	130
Figura 7-6: Aspecto dos espécimes geotêxteis 38-41 – TG-14.....	131

Figura 7-7: Massa por unidade de área dos espécimes geotêxteis.	132
Figura 7-8: Exemplo de curvas tensão x deformação – espécimes MD.	133
Figura 7-9: Exemplo de curvas tensão versus deformação – espécimes CMD.	133
Figura 7-10: Alongamento na ruptura dos espécimes cortados na direção MD.	134
Figura 7-11: Alongamento na ruptura dos espécimes cortados na direção CMD.....	135
Figura 7-12: Aspectos dos espécimes após a ruptura cortados no sentido MD.	135
Figura 7-13: Aspectos dos espécimes cortados no sentido CMD após a ruptura.	136
Figura 7-14: Curvas tensão-deformação de espécimes MD virgem e exumados.	137
Figura 7-15: Resistência à tração dos espécimes cortados na direção MD.....	137
Figura 7-16: Curvas tensão-deformação de espécimes CMD virgem e exumados.....	138
Figura 7-17: Resistência à tração dos espécimes cortados na direção CMD.	138
Figura 7-18: Magnitude dos efeitos – modelo resistência à tração.	140
Figura 7-19: Magnitude dos efeitos – modelo alongamento na ruptura.	142
Figura 7-20: Microscopia eletrônica das amostras virgens: (a) ampliação de 40x; (b) ampliação de 100x e (c) ampliação de 300x.....	143
Figura 7-21: Microscopia eletrônica das amostras do TG-14: ‘a’, ‘b’ e ‘c’ são ampliações de 40, 100 e 300 vezes, respectivamente, da amostra superior; ‘d’, ‘e’, e ‘f’ também apresentam ampliações de 40, 100 e 300 vezes para a amostra inferior.	145
Figura 7-22: Microscopia eletrônica das amostras do TG-10: ‘a’, ‘b’ e ‘c’ são ampliações de 40, 100 e 300 vezes, respectivamente, da amostra sujeita a UV; ‘d’, ‘e’, e ‘f’ também apresentam ampliações de 40, 100 e 300 vezes para a amostra não sujeita a UV.	146
Figura 7-23: Microscopia eletrônica das amostras do TG-14: ‘a’, ‘b’ e ‘c’ são ampliações de 40, 100 e 300 vezes, respectivamente, da amostra superior; ‘d’, ‘e’, e ‘f’ também apresentam ampliações de 40, 100 e 300 vezes para a amostra inferior.	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Percentagem de elementos presentes na amostra de rejeito não-ciclonado (Bedin, 2010).....	10
Tabela 2-2: Distribuição granulométrica e variação dos índices físicos para o rejeito de ouro da mina Fazenda Brasileiro encontrados na literatura.	13
Tabela 2-3: Valores típicos de propriedades dos geotêxteis utilizados na fabricação de tubos geotêxteis (Maurer, 2011).	31
Tabela 3-1: Ciclos de enchimento dos tubos geotêxteis utilizados no empilhamento (Freitas Silva, 2017).	51
Tabela 4-1: Propriedades do geotêxtil fornecidas pelo fabricante (TenCate, 2018).....	78
Tabela 4-2: Distribuição dos níveis para cada um dos fatores.	86
Tabela 5-1: Variação na altura dos TG 1, 2 e 3 entre os dias 26/07/2017 e 27/07/2017.	90
Tabela 6-1: Índices físicos obtidos a partir de medidas feitas em campo.	96
Tabela 6-2: Descrição do código das amostras coletadas	98
Tabela 6-3: Diâmetros equivalentes das amostras coletadas	99
Tabela 6-4: Caracterização das amostras de rejeito coletados no TG-14.	102
Tabela 6-5: Caracterização das amostras de rejeitos coletados no TG-10.	105
Tabela 6-6: Caracterização das amostras de rejeitos coletados no TG-5.	107
Tabela 6-7: Características dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométrico... ..	109
Tabela 6-8: Parâmetros de compressibilidade dos ensaios de adensamento edométrico.....	109
Tabela 6-9: Características dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométrico... ..	116
Tabela 6-10: Parâmetros obtidos por meio do ensaio de adensamento edométrico com medida de permeabilidade.	116
Tabela 6-11: Dados iniciais dos corpos de prova – Ensaio CIUsat.	118
Tabela 6-12: Parâmetros de resistência do rejeito confinado no interior dos tubos geotêxteis.	118
Tabela 6-13: Permeabilidade das amostras de rejeito de ouro	118
Tabela 6-14: Resultado dos ensaios de difração de Raios-X - teores dos minerais.	120
Tabela 7-1: Espessura e massa por unidade de área dos grupos de espécimes geotêxteis.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CDTN – Centro de Desenvolvimento da tecnologia nuclear

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

FUNDEP – Fundação de Desenvolvimento e Pesquisa

GDT – Ensaio de desaguamento em bolsa fechada

GRI – *Geosynthetic Research Institute*

HBT – Ensaio de desaguamento em bolsa suspensa (*Hanging Bag Test*)

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

LABCOM – Laboratório de combustível nuclear do CDTN

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MD – Sentido do corte dos espécimes geotêxteis na direção de fabricação (*machine direction*)

CMD – Sentido do corte dos espécimes geotêxteis na direção contrária à de fabricação (*cross machine direction*)

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

PFT – Ensaio de filtração sob pressão (*Pressure Filtration Test*)

TG – Tubo geotêxtil

1. INTRODUÇÃO

Os desafios enfrentados pela indústria de mineração para a disposição de seus rejeitos de forma econômica e segura impulsionam o desenvolvimento de uma atividade minerária mais sustentável. A necessidade de reduzir a umidade e desaguar os rejeitos é um problema ambiental significativo no Brasil e no mundo, impulsionando a indústria de mineração e a academia a avaliar novas tecnologias de disposição de rejeitos para atender as demandas ambientais e sociais frente ao elevado impacto ambiental que os rejeitos podem causar (Portes, 2013).

Problemas ambientais gerados pelos rejeitos podem ser agravados devido à falta e/ou ineficiência de um plano de fechamento da área de mineração, como evidenciado por Karaca *et al.* (2018) em seu trabalho de remediação de solo contaminado com rejeitos de mineração. São comuns áreas de mineração com contaminação elevada de metais pesados, gerando impactos nos ecossistemas e para a saúde humana. De acordo com Carneiro (2018), o custo que esses e outros impactos geram nem sempre são levados em consideração no plano de disposição de rejeitos, e isso pode dificultar a adoção de outras tecnologias de disposição em que o manejo do rejeito ocorre de modo mais controlado.

Recentemente, o Brasil presenciou duas rupturas de barragens de rejeito com consequências socioambientais gravíssimas: i. a ruptura da barragem de Fundão, na cidade de Mariana-MG, em 2015, e ii. a ruptura da mina do córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, em 2019. A ruptura da barragem de Fundão pode ser considerada como um dos maiores acidentes envolvendo rejeitos de mineração no mundo, pois causou danos sociais e ambientais irreversíveis e afetou a bacia do Rio do Doce ao longo de sua extensão nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. O rompimento da barragem da mina do córrego do Feijão ocasionou 259 mortes confirmadas e 11 pessoas desaparecidas, com liberação de cerca de 65% dos rejeitos armazenados. Diante dos possíveis impactos associados, é relevante que métodos alternativos de disposição de rejeito sejam avaliados e utilizados na mineração.

Nesse contexto, os tubos geotêxteis têm se mostrado como uma alternativa tecnológica para desaguar e confinar rejeitos de mineração. De acordo com Lawson (2008), rejeitos produzidos por grandes instalações de mineração são normalmente dispostos em barragens construídas com a técnica de aterro hidráulico em locais isolados. No entanto, existem atividades minerárias

instaladas em locais ambiental e socialmente sensíveis e que geram rejeitos em escala relativamente menor. Para essas circunstâncias, ou ainda para dispor parte dos rejeitos gerados, os tubos geotêxteis são uma alternativa tecnológica para desaguar e confinar os rejeitos de mineração. Os trabalhos de Newman (2004), Van Kessel *et al.* (2016), Assinder *et al.* (2015) e Yang *et al.* (2019) são exemplos de aplicação de tubos geotêxteis para o manejo de rejeitos produzidos na mineração.

Lawson (2008) analisou separadamente o uso de tubos geotêxteis em aplicações marítimas e costeiras e sanitárias e de mineração. Em obras marítimas, os tubos geotêxteis atuam primariamente como estruturas de contenção e proteção. Assim, são comumente preenchidos com areia devido à abundância desse material no local da obra, por sua boa característica mecânica e por apresentar menor deformabilidade após o enchimento. Nas aplicações sanitárias, por outro lado, a tecnologia dos tubos geotêxteis foi adaptada para suprir a demanda de deságue de resíduos, rejeitos e subprodutos de forma mais econômica (Maurer, 2011).

Alternativas de disposição de rejeito de mineração só conseguem ser disseminadas quando são bem embasadas e têm seus riscos avaliados de forma abrangente. Nesse sentido, a linha de pesquisa de tubos geotêxteis aplicada à mineração iniciada na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) deseja avaliar a utilização desses produtos para desaguar rejeitos de mineração e avaliar a utilização dessas unidades empilhadas como uma estrutura geotécnica. Para tanto, Freitas Silva (2017) realizou uma série de ensaios de laboratório e um experimento em campo para avaliar o uso dessa tecnologia para confinar, desaguar e empilhar rejeito de mineração de ouro. O experimento realizado em campo tratou-se de um empilhamento de tubos geotêxteis em formato piramidal, com nove tubos geotêxteis na camada base, quatro tubos na camada intermediária e um tubo na terceira camada.

O presente trabalho tem o propósito de contribuir nesse sentido, apresentando os resultados da exumação e do monitoramento da estrutura construída por Freitas Silva (2017). Serão apresentados e discutidos dados de caracterização geotécnica e mineralógica, bem como as propriedades mecânicas e hidráulicas determinadas em laboratório para o rejeito confinado. Para tanto, um plano de exumação do empilhamento foi elaborado para a coleta das amostras que, em seguida, foram submetidas a um programa experimental em laboratório. A partir da caracterização do rejeito confinado nos tubos, foi feito um estudo para avaliar a segregação de partículas ao longo processo de enchimento. Como a elevada resistência à tração do

geossintético contribui para a estabilidade do empilhamento, amostras de geotêxtil tecido foram coletadas em campo para avaliar a durabilidade do geotêxtil, uma vez que esse esteve em contato com o rejeito, com o fluido de beneficiamento de mineração de ouro e foi exposto à radiação UV ao longo de 22 meses.

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho consistiu na avaliação do desempenho de um empilhamento drenado de tubos geotêxteis, com base em suas propriedades geotécnicas e na observação da estrutura em campo ao término da construção.

Os objetivos específicos foram:

- Acompanhar o comportamento da estrutura de empilhamento de tubos geotêxteis por meio de observação visual em campo e levantamento topográfico, tendo em vista os detalhes construtivos apresentados por Freitas Silva (2017);
- A partir da exumação do empilhamento de tubos geotêxteis, verificar os aspectos visuais da estrutura de empilhamento, tais como: deformações, coloração do geotêxtil e umidade e densidade in situ do rejeito confinado e, coletar amostras para serem submetidas a ensaios laboratoriais;
- Fazer a caracterização geotécnica completa do rejeito por meio de ensaios de teor de umidade, massa específica dos grãos, granulometria, difração de raios-X e microscopia;
- Determinar os parâmetros de compressibilidade do rejeito confinado nos tubos geotêxteis por meio de ensaio de adensamento edométrico convencional e os parâmetros de resistência do rejeito confinado por meio de ensaios triaxiais do tipo CIU_{sat} ;
- Analisar a segregação de material ao longo do eixo tubo geotêxtil por meio de análise dos dados obtidos dos ensaios de granulometria;
- Avaliar o desempenho do geotêxtil tecido – utilizado na confecção dos tubos geotêxteis – por meio de ensaios que verificam as alterações na sua macroestrutura (massa por

unidade área, espessura e resistência à tração), assim como promover uma avaliação qualitativa da microestrutura geotêxtil – por meio de microscopia eletrônica de varredura.

1.2 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório, outros sete capítulos compõem este trabalho. Com o propósito de facilitar o entendimento do trabalho, são comentadas de forma sucinta as partes integrantes.

No capítulo 1 são apresentados alguns dos pontos de justificativa da pesquisa, como as dificuldades de disposição de rejeito de mineração e a alternativa de manejo utilizando tubos geotêxteis. Além disso, são listados os objetivos geral e específicos.

O capítulo 2 é apresenta a revisão bibliográfica que abrange o processo de beneficiamento de minério e a consequente geração de rejeitos – com enfoque no rejeito de ouro – e aspectos relativos às propriedades de tubos geotêxteis para aplicação em rejeitos de mineração.

O capítulo 3 apresenta a área de estudo deste trabalho, o empilhamento de tubos geotêxteis realizado por Freitas Silva (2017). Aspectos relativos à construção desse empilhamento e outros que são relevantes para compreensão deste trabalho são apresentados.

O capítulo 4 apresenta a metodologia da pesquisa, com o detalhamento da exumação realizada na estrutura para coletas de amostra de geotêxtil e rejeito. Em seguida, são apresentadas as metodologias adotadas nos ensaios de avaliação dos materiais obtidos.

Com relação aos resultados, optou-se por dividi-los em três capítulos para facilitar a compreensão. No capítulo 5 estão apresentados os resultados obtidos no monitoramento da estrutura do empilhamento – construída em maio/2018 – com obtenção de dados topográficos, bem como as observações que foram feitas antes do início da exumação, realizada em abril/2019.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados no rejeito, como caracterização geotécnica, parâmetros de compressibilidade e parâmetros de resistência.

O capítulo 7 apresenta os resultados da avaliação do geotêxtil exumado em campo. Por fim, as considerações finais sobre o trabalho estão apresentadas no capítulo Conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais pontos observados em outros estudos que estão relacionados aos objetivos da pesquisa, bem como o referencial teórico que serviu de embasamento para esta dissertação. Na primeira parte serão discutidos, de forma concisa, os aspectos relacionados às atividades de extração mineral e a consequente geração de rejeitos na forma de lama, com ênfase no processamento de ouro. Em seguida serão apresentados os conceitos pertinentes à tecnologia de tubos geotêxteis, com foco na sua utilização em técnicas para a mineração.

2.1 Aspectos Gerais sobre Mineração

Qualquer atividade agrícola ou industrial, na área das indústrias química, metalúrgica, de construção civil ou ainda no cultivo da terra, utiliza minerais e seus derivados. Os fertilizantes, os metais e suas ligas, cimento, a cerâmica e o vidro são exemplos de produtos obtidos a partir de matérias-primas minerais (Luz e Lins, 2010).

Alguns conceitos apresentados por Luz e Lins (2010) são pertinentes no entendimento da atividade de mineração e a consequente geração de rejeitos. De acordo com os autores, uma substância mineral pode ser definida como um corpo inorgânico encontrado na crosta terrestre cuja composição química e propriedades físicas são bem definidas. Um minério, por outro lado, é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos que podem ser aproveitados economicamente. Os minérios são, então, beneficiados por meio de operações de cominuição (britagem e moagem) que modificam a sua granulometria e a concentração relativa entre minerais presentes na rocha de origem. No processo seguinte do beneficiamento obtém-se um concentrado e um rejeito de mineração (Luz e Lins 2010).

Devido à sua rentabilidade econômica, atividades de extração mineral muito contribuem para o desenvolvimento de países cujos recursos minerais estejam aptos a serem explorados. Como discutido por Espósito (2000), a mineração gera riquezas que ajudam a viabilizar o desenvolvimento de tecnologias que promovem uma melhor qualidade de vida para a sociedade. Segundo IBRAM (2018), a indústria extrativa mineral tem participação expressiva no Produto Interno Bruto (PIB) no Brasil, representando 1,4% do PIB e gerando cerca de 180 mil empregos diretos. Portanto, o segmento de exploração mineral se configura como um

importante fomentador da indústria nacional, uma vez que fornece matéria-prima para as indústrias do país.

As substâncias metálicas, em especial, têm representatividade considerável para indústria extrativa no Brasil. De acordo com DNPM (2018), as substâncias da classe dos metálicos corresponderam por, aproximadamente, 80% do valor total da produção mineral brasileira comercializada ao longo do ano de 2017. Dentre as 37 substâncias metálicas com títulos ativos de pesquisa e lavra cadastrados na Agência Nacional de Mineração, 11 (onze) destacam-se no valor de produção comercializada, quais sejam: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. O valor da produção comercializada dessas onze substâncias totalizou 88,5 bilhões de reais em 2017. A mineração de ouro correspondeu a 8,9% no valor total da produção mineral comercializada no Brasil em 2017, como ilustrado pela Figura 2-1.

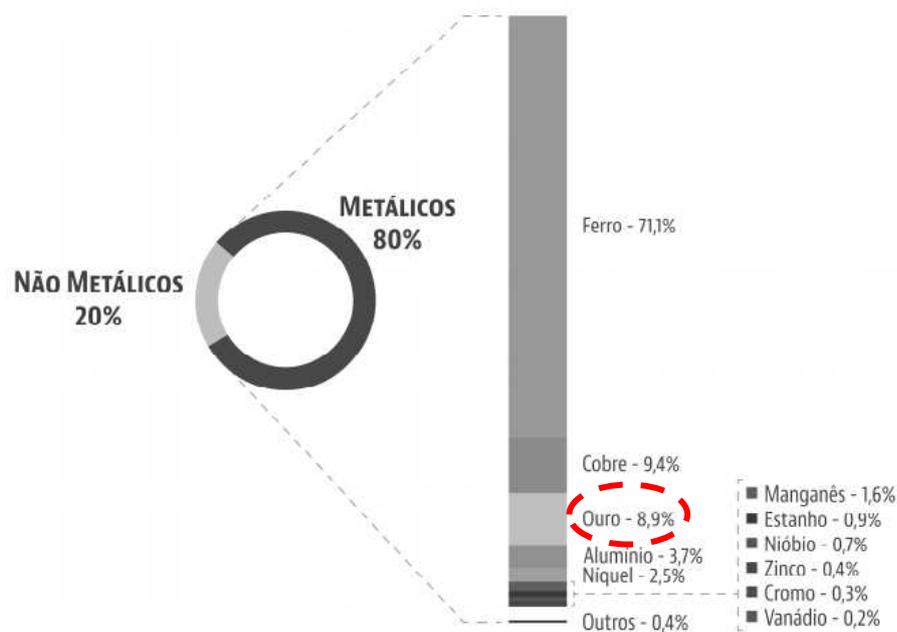


Figura 2-1: Participação das principais substâncias metálicas no valor de produção mineral comercializada em 2017. (Adaptado de DNMP, 2018)

Apesar de impulsionar o desenvolvimento das regiões onde são instaladas, as atividades de mineração geram impactos no meio ambiente e na sociedade. Esses impactos devem-se,

principalmente, à característica intrínseca à atividade extrativa de produzir grande volume de rejeitos que precisam ser gerenciados de forma adequada. Isso ocorre porque os minerais de valor econômico estão, frequentemente, associados ao minério bruto em concentrações muito baixas. A mineração de ouro é um bom exemplo dessa característica. De acordo com DNPM (2018), o teor médio de ouro (*Au*) extraído das jazidas brasileiras em 2018 foi de 0,65 g/t, de tal forma que as mineradoras brasileiras extraíram 92 milhões de toneladas de minério bruto para produzir aproximadamente 60 toneladas de ouro em 2018. Assim, após o beneficiamento e obtenção das substâncias de interesse, resta um grande volume de material processado sem valor econômico a ser disposto com o menor impacto possível. Nesse sentido, o conhecimento do comportamento geotécnico dos rejeitos torna-se fundamental para garantir a segurança do método de disposição selecionado e diminuir os possíveis impactos para meio ambiente e sociedade.

2.1.1 Rejeitos de Mineração de Ouro

As características físicas, químicas e mineralógicas dos rejeitos dependem do tipo de minério explorado, do método de beneficiamento e dos processos químicos empregados. Como apresentado por Bedin (2010), para analisar as características geotécnicas de um rejeito de mineração, faz-se necessário considerar que este material é resultado de uma sucessão de processos físicos e químicos. Portanto, não há, necessariamente, uma correlação entre a distribuição de tamanhos das partículas sólidas e sua composição mineralógica, como acontece com os solos naturais.

A quantidade de finos de um rejeito não corresponde, necessariamente, à presença de minerais típicos da fração silte ou de argilominerais. A fração fina (partículas com diâmetro inferior a 0,075mm) pode, na verdade, tratar-se de minerais primários finamente divididos. Assim, a composição química, estrutura cristalina e superfície específica das partículas que compõe os rejeitos são fatores determinantes para o comportamento geotécnico do material (Bedin, 2010).

O processo de beneficiamento de minério de ouro, em especial, apresenta algumas particularidades em relação aos tratamentos utilizados na extração de outros minerais. Isso ocorre porque o ouro contido no minério é encontrado em sua forma química elementar, caracterizada por alta densidade e maleabilidade. As etapas de processamento do minério de ouro podem se restringir à adequação granulométrica para as etapas hidro metalúrgicas

subsequentes ou ainda envolver estágios de concentração. Quando estágios de concentração são necessários, as propriedades diferenciadoras exploradas são a diferença de densidade e de hidrofobicidade (natural ou induzida) entre o ouro e os minerais a ele associados. As etapas de preparação do minério de ouro devem preservar as partículas de ouro livre de tal maneira que o processo de beneficiamento priorize a recuperação do ouro contido na polpa; dessa maneira, o teor de ouro no concentrado e a remoção de impurezas são objetivos secundários no processo de beneficiamento do minério de ouro (Peres *et al.*, 2002).

A etapa de preparação do minério consiste em britagem, peneiramento, moagem e classificação. Esses processos ocorrem tanto em circuitos onde há a concentração prévia do minério quanto em circuitos nos quais o minério é submetido diretamente à extração hidrometalúrgica. O objetivo do processo de britagem é reduzir os fragmentos de rocha, envolvendo uma primeira britagem, chamada grosseira, realizada por britadores de mandíbula ou de impacto e, em seguida, britagem fina, realizada por britadores giratórios ou cônicos. O peneiramento visa separar as partículas obtidas na britagem em frações de tamanhos distintos; para tanto, podem ser utilizadas peneiras vibratórias convencionais, horizontais e inclinadas. Após os processos de britagem e peneiramento, o tamanho das partículas pode ser reduzido por mecanismos de arredondamento de partículas, quebra de pontas e abrasão realizadas por moinho de barras ou bolas (Araújo, 2006).

A etapa final de preparação do minério é finalizada com a classificação, que consiste na separação das partículas por meio de equipamentos de ciclonagem, resultando em duas frações com diferentes distribuições granulométricas. A fração composta por uma porção maior de partículas grosseiras é conhecida como *underflow*, enquanto a fração composta por proporção maior de partículas finas é chamada de *overflow*. Os rejeitos que não são submetidos a esse processo são ditos não-ciclonados (Peres *et al.*, 2002). A Figura 2-2 apresenta um fluxograma do processo de beneficiamento de ouro da Usina *Fazenda Brasileiro*, situada no estado da Bahia, local fonte dos materiais utilizados neste trabalho. Após o processo de preparação descrito anteriormente e ilustrado pelo fluxograma, o beneficiamento é realizado pelo intermédio de ataques químicos, com dissolução do ouro por uma solução de cianeto de sódio e posterior recuperação com uso de duas metodologias: adição de carvão ativado em polpa (CIP) ou adsorção no próprio líquido lixiviado (CIL). Para tanto, a polpa proveniente do circuito de lixiviação flui gravitacionalmente até um conjunto de tanques com agitação mecânica, nos

quais a polpa é contactada em contracorrente com carvão ativado. A solução resultante do processo é encaminhada para a etapa de produção do metal mediante a eletrólise ou precipitação com zinco. Como o zinco é mais eletronegativo que o ouro, ocorre uma troca iônica na solução, resultando num precipitado de composição entre 20% e 50% de ouro.

Os processos de classificação podem ser utilizados de forma combinada para proporcionar taxas mais elevadas de recuperação do minério de ouro, entre 75% e 98%. Ao final do beneficiamento, a produção de rejeitos ocorre à uma vazão de 190 m³/h, sendo 30% sólidos em peso, que são encaminhados até os locais de disposição (Bedin, 2010). No trabalho desenvolvido por Freitas Silva (2017), no período de realização do enchimento de tubos geotêxteis no interior da mesma mineradora, a concentração do rejeito produzido era de 50% (em peso).

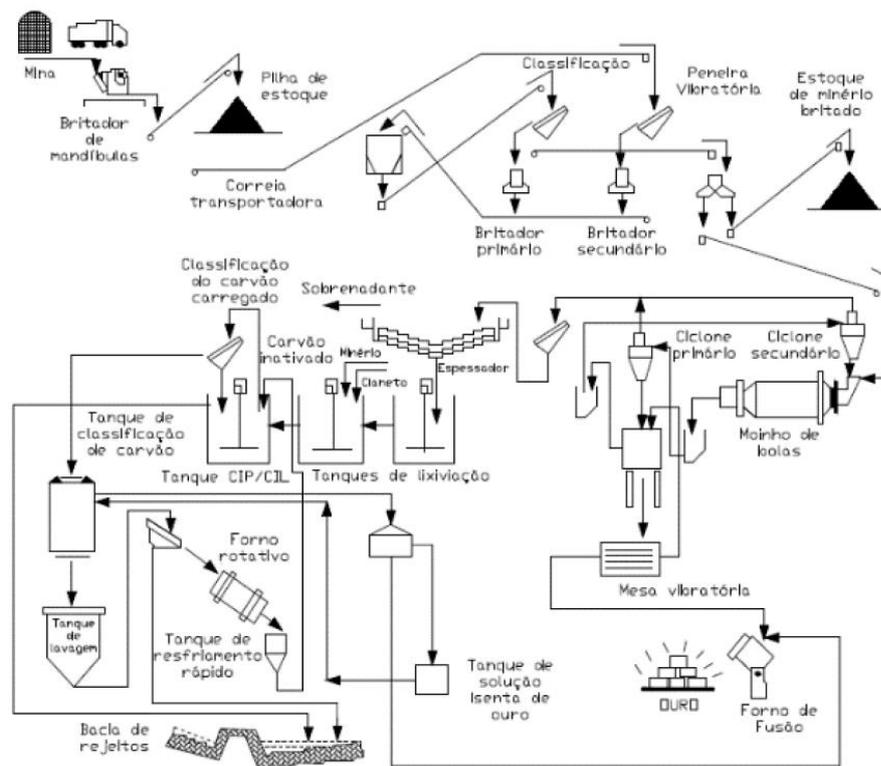


Figura 2-2: Fluxograma simplificado da Usina Fazenda Brasileiro (Peres *et al.*, 2002)

2.1.2 Análise microestrutural dos rejeitos de ouro - Fazenda Brasileiro (Bedin, 2010)

Bedin (2010) apresenta um conjunto de imagens obtidas com o uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de rejeitos de *underflow* e não-ciclonados provenientes da mina Fazenda

Brasileiro. Essas imagens são úteis para avaliar características microestruturais elementares desses materiais. A Figura 2-3 mostra as imagens obtidas por MEV para o rejeito não-ciclonado com aumento de 250 e 500 vezes. Nota-se que o resíduo de ouro apresenta um padrão microestrutural com grãos relativamente angulares, com quantidade significativa de finos e, aparentemente, sem tendência à floculação.

Ensaio de varredura por EDX (espectroscopia de raios x por dispersão em energia) também foram realizados para determinação dos elementos presentes na amostra. Por meio dessa técnica, foi possível determinar a proporção (em peso) dos elementos químicos presentes na mineralogia da amostra. A Tabela 2-1 apresenta a percentagem dos elementos encontrados, sendo os mais dominantes: sílica, ferro e alumínio e, em menor proporção, magnésio, potássio, sódio, titânio e cálcio.

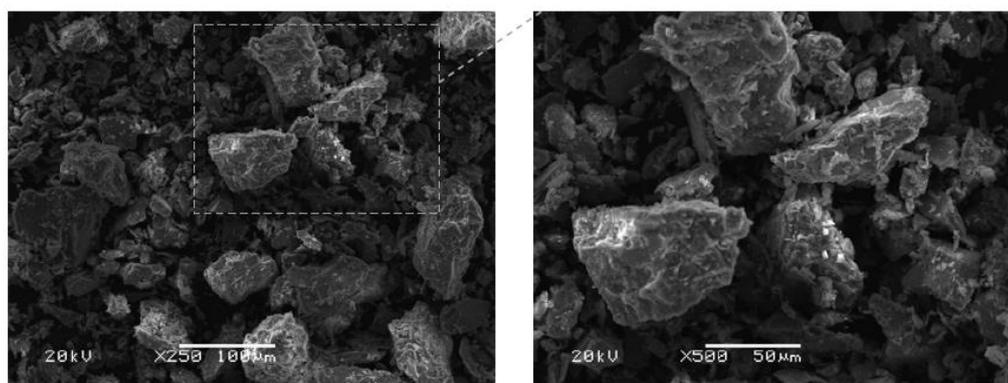


Figura 2-3: Análise microestrutural de rejeito não-ciclonado da mina Fazenda Brasileiro (Bedin, 2010).

Tabela 2-1: Percentagem de elementos presentes na amostra de rejeito não-ciclonado (Bedin, 2010).

Elemento	% Peso (Não-ciclonado)	Elemento	% Peso (Não-ciclonado)
Sódio (Na)	1,91	Cálcio (Ca)	10,16
Magnésio (Mg)	11,39	Titânio (Ti)	1,27
Alumínio (Al)	21,34	Ferro (Fe)	23,45
Silício (Si)	29,97	Total	99,95
Potássio (K)	0,46		

2.1.3 Granulometria, limites de Atterberg e índices físicos de rejeitos de ouro

A mineralogia da rocha, juntamente com o processo de extração e beneficiamento do minério influenciam diretamente na granulometria dos rejeitos de mineração. Como essas características variam de região para região, não é possível definir uma curva granulométrica característica para os rejeitos. No entanto, de acordo com Vicky (1983), a granulometria típica de rejeitos de mineração está na faixa dos siltes. Ainda assim, os rejeitos tanto podem conter parcelas consideráveis de partículas de granulometria de areias, quanto material de granulometria fina. Nesse sentido, vários trabalhos científicos (Bedin, 2010; Klahold, 2013; Nierwinski, 2013; Sosnoski, 2016; Freitas Silva, 2017; Oliveira *et al.*, 2018) já foram realizados com rejeito de processamento de ouro coletados na mina Fazenda Brasileiro. Os principais resultados encontrados por estes autores estão resumidos na Tabela 2-2.

Bedin (2010) utilizou amostras de rejeito de processamento de ouro da mina Fazenda Brasileiro em seu estudo do comportamento geomecânico de rejeitos de mineração. Segundo a autora, as amostras foram coletadas superficialmente e em profundidade de forma a serem representativas de um reservatório de rejeitos ciclados (*underflow*) e de outro reservatório de rejeitos não ciclados. O rejeito *underflow* foi classificado pela autora como um silte-arenoso, ao passo que o material não-ciclado tratava-se de um silte-areno-argiloso.

Nierwinski (2013) avaliou o potencial de liquefação de rejeitos de mineração a partir de ensaios de campo; para tanto, realizou caracterização de material coletado em dois pontos, que chamou de Ilha 01 e Ilha 02, localizados no reservatório de rejeitos ciclados (*underflow*). A caracterização geotécnica do material coletados nesses pontos foi feita para as profundidades de 2,0 (dois) e 4,0 (quatro) metros à época da coleta. Além disso, a autora verificou a diminuição do teor de umidade com a profundidade, indicando a tendência de redução do índice de vazios (*e*) com aumento das tensões em profundidade. Sosnoski (2016) realizou e interpretou ensaios de campo do tipo DMT e CPTU no rejeito de mineração de ouro da mina Fazenda Brasileiro. A investigação foi realizada em um ponto localizado no lago de armazenamento de rejeitos chamado de Lago II; o rejeito coletado foi classificado como silte-arenoso.

Os rejeitos de processamento de ouro utilizados nos trabalhos de Freitas Silva (2017) e Oliveira *et al.* (2018) foram coletados ao final do processo de beneficiamento do minério, antes de ser disposto nos lagos. A Figura 2-4 apresenta as curvas granulométricas obtidas por Oliveira *et al.*

(2018). Tratou-se de rejeitos não-ciclonados, amostrados na forma de lama, com percentagem de sólidos próxima a 50% (em peso). Esse material foi utilizado ao longo do estudo do empilhamento de tubos geotêxteis para mineração. Os dados apresentados na Tabela 2-2 foram obtidos durante a caracterização geotécnica do rejeito utilizado na pesquisa.

Cabe notar que, tanto Freitas Silva (2017) quanto Oliveira *et al.* (2018), realizaram ensaios da fase de sedimentação para determinação da curva granulométrica em quatro situações diferentes: com o fluido do beneficiamento com adição e sem adição de defloculante, com água destilada com adição e sem adição de defloculante. Os dados apresentados na Tabela 2-2 são os dados obtidos para a fase de sedimentação seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2018) (água destilada e floculante), a critério de comparação com os demais trabalhos que seguiram a referida normatização. Nota-se que as curvas obtidas por peneiramento e sedimentação sem defloculante e sedimentação em fluido, curvas 2 e 3, respectivamente, apresentaram formato semelhante. Além disso, houve uma clara distinção entre a curva 1 e as curvas 2 e 3, especialmente para diâmetros menores que 0,02mm. Isso indica que o uso do defloculante químico exerceu influência nos resultados das curvas granulométricas.

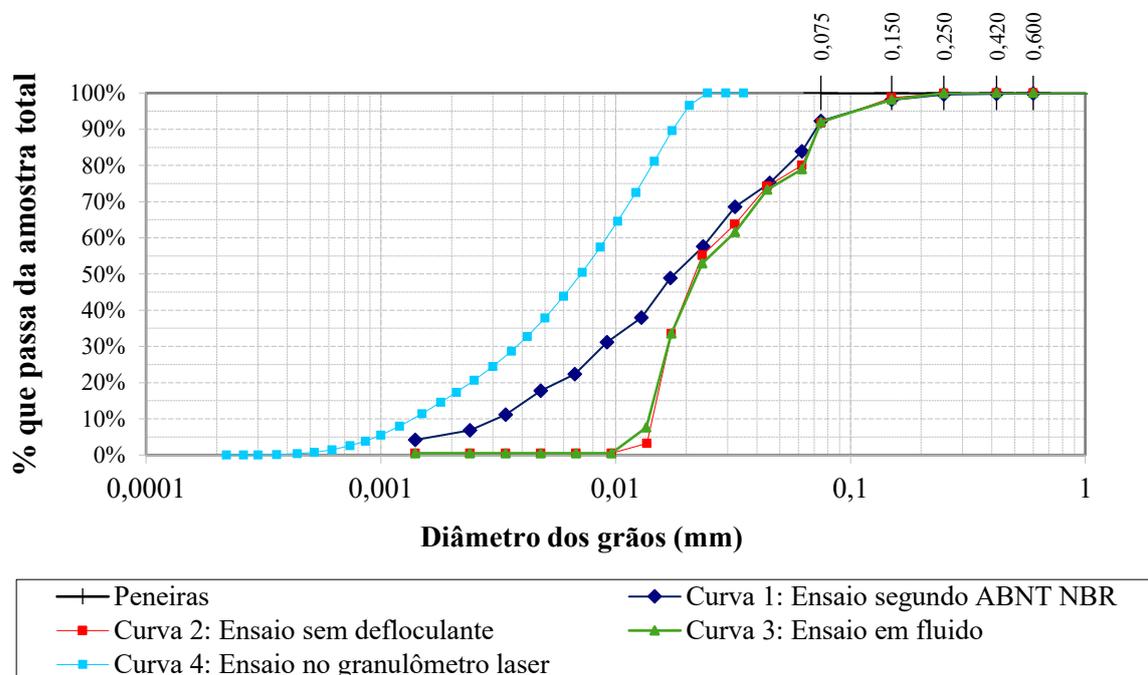


Figura 2-4: Curvas granulométricas obtidas por Oliveira *et al.* (2018).

Tabela 2-2: Distribuição granulométrica e variação dos índices físicos para o rejeito de ouro da mina Fazenda Brasileiro encontrados na literatura.

Autor	Material	Posição	w (%)	ρ_s (g/cm³)	Υ_{nat} (KN/m³)	e	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL	LP
Bedin (2010)	Underflow	Superfície	40,1	3	18,6	1,23	7	63	30	NP	NP
		Profundidade	30	3,15	20,5	1,1					
	Não- ciclonado	Superfície	38,7	3,3	19,3	1,3	15	57	28	NP	NP
		Profundidade	40	3	19	1,25					
Klahold (2013)	Underflow	Ilha 01 - 2m	37,8	2,86	18,9	1,08	1	72	26	NP	NP
		Ilha 02 - 2m					1	52	47	NP	NP
		Ilha 01 - 4m	32,3	2,9	34,3	0,9	6	82	12	NP	NP
		Ilha 02 - 4m					1	70	29	NP	NP
Sosnoski (2016)	Underflow	2,5m	34,9	2,85	19,1	0,97	2	60	38	NP	NP
		4,5m	31,1	2,82	19,5	0,86	9	84	7	NP	NP
Freitas Silva (2017)	Total	-	102	2,85	-	-	7	71	22	23	NP
Oliveira (2018)	Total	-	100	2,93	-	-	5	77	18	23	NP

Nota: w é o teor de umidade, ρ_s é a massa específica dos grãos, Υ_{nat} é o peso específico natural, e é o índice de vazios, LL é o limite de liquidez e LP é o limite de plasticidade.

2.1.4 Disposição dos rejeitos

Algumas das técnicas comuns de disposição de rejeitos úmidos em superfície são: aterro hidráulico, disposição em cava, codisposição de rejeitos e estéreis, disposição subaérea, empilhamento drenado e rejeitos espessados. É comum na mineração brasileira o manejo de rejeitos por meio de barragens. De acordo com a NBR 13.028 (ABNT, 2017), barragens para disposição de rejeitos são estruturas utilizadas para reter, de forma planejada, projetada e controlada, volumes de rejeitos advindos do processo de beneficiamento do minério.

Uma barragem de rejeito construída pela técnica de aterro hidráulico utiliza o próprio rejeito como material de construção, transportando e dispondo o rejeito de forma hidromecânica. Um dique de partida é executado e, a partir desse dique, o rejeito é lançado em sua crista de forma a constituir a fundação e o próximo alteamento (Portes, 2013).

Os alteamentos das barragens de rejeito são realizados de acordo com a necessidade de armazenamento da mineradora. Dessa forma, uma das grandes vantagens de adotar as barragens no manejo de rejeitos de mineração é a possibilidade amortizar os custos de construção ao longo da vida útil da estrutura. No entanto, a insuficiência de especificações que padronizem a construção desse tipo de estrutura gera incertezas em aspectos construtivos e de segurança das barragens de rejeito projetadas com a técnica de aterro hidráulico (Ribeiro, 2000).

De fato, o Brasil testemunhou rupturas de barragens nos últimos cinco anos com consequências socioambientais extremas, como a ruptura das barragens de Fundão, em 2015, e da mina do córrego do Feijão, em 2019. Nesse contexto, torna-se latente a necessidade de avaliação de alternativas para desaguar e confinar os rejeitos de maneira mais segura. Dessa forma, tubos geotêxteis podem ser utilizados como alternativa de desaguoamento de rejeitos de mineração.

2.2 Tubos Geotêxteis como alternativa de disposição de rejeitos de mineração

Tubos geotêxteis são sistemas tubulares fechados fabricados com esse tipo de geossintético. Os geotêxteis tecidos ou não tecidos de elevada resistência à tração são a matéria prima utilizada na fabricação dos tubos geotêxteis, que são posicionados e preenchidos hidráulicamente em campo para, então, adquirirem a geometria prevista em projeto. As principais características de um tubo geotêxtil podem ser vistas na Figura 2-5. O processo de deságue ocorre por meio do

bombeamento do material para o interior do tubo em bocais localizados em intervalos específicos ao longo da porção superior. A tecnologia faz uso das propriedades hidráulicas e mecânicas dos geotêxteis para desaguar materiais enquanto retém as partículas sólidas. Para tanto, o geotêxtil deve ser permeável o suficiente para permitir a passagem do fluido e, ao mesmo tempo, deve reter as partículas sólidas, evitando a perda excessiva de materiais finos (Maurer, 2011).

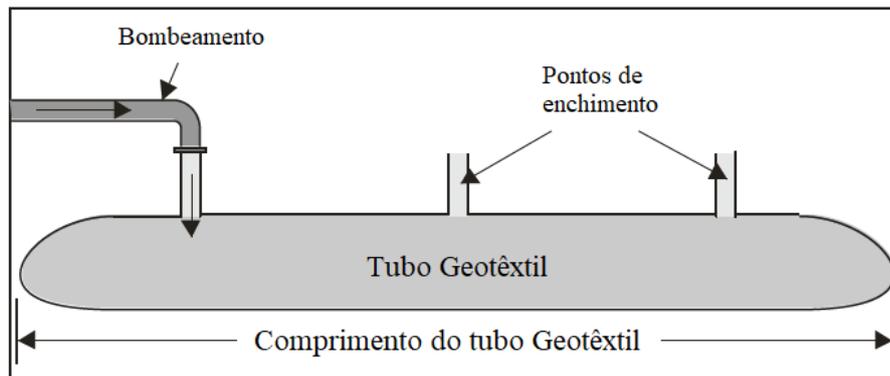


Figura 2-5: Características típicas de um tubo geotêxtil (adaptado de Lawson, 2008).

Atualmente, os tubos geotêxteis são utilizados, por exemplo, em obras marítimas, exercendo funções estruturais, como na construção de quebra-mares e prevenção de erosão costeira. Também podem ser utilizados como elementos de proteção de pilares de pontes, túneis ou tubulações em fundo de mares. Adicionalmente, a tecnologia foi adaptada para suprir a demanda de deságue (redução da umidade) de lamas, rejeitos, lodos de estações de tratamento de água e esgoto além de resíduos e subprodutos produzidos por indústrias (Palmeira, 2018).

O conceito de tubos geotêxteis em aplicações hidráulicas não é novo. De acordo com Koerner (2016), partindo da ideia das bolsas de areia, as primeiras tentativas de preenchimento hidráulico de tubos geotêxteis ocorreram na década de 1950. De fato, a tecnologia de tubos geotêxteis já tem seu uso consolidado para finalidades que incluem: proteção costeira (Ortiz *et al.*, 2003; Das, 2016), confinamento de sólidos dragados (Satyamurthy *et al.*, 2011; Yee *et al.*, 2012) e desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas residuais (Chu e Zhou, 2015; Morgan, 2014). Com relação às aplicações na mineração, alguns trabalhos já foram publicados (Newman, 2004; Wilke *et al.*, 2015; Assinder *et al.*, 2015, Yang *et al.*, 2019). Cabe notar que um projeto pioneiro na utilização dos tubos geotêxteis ocorreu no Brasil, na execução de um dique de contenção na cidade de Cubatão-SP, cujo procedimento e detalhes do empreendimento estão

apresentados em Bogossian *et al.* (1982). O projeto foi finalizado em um terço do tempo esperado para a construção de diques convencionais.

Diferentemente de outras tecnologias, os tubos geotêxteis podem ser fabricados com dimensões específicas para atender as necessidades de cada projeto e fornecem uma área extensa através da qual o deságue pode acontecer. Além disso, a logística e transporte dos tubos geotêxteis é simples e o sistema pode ser significativamente mais econômico se comparado a outras metodologias de desaguamento de materiais (Lawson, 2008).

Para o caso de tubos geotêxteis preenchidos com material arenoso, Lawson (2008) apresenta relações aproximadas entre as dimensões relevantes de projeto. Os tubos geotêxteis são geralmente classificados em termos do diâmetro teórico (D_T , Figura 2-6) ou de perímetro inicial (P_T , Figura 2-6). Apesar de diâmetro e perímetro serem características de interesse, existem outros parâmetros de engenharia mais relevantes para projetos de tubos geotêxteis, especialmente considerando a condição após o preenchimento por via hidráulica. A Figura 2-6 apresenta um esboço da seção transversal do tubo já preenchido com a indicação dos parâmetros de relevantes, altura do tubo geotêxtil (H_T), área de seção transversal (A_T), largura da base (b_T) e largura do tubo (W_T).

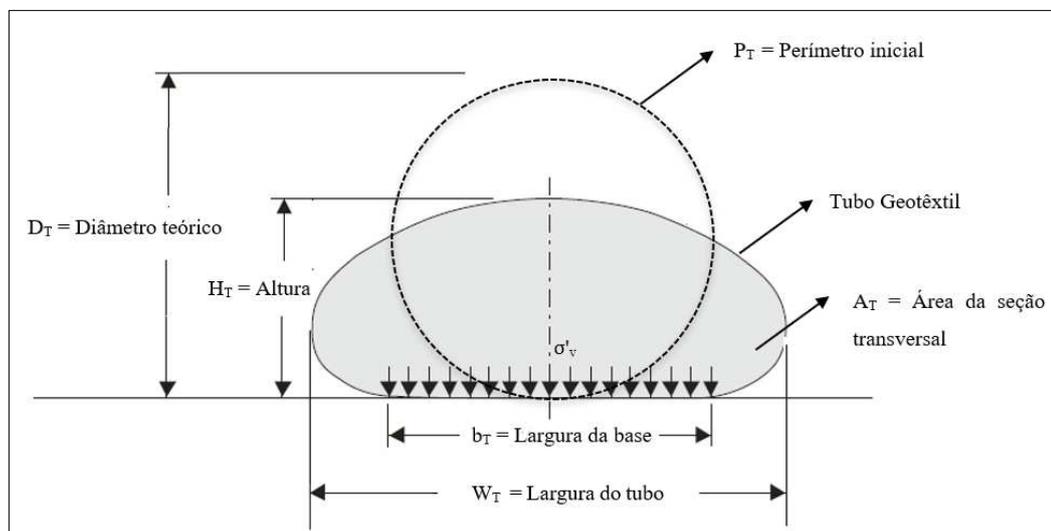


Figura 2-6: Dimensões relevantes de um tubo geotêxtil preenchido com material arenoso (adaptado de Palmeira, 2018).

2.2.1 Processo de enchimento de tubos geotêxteis

De acordo com Maurer (2011), a instalação da infraestrutura para realizar o processo de desaguamento bem como o cronograma do processo de enchimento dos tubos geotêxteis são dois aspectos fundamentais de projeto. Antes de instalar os tubos geotêxteis em campo, uma plataforma de desaguamento, como mostra o desenho esquemático da Figura 2-7, deve ser construída consistindo de uma barreira impermeável (argila compactada, concreto ou geomembrana) situada abaixo de uma camada de drenagem, que pode ser feita de material granular ou ainda de um geocomposto drenante. Essa plataforma garante que o líquido efluente seja drenado adequadamente e coletado para tratamento posterior, caso seja necessário.

O processo de deságue de materiais com o uso de tubos geotêxteis envolve, basicamente, três etapas: o enchimento do tubo, o deságue e o adensamento do material. A fase de enchimento acontece por meio do bombeamento do material para o interior do tubo; nessa fase, o geotêxtil deve ter resistência suficiente para suportar as tensões geradas durante o enchimento. A etapa de deságue consiste na drenagem do fluido *livre* através dos poros do geotêxtil, resultando em redução de volume efetiva. Geralmente, várias etapas de enchimento e deságue são realizadas até que o material prossiga para a fase final de adensamento, com drenagem da água intersticial (Lawson, 2008).

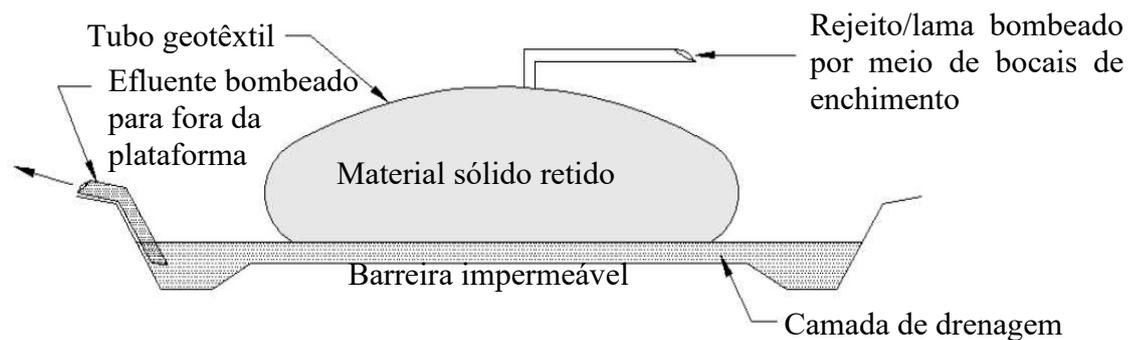


Figura 2-7: Esquema da plataforma de deságue de tubos geotêxteis (adaptado de Maurer, 2011).

O gráfico apresentado na Figura 2-8 – elaborado por Lawson (2008) – mostra a variação do volume do tubo geotêxtil ao longo das fases de enchimento e desaguamento e posterior consolidação e dessecação. A drenagem de fluido para o exterior do tubo geotêxtil ocorre ao longo de todo o processo (enchimento e deságue). O volume de material bombeado depende das dimensões do tubo, da resistência à tração da camada geotêxtil e das costuras que formam o tubo geotêxtil. Uma vez que o volume máximo tenha sido atingido, o bombeamento é cessado para que o deságue ocorra por certo intervalo de tempo.

Em termos de projeto, é importante que o deságue do material ocorra em um intervalo de tempo tal que não comprometa o processo. A taxa de deságue depende das características dos solos suspensos, do teor de sólidos, das características do geotêxtil utilizado e da vazão de bombeamento do material durante o enchimento. Após finalizar a etapa de deságue, o enchimento é iniciado até que o volume máximo do tubo seja atingido novamente (Lawson, 2008).

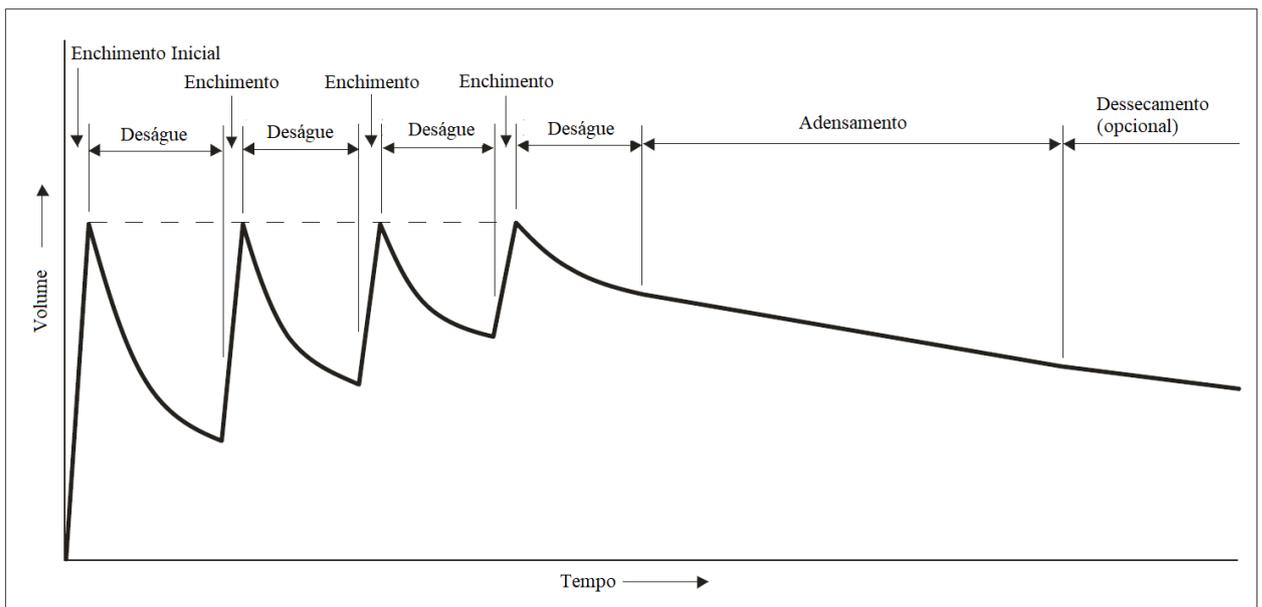


Figura 2-8: Etapas de enchimento, deságue e adensamento no interior de um tubo geotêxtil (adaptado de Lawson, 2008).

Cabe notar que o gráfico da Figura 2-8 faz distinção entre períodos de enchimento e deságue apenas para indicar, respectivamente, quando o bombeamento foi iniciado ou cessado. A drenagem efetiva de fluido para o exterior do tubo ocorre ao longo de todo o processo.

De acordo com Yee e Lawson (2012), há uma diferença significativa na vazão de fluido drenado dos tubos nas fases de enchimento e desaguamento. Durante o enchimento, uma porção significativa da fração sólida bombeada fica em suspensão no interior do tubo, devido à natureza turbulenta do processo de enchimento. Na fase de deságue, a fração líquida é liberada em regime laminar e a vazão de fluido que sai do sistema é menor devido à ausência da pressão de bombeamento. Como pode ser visto na Figura 2-9, a vazão de fluido que sai das bolsas durante o enchimento pode ser até cinco vezes maior em relação à vazão que sai durante o deságue, quando o bombeamento é cessado.

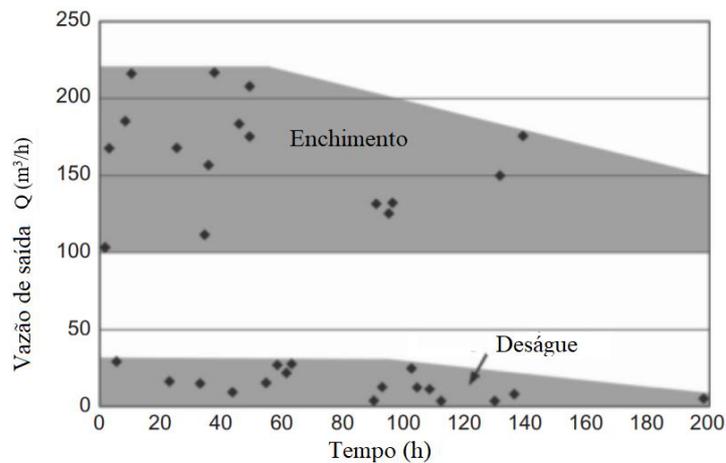


Figura 2-9: Vazão de fluido que sai do sistema de tubos geotêxteis (adaptado de Yee & Lawson, 2012).

O desaguamento pode ser dividido em duas fases, de acordo com as observações de Cantré e Saathoff (2011): i. na etapa de enchimento dos tubos, o deságue é turbulento e dinâmico e, ii. cessado o bombeamento, o deságue é lento e hidrostático. Baseado nos estudos de Cantré e Saathoff (2011), Yee e Lawson (2012) esquematizaram as diferentes condições no interior do tubo geotêxtil durante os ciclos de enchimento e desaguamento. No início do primeiro enchimento (Figura 2-10 - a) a mistura é introduzida sob pressão criando um regime turbulento e uma zona de sólidos suspensos no interior do tubo. A drenagem do fluido tem início na fase do enchimento e, dependendo das características da mistura, a fração sólida mais densa pode sedimentar, havendo a formação de uma camada de sólidos sedimentados na porção inferior do tubo (Figura 2-10 - b). Ao atingir a altura desejada neste primeiro ciclo, o bombeamento do material é paralisado e o tubo entra na fase de deságue. Durante o desaguamento, os sólidos suspensos sedimentam de acordo com a lei de Stokes (Figura 2-10 - c), e a fração líquida é

drenada para o exterior do tubo. Ao final do desaguamento restam apenas os sólidos sedimentados na porção inferior do tubo, que neste momento assume a forma dessa camada de material depositado (Yee e Lawson, 2012).

Após a primeira fase de desaguamento, o bombeamento subsequente é iniciado. Ocorre, então, aumento no volume do tubo devido à injeção de material pela bomba. Basicamente, três zonas distintas podem ser identificadas no interior do tubo nas fases de enchimento subsequentes: zona de sólidos suspensos; zona em sedimentação e zona sedimentada, (Figura 2-10 – d). Nas fases finais de desaguamento (Figura 2-10 – e, Figura 2-10 – f), observa-se uma redução da vazão que sai do tubo, devido à redução da superfície drenante e da colmatção parcial do geotêxtil.

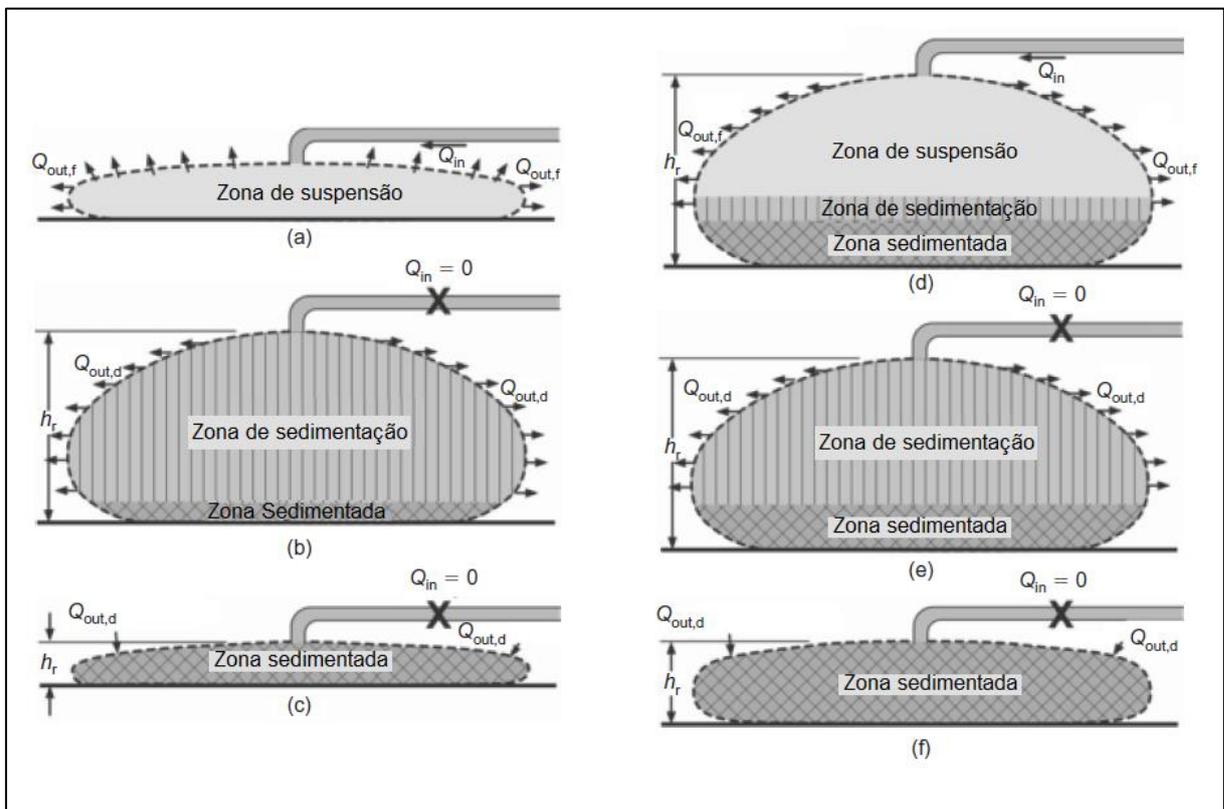


Figura 2-10: Condições no interior do tubo geotêxtil durante as fases de enchimento e deságue: (a) início do primeiro enchimento; (b) início da primeira fase de deságue; (c) fim da primeira fase de deságue; (d) ao final do enchimento subsequente; (e) início da fase de deságue subsequente; (f) ao final da fase subsequente de deságue (adaptado de Yee & Lawson, 2012).

É possível que o processo de enchimento de tubos, descrito por Yee e Lawson (2012) na Figura 2-10, cause segregação de partículas, a depender do material bombeado. Freitas Silva (2017) exumou tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração de ferro e verificou a ocorrência camadas de diferente coloração no interior do tubo (Figura 2-11). Tal fato é indicativo da segregação ocorrida durante o bombeamento para esse material.



Figura 2-11: Segregação de partículas no interior de um tubo geotêxtil (Freitas Silva, 2017).

2.2.2 Ensaios para avaliação da qualidade do desaguamento de tubos geotêxteis

De acordo com Yee e Lawson (2012), a qualidade do desaguamento do tubo geotêxtil deve ser verificada por meio de quatro critérios principais:

- 1) A redução em volume de material, que deve atender à demanda do projeto com relação à concentração final de sólidos;
- 2) O tempo necessário para se atingir a concentração de sólidos desejada, que deve ser compatível com os requerimentos do projeto;
- 3) A retenção de partículas pelo tubo geotêxtil, que deve ser eficiente, não permitindo que ocorra perda de material fino ao longo de todo o processo;
- 4) A qualidade do líquido efluente, que deve ser adequada à legislação específica, caso seja encaminhado a alguma bacia hidrográfica sem tratamento prévio.

Uma série de métodos de ensaio foi desenvolvida para avaliar a qualidade de desaguamento do tubo geotêxtil, englobando ensaios de laboratório e de campo. Um dos ensaios preliminares mais simples para avaliar a qualidade do desaguamento é o ensaio do cone geotêxtil, que consiste em verter uma mistura do material a ser desaguado, cerca de 500 ml,

em uma amostra de geotêxtil com 30 cm de diâmetro, dobrada na forma de cone. Nesse ensaio, são avaliados a quantidade de sólidos passante e o teor de umidade final do material retido no cone. Apesar de simples, esse ensaio é um bom indicativo para avaliar se há ou não necessidade de utilizar floculação química ou, ainda, se houver disponibilidade, testar outros tipos de geotêxteis que possam ser utilizados na fabricação de tubos e verificar a qualidade do desaguamento (Lawson, 2008; Morgan, 2014; Freitas Silva, 2017).

A Figura 2-12 mostra o aspecto do ensaio do cone realizado por Freitas Silva (2017) como ensaio preliminar para avaliar a conveniência, tipo e a dosagem de polímero floculante para aumento da eficiência do desaguamento.

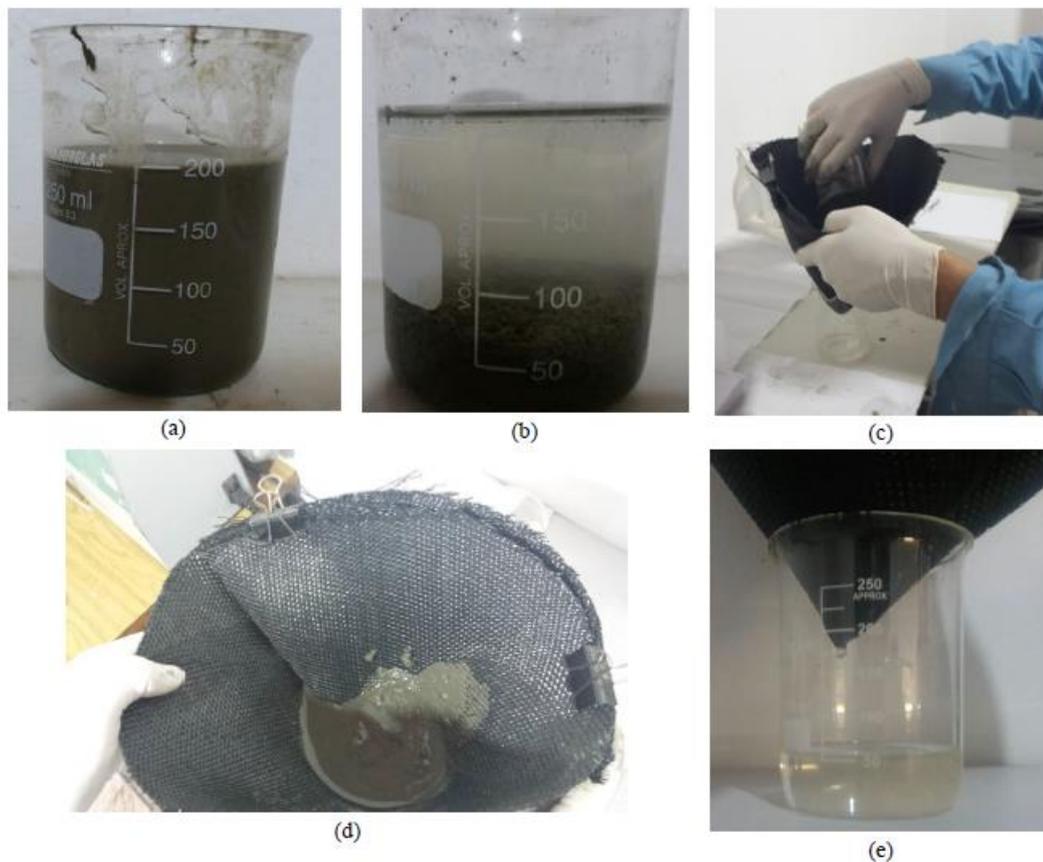


Figura 2-12: Sequência do ensaio do cone: (a) amostra de rejeito bruto, (b) aspecto da amostra de rejeito após a adição de floculação química; (c) vertimento da amostra de rejeito no cone, (d) material sólido retido no geotêxtil e (e) aspecto do líquido percolado (Freitas Silva, 2017).

O ensaio de filtração sob pressão PFT (do inglês *pressure filtration test*) realizado em laboratório, gera informações que são utilizados para estimar o desempenho de desaguamento de tubos geotêxteis antes da implementação de ensaio de larga-escala. Os parâmetros obtidos a

partir do PFT são: o teor de sólidos do material retido, altura dos sedimentos retidos, qualidade do efluente e taxa de desaguamento. O ensaio consiste em verter uma mistura do material a ser desaguado em um permeâmetro previamente equipado com o geotêxtil e adaptado para aplicação de pressão no sistema. De acordo com Khachan e Bhatia (2017), dois fatores principais irão controlar a capacidade total de retenção de sedimentos por um tubo geotêxtil, que são i. as características dos sedimentos retidos e ii. as tensões externas aplicadas aos tubos geotêxteis. Essas tensões externas são exercidas pela pressão de enchimento, as poropressões que surgem ao longo dos ciclos de enchimento, peso próprio do material retido e o empilhamento dos tubos. Por isso o ensaio de PFT é útil na compreensão do comportamento dos sedimentos em relação à aplicação de pressões externas. A Figura 2-13 mostra a montagem de um equipamento feita por Khachan e Bhatia (2017).

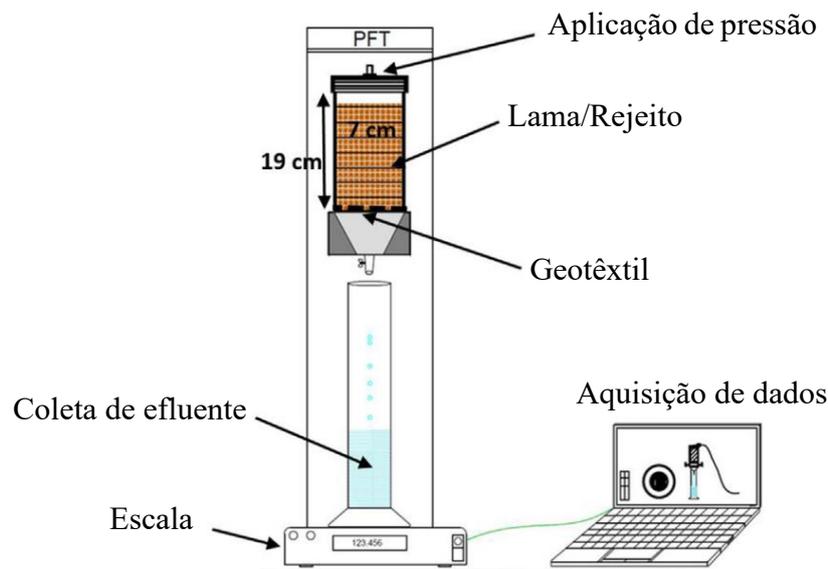


Figura 2-13: Desenho esquemático do ensaio de filtração sob pressão. (Adaptado de Khachan e Bhatia, 2017)

O ensaio de bolsa de pequena dimensão GDT (do inglês *geotextile dewatering test*), cujo procedimento foi formalizado pelo *Geosynthetic Research Institute*, GT15 e também está descrito na norma D7880 (ASTM, 2013), pode ser utilizado como avaliação complementar aos ensaios de laboratório demonstrando a eficiência de desaguamento de tubos geotêxteis por

meio da determinação da quantidade de material que passa através do geotêxtil, o fluxo de efluente e o teor de sólidos retidos na bolsa fechada de geotêxtil. A bolsa pequena tem dimensões de 53 cm por 53 cm (não preenchida) e deve ter todos os lados cortados e costurados com o mesmo padrão de costura. Um flange de 50 mm de diâmetro deve ser instalado na porção central superior da bolsa, para ser conectado a um tubo plástico transparente de 50 mm de diâmetro e 1,10 m de altura. A bolsa deve ser posicionada sob um suporte não corrosível nas dimensões 61 cm x 71 cm x 51 cm (largura x comprimento x altura), com a superfície da mesa constituída por apoios para a bolsa de geotêxtil, mas que permita o pleno desaguamento do sistema. Recomenda-se que seja reservado um volume de 55 a 95 l do material a ser testado no ensaio, que o recipiente de coleta do líquido efluente tenha capacidade de 75 l e que a amostragem do efluente coletado seja feita ao longo do tempo. Um esquema da montagem do ensaio está apresentado na Figura 2-14.

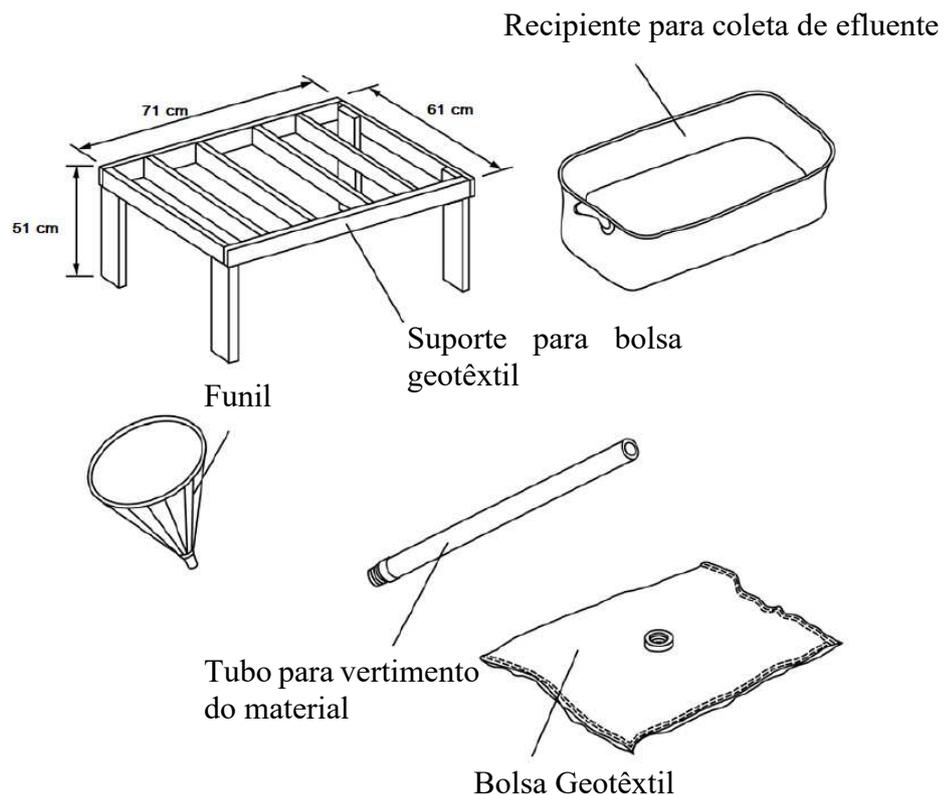


Figura 2-14: Montagem ensaio de bolsa fechada (adaptado de ASTM, 2013).

Há ainda o ensaio de bolsa suspensa HBT (do inglês *Hanging Bag Test*), cujo procedimento está formalizado na norma GT14 do *Geosynthetic Research Institute*, GRI (2004). O ensaio HBT, bem como o ensaio de bolsa de pequena dimensão GDT, são considerados ensaios de semi-performance e foram comparados por Koerner e Koerner (2010) quanto à obtenção de parâmetros para utilização da tecnologia de tubos geotêxteis. Os autores concluíram que o ensaio GDT possui mais vantagens se comparado ao ensaio HBT devido à maior facilidade de execução do ensaio GDT, orientação semelhante ao campo além da possibilidade de avaliar mais parâmetros, como a pressão de enchimento. De fato, Martins (2006) e Tominaga (2010) indicaram a dificuldade de execução do ensaio HBT devido às dimensões do equipamento, como mostra a montagem e execução do ensaio feita por Martins (2006) na Figura 2-15, dificuldade na obtenção do volume da amostra a ser ensaiada e a influência das condições climáticas na realização do ensaio.



Figura 2-15: Montagem e execução do ensaio de bolsa suspensa de geotêxtil (HBT) (Martins, 2006).

Nos casos em que os tubos geotêxteis serão utilizados para desaguar grandes volumes de material, ensaios de escala real por meio de protótipos de grande dimensão são indicados para

avaliar o sistema de desaguamento de forma mais precisa e obter parâmetros reais de projeto. Os ensaios de menor escala são importantes para avaliação da qualidade do desaguamento, mas são de pouca utilidade na estimativa do tempo de desaguamento necessário para a estabilização de tubos geotêxteis em larga escala (Lawson, 2006).

Yee *et al.* (2012) apresentam os resultados do protótipo de grande dimensão realizado para o projeto de remediação de um lago localizado em Tianjin Eco-city, na China. A quantidade de sedimentos moderadamente contaminados que seriam desaguados nesse projeto era estimada em 2.4 milhões de m³. A Figura 2-16 apresenta as etapas de enchimento de um tubo geotêxtil no ensaio de larga escala de Yee *et al.* (2012).

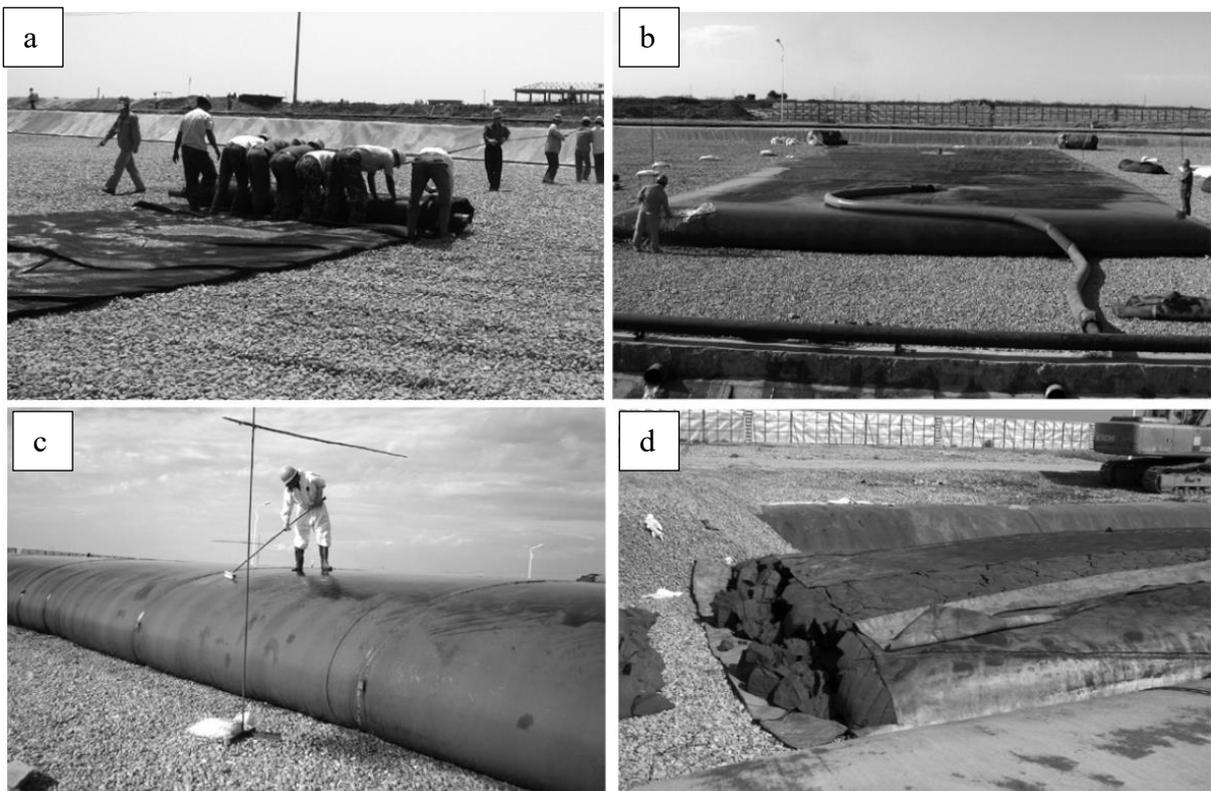


Figura 2-16: Protótipo de grande dimensão de tubo geotêxtil: (a) abertura do tubo geotêxtil na plataforma de desaguamento, (b) enchimento, (c) monitoramento e (d) abertura do tubo geotêxtil (Yee *et al.*(2012).

Foram realizados ensaios do cone e ensaio de bolsa de pequena dimensão (GDT) para avaliar o uso e dosagem de flocculantes, observação dos sólidos retidos no geotêxtil e qualidade do

líquido efluente. No ensaio GDT a dosagem de flocculantes foi ajustada e a concentração de sólidos após 13 dias de ensaios foi de 30%. Dessa forma, os autores estabeleceram a concentração de sólidos de 30% como meta para o ensaio de grande dimensão. Os tubos geotêxteis preenchidos no ensaio de grande dimensão tinham circunferência de 27,5 m, que corresponde a um diâmetro teórico de 8,75 m, e comprimento de 30,6 m. Esses tubos foram projetados para atingirem uma altura máxima de 2,65 m ao longo dos ciclos de enchimento. Devido à própria natureza do teste, realizado em campo, somente três variáveis foram controladas ao longo de todo o enchimento: volume de sólidos bombeados no tempo, a concentração de sólidos e a altura dos tubos geotêxteis. A partir desses dados, os autores calcularam parâmetros importantes para a avaliação do desaguamento a partir da consideração de conservação de massa entre o volume bombeado, volume de líquido efluente e volume de material retido nos tubos geotêxteis.

Ao final do ensaio de grande dimensão, a concentração de sólidos atingiu o patamar de 50%, indicando um desempenho de desaguamento superior ao previsto no ensaio de GDT. Além disso, o processo de desaguamento foi eficiente na retenção de contaminantes nos sedimentos confinados, como foi visto em ensaios feitos no líquido efluente. Resultados de testes realizados em protótipos de grande dimensão também podem ser vistos nos trabalhos de Fowler *et al.* (2005), Shin e Oh (2003) e Freitas Silva (2017).

2.2.3 Propriedades do Geotêxtil

O geotêxtil desempenha três principais funções que são críticas para o comportamento do tubo geotêxtil durante e após o enchimento. Em primeiro lugar, o geotêxtil deve suportar as solicitações mecânicas durante o enchimento e ao longo da vida útil do tubo. Assim, o geotêxtil não deve apresentar deformações ao longo do tempo para evitar que a forma geométrica do tubo sofra quaisquer modificações. Em segundo lugar, o geotêxtil deve apresentar propriedades hidráulicas para reter as partículas sólidas, prevenindo que ocorra erosão interna do material de enchimento. Por último, o geotêxtil deve apresentar durabilidade suficiente para apresentar desempenho adequado ao longo do tempo de vida útil da obra (Lawson, 2008).

Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas críticas para o bom desempenho dos tubos geotêxteis são: a resistência à tração do geotêxtil e a resistência à tração da costura. De modo geral, a condição crítica de solicitação de um tubo geotêxtil ocorre durante a fase de enchimento, na qual as tensões axiais de tração do geotêxtil podem atingir valores próximos ao limite máximo (Baltazar, 2008).

De acordo com Lopes e Lopes (2010), o comportamento à tração de um geotêxtil depende de fatores como o polímero constituinte, a estrutura, processo de fabricação, tipo de ligação, entre outros. No entanto, o polímero constituinte e a estrutura são os dois fatores que mais influenciam na resistência à tração.

O comportamento dos geossintéticos sujeitos à tração é, em geral, caracterizada pela curva que relaciona força por unidade de largura, expressa em kN/m, com as deformações, que são adimensionais e, usualmente, expressas em porcentagem. A partir dessa curva é possível obter a resistência à tração, as deformações na ruptura e o módulo de rigidez do material em questão. Para obter as tensões no geossintético, seria necessário dividir a força por unidade de largura pela espessura do material. Uma vez que a espessura do geossintético varia muito de acordo com a carga aplicada ao longo do ensaio de tração, não é usual utilizar dados de tensão para caracterizar o comportamento de tração em geossintéticos (Lopes e Lopes, 2010).

De acordo com Palmeira (2018), há uma série de ensaios disponíveis que auxiliam na avaliação das propriedades mecânicas do geossintéticos, como o ensaio de tração faixa estreita, ensaio de tração concentrada, ensaio de tração confinada, entre outros. O ensaio de tração faixa larga simula de maneira simplificada a condição de deformação plana que frequentemente ocorrem nas obras em que os geossintéticos são utilizados. A Figura 2-17 apresenta os resultados do estudo realizado por Raumann (1979) que mostra como a largura do espécime geotêxtil a ser ensaiado influencia os resultados de resistência a tração. Investigações conduzidas em laboratório (Rigo e Perfetti, 1980 *apud* Palmeira, 2018) mostraram que a resistência e a rigidez passam a variar pouco para espécimes com altura fixa de 100 mm e larguras superiores a 200 mm.

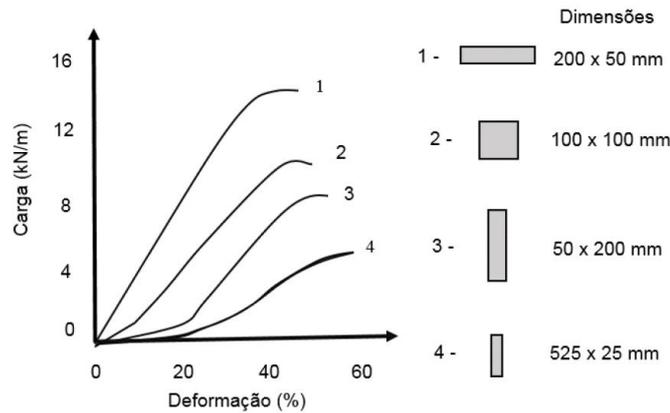


Figura 2-17: Resultados de ensaios de tração para espécimes com diferentes dimensões (Raumann, 1979).

O ensaio de resistência à tração faixa larga, normatizado pela NBR ISO 10319 (ABNT, 2013-a) e D4595 (ASTM, 2017) utiliza os corpos de prova com largura nominal de 200 mm e comprimento suficiente para garantir uma distância de 100 mm entre as garras. A norma D4595 indica que nos casos de geotêxteis tecido de elevada resistência à tração, próxima a 100 kN/m, os espécimes podem ser cortados com largura de 100 mm. Nesses casos, o efeito de estricção lateral, que ocorre nos espécimes ao longo do ensaio, é minimizado pela elevada resistência do geotêxtil, de forma a não prejudicar os resultados e demais comparações feitas a partir do ensaio.

As características das garras utilizadas no ensaio são fundamentais para garantir a qualidade dos resultados, especialmente para os geossintéticos de elevada resistência à tração. A Figura 2-18 (a) mostra um espécime de geotêxtil não tecido rompido em um modelo de garra de pressão. O material que reveste a superfície interna da garra deve conferir aderência ao corpo de prova sem, no entanto, danificá-lo. Caso contrário, o corpo de prova pode romper na região da garra, gerando resultados que não representam de fato a resistência do geossintético. Garras cilíndricas, como a apresentada na Figura 2-18 (b), são mais adequadas para ensaiar geossintéticos de elevada resistência à tração ou ainda aqueles que são mais susceptíveis a escorregar nas garras de pressão por serem formados por várias camadas.

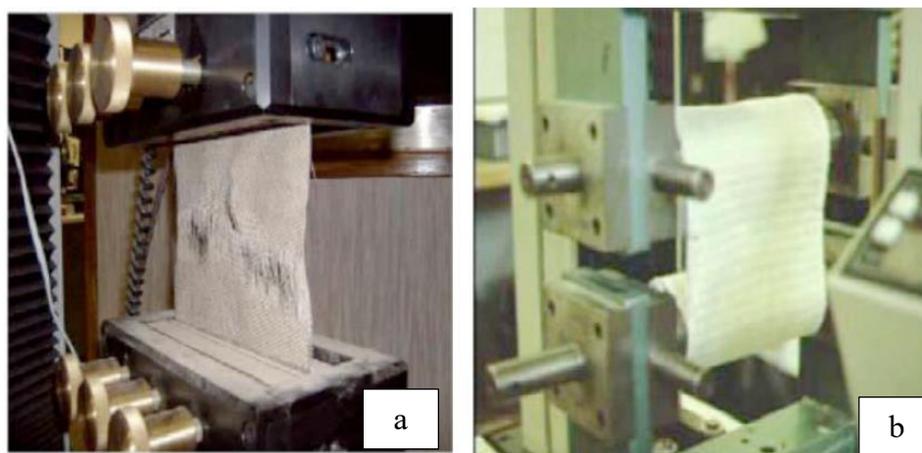


Figura 2-18: Modelos típicos de garras de ensaio de tração à faixa larga: (a) garra de pressão, (b) garra cilíndrica (ASTM, 2017).

Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas dos geotêxteis são igualmente importantes para os critérios de projeto com tubos geotêxteis. Tais propriedades incluem abertura de filtração (O_n), permissividade (ψ) e porosidade (n). A abertura de filtração, considerada por Gardoni (2000) como o parâmetro mais importante no dimensionamento de filtro geotêxteis, é rotineiramente obtida pelo método de peneiramento seco ou hidrodinâmico. Palmeira (2018) explica que, nesse ensaio, o geotêxtil é posicionado sobre uma tela metálica e inserido em um recipiente fechado; o peneiramento do solo através do geotêxtil é induzido por vibração ou movimento cíclico. O material passante é submetido a análise granulométrica para determinação do tamanho do maior grão. O diâmetro do maior grão pode variar de acordo com a norma utilizada; no entanto, ele é usualmente tomado como o valor para o qual 95% em massa dos demais grãos possuem diâmetros menores. O procedimento para obtenção de (O_n) é normatizado em NBR ISO 12956 ABNT (2013-b).

A permissividade, que é a medida da permeabilidade normal ao plano por unidade de espessura do geotêxtil, é uma propriedade hidráulica importante, uma vez que o geotêxtil não deve restringir a drenagem durante o enchimento dos tubos. A Tabela 2-3 apresenta valores típicos de propriedades relevantes de geotêxteis utilizados em aplicações de tubos geotêxteis de acordo com Maurer (2011).

Tabela 2-3: Valores típicos de propriedades dos geotêxteis utilizados na fabricação de tubos geotêxteis (Maurer, 2011).

Propriedades do geotêxteis	Valores típicos
Abertura de filtração (mm)	0,15 – 0,40
Permissividade (s^{-1})	0,3-0,5
Massa por unidade de área (g/m^2)	500 – 700
Espessura (mm)	0,8 – 1,5

Durabilidade dos geossintéticos

De maneira geral, o conceito de durabilidade está relacionado às alterações irreversíveis que podem ocorrer nas propriedades de um material decorrentes da sua utilização e da passagem do tempo, incluindo-se todos os agentes do ambiente que contribuem para tal degradação. No caso específico dos geossintéticos, a durabilidade refere-se à manutenção ao longo do tempo das características e/ou do comportamento de interesse. Assim, ao ser aplicado em obras geotécnicas e ambientais, espera-se que o geossintético cumpra uma determinada função ao longo de um período mínimo, o tempo de vida útil. Quaisquer funções que venham a ser desempenhadas pelos geossintéticos estarão associadas a uma ou mais propriedades (por exemplo, resistência à tração, permeabilidade). Dessa forma, a durabilidade de um geossintético pode ser entendida como a capacidade de manter as propriedades ainda que sujeito à presença de agentes mecânicos, ambientais, biológicos e químicos.

Os principais parâmetros que influenciam na durabilidade dos geossintéticos são: a sua estrutura física, a natureza do polímero utilizado, o processo de fabricação do material, o ambiente físico e químico no qual será inserido, v. as condições de armazenamento, os procedimentos para sua instalação e os níveis de carregamento que o material irá suportar. Essas questões que estão relacionadas à durabilidade podem ser subdivididas em dois subgrupos a saber, o grupo de questões relacionadas a *endurance*, ou seja, a resistência ao longo do tempo de vida útil que inclui a danificação que os geossintéticos podem sofrer durante a instalação na obra, fluência, relaxação a tensões, abrasão, fluência em compressão e colmatação; o segundo subgrupo se refere às questões relacionadas à degradação, isto é, oxidação, ação da temperatura, efeito de

radiações ultravioleta, hidrólise dos polímeros, agentes químicos e agentes biológicos (Koerner, 2016).

De acordo com Lopes e Lopes (2010), a avaliação da durabilidade dos geossintéticos passa, em geral, por seis etapas a saber: identificação dos geossintéticos utilizados e as funções que realizam, identificação das propriedades funcionais dos geossintéticos, análise dos agentes de degradação do meio que podem alterar essas propriedades, realização de ensaios de durabilidade sob condições reais ou simuladas, avaliação dos efeitos sinérgicos entre os diferentes agentes de degradação e, por fim, definição dos valores para os coeficientes de redução e aplicar no dimensionamento dos geossintéticos.

Fernanda faça esta correção na sua dissertação toda. Parei de corrigir daqui.

Sprague *et al.* (1994 *apud* Lopes e Lopes, 2010) indicam que a durabilidade pode ser avaliada por meio das alterações que ocorrem na microestrutura do polímero e na macroestrutura do geossintético ao longo do tempo. Enquanto as variações microestruturais ocorrem devido a mudanças na estrutura molecular do polímero, as variações macroestruturais envolvem mudanças nas propriedades do geossintético. Sendo assim, as principais metodologias para a avaliação da durabilidade dos geossintéticos consistem em realizar ensaios em laboratório para avaliar as questões macro e microestruturais de amostras intactas e amostras obtidas após a exposição a agente de degradação.

2.2.4 Filtração e drenagem

Tubos geotêxteis já foram utilizados com sucesso para desaguar materiais com uma variedade de teor de sólidos, distribuição granulométrica, plasticidades e níveis de contaminação. A Figura 2-19 – adaptada de Gaffney (2001) – apresenta as características dos materiais para os quais a tecnologia de tubos geotêxteis já foi aplicada. Devido ao elevado teor de umidade desses materiais, a concentração de sólidos em peso é utilizada como parâmetro de caracterização ao invés do teor de umidade para esse tipo de aplicação (Gaffney, 2001).

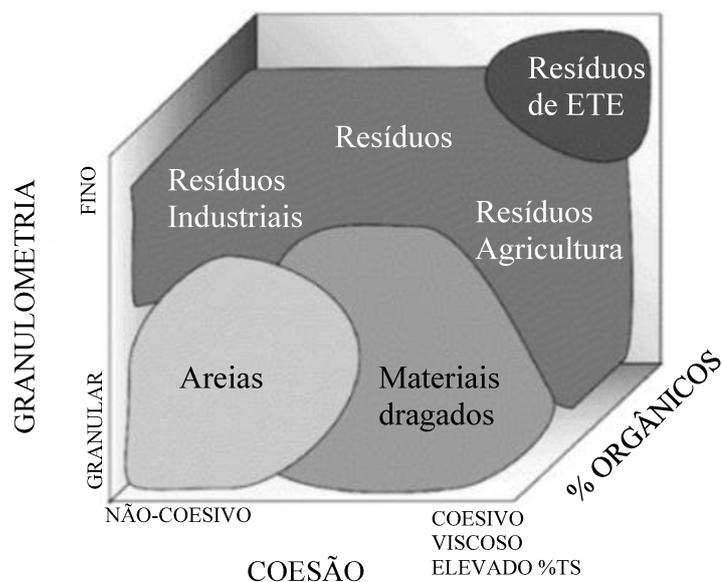


Figura 2-19: Representação esquemática de materiais com elevada umidade (Adaptado de Gaffney, 2001).

As considerações fundamentais de projeto de filtro com geossintéticos são retenção de partículas, permeabilidade, durabilidade e colmatação são aplicados para qualquer material a ser desaguado. Diversos critérios de filtro foram desenvolvidos com base nesses fundamentos (por exemplo, Christopher e Hotlz, 1985; Bhatia e Huang, 1995; Lafleur, 1999). No entanto, de acordo com Moo-Young *et al.* (2002), há uma distinção fundamental entre os critérios de projeto usados no dimensionamento convencional de filtros geotêxteis e os critérios utilizados na filtração de tubos geotêxteis pois a permeabilidade é o critério dominante em aplicações de tubos geotêxteis. A viabilidade econômica de um projeto de tubos geotêxteis depende da taxa de desaguamento, sendo assim, o critério de retenção pode ser parcialmente comprometido desde que não ocorra erosão regressiva (*piping*) nem haja o comprometimento da qualidade do líquido efluente, por exemplo, em relação à turbidez. Nos critérios de filtro convencionais, a retenção de partículas é o critério de projeto dominante, de tal maneira que o critério de permeabilidade pode ser ligeiramente comprometido, desde que não se desenvolva excesso de poro pressões. Devido à essa diferença fundamental, Liao e Bhatia (2005) indicam que os critérios de filtro convencional têm aplicabilidade limitada em projetos com tubos geotêxteis, especialmente quando os materiais a serem desaguados têm granulometria fina.

2.2.5 Comportamento dos tubos geotêxteis sob solicitações mecânicas – Lawson (2008)

Após o preenchimento, os tubos se comportam como estruturas de gravidade, de tal maneira que as considerações à respeito da estabilidade de estruturas de contenção podem ser aplicadas. Assim, é importante que sejam avaliados os padrões de modo de falha ou deformações aos quais estão submetidos. Pode-se dizer que os estados limites de solicitação podem ser divididos em externos, que afetam o desempenho da estrutura global, e os modos internos, que afetam o desempenho da estrutura do geotêxtil (Lawson, 2008).

Na análise de estabilidade interna (Figura 2-20) as seguintes verificações devem ser feitas: i. ruptura do geotêxtil; ii. perda de capacidade de retenção do geotêxtil, levando à erosão interna; e iii. deformações do material de enchimento.

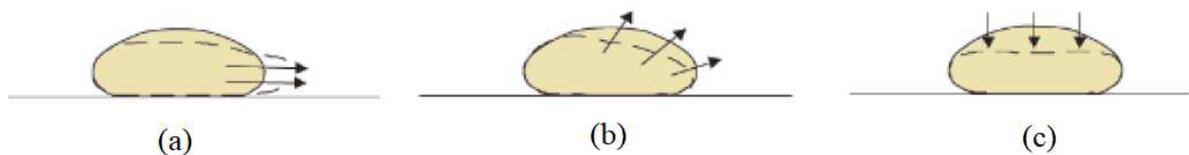


Figura 2-20: Condições de Estado Limite Interno: (a) ruptura do geotêxtil; (b) perda da capacidade de retenção do geotêxtil; (c) deformações do material de enchimento.

Na análise de estabilidade externa de um tubo geotêxtil, como mostrado na Figura 2-21, devem ser verificados: i. o deslizamento ao longo da base, rotação ao redor do pé do tubo; ii. a capacidade de carga do solo subjacente, estabilidade global, no caso de um empilhamento; iii. a erosão da fundação; recalques no solo de formação (Lawson, 2008).

De modo geral, os tubos geotêxteis são elementos estáveis quando a relação entre a largura da base (b_T) e altura (H_T) é próxima a 1,5. No entanto, as condições do local de instalação podem influenciar na estabilidade, a depender do peso por comprimento linear do tubo, características da fundação e condições de enchimento. Fundações em solos não adensados ou tubos de diâmetro teórico pequeno, $D_T < 2$ m, apresentam maior suscetibilidade à ocorrência de rolamento. Se os tubos forem empilhados, a estabilidade global do conjunto tubo geotêxtil-fundação deve ser avaliada e potenciais planos de ruptura localizados entre tubos adjacentes devem ser avaliados (Lawson, 2008).

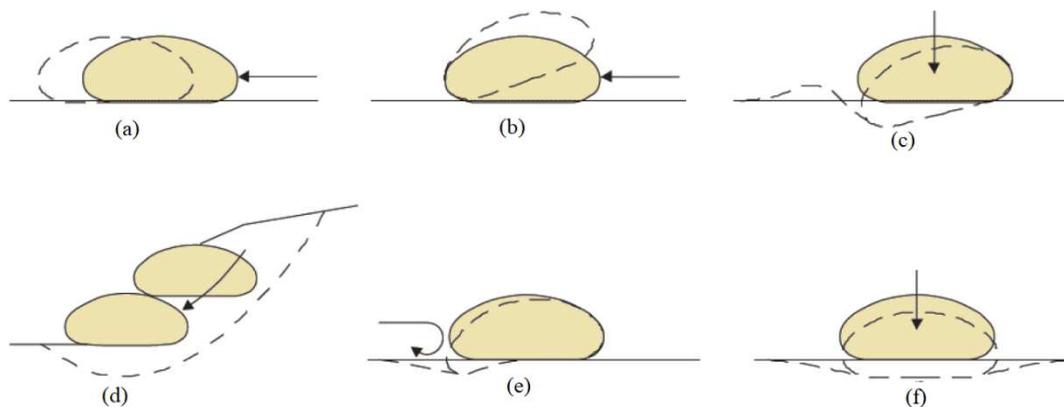


Figura 2-21: Condições de estado limite externo de tubos geotêxteis: (a) deslizamento, (b) rotação ao redor do pé do tubo; (c) capacidade de carga do solo subjacente; (d) estabilidade global; (e) erosão junto à base; (f) recalque no solo de fundação (Lawson, 2008).

O escorregamento de tubos uns sobre os outros, pode ser evidenciado pelas torções das costuras dos elementos. Esse escorregamento pode acontecer durante o processo de enchimento dos tubos, no qual a tensão de contato entre tubos adjacentes ou fundação é minimizada pelo efluente liberado durante o desagamento. O fluxo desse efluente pode levar a deslocamentos laterais dos tubos ou ainda erosão da fundação. Para evitar o escorregamento, o lançamento de tubos superiores deve ser realizado somente quando os tubos inferiores já estiverem na iminência de entrar na fase de adensamento, evitando deste modo, que o fluxo ascendente minimize as tensões de contato.

2.2.6 Uso de tubos geotêxteis na mineração

A tecnologia foi aplicada pela primeira vez na mina de Stratoni, localizada na Grécia. Newman (2004) descreveu essa experiência grega com a utilização de tubos geotêxteis para desaguar rejeitos finos de mineração de ouro. O sistema foi utilizado apenas com intuito de desaguar os rejeitos; uma vez desaguido e consolidado, os tubos eram abertos e o material era disposto em área apropriada na mineradora. Foram realizados ensaios de bolsa suspensa e um ensaio de protótipo de larga escala medindo 60 m de comprimento, 14,7 m de perímetro e com altura de 2,50 m foi preenchido em campo. O autor indicou que após 10 dias o teor de sólidos do rejeito passou de 7% para 65%, atendendo as necessidades da mineradora de dispor os rejeitos em espaço reduzido.

O estudo de caso apresentado por Wilke *et al.* (2015) mostra a experiência de uso de tubos geotêxteis para desaguar e confinar rejeitos de mineração de zinco e níquel da mina de Talvivaara, localizada na Finlândia. A mina avaliou o uso dessa tecnologia após passar por um vazamento de rejeito fino localizado em um de seus barramentos. Após obter sucesso no projeto piloto, a tecnologia de tubos geotêxteis foi adotada como forma de manejo de todo o rejeito gerado. A Figura 2-22 mostra o empilhamento dos tubos geotêxteis preenchidos com rejeitos da mina de Talvivaara. Os tubos utilizados para desaguar e confinar os rejeitos tinham dimensões variáveis, com capacidade de armazenamento entre 30 m³ e 1600 m³ de rejeito, e com tubos com comprimento máximo de 65 metros. O procedimento incluiu o uso de floculantes para elevar a eficiência de filtração do sistema. Os autores fizeram ainda a avaliação das características geotécnicas do rejeito produzido pela mina, como análise granulométrica e ensaios de resistência em amostras remoldadas. Os tubos geotêxteis foram empilhados com o intuito de aumentar a capacidade de armazenamento do sistema. Wilke *et al.* 2015 indicaram ainda que os fatores decisivos para a adoção da tecnologia de disposição foram o aumento na capacidade operacional na disposição dos rejeitos, flexibilidade na capacidade de armazenamento com o empilhamento dos tubos, confinamento permanente dos rejeitos e redução drástica dos riscos de possíveis impactos ambientais ao armazenar o rejeito desaguado, a possibilidade de operação dos tubos no inverno além da reutilização da água drenada.



Figura 2-22: Empilhamento de formas têxteis tubulares preenchidas com rejeito de mineração na mina de Talvivaara, Finlândia (Wilke *et al.* 2015)

Yang *et al.* (2019) apresentam o estudo de caso do alteamento da barragem de rejeitos finos de fosfato, construída pelo método de montante, localizada na província chinesa de Yunnan. O

projeto previu a alteamento de 9 metros por meio do empilhamento de tubos geotêxteis fabricados de geotêxtil não tecido. Os TG tinham comprimentos que variavam entre 18 m e 36 m, largura de 5 m e altura máxima de enchimento de 0,65 m. Os tubos foram projetados para possuírem bocais de entrada a cada 16-20 m² e não foram utilizados flocculantes no rejeito. A Figura 2-23 mostra o aspecto dos tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de fosfato e a Figura 2-24 mostra o projeto do alteamento realizado com tubos geotêxteis. Os autores indicaram ainda que o rejeito de fosfato confinado nos tubos geotêxteis apresentou parâmetros de resistência superiores ao restante do material da barragem.



Figura 2-23: Tubos geotêxteis preenchidos para alteamento de barragem (Yang *et al.*, 2019).

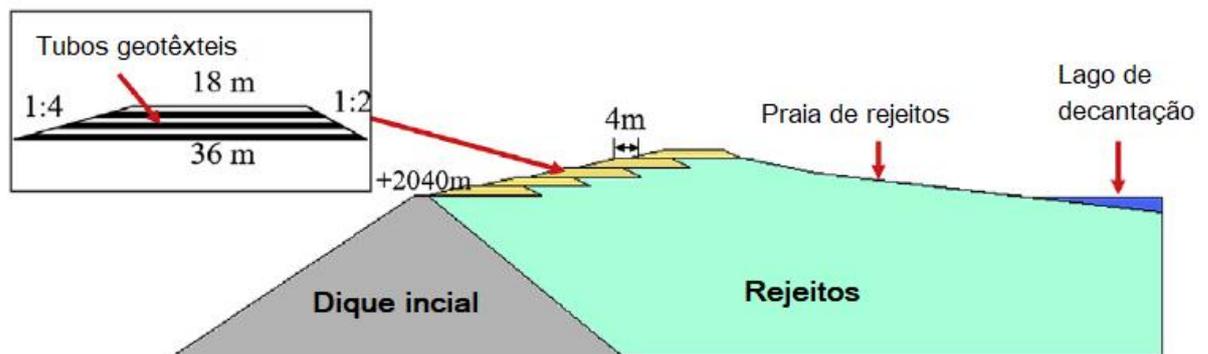


Figura 2-24: Projeto de alteamento de barragem com tubos geotêxteis (Yang *et al.*, 2019).

3 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O objeto de estudo deste trabalho é um empilhamento drenado de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração de ouro provenientes da mina Fazenda Brasileiro. Freitas Silva (2017) apresenta o procedimento de enchimento e empilhamento dos tubos, denominado de protótipo de grande dimensão, bem como a avaliação do desaguamento do rejeito e do formato dos tubos ao longo do enchimento. As informações relevantes para a avaliação de desempenho do empilhamento serão apresentadas neste capítulo.

3.1 Localização

A obra foi construída em área pertencente à Fazenda Brasileiro Desenvolvimento Mineral S/A (FBDM), de propriedade da empresa Leagold. A mina está localizada no município de Barrocas-BA, nordeste da Bahia, a cerca de 200 km da capital Salvador-BA e iniciou suas atividades na década de 1980.

A Figura 3-1 mostra uma imagem panorâmica da área de mineração, com a indicação do local do empilhamento dos tubos geotêxteis. Um dos objetivos do projeto de pesquisa foi avaliar o processo de construção do empilhamento e acompanhar o comportamento da estrutura ao longo do tempo. Portanto, era necessário construir o empreendimento em local que não fosse sofrer qualquer tipo de intervenção por, aproximadamente, 2 (dois) anos. Além disso, a escolha do local visou o uso de área já licenciada e que não causasse impactos ao meio ambiente. O local selecionado foi a pilha de rejeito *underflow* já consolidado. Essa área estava próxima aos ciclones de lançamento de rejeito, o que facilitou a derivação de ramais para a obra.

A imagem do empilhamento, mostrado na Figura 3-1, foi feita pouco tempo depois da finalização da construção do empreendimento, em julho de 2017. Como será mostrado no próximo capítulo, a exumação da estrutura foi feita em abril de 2019. A Figura 3-2 mostra uma imagem aérea do empilhamento realizada durante a exumação da estrutura. Visualmente, a estrutura permanece estável. Nota-se que alguns tubos geotêxteis foram praticamente soterrados pelos rejeitos da pilha devido à ação de tempestades de vento na região. O trabalho de exumação precisou ser interrompido algumas vezes porque o vento carregava as partículas de rejeito da pilha e dificultava a visão e a realização dos trabalhos de coleta de amostras.



Figura 3-1: Vista panorâmica da FBDM com localização do empilhamento de tubos geotêxteis – julho/2017.



Figura 3-2: Fotografia aérea do empilhamento de tubos geotêxteis – abril/2019.

3.2 Informações relevantes

3.2.1 Concepção do Projeto

Freitas Silva (2017) apresenta, de forma detalhada, o projeto de concepção bem como o processo de enchimento e empilhamento dos tubos geotêxteis. A Figura 3-3 apresenta um esquema do layout geral da implantação da estrutura. Na época da construção do empilhamento, a mineradora não utilizava flocculantes no processo de disposição de rejeitos gerados. Após realizar ensaios de cone e de ensaio de bolsa de pequena dimensão (GDT), Freitas Silva (2017) verificou que a filtração do rejeito por meio do geotêxtil não era plenamente eficiente, havendo perda considerável de partículas finas através da abertura do geotêxtil. Assim, foi necessário adicionar flocculantes para a melhoria do processo de desaguamento. Ensaios de laboratório também foram realizados para a determinação da dosagem ótima de polímero, como o ensaio do cone e ensaio de bolsa fechada. O polímero selecionado foi o Magnafloc LT27, uma poliácridamida aniônica, fabricada pela BASF, com concentração em massa de 0,1%. Uma central de dosagem de polímeros foi montada em paralelo ao ramal de bombeamento de rejeitos. Além disso, um sistema de chincanas foi instalado à jusante da central de dosagem de polímeros para homogeneizar o rejeito e polímero. O detalhamento do projeto pode ser visto na Figura 3-3.

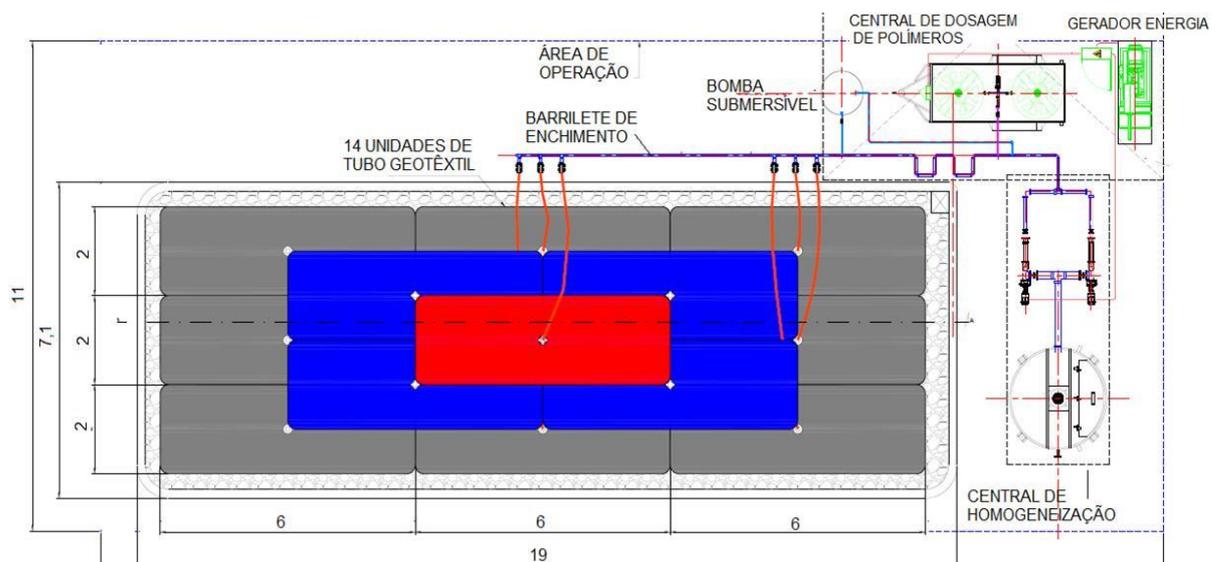


Figura 3-3: Layout do empilhamento de tubos geotêxteis (Freitas Silva, 2017).

3.2.2 Monitoramento e processo de enchimento

Os deslocamentos que ocorreram nos tubos geotêxteis foram monitorados durante a operação e bombeamento de rejeitos. Esses dados foram obtidos por meio da instalação de elementos de monitoramento que incluíram controle topográfico a laser, régua em pórtico com escala vertical e horizontal para obtenção de medidas diretas, mira-laser e captura de imagens sequenciais do enchimento. A Figura 3-4 mostra a localização dos instrumentos: a câmera foi instalada em frente ao empilhamento de forma a obter a variação de seção transversal ao longo do enchimento. Da mesma forma, a mira-laser em conjunto com sua baliza e régua permitiu a obtenção de dados de altura e largura dos tubos.



Figura 3-4: Alguns instrumentos utilizados por Freitas Silva (2017) para monitorar a geometria do empilhamento antes e após o enchimento dos tubos geotêxteis: (a) câmera e mira-laser instalados de frente para a régua em pórtico; (b) localização da régua.

De acordo com Freitas Silva (2017), os tubos geotêxteis da primeira linha de enchimento (TG1, TG2 e TG3) apresentaram altura final após desaguamento da ordem de 0,98 a 1,0 m, enquanto os demais apresentaram altura final entre 0,85 e 0,95 m, provavelmente associado aos maiores tempos de enchimento dos três primeiros, em decorrência da necessidade de ajuste dos processos de campo. Cada tubo geotêxtil confinou, ao final de todas as etapas de enchimento, cerca de 9 m³ de rejeito. O teor de sólidos inicial médio era de 50% (em peso); 24 horas depois, o teor de sólidos se aproximava de 75% (em peso). Em termos de teor de umidade, isso significa reduzir o teor de umidade de 100% para 25% em menos de 24 horas.

Com relação à forma dos tubos ao longo do enchimento, Freitas Silva (2017) observou que a seção transversal se aproxima da forma retangular ou falsa elipse nas primeiras etapas de enchimento. Quando a altura do tubo geotêxtil ultrapassou 0,50 m, a mudança no formato da seção transversal foi notável, aproximando-se de uma falsa elipse. A Figura 3-5 apresenta as diversas formas da seção transversal ao longo do enchimento. Os tubos geotêxteis foram projetados para atingirem uma altura máxima de 1,0 m, de tal forma que o bombeamento era interrompido quando essa altura era atingida.



Figura 3-5: Variação da forma em função da altura (H) dos TG: (a) primeira fase de enchimento, $H \sim 0,15$ m; (b) segunda fase, $H \sim 0,35$ m; (c) terceira fase, $H \sim 0,50$ m; (d) quarta fase, $H \sim 0,75$ m; (e) quinta fase, $H \sim 0,90$ m; (f) sexta fase, $H \sim 1,00$ m (Freitas Silva, 2017).

A base do empilhamento foi composta por três linhas formadas por 3 tubos geotêxteis cada. A Figura 3-6 apresenta a perspectiva da base do empilhamento ao final do enchimento. Após o enchimento, os tubos tinham formato de seção transversal semelhante a uma elipse e havia um espaço de aproximada 0,40 m entre cada unidade. Freitas Silva (2017) indica que os espaços vazios formados entre os tubos geotêxteis devem ser preenchidos com algum material cuja textura não provoque danos ao geotêxtil e não altere as condições de drenagem dos tubos geotêxteis. No caso deste empilhamento, o espaço vazio entre cada TG foi preenchido com o próprio rejeito de mineração de ouro. A Figura 3-7 apresenta o aspecto da base do empilhamento após o preenchimento. Tal procedimento tinha como objetivo regularizar a base onde o segundo nível do empilhamento foi implantado. Em seguida, foram executadas duas linhas compostas por dois tubos geotêxteis cada (TG10, TG11, TG12 e TG13).



Figura 3-6: Final do enchimento dos tubos geotêxteis da base do empilhamento (Freitas Silva, 2017).

A seção transversal do empilhamento com a implantação da segunda camada de tubos geotêxteis foi quadriculada para destacar a distorção ocorrida no TG12, como mostra a Figura 3-8. Nota-se que, mesmo realizando o preenchimento entre os espaços entre os tubos geotêxteis, ocorreram deformações e distorções na segunda camada de tubos geotêxteis. Verificou-se ao longo do procedimento construtivo que os tubos geotêxteis se encaixaram em quaisquer espaços vazios que existam na base da fundação. Também foram observadas distorções na seção longitudinal do tubo geotêxtil em função desses encaixes. Essa situação é ilustrada na Figura

3-9, onde a linha tracejada branca indica o contorno do TG13, mostrando que ocorreram deformações devido ao desnível entre os tubos geotêxteis da base.



Figura 3-7: Espaço entre os TG da base do empilhamento preenchidos com rejeito de ouro



Figura 3-8: Procedimento de construção do empilhamento drenado.

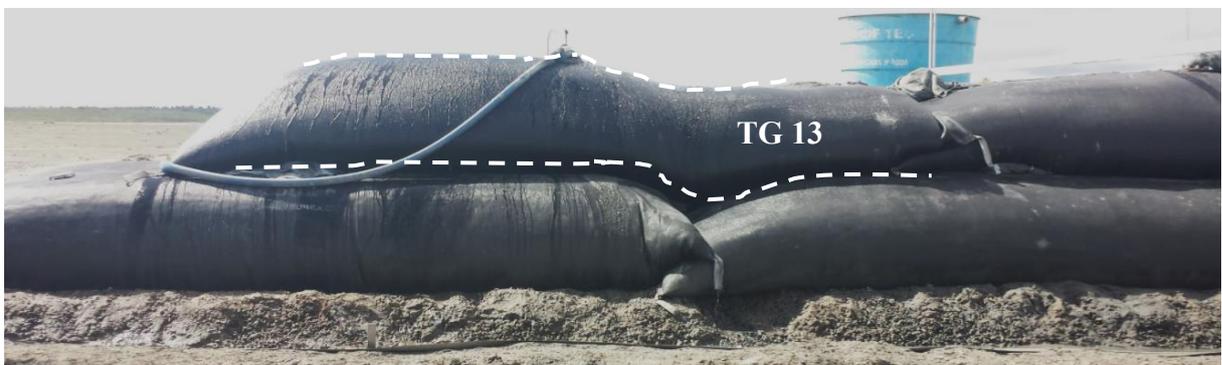


Figura 3-9: Deformações no tubo geotêxtil (Freitas Silva, 2017).

À medida que o rejeito se consolidava dentro do TG13, as deformações mostradas na Figura 3-9 apresentaram tendência de diminuir com o passar do tempo. No entanto, foi possível notar que o TG14, localizado no topo do empilhamento, deslocou-se no sentido de acompanhar a deformação ocorrida no TG13, imediatamente inferior. A Figura 3-10 foi quadriculada para melhor visualização da posição relativa entre os tubos geotêxteis.

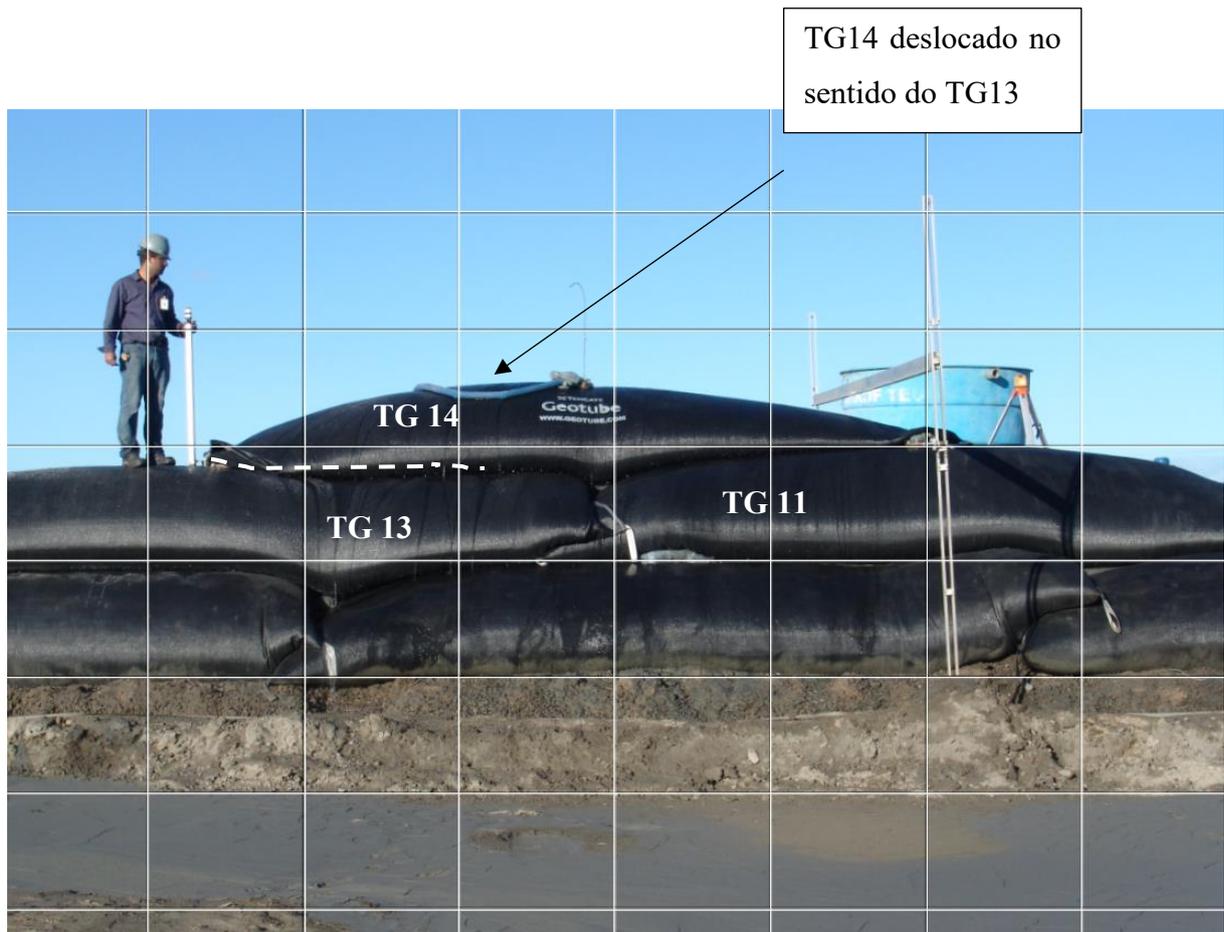


Figura 3-10: Vista lateral do empilhamento.

A terceira e última camada do empilhamento foi concluída com o enchimento do TG14, de tal maneira que o aspecto final do empilhamento se assemelhou à um processo de montagem do tipo piramidal. Os espaços vazios formados entre os quatro tubos geotêxteis que constituíam a segunda camada, Figura 3-11 (a), também foram preenchidos com rejeito. O aspecto da segunda camada do empilhamento após o preenchimento dos espaços vazios com rejeito está apresentado na Figura 3-11 (b).



a) Espaço vazio entre os tubos geotêxteis da segunda camada do empilhamento

b) Preenchimento dos espaços vazios com rejeito

Figura 3-11: Procedimento de construção do empilhamento drenado.

No enchimento do último tubo geotêxtil (TG14), localizado no terceiro nível do empilhamento, foi observada a iminência de rolamento. Após 15 minutos de bombeamento, o tubo geotêxtil começou a apresentar superfície retorcida, com decaimento para a lateral direita, aproximando-se do limite externo da base de tubos inferior, formada pelo TG13 e TG11, como mostra a seta pontilhada de branco na Figura 3-12. Nesse momento, a altura da região próxima ao bocal de bombeamento era de 0,22 m. Para evitar a ocorrência do rolamento, o bombeamento foi paralisado imediatamente para que ajustes fossem feitos na superfície do tubo geotêxtil com o objetivo de endireitá-lo e impedir o seu deslizamento. Como todos os tubos geotêxteis possuíam alças em suas extremidades, a flange do TG14 foi amarrada à alça do tubo geotêxtil inferior (TG 12) para auxiliar na regularização do TG14, como mostra a Figura 3-13. Após 45 minutos, o bombeamento foi iniciado novamente e o restante do enchimento ocorreu de forma ininterrupta. De fato, a amarração entre as extremidades dos tubos geotêxteis foi um recurso utilizado em dois momentos ao longo do enchimento dos tubos, sendo utilizada no enchimento do TG13, como mostra a Figura 3-14, e no enchimento do TG14. A conformação do empilhamento de tubos geotêxteis ao final do enchimento de todas as unidades está apresentada na Figura 3-15. A imagem foi quadriculada para mostrar a posição relativa de cada TG. Adicionalmente, a área preenchida com rejeito entre os tubos geotêxteis apresentou um formato triangular, como indicada pela linha branca tracejada.



Figura 3-12: Iminência de rolamento do TG 14 (Freitas Silva, 2017).



Figura 3-13: Detalhe da amarração realizada na flange do TG14.

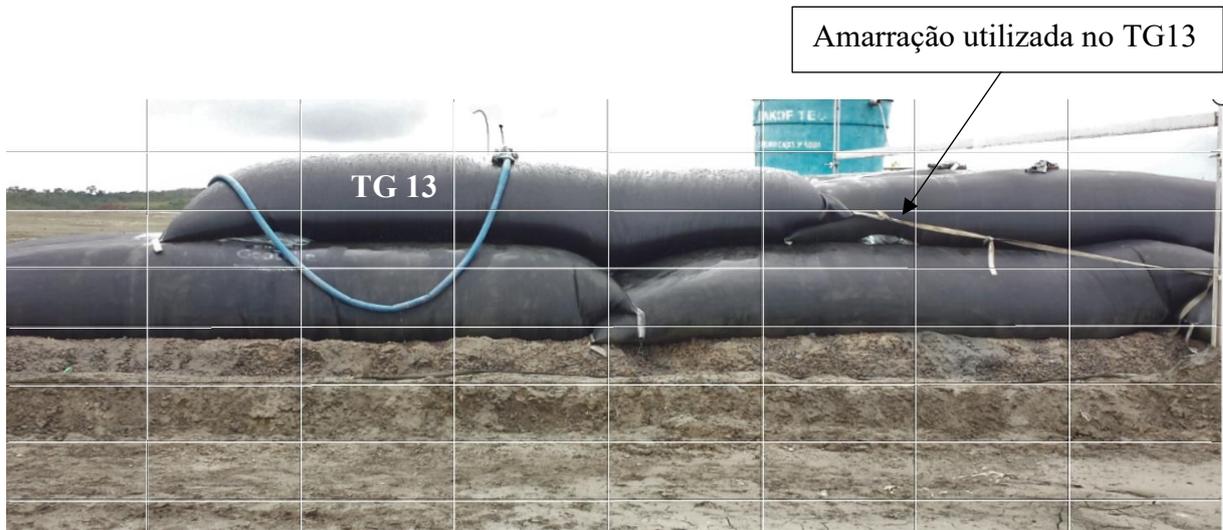


Figura 3-14: Amarração utilizada no enchimento do TG13.



Figura 3-15: Empilhamento de tubos geotêxteis (Freitas Silva, 2017).

Após a conclusão do enchimento dos tubos, o dessecamento do rejeito confinado foi feito ao longo do tempo. Para essa avaliação, foram coletadas amostras por meio dos bocais de enchimento. É importante notar que as amostras obtidas para a medição do teor de umidade representam apenas o material contido na região superior do TG, como mostra a Figura 3-16. Para obter amostras em outros locais do TG seria necessário fazer aberturas no geotêxtil, o que comprometeria a estabilidade da estrutura. Por estarem na região superior do tubo geotêxtil, é provável que o teor de umidade dessas amostras obtidas seja inferior ao rejeito contido na base do tubo geotêxtil e que o teor de umidade ao longo do tubo geotêxtil não seja uniforme. Dessa forma, o objetivo de retirar essas amostras de rejeito era fazer uma avaliação inicial da desidratação do rejeito ao longo do tempo e obter parâmetro de comparação ao teor de umidade da lama antes de ser bombeada para o interior dos tubos geotêxteis.



Figura 3-16: Coleta de amostra de rejeito no interior do tubo geotêxtil (Freitas Silva, 2017).

Para o tubo geotêxtil TG14, foram coletadas amostras após 24 horas, 48 horas, 72 horas, 14 dias e 21 dias com o objetivo de correlacionar o ensaio de campo com os dados obtidos no ensaio de bolsa fechada (GDT). Os resultados obtidos por Freitas Silva (2017) estão apresentados na Figura 3-17. Nota-se que o maior incremento do teor de sólidos ocorre nas

primeiras 24 horas, havendo a tendência de estabilização para o ensaio de campo após esse período.

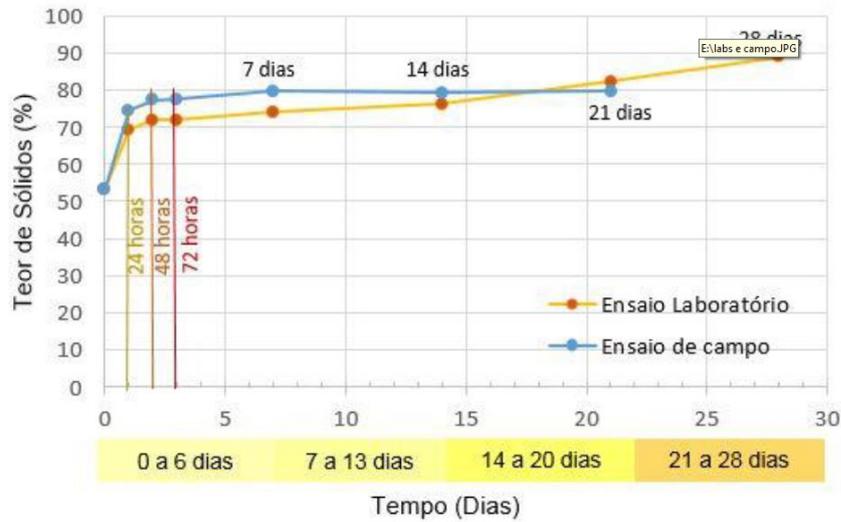


Figura 3-17: Curva de dessecação para amostras do ensaio de campo e de laboratório (Freitas Silva, 2017).

Com relação à duração dos ciclos de enchimento, a Tabela 3-1 foi elaborada a partir dos dados de variação de altura e período de bombeamento de cada tubo, disponibilizados no Apêndice A de Freitas Silva (2017). Esses dados foram compilados com o intuito de auxiliar na interpretação dos resultados dos ensaios de laboratório conduzidos no presente trabalho.

A Tabela 3-1 apresenta a duração dos ciclos de enchimento e deságue, que cada tubo geotêxtil foi submetido, além do tempo total de bombeamento de cada uma das bolsas. Por ciclos de enchimento entenda-se ciclos em que houve efetivamente o bombeamento de rejeito e, ciclos de deságue, os períodos em que o bombeamento foi interrompido. Nota-se que houve variações significativas tanto no número de ciclos de enchimento quanto no tempo total de bombeamento de rejeito. Isso ocorreu devido à seleção de rotação da bomba, que sofreu ajustes ao longo do processo de acordo com a floculação do rejeito. O número de ciclos de enchimento variou entre quinze ciclos (para o primeiro tubo geotêxtil) e dois ciclos para último. Os tubos geotêxteis exumados neste trabalho estão marcados em vermelho.

Tabela 3-1: Ciclos de enchimento dos tubos geotêxteis utilizados no empilhamento (Freitas Silva, 2017).

Tempo Total Bombeamento	TG	Período de bombeamento e pausa de bombeamento dos tubos geotêxteis (min)																															
		Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		Ciclo 4		Ciclo 5		Ciclo 6		Ciclo 7		Ciclo 8		Ciclo 9		Ciclo 10		Ciclo 11		Ciclo 12		Ciclo 13		Ciclo 14		Ciclo 15			
		B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P		
142	1	20	24 h	10	20	5	20	5	15	7	12 h	20	10	10	3 h	10	25	15	72 h	10	15	13	14	8	24 h	9	Fim						
146	2	15	30	15	24 h	10	15	10	15	5	12 h	10	10	10	10	180	10	20	15	72 h	10	15	10	20	7	8	5	24 h	4	Fim			
129	3	15	35	10	24 h	10	15	10	20	5	12 h	10	50	10	180	15	45	10	72 h	10	20	5	13	7	20	5	24 h	7	Fim				
94	4	10	20	10	20	5	17 h	10	20	10	20	10	3 h	15	27	7	25 h	8	18	4	15	5	6	Fim									
98	5	10	40	10	15	10	17 h	10	20	10	20	10	2 h	15	25 h	10	9	10	9	3	Fim												
89	6	10	20	10	15	10	17 h	10	20	10	3 h	10	30	12	25 h	8	14	5	15	4	Fim												
45	7*	10	20	10	30	5	2 h	10	20	10																							
50	8*	10	20	10	20	10	2 h	10	20	10																							
60	9*	10	20	10	10	10	2 h	10	25	20																							
125	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	21 h	10	20	10	10	10	15	15	105	15	15	15	Fim										
115	11	10	10	10	10	10	10	10	21 h	25	10	10	10	15	2 h	15	15	10	Fim														
110	12	15	20	10	40	30	24 h	10	35	15	2 h	15	24 h	10	10	5	Fim																
128	13	10	15	5	60	15	50	40	24 h	35	140	5	75	3	24 h	10	5	5	Fim														
115	14	15	45	100	Fim																												

Nota: **B** é o intervalo de tempo de bombeamento, **P** é o intervalo de pausa do bombeamento, **TG** identifica o tubo geotêxtil

- Intervalos maiores de desagamento foram indicados em horas
- * Alguns intervalos de enchimento que não foram acompanhados

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Depois da conclusão do trabalho de empilhamento dos tubos geotêxteis, a estrutura foi monitorada ao longo dos 2,0 (dois) anos do projeto. Um levantamento topográfico foi realizado em maio de 2018 (aproximadamente um ano após a conclusão da construção) pela mesma equipe disponibilizada pela mineradora durante a construção do empreendimento. O objetivo era verificar se a estrutura havia sofrido grandes deformações ao longo dos meses.

A exumação do empilhamento foi realizada ao longo da última semana de abril de 2019, após um período de 22 meses do término da construção. Essa etapa foi primordial para o desenvolvimento deste trabalho e um dos objetivos a serem alcançados na dissertação. Durante os dias de trabalho, foi possível obter imagens aéreas que auxiliaram na inspeção visual dos tubos geotêxteis, além de medidas de altura de alguns tubos. Adicionalmente, um projeto de amostragem de rejeito e de geossintético foi elaborado a partir dos critérios definidos para avaliação do empilhamento. O empilhamento de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração de ouro teve o intuito de confinar, desaguar e formar uma estrutura de contenção. Dessa forma, um programa experimental foi planejado para caracterizar o rejeito confinado, obter parâmetros de resistência e compressibilidade e avaliar a durabilidade do geossintético.

A caracterização do rejeito teve início na exumação do empilhamento, com a abertura dos tubos geotêxteis, onde foram observados: i. a coloração, ii. o teor de umidade e iii. A densidade final do rejeito. Posteriormente, as amostras foram submetidas a ensaios de caracterização geotécnica, análises mineralógicas e de microscopia eletrônica.

Com o objetivo de conhecer melhor o comportamento de tubos geotêxteis empilhados, foram realizados ensaios que fornecem parâmetros hidráulicos e de compressibilidade desse rejeito. As análises de compressibilidade envolveram ensaios de adensamento edométrico convencionais. Para uma futura implementação de modelo de comportamento de empilhamento de tubos geotêxteis, foram realizados ensaios de compressão triaxial para obter os parâmetros de resistência do rejeito confinado no interior dos tubos geotêxteis.

A durabilidade do geotêxtil tecido de alta resistência à tração, matéria prima na confecção dos tubos, também foi avaliada neste trabalho. Ensaios de gramatura, espessura, grau de impregnação e resistência à tração foram realizados e serviram de base para a avaliação do comportamento do material após ter sido sujeito às condições de campo.

4.1 Exumação do empilhamento de tubos geotêxteis: coleta de amostras de rejeito

Conforme exposto no Capítulo 3, o empilhamento dos tubos geotêxteis foi composto por quatorze unidades, que foram preenchidas com rejeito de ouro ao longo de cinco semanas entre junho e julho de 2017. Devido às limitações para transportar e armazenar o material, não foi possível exumar todas as unidades que compunham a estrutura. Assim sendo, selecionou-se três tubos geotêxteis (um de cada nível do empilhamento) que seriam efetivamente exumados e para os quais amostras indeformadas e deformadas foram coletadas. Cada tubo geotêxtil havia sido previamente numerado por Freitas Silva (2017) e essa numeração dos tubos geotêxteis foi mantida neste trabalho. No primeiro nível, selecionou-se o tubo geotêxtil central, denominado G5; no segundo nível, selecionou-se o tubo denominado G10 e, por último, o único tubo do terceiro nível, denominado G14. A Figura 4-1 apresenta a seção transversal do empilhamento, com indicação dos tubos que foram exumados.

Conforme citado no Capítulo 2, Freitas Silva (2017) realizou exumação de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração de ferro de uma mineradora em Minas Gerais. Nessa visita, a autora observou que houve segregação no material consolidado caracterizada por diferentes texturas das camadas. Para avaliar a segregação de partículas nos tubos preenchidos com rejeito de mineração de ouro, foi elaborado um plano com indicação dos pontos de coleta de amostra. A Figura 4-2 apresenta um esquema da seção longitudinal do tubo geotêxtil, com indicação das amostras que seriam coletadas, localizadas na linha central do tubo geotêxtil. Os códigos das amostras, como será visto nas próximas seções, identificam se são deformadas ou indeformadas, o número do TG da qual foram retiradas, se foram retiradas à direita ou esquerda em relação à sede da mineradora e se estão localizadas na parte superior ou inferior do TG. Esse planejamento, feito antes da visita a campo, passou por algumas alterações após a abertura dos tubos geotêxteis, conforme será exposto neste capítulo.

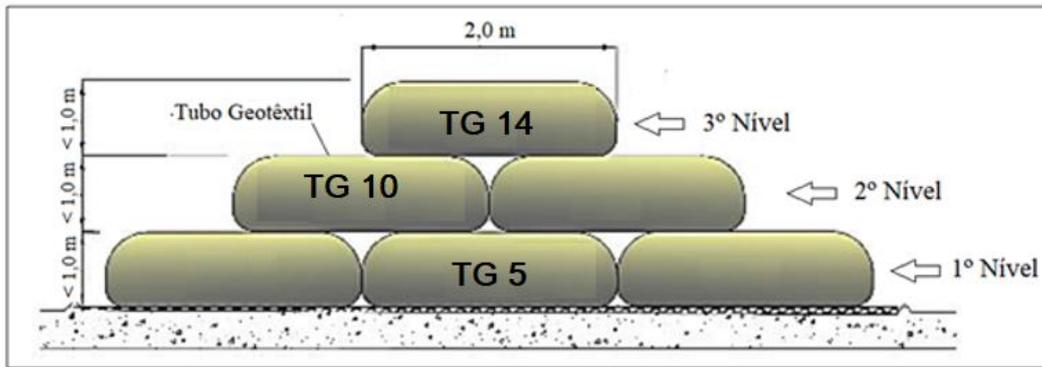


Figura 4-1: Seção transversal do empilhamento de tubos geotêxteis realizado na mina Fazenda Brasileiro. (adaptado de Freitas Silva, 2017).

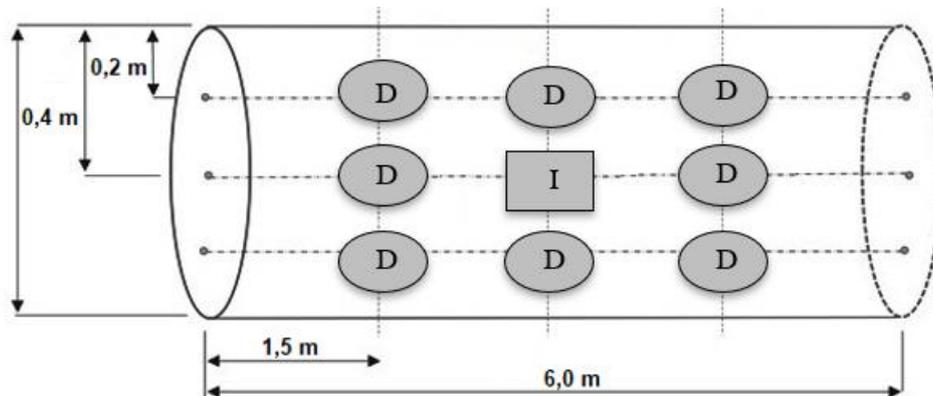


Figura 4-2: Seção longitudinal de um tubo geotêxtil com indicação do plano de coleta de amostras de deformadas (D) e indeformadas (I).

Logo após a abertura dos tubos, amostras para ensaio de teor de umidade foram retiradas em local próximo da moldagem dos blocos indeformados. A massa específica aparente in situ também foi determinada por meio do ensaio de cravação de cilindro, normatizado pela NBR 9813 (ABNT, 2016-b), para cada um dos tubos exumados. Após cravar o cilindro e retirá-lo preenchido com rejeito, este era embalado, vedado e levado ao laboratório localizado dentro da mineradora.

4.1.1 Exumação do tubo geotêxtil TG14

O acesso ao rejeito confinado no interior dos tubos geotêxteis foi feita por meio de corte com estilete e coleta do geossintético. A primeira observação feita ao abrir o tubo geotêxtil TG14 foram trincas no rejeito. Foram observadas trincas tanto na lateral direita (Figura 4-3) quanto na lateral esquerda (Figura 4-4). A moldagem do bloco indeformado na área central do tubo geotêxtil precisou ser ligeiramente modificada por causa de uma trinca localizada na região central. Esse padrão de trincas não foi observado nos outros tubos geotêxteis exumados para este trabalho. Ressalta-se que este tubo geotêxtil esteve diretamente exposto às intempéries, sol e umidade, sendo submetido tanto às elevadas temperaturas da região quanto à umidade do local.

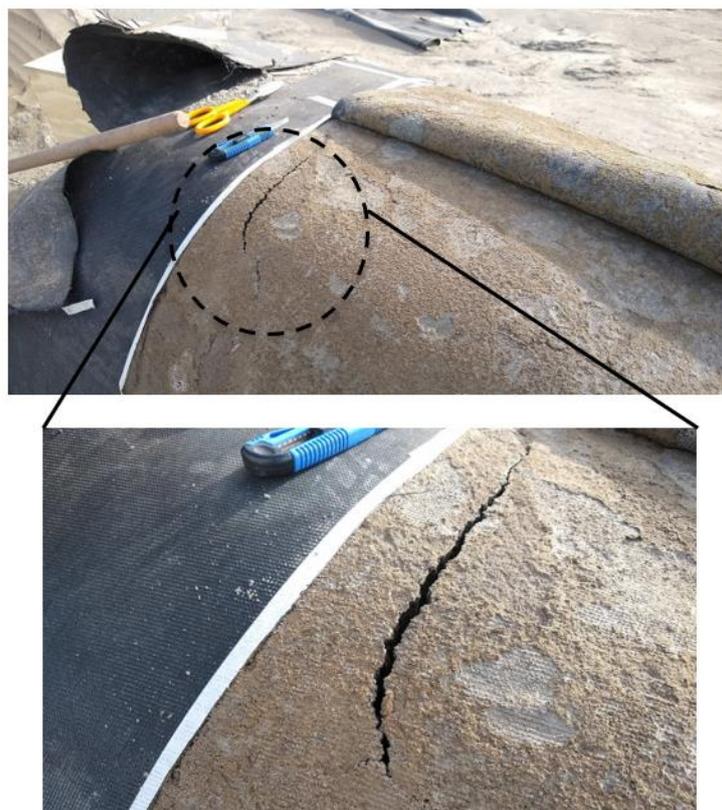


Figura 4-3: Trincas observadas no rejeito confinado na lateral direita do tubo geotêxtil localizado no nível superior do empilhamento (TG14).



Figura 4-4: Trincas no rejeito confinado na lateral direita do tubo TG14.

Durante a exumação do tudo TG14 e preparação de coleta de amostra indeformada não havia aparentemente segregação visual de partículas, como pode ser visto na Figura 4-5 (a). O rejeito contido no tubo geotêxtil aparentava homogeneidade e as condições de confinamento do material permitiram que a moldagem do bloco indeformado ocorresse sem dificuldades (Figura 4-5 (b)).



a) Início do processo de moldagem do bloco indeformado. b) Finalização da moldagem.

Figura 4-5: Moldagem do bloco indeformado coletado no TG 14.

Por isso decidiu-se por diminuir o número de amostras deformadas coletadas no tubo geotêxtil TG14. Foram coletadas três amostras deformadas (D-14D, D-14M, D-14E) e uma amostra indeformada (I-14) localizada na área central. A Figura 4-6(a) mostra o

momento de abertura do tubo geotêxtil e a aparência do rejeito confinado. A Figura 4-6(b) mostra a retirada de amostras deformadas com o auxílio de uma pá. O peso médio de material coletado por amostra foi de aproximadamente 12 quilos.



a) Aspecto do rejeito após a abertura do TG. b) Coleta de amostra deformada.
TG.

Figura 4-6: Exumação do TG 14.

A Figura 4-7 (a) apresenta o esquema da seção longitudinal do TG14, com a localização e as nomenclaturas das amostras efetivamente coletadas; e a Figura 4-7 (b) mostra a seção transversal do empilhamento. A segregação de material no sentido vertical não será avaliada, sendo essa a principal modificação ocorrida em relação ao planejamento inicial.

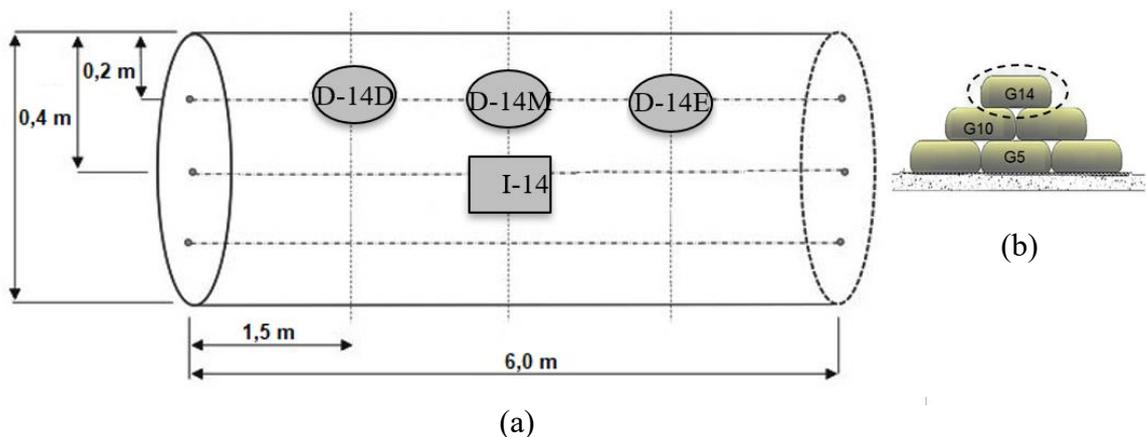


Figura 4-7: Esquema de seção longitudinal do TG 14: (a) nomenclatura das amostras de rejeito coletadas; (b) seção transversal do empilhamento com indicação TG14.

4.1.2 Exumação do tubo geotêxtil TG10

Para acessar o tubo geotêxtil localizado no segundo nível do empilhamento (TG10), foi necessário o auxílio de uma retroescavadeira para retirada do restante do tubo exumado no nível superior (Figura 4-8 (a)) e acesso aos demais tubos localizados no 2º nível. Esse procedimento de desmonte foi realizado por um operador experiente, pois um movimento brusco poderia danificar o rejeito e/ou geossintético que seriam coletados dos próximos tubos.

O operador da retroescavadeira informou sobre a dificuldade que sentiu ao utilizar o equipamento devido à resistência que o conjunto (geotêxtil e rejeito) apresentava para a movimentação da pá da retroescavadeira. A partir do que foi observado de campo, nota-se que o rejeito confinado em um tubo fabricado com geotêxtil de elevada resistência à tração forma uma estrutura robusta e estável. Com relação ao rejeito confinado, situação semelhante ao tubo TG14 (3º nível do empilhamento) ocorreu com o tubo geotêxtil TG10 – quando o tubo foi aberto, o rejeito estava aparentemente homogêneo.



Figura 4-8: Desmontagem do empilhamento com auxílio da retroescavadeira para retirada do TG 14.

Por questões logísticas e pela dificuldade de trabalho na área em que os tubos geotêxteis foram alocados, apenas duas amostras deformadas foram retiradas para o tubo G10, uma em cada extremidade do tubo – como mostra a Figura 4-9(a) (D10-D, D10-E). As

amostras eram colocadas em sacos plásticos, identificadas e vedadas para preservar a umidade natural do rejeito.

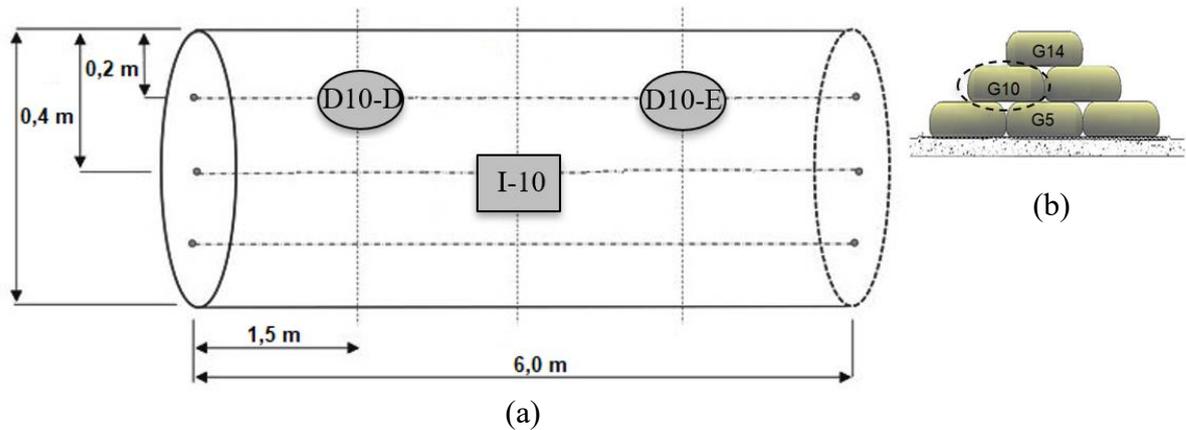


Figura 4-9: Esquema de seção longitudinal do TG 10: (a) nomenclatura das amostras de rejeito coletadas; (b) seção transversal do empilhamento com indicação TG10.

A Figura 4-10(a) e (b) mostram o aspecto do tubo geotêxtil TG10 logo após ser aberto para retirada de amostra deformada. O geotêxtil foi coletado com o auxílio de um estilete, acondicionado em sacos plásticos e vedado. Logo em seguida, a amostra deformada foi coletada com o auxílio de uma pá e também foi acondicionada em sacos plásticos. O rejeito confinado estava visualmente homogêneo e, com relação à textura do material, não havia uma segregação aparente de partículas.

A moldagem do bloco indeformado I-10 está ilustrada na Figura 4-10 (c) e (d). Não houve dificuldades para talhar o bloco indeformado, pois o material era fácil de manusear e não havia trincas de tração. Foi possível notar que o material coletado no segundo nível do empilhamento estava mais úmido e a coloração do rejeito era mais escura em relação ao material coletado do tubo do 3º nível.



Figura 4-10: Sequência de exumação do tubo geotêxtil G10: (a) Início de coleta de amostra deformada na extremidade esquerda do tubo; (b) ao final da coleta de amostra deformada; (c) início da moldagem do bloco indeformado; (d) bloco indeformado sendo parafinado geotêxtil.

4.1.3 Exumação do tubo geotêxtil TG5

O acesso ao tubo geotêxtil TG5 foi feito com o auxílio de retroescavadeira e escavação manual. Este tubo geotêxtil estava localizado no primeiro nível do empilhamento e foi completamente confinado por outros tubos geotêxteis. A Figura 4-11 mostra a situação do rejeito que foi utilizado para preencher os vazios que havia entre as bolsas durante o empilhamento e a impregnação do geotêxtil envolvente.

A Figura 4-12 mostra a finalização do processo de desmontagem do empilhamento e o acesso ao tubo geotêxtil TG5, que foi finalizado com o auxílio da retroescavadeira (Figura 4-13). O rejeito confinado nos tubos geotêxteis (TG14) e (TG10) aparentavam condição homogênea, pelo menos em termos de coloração do rejeito confinado. Essa não foi a mesma condição para o rejeito confinado no tubo do 1º nível do empilhamento (TG5).



Figura 4-11: Condições do rejeito utilizado para preencher os vazios entre os tubos geotêxteis durante o empilhamento.



Figura 4-12: Processo de desmontagem do empilhamento para acesso ao tubo geotêxtil TG5.



Figura 4-13: Acesso ao tubo geotêxtil TG5.

Depois de coletar o geossintético com o auxílio de um estilete e ter acesso ao rejeito, foi perceptível a diferença de coloração no rejeito. Aparentemente, uma camada tinha coloração mais acinzentada e a camada adjacente cor amarronzada, como mostra Figura 4-14.



Figura 4-14: Coleta de amostras deformadas do TG5 – 1º nível do empilhamento.

O TG5 passou por intervalos de enchimento ao longo de três dias consecutivos. Assim, é possível que a coloração diferente tenha ocorrido devido à variação na frente de lavra da mineradora. Dessa forma, optou-se por coletar um número maior de amostras deformadas do TG5, de acordo com o esquema mostrado na Figura 4-15(a): foram coletadas cinco

amostras deformadas (D5-DS, D5-DI, D5M, D5-ES, D3-EI) e um bloco indeformado foi moldado.

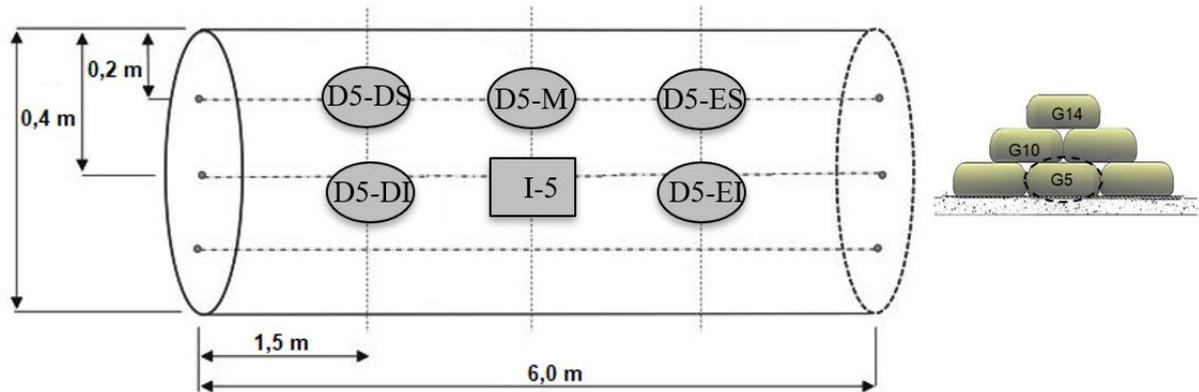


Figura 4-15: (a) Seção longitudinal do TG5 com a nomenclatura das amostras de rejeito coletadas; (b) seção transversal do empilhamento com indicação do tubo geotêxtil G5.

A Figura 4-16 mostra o processo de moldagem do bloco indeformado coletado do primeiro nível do empilhamento, onde é perceptível a variação de coloração do material. De maneira similar à moldagem dos blocos indeformados coletados anteriormente, não houve dificuldade para talhar o bloco coletado no 1º nível do empilhamento.



Figura 4-16: Moldagem do bloco indeformado do TG5 – 1º nível do empilhamento.

4.1.4 Coleta de amostras de geotêxtil

O empilhamento de tubos geotêxteis ficou sujeito às intempéries ao longo de 22 meses. Dessa forma, foi feita uma amostragem do geossintético para ser levado ao laboratório e, dessa forma, avaliar o envelhecimento do material por meio de ensaios de caracterização e resistência à tração. Dois critérios foram utilizados para coletar as amostras de geotêxtil em campo:

- i. Amostras expostas às intempéries;
- ii. Amostras de geotêxtil localizadas no contato entre as bolsas e que, portanto, não ficaram expostas à radiação UV e foram protegidas das intempéries.

A Figura 4-17 apresenta uma imagem aérea do empilhamento, mostrando uma vista em planta dos tubos geotêxteis. As linhas pontilhadas em branco mostram as tiras de geotêxtil que foram retiradas, com o auxílio de um estilete, durante a exumação dos tubos geotêxteis TG-14 e TG-10 – o TG-5, completamente confinado, não aparece na Figura 4-17. Para cada tubo geotêxtil foram coletadas três faixas na região superior com, aproximadamente, 1,0 m de largura e 2,0 m de comprimento.

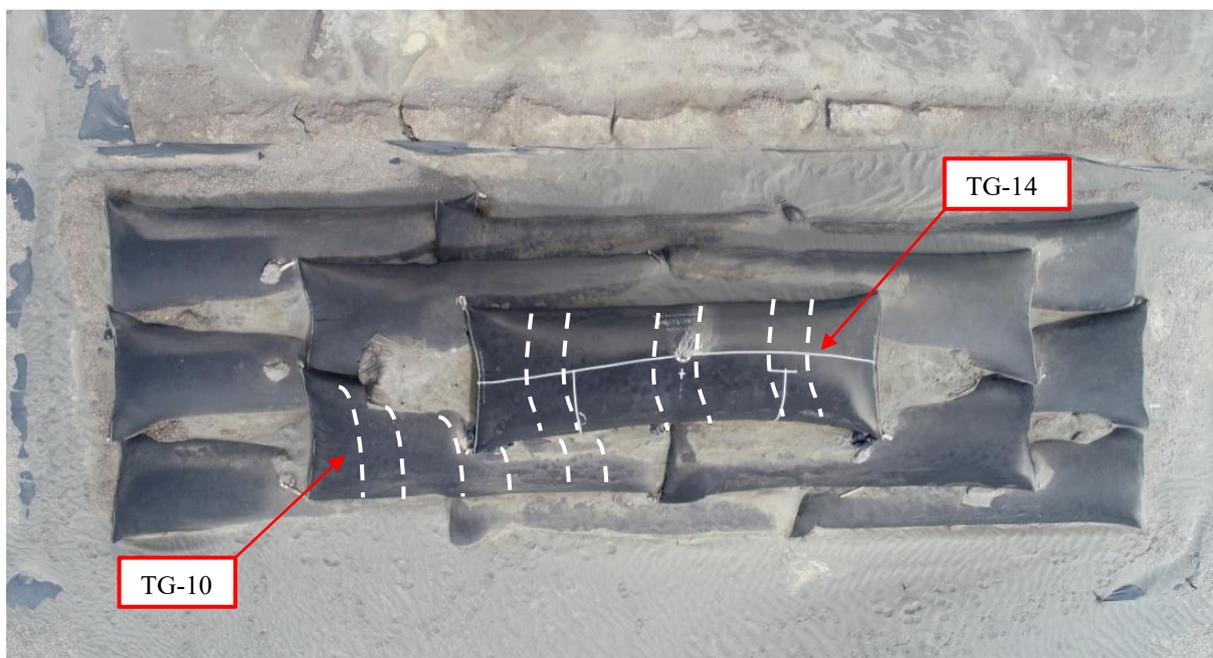


Figura 4-17: Vista superior do tubo geotêxtil com indicação dos locais de retirada de amostras geotêxteis.

Em campo, os tubos foram demarcados com fita crepe e o corte do geotêxtil foi realizado com o auxílio de um estilete, como mostra a amostragem do tubo TG-14 (Figura 4-18). Após serem cortados, os geotêxteis foram identificados, embalados em sacos plásticos e vedados. Foi possível identificar a variação na impregnação do geotêxtil durante a exumação. Como exemplo, a Figura 4-19 (a) mostra a diferença entre as áreas inferior e superior do TG-14, separadas com uma linha branca pontilhada: a área inferior estava nitidamente mais limpa, com coloração escura característica do geotêxtil utilizado. Pode-se notar a situação do empilhamento ao finalizar a retirada do tubo geotêxtil superior Figura 4-19 (b).



Figura 4-18: Retirada de amostras geotêxteis expostas à radiação UV.



a) variação de impregnação do geotêxtil.

b) aspecto do empilhamento após a retirada do TG-14.

Figura 4-19: Coleta de amostras de geotêxtil.

4.1.5 Caracterização física do rejeito

A caracterização física do rejeito foi realizada por meio de ensaios padronizados no meio geotécnico para a determinação das propriedades índice dos solos. Ensaios de granulometria por peneiramento, sedimentação, granulometria a laser, além de determinação da densidade relativa dos grãos foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UFMG em amostras indeformadas de acordo com as seguintes recomendações.

- NBR 7181 Solo – Análise granulométrica (ABNT, 2018)
- NBR 6508 – Massa específica real dos grãos (ABNT, 2016-a)

O objetivo da análise granulométrica é determinar a relação entre a dimensão das partículas que compõe a amostra e os respectivos percentuais, em peso. No ensaio convencional, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2018), são realizadas, em geral, duas etapas, que são o peneiramento para partículas com dimensões superiores a 0,074 mm e a sedimentação para as partículas com dimensões menores que 2,0 mm.

Os rejeitos de mineração são originados a partir de processos físicos de britagem e ciclonagem, além de processos químicos, como é o caso do rejeito de ouro. No ensaio de granulometria convencional, a distribuição do tamanho dos grãos finos (menores que 2,0 mm), realizada na fase de sedimentação, tem como base a lei de Stokes e pode induzir a erros cumulativos em função do formato não esférico dos grãos de rejeito e da composição química diferenciada das partículas. Dessa forma, o ensaio de granulometria a laser foi feito no laboratório de combustível nuclear (LABCOM) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, utilizando-se o granulômetro a laser *Cilas* modelo 1190. A Figura 4-20(a) mostra o equipamento, o momento de inserção de amostras Figura 4-20 (b), e uma imagem do equipamento aberto Figura 4-20 (c) com localização da unidade óptica e o porta amostras que possui um ultrassom acoplado.

O equipamento possibilitava a realização do ensaio de granulometria com ou sem o uso de ultrassom. Como o rejeito de ouro é um material muito fino, oriundo de processos minerários físicos e químicos, optou-se por realizar os ensaios com o uso de ultrassom. A preparação das amostras consistiu na passagem do rejeito pela peneira #40, seguida de homogeneização e inserção de cerca de 7,0 g no porta amostras.

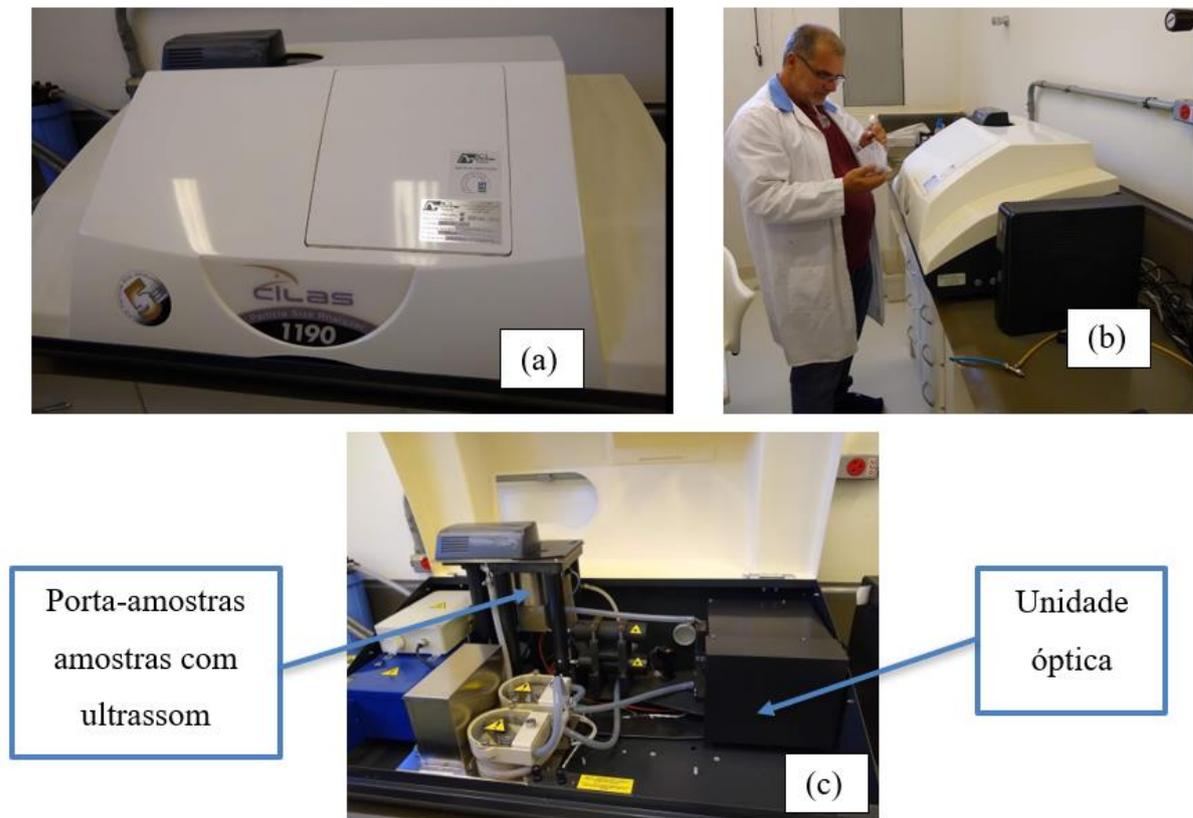


Figura 4-20: Equipamento para ensaio de granulometria a laser: (a) Granulômetro a laser Cilas1190; (b) inserção de amostras; (c) imagem do equipamento aberto.

4.1.6 Estabilidade interna dos rejeitos

Ao longo do período de enchimento dos TG, Freitas Silva (2017) observou-se que houve diminuição da filtragem em determinados períodos sendo necessário o uso de hidrojateamento para melhorar a eficiência de drenagem. Tal fato deve ter sido ocasionado pela colmatação do geotêxtil. Nesse sentido, análise de estabilidade interna do rejeito é uma ferramenta para investigar se o material é suscetível ao fenômeno da sufusão, caracterizado pela livre passagem de partículas mais finas através da estrutura do solo. As análises de estabilidade interna foram realizadas seguindo as metodologias propostas por Kenney e Lau (1985) e Lafleur *et al.* (1989), utilizadas por Beirigo (2005) para avaliar a estabilidade interna de rejeitos de mineração de ferro, e que se baseiam na distribuição granulométrica do material para determinar sua capacidade de estabilidade interna.

Três curvas granulométricas obtidas por peneiramento e sedimentação com defloculante foram selecionadas, uma de cada tubo geotêxtil exumado, para serem analisadas. A forma de cada uma das três curvas selecionadas foi comparada com os modelos de curvas típico apresentados por Lafleur *et al.* (1989), como mostra a Figura 4-21: as curvas com formato linear (curvas 1 e 2) são geralmente internamente estáveis; as curvas descontínuas (curva 3) precisam ser analisadas para determinar se têm potencial de ser internamente estável; as curvas com formato côncavo pra cima (curva 4) são geralmente internamente instáveis.

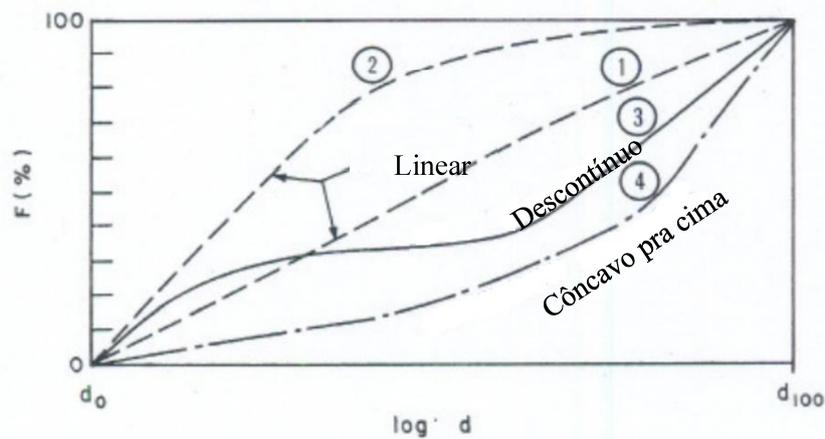


Figura 4-21: Classificação de curvas granulométrica de solos amplamente graduados (Lafleur *et al.*, 1989).

Nos casos em que o número hidrodinâmico R' , dado pela Equação 4.1, é maior que 10, o que corresponde a velocidades altas de percolação, Kenney *et al.* (1985) sugerem que a forma da curva granulométrica é mais importante que o diâmetro das partículas.

$$R' = \frac{q}{v} \left(\frac{D_5}{n} \right)^2$$

Equação 4.1

Onde: q = vazão unitária (mm/s), D_5 = diâmetro do solo equivalente a 5% das partículas passantes (mm), n = porosidade do solo e v = viscosidade do fluido percolante (mm^2/s).

Dessa forma, com base nos resultados de Kenney *et al.* (1985), em que o diâmetro equivalente médio dos vazios de um solo granular é quatro vezes maior que o diâmetro equivalente de suas partículas, Kenney e Lau (1985) propõe uma metodologia de descrição da forma granulométrica o potencial do solo à instabilidade interna. Os autores se referem a potencial porque as características do local de implantação do filtro, como a

velocidade do fluxo de percolação, influenciam no comportamento do solo com relação à instabilidade interna.

A Figura 4-22 mostra como a curva granulométrica é descrita. O diagrama 'a', à esquerda, representa a curva granulométrica do solo a ser analisado. Os eixos dos ordenadas do correspondem à fração F da massa de partículas menores que o diâmetro D e o eixo das abcissas corresponde ao diâmetro D das partículas em escala logarítmica. Cada um dos pontos que compõe a curva granulométrica original, identificados por D e F_1 é usado para determinar valores correspondentes a quatro vezes o diâmetro D , identificados como pares $4D$ e F_2 . Assim, o diagrama 'b', à direita, é traçado, com eixo das abcissas, denominado H , que equivale à fração de massa entre D e $4D$, calculado pela subtração $F_2 - F_1$; o eixo das ordenadas, denominados F , equivalem a F_1 . Esse procedimento é repetido para todos os pontos da curva granulométrica até que a curva $H \times F$ seja traçada. A reta $H = 1,3F$, de acordo com os resultados dos ensaios de Kenney & Lau (195) separa os materiais com potencial de serem internamente estáveis.

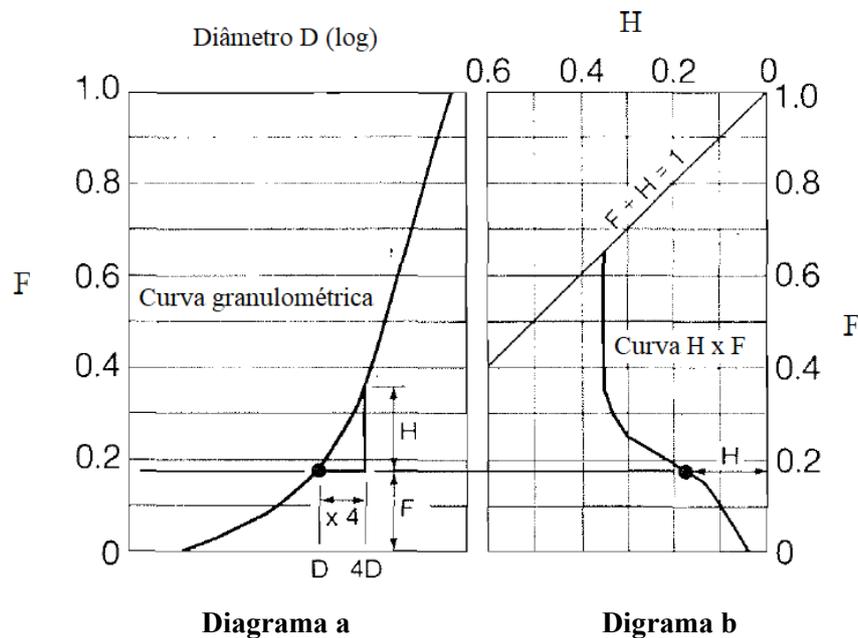


Figura 4-22: Método de descrição da curva granulométrica de Kenney e Lau (1985).

4.1.7 Caracterização mineralógica

A mineralogia de um rejeito de mineração está interligada ao minério explorado e ao processo de beneficiamento utilizado pela planta mineradora, além de influências relativas a alterações de frente de lavra.

Os rejeitos de ouro do presente estudo foram gerados a partir do beneficiamento de minérios localizados, de acordo com Pena (2008) na sequência vulcanos sedimentar do Greenstone Belt do Rio Itapicuru. A região de lavra apresenta geologia complexa, com rochas relacionadas a eventos geológicos distintos. Distinguem-se zonas de concentração de minerais que incluem basicamente plagioclásico e actinolita-tremolita, além de quartzo, apatita, esfênio, muscovita e minerais opacos, com maior representatividade por sulfetos, carbonatos, albita e biotita (Pena, 2008).

Um dos ensaios que auxiliam na identificação da composição mineralógica de rejeitos é a Difração de Raios-X. De acordo com Mitchell e Soga (2005), o ensaio consiste em incidir um feixe monocromático de Raios-X na amostra e registrar seu ângulo de reflexão. Cada mineral gera um conjunto característico de reflexões segundo ângulos θ , que podem ser convertidos nas distâncias interplanares formadas pelas estruturas cristalinas.

Uma amostra de cada tubo geotêxtil exumado foi selecionada para ser avaliada. Os ensaios de difração de Raios-X foram executados no Instituto de Geociência da UFMG, utilizando o difratômetro modelo Panalytical XPert-PRO, com irradiações realizadas no intervalo de 3° a 35°. As amostras foram preparadas pelo método do pó: primeiro foram secas ao ar até constância da massa, passadas pela peneira #40 e em seguida foram pulverizadas até atingir granulometria inferior a 60 micrômetros.

4.1.8 Microscopia eletrônica de varredura

Os materiais estudados neste trabalho, rejeito e geossintético, foram submetidos à análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises foram feitas no Centro de Microscopia da UFMG e o equipamento utilizado foi o microscópio Quanta 200 FEI (Figura 4-23), sendo possível realizar imagens dos grãos das amostras e dos geotêxteis com elevada ampliação. Cada amostra analisada foi fixada sobre um suporte metálico (*Staby*) de, aproximadamente, 10 mm de diâmetro. Em seguida, foram metalizadas com uma camada de carbono para que se tornassem condutoras. As imagens obtidas com a

microscopia eletrônica representam a superfície do material, que é bombardeada por um feixe de elétrons, focalizados por lentes eletromagnéticas.

Uma amostra deformada de rejeito, retirada do TG-14 foi analisada. Para avaliar as amostras indeformadas de rejeito, blocos de 10 mm foram esculpido de cada um dos três blocos indeformados coletados foram cuidadosamente talhados, secos ao ar e fixados nos suportes metálicos. As imagens obtidas apresentam a superfície do rejeito confinado nos tubos geotêxteis.



Figura 4-23: Microscópio Quanta 200 FEI.

4.1.9 Ensaios de Adensamento Edométrico Convencional

Para avaliar a compressibilidade do rejeito confinado nos tubos geotêxteis foram realizados ensaios de adensamento unidimensional em laboratório por meio do ensaio edométrico. O corpo de prova cilíndrico é confinado lateralmente por um anel metálico rígido, de tal forma que as deformações e fluxo são limitados à direção vertical. Incrementos de carga vertical são aplicados no corpo de prova e as deformações são registradas em diversos intervalos de tempo para cada estágio de carga.

Os ensaios de adensamento edométrico convencional foram executados no Laboratório de Geotecnia Loctest, em prensas fabricadas pela *Elle International*, como mostra a Figura 4-24. Nessa prensa, a carga axial é transmitida ao corpo de prova por meio de um braço de alavanca. As variações de altura foram registradas por meio de um extensômetro com resolução de 0,01 mm. Para todos os ensaios, a sequência de carregamento/descarregamento foi: 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 400, 200, 100, 800, 1600 kPa. Os estágios de carregamento foram encerrados após um período de 24h e de

descarregamento quando a variação da altura do corpo de prova ficava constante no tempo, em geral por um período de 4 horas.

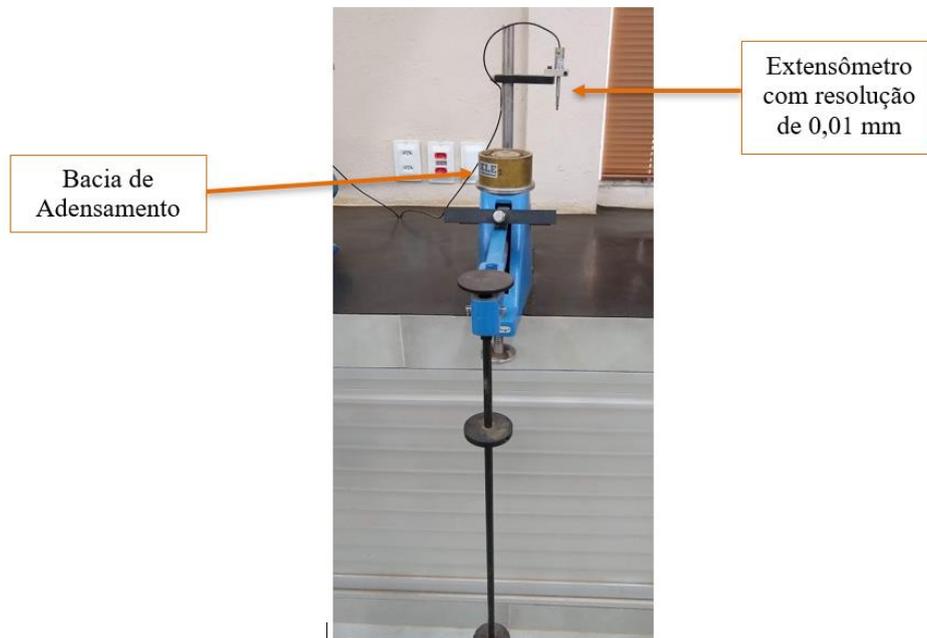


Figura 4-24: Prensa de adensamento *Elle International* – Laboratório Loctest.

Os corpos de prova foram moldados com dimensões de 2,0 mm de altura e 6,3 mm de diâmetro, em amostras moldadas a partir dos blocos indeformados coletados em campo, como descrito no Capítulo 3. Foram realizados três ensaios de adensamento, um para cada bloco coletado em campo. Dessa forma, obtiveram-se parâmetros de compressibilidade para cada nível do empilhamento de tubos geotêxteis.

O procedimento de moldagem foi feito seguindo as recomendações da ASTM, de acordo com a norma D2435 (ASTM, 2011). Primeiro, um prisma de solo de aproximadamente 60 mm de altura e 100 mm de lado era retirado do bloco indeformado. Em seguida, esse prisma era desbastado até o tamanho próximo do anel (Figura 4-25-a). O anel foi, então, cuidadosamente encaixado no corpo de prova para evitar que houvesse quaisquer folgas entre o rejeito e o anel metálico, como mostra Figura 4-25 (b). Depois disso, o excesso de rejeito era retirado para finalizar o processo de moldagem (Figura 4-25– c). Depois de realizar a moldagem, o corpo de prova foi inserido na célula de adensamento, que foi previamente preparada com a inserção de uma pedra porosa e papel filtro (Figura 4-25– d). O corpo de prova foi posicionado sobre o papel filtro (Figura 4-25– e), fixado com um disco metálico (Figura 4-25– f), e teve sua superfície superior protegida com papel filtro,

seguido de outra pedra porosa e da tampa metálica (*cap*) para aplicação dos carregamentos verticais.



Figura 4-25: Preparação do ensaio edométrico: (a), (b) e (c) mostram a sequência de moldagem e inserção do corpo de prova no anel metálico; (d), (e), (f) e (g) mostram a inserção do corpo de prova na bacia de adensamento.

4.1.10 Ensaio de Adensamento Edométrico com Medida de Permeabilidade

Para avaliar a permeabilidade das amostras de rejeito ao longo dos carregamentos, foi efetuado um ensaio de adensamento edométrico com medida de permeabilidade no Laboratório de Geotecnia da UFMG em prensa do tipo Bishop, como mostra a Figura 4-26. Nessa prensa, a carga axial é transmitida ao corpo de prova por pesos previamente calibrados por meio de um braço de alavanca com vantagem mecânica 10:1 (Figura 4-27). As variações de altura foram registradas por meio de um extensômetro com resolução de 0,01 mm.

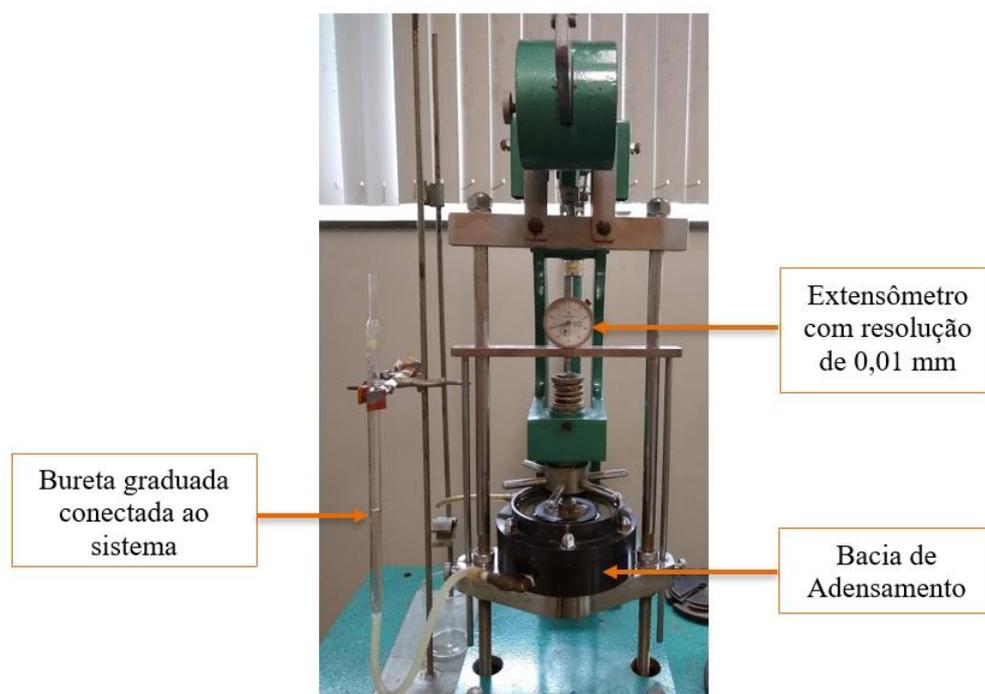


Figura 4-26:Prensa de adensamento tipo Bishop do LabGeo da UFMG.

Para realizar determinações de permeabilidade no corpo de prova, uma bureta graduada com resolução de 0,05 cm³ foi acoplada ao sistema de drenagem, indicada na Figura 4-26. Os ensaios de permeabilidade foram realizados ao final de determinados estágios de carregamento e eram do tipo carga variável, com fluxo de água vertical e ascendente. Os carregamentos foram de: 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 400, 200 e 100 kPa. Os estágios de carregamento foram encerrados após um período de 24h e de descarregamento quando a variação da altura do corpo de prova ficava constante no tempo, em geral por um período

de 4 h. O ensaio de permeabilidade foi executado ao final dos estágios de 25, 200 e 800 kPa. Para este ensaio, a carga hidráulica aplicada na base do corpo de prova foi de 130 mm e as leituras de variação de volume foram realizadas em períodos de aproximadamente 12 horas.



Figura 4-27: Prensa de adensamento tipo Bishop do LabGeo da UFMG.

O procedimento de moldagem de amostras para o ensaio de adensamento edométrico com medida de permeabilidade foi semelhante ao ensaio de adensamento edométrico convencional, descrito no item 4.2.4

4.1.11 Ensaio triaxiais CIU_{sat}

Os ensaios triaxiais foram conduzidos com adensamento isotrópico e rupturas de maneira não drenada (CIU), seguindo-se as recomendações da norma ASTM D4767/2002 - *Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils* no laboratório da empresa *Pattrol*. Os corpos de provas foram moldados a partir das amostras indeformadas com dimensões de, aproximadamente, 35 mm de diâmetro e 72 mm de altura. A preparação e inserção do CP e inserção na célula triaxial está apresentada na Figura 4-28.

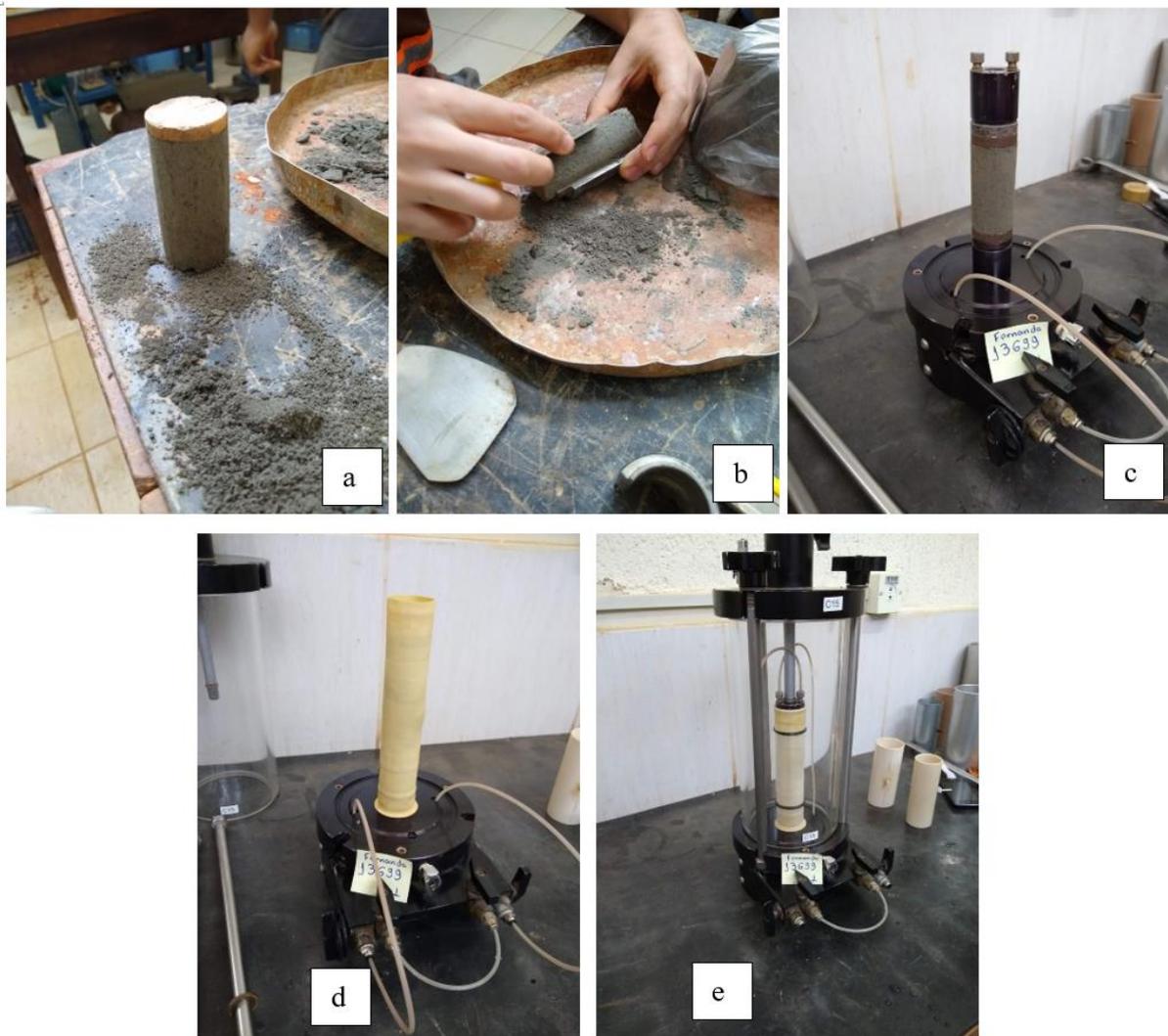


Figura 4-28: Preparação de corpo de prova para o ensaio triaxial: (a) o corpo de prova após ter sido talhado; (b) acerto do contorno do CP a partir do moldador; (c) inserção do CP na célula triaxial; (d) inserção da membrana de látex; (e) CP dentro da célula triaxial

A saturação foi estabelecida por contrapressão, sendo controlada por meio do parâmetro B de Skempton. Os CP foram considerados saturados quando atingido $B=95\%$. As tensões confinantes estabelecidas para os ensaios foram de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa por varrerem as tensões ocasionadas pela implantação da obra. Em todos os casos os ensaios foram conduzidos até 20% de deformação. A velocidade adotada para o cisalhamento foi de 0,23%/min, aproximadamente de 0,16 mm/min. Os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb foram obtidos pela interpretação das trajetórias de tensões do Massachusetts Institute of Technology (MIT), por meio das relações entre a inclinação da envoltória de resistência obtida das trajetórias de tensões, ângulo α , e o ângulo de atrito interno efetivo do material (Φ'). O intercepto coesivo efetivo também adveio das relações

trigonométricas existentes entre o valor da ordenada para a abscissa nula do gráfico de trajetória de tensões, “a”, e o intercepto coesivo efetivo (c').

Depois de realizar os ensaios de caracterização geotécnica, verificou-se que o rejeito possui granulometria fina. Portanto, optou-se por realizar o ensaio de permeabilidade a carga variável nos corpos de prova que seriam submetidos ao ensaio de triaxial do tipo CIUsat. Selecionou-se um corpo de prova para cada um dos três blocos indeformados coletados em campo. As células triaxiais contendo os corpos de prova foram conectadas ao painel indicado na Figura 4-29.



Figura 4-29: Montagem do ensaio de permeabilidade a carga variável.

O painel utilizado no ensaio de permeabilidade possui buretas que foram acopladas aos corpos de prova para induzir um fluxo ascendente. Para este ensaio, a carga hidráulica aplicada na base do corpo de prova foi de 1,40 m, e os corpos de prova foram submetidos a uma tensão confinante de 10 kPa.

4.2 Ensaios de para avaliação do geotêxtil coletado

O geotêxtil tecido utilizado na fabricação dos tubos é fabricado em fios de polipropileno de alta resistência a tração e possui uma rede estável a qual os fios mantem sua posição. De acordo como fabricante, esse geotêxtil é resistente à degradação biológica, substâncias químicas alcalinas e ácidos encontrados naturalmente nos fluidos das obras. A Tabela 4-1 apresenta as propriedades fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4-1: Propriedades do geotêxtil fornecidas pelo fabricante (TenCate, 2018)

Propriedade	Norma	Valor
Gramatura	ASTM D-5261	556 g/m ²
Espessura	ASTM D-5199	1,80 mm
Resistência à tração – faixa larga	ASTM D-4595	78,8 x 109,4 kN/m
Alongamento na ruptura – faixa larga	ASTM D-4595	20 x 20 %
Puncionamento	ASTM D-6241	8,9 kN
Abertura aparente dos poros	ASTM D-4751	0,43 mm
Permeabilidade	ASTM D-4491	813 l/min/m
Resistência a raios UV – 500 h	ASTM D-4355	80%
Resistência da costura	ASTM D-4884	70 kN/m
Abertura de filtração O ₅₀	ASTM D-6767	115 micron
Abertura de filtração O ₉₅	ASTM D-6767	368 micron

A avaliação do geotêxtil tecido, material que compõe os tubos e confere resistência ao empilhamento, foi feita por meio de três ensaios principais: i. verificação da espessura, i. gramatura e iii. resistência à tração das amostras coletadas. Antes de especificar a metodologia desses ensaios, a preparação das amostras será apresentada a seguir.

4.2.1 Preparação das amostras para os ensaios de tração faixa larga

Os ensaios de tração foram realizados na prensa do fabricante INSTRON, recentemente adquirida pelo Laboratório de Geotecnia da UFMG (Figura 4-30). Trata-se de uma prensa de tração servo controlada, com medidor de deslocamento do tipo LVDT e software Bluehill, que permite a aquisição e armazenamento dos resultados via interface gráfica por meio de um computador acoplado ao sistema. Ao final do ensaio obtêm-se os valores de tensão de ruptura, deformação e força máxima.

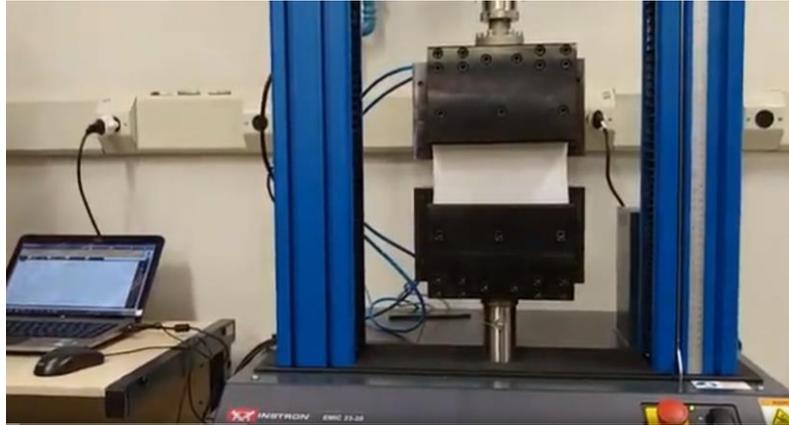


Figura 4-30: Prensa universal Instron com garra de pressão pneumática.

O planejamento das quantidades de geotêxtil a serem coletados em campo foi feito com a expectativa de utilizar amostras de geotêxtil com dimensões de 200 mm x 200 mm nos ensaios de tração para avaliar a resistência do material. Esse tamanho de amostra era compatível com a garra de pressão pneumática disponível na prensa de tração Instron, que foi projetada para romper amostras de geotêxteis do tipo tecido e não tecido. No entanto, ao ensaiar amostras de geotêxtil tecido de alta resistência à tração, semelhante ao material avaliado neste trabalho, não se obteve ensaios com resultados satisfatórios: as amostras escorregavam e/ou apresentavam ruptura próxima à região da garra, obtendo-se valores de resistência muito inferiores ao esperado. Na Figura 4-31(a) é possível notar, por meio da marcação em linha branca, o escorregamento do espécime que ocorreu ao longo do ensaio. A Figura 4-31(b) mostra o aspecto do espécime geotêxtil ao final do ensaio, com ruptura na região da garra.

Para solucionar o problema, o fabricante desenvolveu a garra do tipo rolete mostrada na Figura 4-32 (a), já instalada no Laboratório de Geotecnia da UFMG. Para essa garra, a amostra é presa por um comprimento de 50 mm e envolta nos componentes da garra. A Figura 4-32 (b) apresenta o final de um teste realizado pelo fabricante onde é possível notar a ruptura na região central espécime, cujas medidas forma de 200 mm de largura por um metro de comprimento. Para este ensaio, o geotêxtil apresentou resistência à tração ligeiramente superior ao informado pelo fabricante. Dessa forma, ficou claro que a garra de rolete seria mais adequada para romper o geotêxtil-tecido de alta resistência à tração, utilizado neste trabalho.

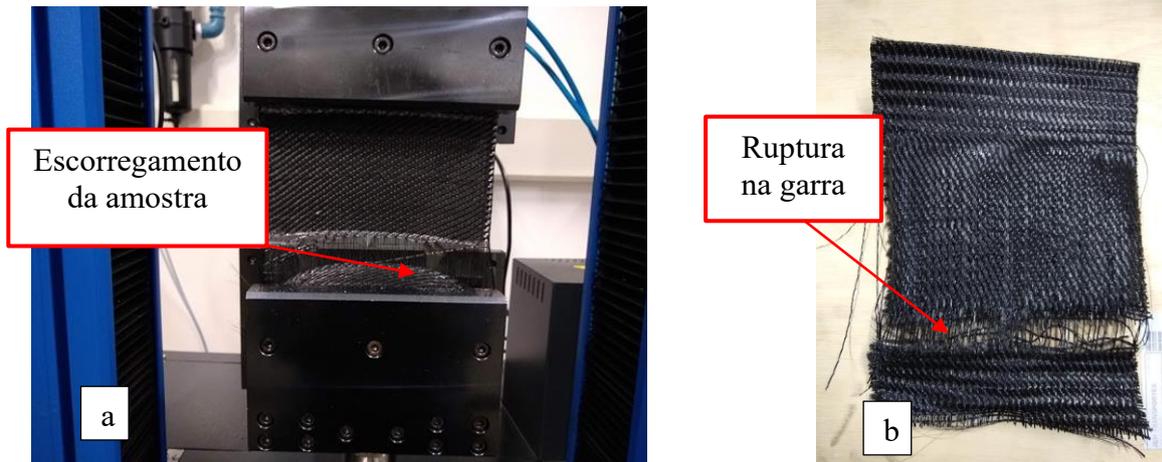


Figura 4-31: Ensaio de tração em geotêxtil tecido: (a) escorregamento de amostra na garra pneumática, (b) ruptura na região da garra.

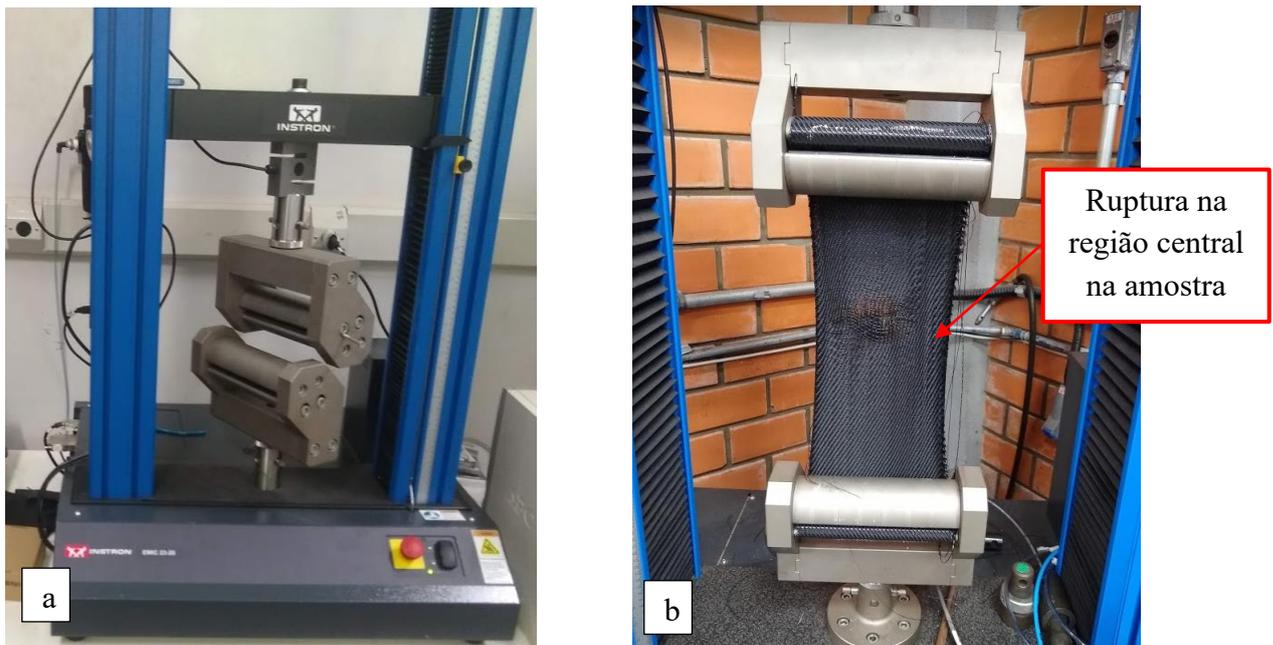


Figura 4-32: (a) Prensa universal Instron com garra de rolete; (b) espécime geotêxtil após a ruptura na garra de rolete.

Antes de ensaiar as amostras virgens e exumadas de geotêxtil tecido, 30 amostras foram ensaiadas para determinar a melhor de forma de realizar o ensaio de resistência à tração e garantir que as amostras exumadas fossem rompidas da mesma forma. Utilizou-se como

referência a norma D4595 (ASTM, 2017), que define a metodologia de ensaio de tração faixa larga de geotêxteis.

A norma D4595 indica o uso de espécimes com largura de 200 mm. No entanto, para geotêxteis tecidos de elevada resistência à tração, superior a 100 kN/m, é possível reduzir a largura de 200 mm para 100 mm. O motivo de se utilizar espécimes de largura maior (200 mm) é, de acordo com Palmeira (2018), reduzir a estrição lateral ao longo do ensaio, especialmente para os geotêxteis não tecidos. No entanto, esse efeito de estrição lateral nos geotêxteis tecidos de elevada resistência à tração é mínimo, de tal forma a possibilitar o uso de espécimes de largura de 100 mm sem prejuízo nos resultados. Portanto, para que mais ensaios pudessem ser realizados com o volume de material coletado em campo, optou-se por preparar amostras de 100 mm de largura. O comprimento ideal para realizar os ensaios de tração utilizando-se a garra de rolete foi de 700 mm, pois dessa forma foi possível romper os espécimes com sucesso e, após realizar cerca de 30 ensaios, garantiu-se um procedimento padrão.

Os espécimes utilizados nos ensaios testes foram cortados com largura de 110 mm, com o auxílio de uma tesoura, e um número igual de fios eram retirados de cada lado, formando-se franjas, até que a largura nominal de 100 mm fosse atingida. Nos primeiros ensaios realizados, alguns fios do espécime geotêxtil acabavam se movendo no processo de inserção na garra. Para evitar esse problema, os espécimes precisavam ter suas extremidades protegidas com fita crepe. Os espécimes de geotêxtil das amostras exumadas foram efetivamente cortados utilizando-se uma faca quente, como mostra a Figura 4-33. O uso desse equipamento possibilitou um corte mais preciso dos espécimes e facilitou a preparação. Não houve a necessidade de se retirar os fios das laterais dos espécimes porque o calor da faca gera uma pequena fusão que sela as fibras do geotêxtil e garante a integridade do material.

A Figura 4-34 mostra a sequência de inserção de um espécime na garra em um dos ensaios teste realizado: (a) o espécime geotêxtil era inserido na parte superior da garra; (b) a borda do espécime, protegida com fita crepe pode ser vista na parte posterior da garra; (c) uma vez ajustada na garra, a outra extremidade do espécime era posicionada na parte posterior da garra; (d) em seguida, o geotêxtil envolvia a garra; (e) vista posterior da garra após ser envolvida pelo geotêxtil; (f) por último, o geotêxtil era envolto na parte inferior da garra.



Figura 4-33: (a) Faca elétrica quente utilizada para cortar os espécimes geotêxteis e (b) espécimes cortados.

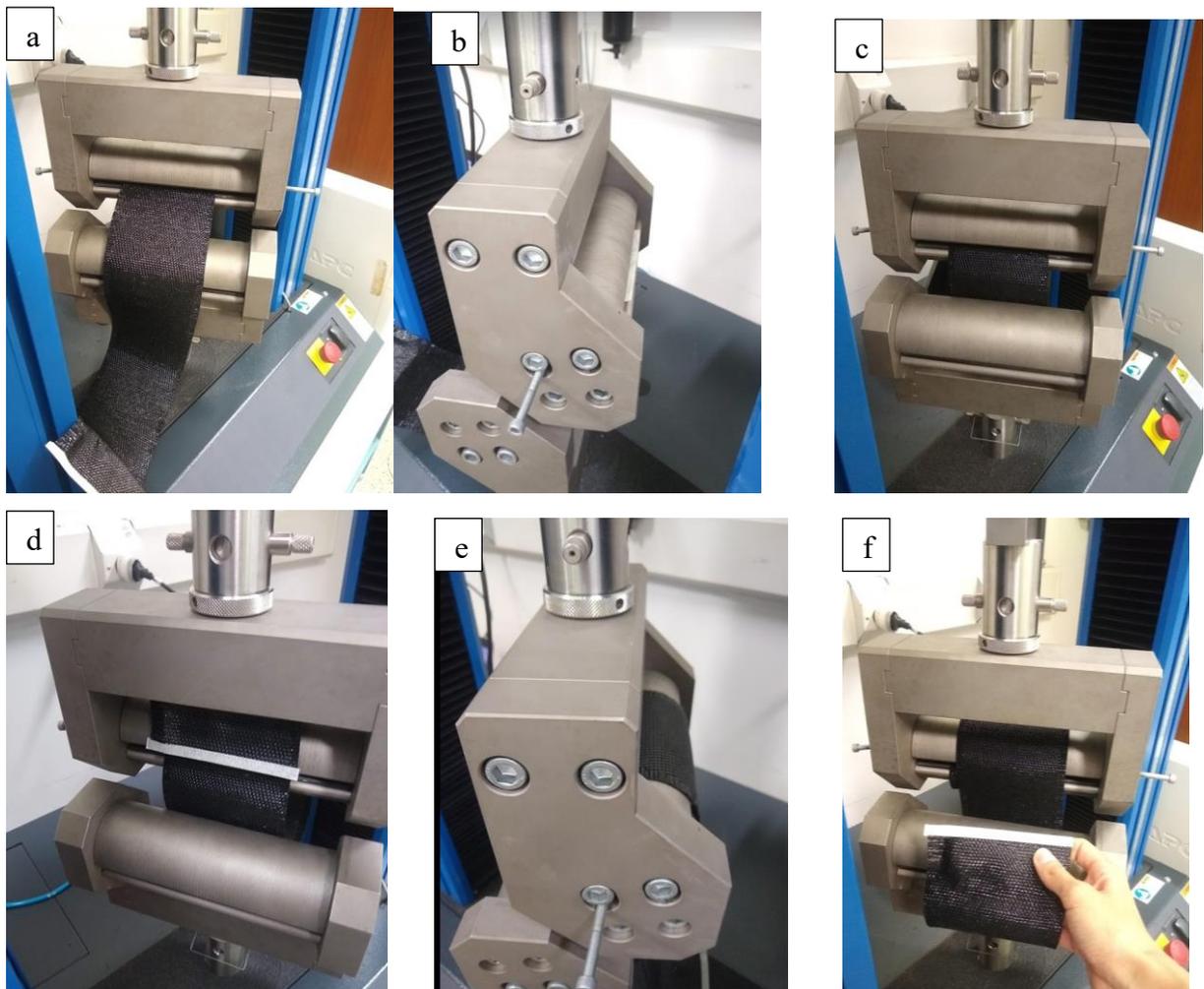


Figura 4-34: Sequência de inserção do espécime geotêxtil na garra de rolete

Após ser inserida na garra, a amostra era submetida a uma pré-tensão inicial equivalente a 1% da resistência esperada do geotêxtil. Assim, aplicou-se uma pré-tensão de aproximadamente 1,0 kN para os espécimes cortados no sentido de fabricação e 0,8 kN para os espécimes cortados no sentido contrário ao de fabricação. A velocidade utilizada nos ensaios foi de 56 mm/min.

4.2.2 Determinação da espessura

Todos os espécimes geotêxteis submetidos ao ensaio de tração tiveram sua espessura medida logo antes de serem rompidos. A norma NBR ISO 9863-1 (ABNT, 2013) foi utilizada como referência. Segundo essa norma, a espessura de um geossintético é medida como a distância entre duas placas rígidas paralelas que comprimem o corpo de prova a uma dada pressão. A espessura avaliada foi a espessura nominal, medida com a aplicação de uma tensão de 2,0 kPa no espécime geotêxtil. A Figura 4-35 mostra o equipamento utilizado para medir a espessura.

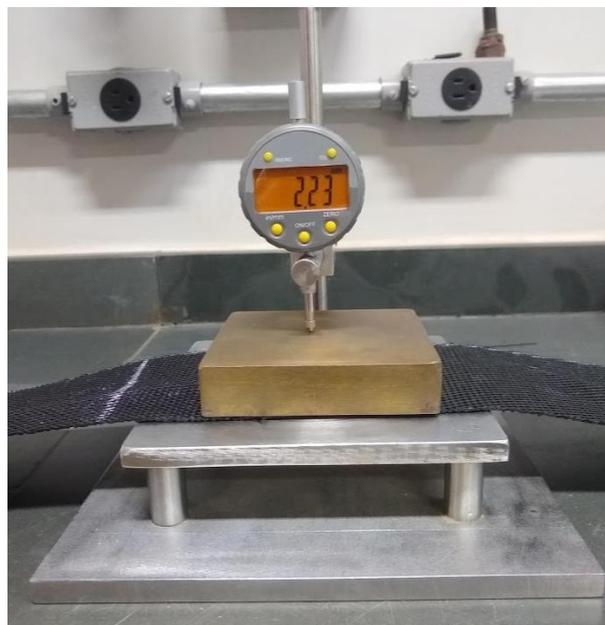


Figura 4-35: Equipamento para medição de espessura de geossintéticos.

4.2.3 Determinação da gramatura

Todos os espécimes geotêxteis tiveram sua massa por unidade de área determinada antes de serem rompidos à tração. Para isso, cada espécime teve suas dimensões medidas (700 mm x 100 mm) e foram pesados em uma balança digital com precisão de 0,001g. As razões dos valores de massa por unidade de área foram expressas em g/m².

4.2.4 Microscopia eletrônica

Amostras de geotêxtil também foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura feita no microscópio Quanta FEI 200, o mesmo utilizado para avaliar as partículas do rejeito. A preparação das amostras consistiu em cortar pequenos quadrados de 10 mm de largura para serem fixados no suporte metálico. Para que a trama do geotêxtil tecido se mantivesse intacta, uma fita dupla face foi colada na parte inferior do geotêxtil tecido, e só depois a amostra foi cortada. Esse procedimento foi necessário para evitar que a trama do geotêxtil tecido fosse desfeita durante o corte. Após serem cortadas e fixadas no suporte metálico, as amostras receberam cobertura metálica de carbono para tornar a superfície condutora.

A organização das amostras está apresentada na Figura 4-36. Foram preparadas duas amostras de cada um dos tubos geotêxteis: para tubo geotêxtil GT-14 foi retirada uma amostra da parte superior que esteve exposta às intempéries e a radiação UV (TG-14S) e uma amostra retirada da área inferior do tubo e, portanto, protegida das intempéries e da radiação UV (TG-14I); para o tubo geotêxtil TG-10 foi retirada uma amostra superior, exposta às intempéries e a radiação UV (TG-10UV) e uma amostra da área superior do tubo que estava protegida pelo TG superior e que, portanto, não foi exposta às intempéries e radiação UV (G10); finalmente, para o tubo geotêxtil TG-5, que estava completamente confinado e protegido das intempéries, foram coletadas duas amostras, uma amostra retirada da área superior (TG-5S) e outra inferior (TG-5I). Além das amostras exumadas, uma amostra de geotêxtil virgem também foi preparada como critério de comparação.

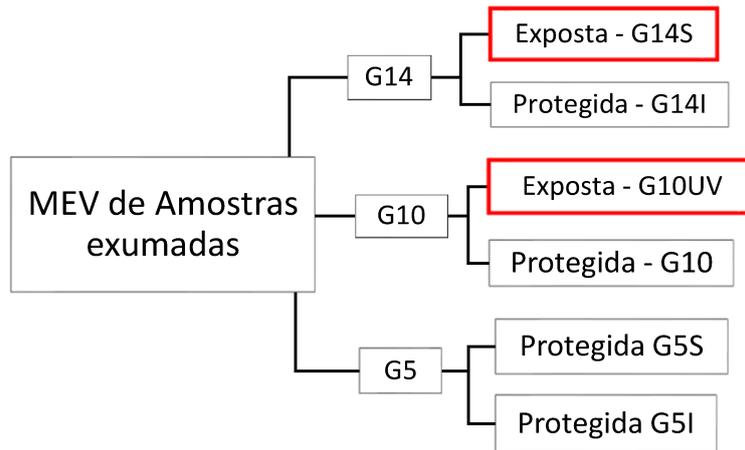


Figura 4-36: Organograma das análises MEV das amostras exumadas.

4.3 Análises estatísticas

4.3.1 ANOVA

A técnica de Análise de Variância (ANOVA) foi utilizada neste trabalho para comparar os resultados obtidos nos ensaios de tração. De acordo com Assis *et al.* (2018), a análise de variância é a técnica em que se comparam as médias de duas ou mais populações por meio de testes de hipóteses utilizando a Distribuição de Fisher; a ANOVA é útil para comparar a eficiência de diferentes fatores que produzam mudanças sistemáticas nas médias da população de interesse.

Fatores são variáveis independentes as quais são divididas em níveis. Neste trabalho, cada espécime geotêxtil submetido ao ensaio de tração esteve associado a determinados fatores, como por exemplo, o tubo geotêxtil ao qual ele pertence ou se ele esteve exposto ou não às intempéries. Uma vez que todos os espécimes são avaliados, é possível identificar o nível de significância de cada fator no experimento. No total, o experimento foi dividido em cinco fatores: i) direção do corte dos espécimes geotêxteis, ii) exposição à luz solar, iii) nível em que se encontra o tubo geotêxtil, iv) posição no sentido longitudinal e v) posição no sentido transversal do TG. A distribuição dos níveis de cada um dos fatores está apresentada na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Distribuição dos níveis para cada um dos fatores.

Fator	Níveis
Direção do corte	2 níveis (sentido de fabricação – MD, sentido contrário à fabricação – CMD)
Exposição solar	2 níveis (exposto e não exposto)
Nível do TG	3 níveis (TG 14, 10 e 5)
Posição longitudinal no TG	2 níveis (borda e centro)
Posição transversal no TG	2 níveis (borda e centro)

Com a definição dos níveis, foram criados grupos de espécimes geotêxteis ensaiados à tração e que possuíam as mesmas características. O objetivo de incluir o fator posição longitudinal no tubo geotêxtil foi verificar se a posição em que o espécime geotêxtil foi retirado teria influenciado na resistência à tração ou no alongamento na ruptura. Para isso, os espécimes geotêxteis obtidos a partir das tiras centrais foram classificados como “Centro” e as demais como “Borda”. A Figura 4-37 exemplifica essa classificação para as amostras do TG-14. Os espécimes 1 a 17 estão localizados na tira da esquerda e foram classificados como “borda”, assim como os espécimes 36 a 54, localizados na tira direita. Os espécimes 18 a 35, localizados na tira central, foram classificados como espécimes de “centro”.

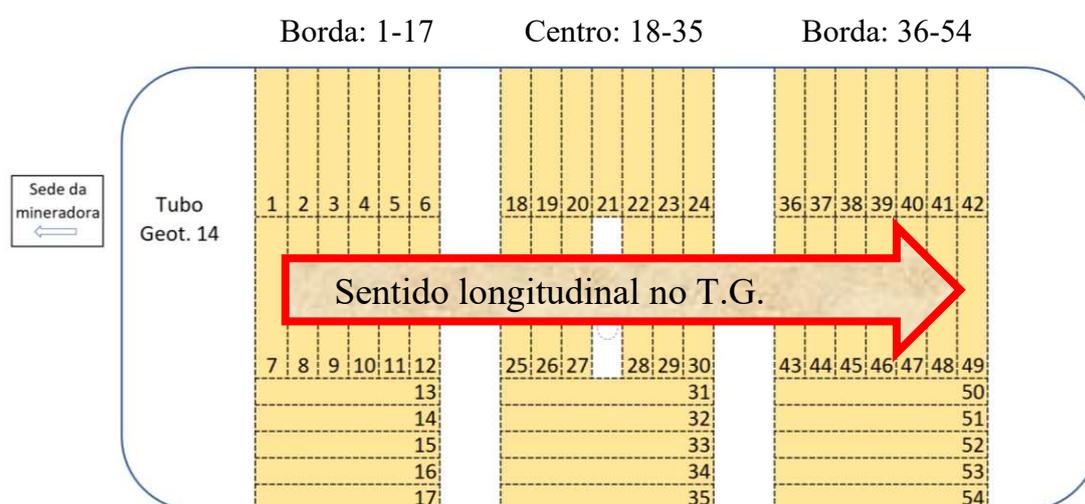


Figura 4-37: Classificação dos espécimes geotêxteis com relação à posição longitudinal.

De maneira similar, verificou-se se posição no sentido transversal do tubo geotêxtil teria influenciado a resistência à tração ou o alongamento na ruptura. Para isso, todos os

espécimes geotêxteis obtidos na região central de cada uma das tiras foram classificadas como “centro” e os demais como “borda”. A Figura 4-38 exemplifica essa classificação para as amostras do TG-14: como exemplo, para a tira de geotêxtil localizada à esquerda, os espécimes 1-6, e 13-17 são classificados como “Borda”, ao passo em que os espécimes 7-12 são classificados como “Centro”.

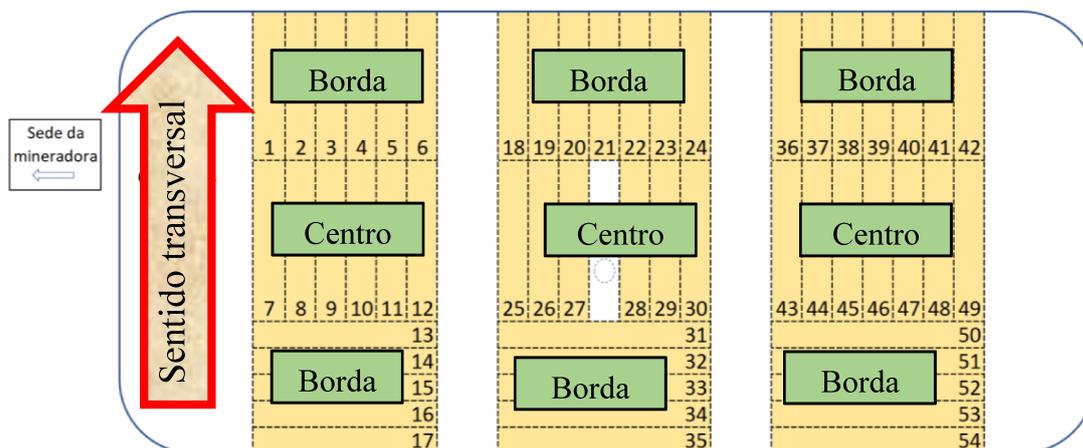


Figura 4-38: Classificação dos espécimes geotêxteis com relação à posição transversal.

Em geral, o ANOVA é utilizado para planejar o experimento para que todas as combinações de fatores sejam testadas. Assim, a análise de variância padrão é feita para uma amostra dita balanceada, quando a quantidade observações (neste trabalho, rupturas à tração) é igual para todas as combinações possíveis de todos os fatores. No entanto, pela natureza desse experimento, foi impossível combinar todos os fatores, de tal forma que o conjunto de dados obtidos fosse desbalanceado. Além disso, os grupos tiveram tamanhos diferentes. Como exemplo, o grupo de espécimes que compartilham as características de corte no sentido MD, esteve exposto à radiação UV, foram retirados na borda da amostra de geotêxtil possui um número de 47 ensaios de tração. Por outro lado, o grupo de espécimes que foram cortados no sentido MD, foram retirados na borda da amostra geotêxtil e não estiveram expostos às intempéries e radiação UV, tem um número de 41 ensaios de tração, menor do que o grupo anterior. Esse fato caracteriza um conjunto de dados não balanceados.

De acordo com Montgomery (2001), a análise de variância para amostras não balanceadas, como ocorreu neste trabalho, pode ser usada sem que haja dificuldades

computacionais. No entanto, como indica Quinn (2002), o valor da média observada para cada um dos grupos é obtido com nível de precisão diferente, uma vez que cada grupo possui um número diferente de ensaios de tração, o que pode dificultar a interpretação dos resultados. Além disso, o teste de Fisher é menos robusto quando hipóteses do modelo são violadas, particularmente a homogeneidade de variâncias, se o tamanho dos grupos for diferente. Esses aspectos foram observados na interpretação dos resultados obtidos.

Os dados de resistência à tração e de alongamento na ruptura de cada espécime ensaiado foram organizados em arquivo de texto e tratados no ambiente de desenvolvimento *Jupyter Notebook* utilizando a linguagem de programação *Python 3.7*. A primeira avaliação é a análise de variância do modelo utilizando o Anova tipo 2, como recomendado por Langsrud (2003) para dados não-balanceados, pois foi esse o caso desse experimento. A primeira modelagem foi realizada considerando os cinco fatores (direção do corte, exposição ao UV, nível no empilhamento, posição longitudinal e posição transversal) com intervalo de confiança de 99%. A partir do primeiro resultado, o modelo foi simplificado até chegar ao ponto em que somente os fatores que apresentaram relevância estatística fossem considerados.

Depois de atingir o modelo simplificado, foram feitos dois testes para avaliar se os dados atendiam as premissas da análise de variância. Os testes utilizados foram *Shapiro Wilk* e *Barlett* que avaliam, respectivamente, normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias. Em seguida, os gráficos de magnitude dos efeitos foram traçados e avaliados.

4.3.2 Diagrama de caixas

O diagrama de caixas foi o método escolhido para avaliar a distribuição dos dados de espessura e comparar graficamente os conjuntos de medidas obtidas no capítulo 7, de avaliação da geotêxtil exumado. O gráfico de caixas ou *Box plot* é uma ferramenta gráfica que auxilia na visualização da dispersão dos dados, permitindo, por exemplo, a identificação de valores discrepantes ou *outliers* dos dados. O diagrama de caixas é também bastante útil como disposição gráfica comparativa, uma vez que as medidas estatísticas descritivas como mínimo, máximo, primeiro quartil, segundo quartil ou mediana e o terceiro quartil formam esse diagrama. A Figura 4-39 mostra um exemplo de diagrama de caixa: o local onde a haste vertical começa de baixo para cima, indica o valor mínimo, excetuando-se algum valor discrepante e, onde a haste termina, tem-se o valor

máximo da distribuição de dados, também excetuando algum valor discrepante. O retângulo ou caixa localizado no meio dessa haste possui três linhas horizontais: a linha inferior indica o primeiro quartil e a linha superior, que delimita o retângulo, indica o terceiro quartil; dessa forma, 50% dos dados obtidos encontram-se limitados pelo retângulo. A posição da linha interna ao retângulo, que indica o segundo quartil ou mediana, é útil para avaliar a simetria dos dados, pois um conjunto de dados que tem uma distribuição simétrica terá a linha mediana no centro do retângulo.

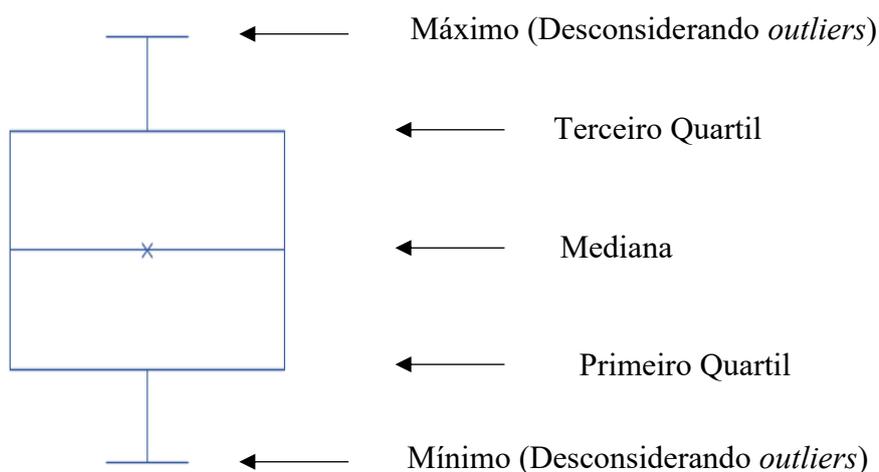


Figura 4-39: Diagrama de caixas ou *box plot*.

5 APRESENTAÇÃO RESULTADOS - EXUMAÇÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados de observação da estrutura do empilhamento desde o fim da construção, em julho de 2017, até a exumação e desmonte da estrutura, ocorrido durante a exumação em abril/2019.

Como foi indicado no trabalho de Freitas Silva (2017), todos os tubos geotêxteis foram preenchidos até a altura máxima de 1,00 m, calculada em projeto, para garantir a segurança do preenchimento e evitar a ruptura do geotêxtil. Ao longo do processo de enchimento e deságue, a altura dos tubos geotêxteis apresentou variabilidade considerável. A Tabela 5-1 apresenta, como exemplo, as alturas obtidas a partir das flanges dos TG 1, 2 e 3 ao final do dia 26/06/2017, após a finalização do enchimento, e

início do dia 27/06/2017, antes de iniciar novos ciclos de enchimento. O período entre um ciclo e outro foi de, aproximadamente 12 horas. A variação na altura dos TG nesse período foi próxima a 20% da altura total do TG, chegando a 200 mm para o TG-1.

Tabela 5-1: Variação na altura dos TG 1, 2 e 3 entre os dias 26/07/2017 e 27/07/2017.

TG	Altura dos TG (mm)			
	Medidas do dia 26/07/2017		Medidas do dia 27/07/2017	
	H_i	H_f	H_i	ΔH
1	630	980	780	200
2	660	990	820	170
3	710	980	830	150

Nota: H_i é a altura inicial medida na flange do TG; H_f é a altura final, medida na flange do TG, ao final do ciclo de enchimento, ΔH é a variação de altura do TG em um período de 12 horas.

A equipe de topografia da mineradora realizou um levantamento topográfico em maio de 2018 para auxiliar no monitoramento e observação da estrutura. A Figura 5-1 mostra o mapa das curvas de nível obtido e a Figura 5-2 mostra a seção transversal do empilhamento. A altura total da estrutura era de 2,25 m; assim cada TG tinha, em média, uma altura de 0,75 m. Como todos os tubos geotêxteis foram preenchidos até a altura de 1,00 m, o recalque médio sofrido por cada unidade foi de, aproximadamente, 0,25 m.

Durante a exumação do empilhamento, realizada em abril de 2019, foi possível obter algumas medidas de altura dos tubos geotêxteis com o auxílio de mira-laser e baliza, que corroboram a observação de que a altura tende a estabilizar após o fim do enchimento. A altura medida a partir da flange foi de 820 mm para o TG-14, localizado no topo do empilhamento. Também foi possível obter a altura do TG-12, localizado no segundo nível, que contava com 740 mm de altura.

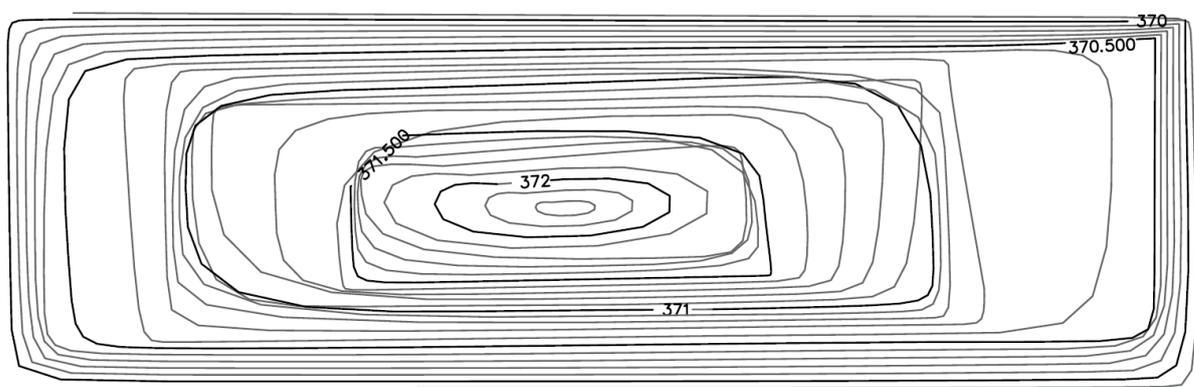


Figura 5-1: Topografia do empilhamento de TG em maio/2018

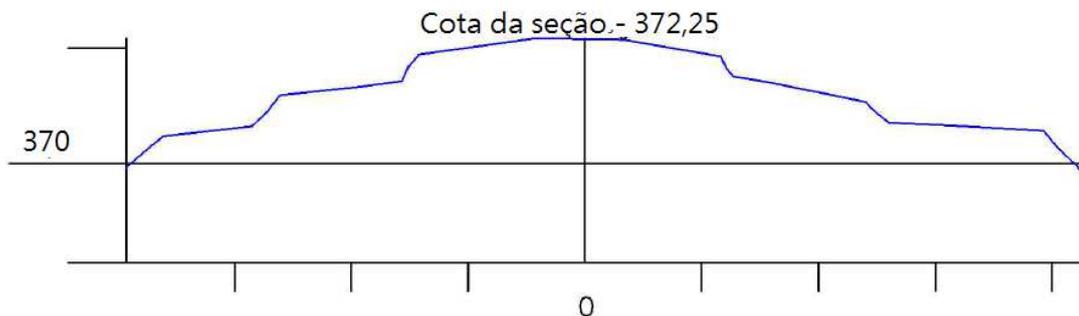


Figura 5-2: Seção longitudinal do empilhamento.

Antes de iniciar a coleta de amostras, a estrutura foi observada com relação às deformações que ocorreram durante o processo de enchimento. A Figura 5-4 mostra uma imagem aérea com a vista superior do empilhamento. O tubo TG-14 foi mapeado marcando-se a linha central por meio de fita crepe, para auxiliar na visualização da posição do TG e de suas deformações na longitudinal e possível torção. Como mostrado na seção 3.2, o TG-14 começou a deslizar no início do bombeamento. Depois de interromper o bombeamento para permitir o deságue e consolidação do material, o processo de enchimento pôde ser finalizado. No entanto, o TG-14 apresentou uma distorção ao longo do seu eixo que já havia sido notada ao final do período construtivo.

A Figura 5-3 mostra uma imagem feita na parte frontal do empilhamento mostrando a seção transversal do TG-14. A imagem foi quadriculada para mostrar a posição relativa da flange deslocada para a esquerda. Neste caso, houve a ocorrência do estado limite externo de deslizamento, que ocorreu devido à declividade excessiva da base onde o tubo foi preenchido. Trata-se de estado limite externo relativo a um único tubo geotêxtil, mas pode causar prejuízos no sistema global de empilhamento e acidentes no decorrer da obra. Além disso, deformações excessivas nos tubos geotêxteis podem impedir que a empilhamento seja utilizado como estrutura de contenção. Dessa forma, é importante que o preenchimento dos espaços vazios entre os tubos não apresente deformações elevadas ao receber o carregamento dos tubos geotêxteis dos níveis subsequentes; adicionalmente, a declividade das bases onde os tubos geotêxteis serão preenchidos deve ser controlada antes do preenchimento dos tubos geotêxteis para evitar o estado limite de deslizamento.

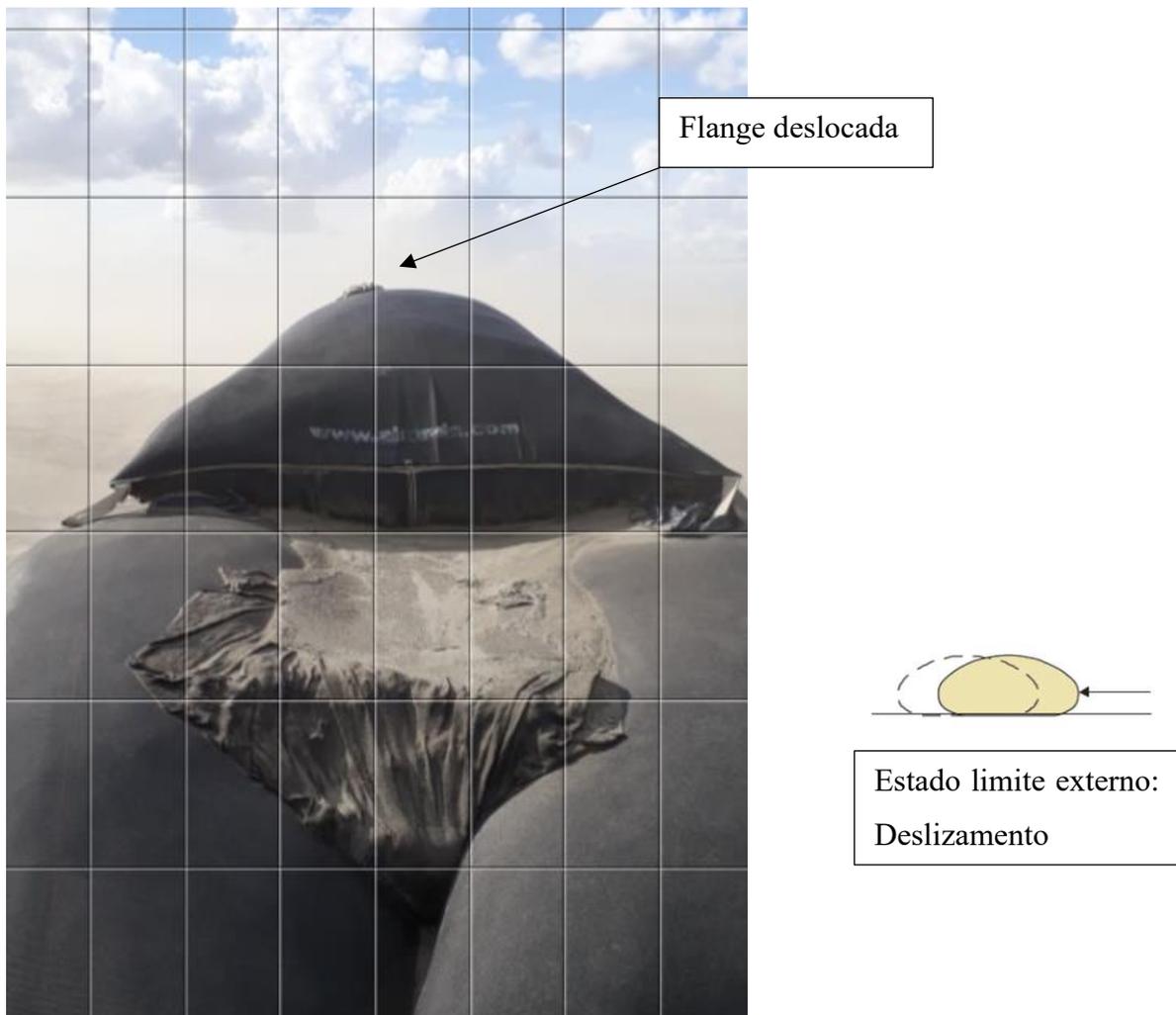


Figura 5-3: Vista da seção transversal do TG-14 e indicação do estado limite externo de deslizamento.

O eixo do TG-14 foi marcado com uma fita crepe para que fosse possível visualizar a distorção ocorrida. A Figura 5-4 mostra uma imagem feita por drone com a vista superior do TG-14. Ao aproximar a imagem, foi possível medir, graficamente, que a distorção do TG14 foi próxima a 12°. Além da distorção apresentada pelo TG-14, outras deformações foram observadas na estrutura, principalmente na junção de um tubo geotêxtil e outro. A Figura 5-5 mostra alguns exemplos de deformações que foram observadas em campo. Essas deformações ocorreram especialmente na sobreposição das extremidades dos tubos geotêxteis. As extremidades dos tubos geotêxteis foram sobrepostas para evitar que houvessem espaços vazios entre a junção de dois tubos geotêxteis. No entanto, como mostra na Figura 5-5-a, a sobreposição excessiva gerou um desnivelamento no primeiro nível de tubos geotêxteis, o que causou deformações nas camadas superiores do

empilhamento. Essas deformações excessivas nos tubos geotêxteis são prejudiciais porque, ao causarem o desnivelamento da base sobre a qual novos tubos geotêxteis serão preenchidos, podem gerar instabilidade e deslizamento dos tubos durante o enchimento, como ocorreu com o TG-14.

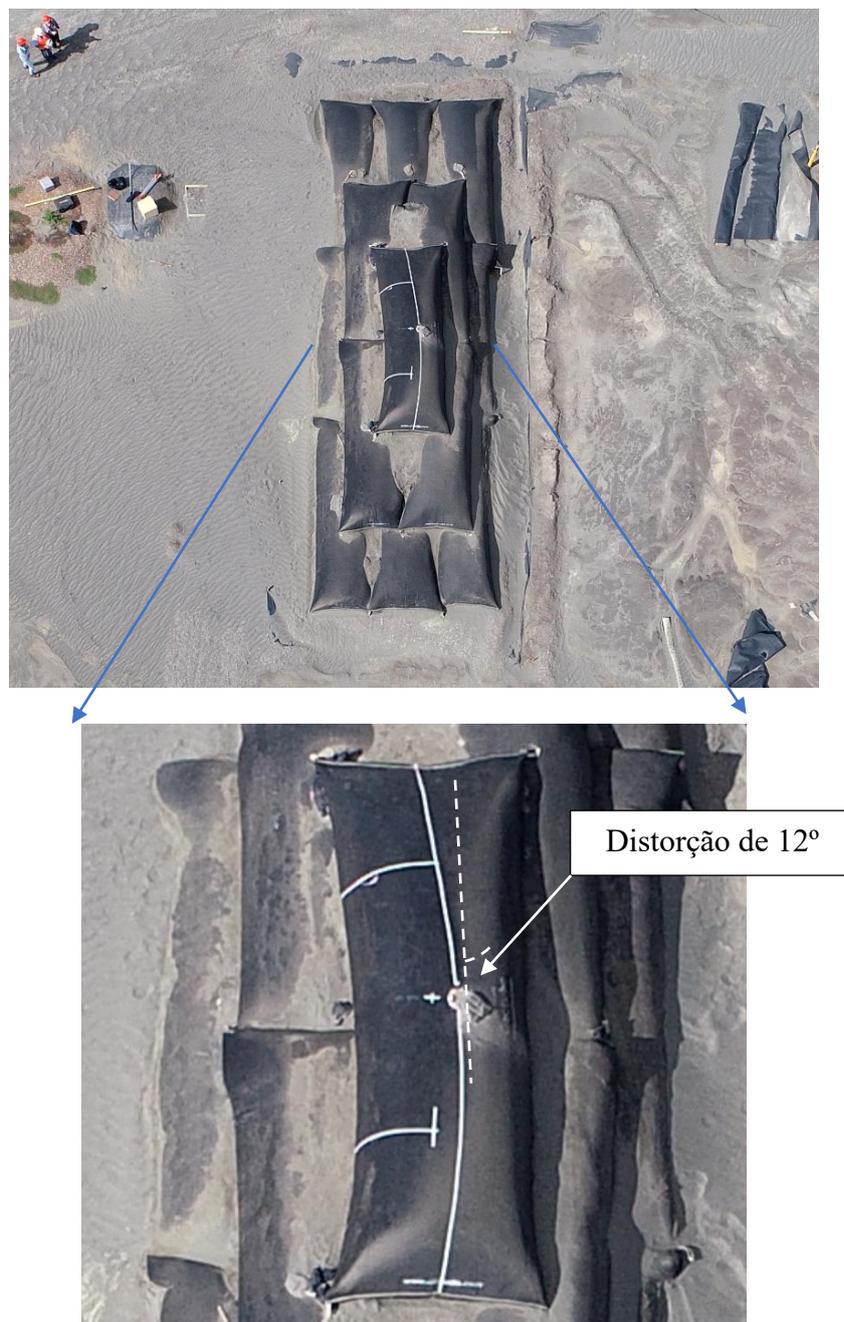


Figura 5-4: Distorção do eixo do TG-14.

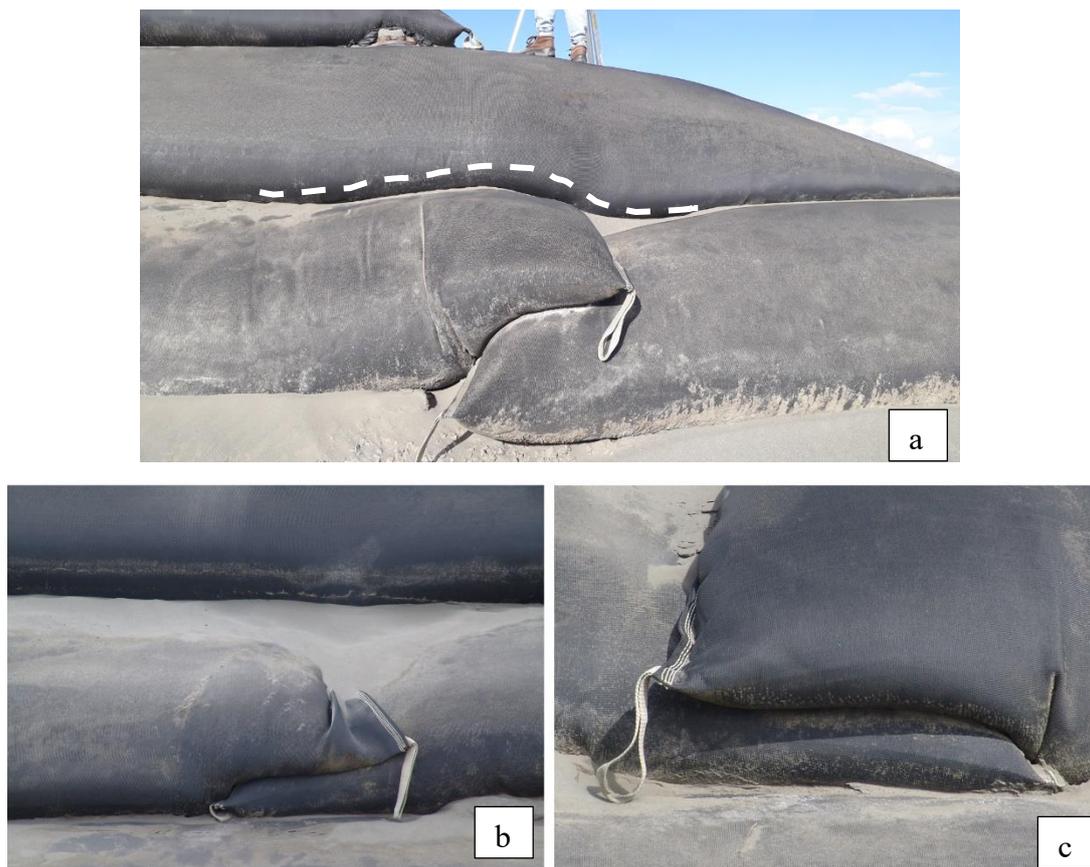


Figura 5-5: Exemplo de deformações e dobras no geotêxtil nas junções dos tubos geotêxteis.

A Figura 5-7 mostra uma imagem quadriculada da seção transversal da estrutura para mostrar a posição relativa entre cada TG. A base do TG-13 e TG-12 parecem estar mais deformadas em relação à base do TG-14. A Figura 5-7 mostra a imagem lateral do empilhamento logo antes de iniciar a exumação do empilhamento.

Ainda que os espaços vazios entre os tubos geotêxteis tenham sido preenchidos com o próprio rejeito as propriedades desse rejeito não são idênticas ao do rejeito confinado no interior dos tubos por causa do confinamento hidráulico que ocorre no preenchimento dos tubos geotêxteis. No caso de utilização da estrutura de tubos geotêxteis como, por exemplo, reforço de barragem, as características do material de preenchimento entre tubos devem ser consideradas, pois o excesso de deformações da estrutura pode comprometer sua estabilidade.



Figura 5-6: Seção transversal da estrutura de tubos geotêxteis.



Figura 5-7: Imagem lateral do empilhamento durante a exumação.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS – REJEITO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados no rejeito que foi coletado na exumação do empilhamento de tubos geotêxteis em Fazenda Brasileiro. Os resultados englobam a avaliação da densidade in situ realizada em campo, ensaios de granulometria das amostras deformadas com avaliação da segregação e da estabilidade interna do rejeito, ensaios de adensamento edométrico e de compressão triaxial realizados nas amostras indeformadas e, por fim, os resultados de difração de raios-x e microscopia eletrônica de varredura realizada no rejeito.

6.1 Índices físicos

Com relação às características físicas do rejeito confinado nos tubos geotêxteis exumados, a Tabela 6-1 apresenta o resultado da massa específica natural (ρ_{nat}), teor de umidade (w) e massa específica aparente seca (ρ_d) para cada um dos níveis de empilhamento verificados na visita a campo. A massa específica das partículas de rejeito (ρ_s) foi obtida a partir de ensaio laboratorial realizado nas amostras deformadas coletadas próximas a cada bloco indeformado, e a partir desse valor, o grau de saturação (S) e o índice de vazios (e) do rejeito confinado foram calculados. Esses dados, obtidos por meio do ensaio de densidade in situ pelo método de cravação de cilindro, estão coerentes com o observado em campo: o TG-14, localizado no nível superior do empilhamento e exposto continuamente à radiação solar, estava visivelmente mais seco em relação aos outros tubos geotêxteis exumados. Além disso, o TG-14 não foi submetido a sobrecargas ao longo dos 22 meses em que esteve disposto em campo, de tal maneira que sua massa específica aparente seca é inferior aos outros tubos geotêxteis.

Tabela 6-1: Índices físicos obtidos a partir de medidas feitas em campo.

TG	Nível	ρ_{nat} (g/cm ³)	w (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	S (%)	e
14	3°	1,65	11,0	2,69	1,49	36,5	0,810
10	2°	1,86	18,0	2,70	1,58	68,6	0,709
5	1°	1,95	20,1	2,73	1,63	80,9	0,679

Nota: ρ_{nat} é a massa específica natural, w é o teor de umidade, ρ_s é a massa específica dos sólidos, ρ_d é a massa específica aparente seca, S é o grau de saturação, e é o índice de vazios.

O teor de umidade obtido após a abertura do TG-14 foi de 11%, o que indica que o rejeito confinado apresentou tendência a perder umidade com o passar do tempo. Isso porque Freitas Silva (2017) constatou que o teor de umidade do material, sete dias após a finalização do processo de enchimento, era próximo a 25%. Nota-se que os tubos geotêxteis TG-10 e TG-5, confinados no segundo e primeiro níveis do empilhamento, respectivamente, também apresentaram a tendência de diminuição de umidade, mas em menor grau se comparados ao TG-14.

O gráfico de monitoramento da umidade ao longo de 21 dias subsequentes ao enchimento dos tubos está apresentado na Figura 6-1. O teor de sólidos, em peso, da lama bombeada para o tubo geotêxtil era de 52%, o que corresponde a um teor de umidade de 92%. Após 24 horas, o teor de umidade do rejeito passou de 92% para 35%. Depois de 21 dias, o teor de umidade do material próximo ao bocal do tubo geotêxtil era de 25%.

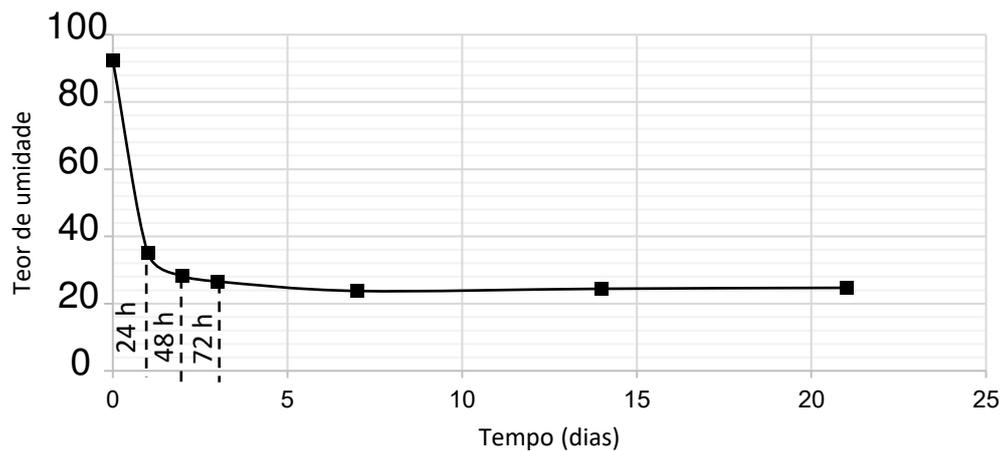


Figura 6-1: Teor de umidade do material coletado no TG14 ao longo de 21 dias subsequentes ao enchimento (Freitas Silva, 2017).

6.2 Segregação Hidráulica

Nesta seção estão apresentados os dados das curvas granulométricas para as 10 amostras de rejeito deformadas que foram coletadas. Os códigos das amostras estão definidos na Tabela 6-2.

Tabela 6-2: Descrição do código das amostras coletadas

Amostra	Descrição
D14-D	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>14</u> , na extremidade <u>D</u> ireita.
D14-M	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>14</u> , no <u>M</u> eio.
D14-E	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>14</u> , na extremidade <u>E</u> squerda.
D10-D	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>10</u> , na extremidade <u>D</u> ireita.
D10-E	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>10</u> , no <u>M</u> eio.
D5-DS	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>5</u> , na extremidade <u>D</u> ireita e em profundidade <u>S</u> uperior.
D5-ES	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>5</u> , na extremidade <u>E</u> squerda e em profundidade <u>S</u> uperior.
D5-DI	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>5</u> , na extremidade <u>D</u> ireita e em profundidade <u>I</u> nferior.
D5-EI	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>5</u> , na extremidade <u>E</u> squerda e em profundidade <u>I</u> nferior.
D5-MS	<u>D</u> eformada, foi retirada no TG- <u>5</u> , no <u>M</u> eio.

A análise do processo de segregação hidráulica ao longo do enchimento dos tubos geotêxteis foi realizada a partir da comparação entre os diâmetros D_{10} , D_{30} , D_{60} e D_{90} , apresentados na Tabela 6-3, obtidos ao longo do eixo longitudinal dos tubos geotêxteis. O comprimento total dos tubos geotêxteis foi de 6,0 m. Assim, as amostras retiradas na extremidade direita estavam localizadas no ponto 0,5 m, as retiradas no meio estavam localizadas no ponto 3,0 m e as retiradas na extremidade esquerda estavam localizadas no ponto 5,5 m. Duas observações devem ser enfatizadas, que são: i. foram obtidas somente duas amostras para o TG-10, uma retirada na extremidade direita e outra na extremidade esquerda e ii. as cinco amostras obtidas no TG-5 foram discriminadas em linha superior e inferior.

Tabela 6-3: Diâmetros equivalentes das amostras coletadas

Diâmetros equivalentes das amostras (mm)										
	TG-14			TG-10		TG-5				
	D14-D	D14-M	D14-E	D10-D	D10-E	D5-DS	D5-M	D5-ES	D5-DI	D5-EI
D ₁₀	0,0034	0,0030	0,0034	0,0030	0,0040	0,0045	0,0045	0,0048	0,0032	0,0032
D ₃₀	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
D ₆₀	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
D ₉₀	0,20	0,20	0,22	0,20	0,21	0,22	0,22	0,19	0,19	0,19

As Figura 6-2 a Figura 6-5 apresentam os valores dos diâmetros D₁₀, D₃₀, D₆₀ e D₉₀ para os tubos geotêxteis exumados neste trabalho. Cabe notar que os valores dos diâmetros característicos que estão sendo utilizados foram aqueles obtidos a partir das curvas com peneiramento e sedimentação com defloculação química. O processo de enchimento dos tubos geotêxteis foi realizado com uso de floculantes poliméricos, dessa forma as curvas obtidas com o uso de defloculante seriam mais realistas com relação à distribuição do tamanho das partículas.

De maneira geral, as amostras do TG-14 apresentaram a mesma tendência de comportamento dos diâmetros D₁₀, D₃₀ e D₆₀, com valores menores no meio do tubo geotêxtil (posição 3,0 m) e aumento nas extremidades direita (0,5 m) e esquerda (5,5 m). Essa tendência não se repetiu no diâmetro D₉₀, em que as amostras da direita e do meio apresentaram valores idênticos de D₉₀.

As amostras do TG-10 apresentaram comportamento variado, ora a amostra da esquerda tinha diâmetro superior à da direita (D₃₀ e D₉₀), ora os valores da direita eram idênticos (D₆₀), ora o valor da direita era superior à esquerda (D₁₀).

As amostras retiradas na linha superior do TG-5 também não apresentaram uma mesma tendência de comportamento para todos os diâmetros; ora o diâmetro do meio foi inferior aos diâmetros das extremidades (D₃₀ e D₆₀), ora era superior ao das extremidades (D₉₀ e D₁₀). Da mesma forma, a linha inferior também não apresentou uma mesma tendência de comportamento; ora os diâmetros das extremidades direita e esquerda eram idênticos ou apresentaram valores muito próximos (D₆₀ e D₉₀), ora o valor da extremidade direita era superior ao da direita (D₃₀) e vice-versa (D₁₀).

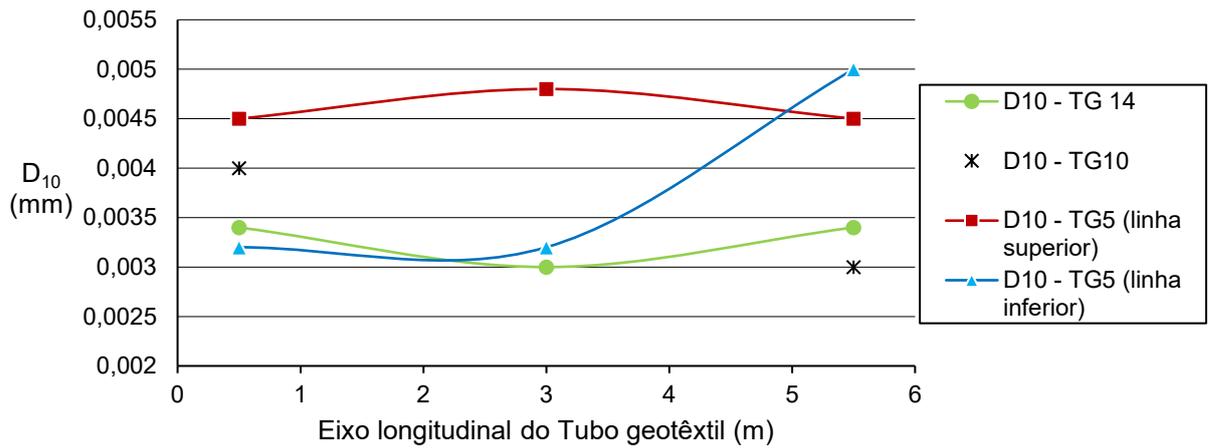


Figura 6-2: Variação de D_{10} nos tubos geotêteis

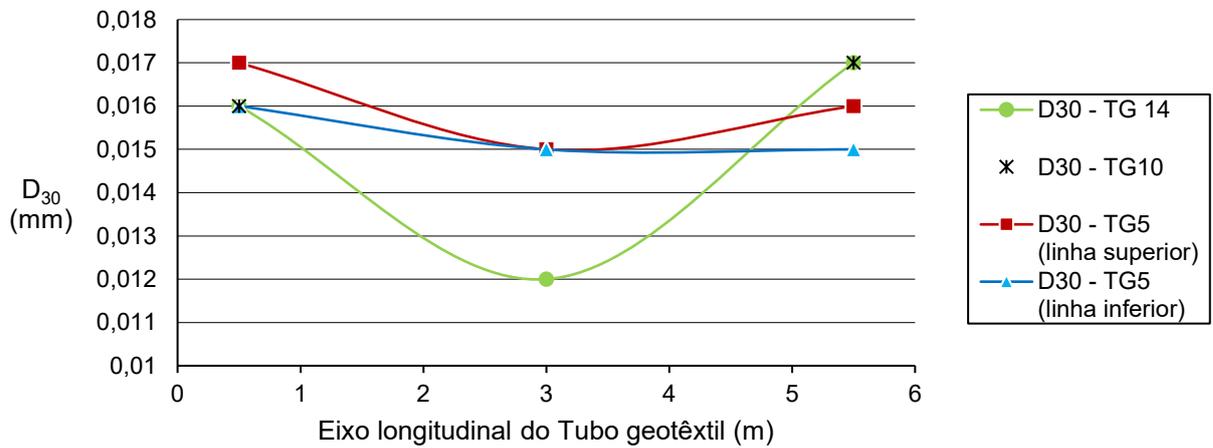


Figura 6-3: Variação de D_{30} nos tubos geotêteis.

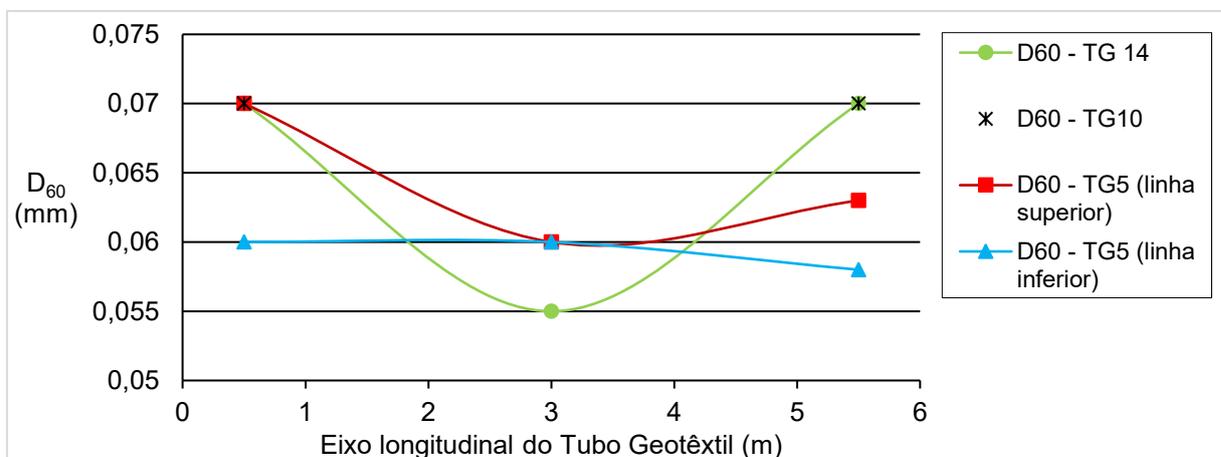


Figura 6-4: Variação de D_{60} nos tubos geotêteis.

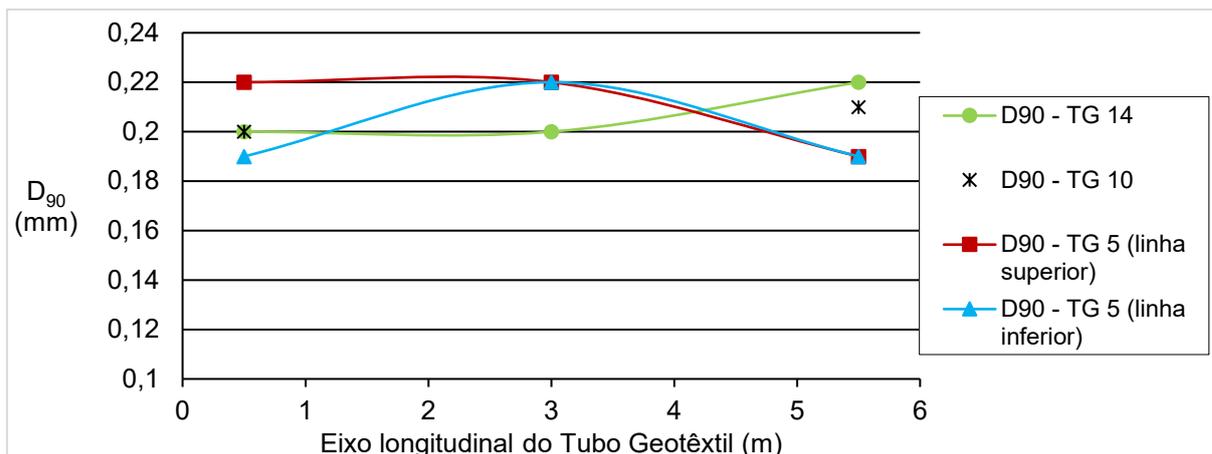


Figura 6-5: Variação de D_{90} nos tubos geotêxteis.

De uma forma geral, não foi possível estabelecer uma relação clara entre a variação granulométrica que ocorreu no interior dos tubos geotêxteis exumados e a posição da amostra retirada. Observa-se, no entanto, que as amostra retirada no meio do TG-14 apresentou em todas as análises o menor valor de diâmetros D_{10} , D_{30} , D_{60} e D_{90} . Como indicado por Fernandes (2007), o mecanismo de transporte das partículas é influenciado pela capacidade de arraste do processo de fluxo, mas também é influenciado pelas características físicas e mineralógicas do rejeito. Além disso, aspectos como o uso de floculantes no rejeito, vazão de bombeamento, a posição do bocal de entrada do TG e ciclos de enchimento são variáveis que influenciam na distribuição do rejeito no interior do TG. Além disso, outros fatores diferenciam os tubos geotêxteis, como as tensões verticais que o TG-5 e TG-10 foram sujeitos com o empilhamento. A densidade dos grãos que formam o rejeito também pode influenciar na segregação, mas como será visto na nas análises de difração de raios-X, as densidades dos minerais que foram identificados não apresentam grande discrepância de valores.

Apresentação das curvas granulométricas do TG-14

As curvas granulométricas foram inseridas em dois gráficos. No primeiro, apresentado na Figura 6-6, foi possível notar uma clara distinção entre as curvas obtidas por peneiramento e sedimentação com e sem defloculante, especialmente nas frações menores que 0,003 mm. Nesse gráfico foi também inserida a curva granulométrica obtida

por Oliveira *et al.* (2018), característica de rejeito total que foi coletado no mesmo local da construção do empilhamento dos tubos geotêxteis após a finalização do enchimento dos tubos. Nota-se que a granulometria do rejeito obtida por Oliveira *et al.* (2018), que não foi flocculado como o rejeito apresentado neste trabalho, é mais fina, mostrando a variabilidade do rejeito; essa curva foi inserida em todos os gráficos de granulometria que serão apresentados.

O segundo gráfico, mostrado na Figura 6-7, faz uma comparação entre as curvas granulométricas obtidas por peneiramento e sedimentação com defloculante com as curvas obtidas à laser com utilização de ultrassom. Nota-se que as curvas à laser estão deslocadas para esquerda na região localizada entre 0,01mm e 0,5mm, mas possuem o formato da curva semelhante, com valores de coeficiente de curvatura (C_c) próximos, como mostra a Tabela 6-4. Os resultados dos coeficientes de não uniformidade (C_u) são superiores a 6, indicando que o rejeito é considerado bem graduado; já a curva obtida sem o uso de defloculante resultou em valores de coeficiente de curvatura menor que a unidade e coeficiente de não-uniformidade (C_u) inferiores a 4, indicando que para essa curva o rejeito é considerado mal graduado.

Para todas as curvas (exceto da amostra D14D ensaiada sem defloculante) a diâmetro efetivo para o qual 50% das partículas tem tamanho inferior (D_{50}) foi inferior a 0,06 mm. Trata-se de um rejeito fino, com classificação textural obtida pelo triângulo de *Feret* (Fernandes, 2016) do tipo silte-arenoso.

Tabela 6-4: Caracterização das amostras de rejeito coletados no TG-14.

Amostra	D_{50} (mm)			C_c			C_u		
	CD	SD	L	CD	SD	L	CD	SD	L
D14D	0,045	0,078	0,020	1,1	0,4	1,2	20,6	3,9	8,7
D14E	0,045	0,052	0,020	1,2	0,4	1,2	20,6	3,3	8,1
D14M	0,037	0,055	0,021	0,9	0,4	1,1	17,7	3,1	8,1
\bar{x}	0,042	0,062	0,020	1,1	0,40	1,17	19,6	3,4	8,3
σ	0,005	0,014	0,001	0,2	0	0,06	1,67	0,42	0,35

Nota: D_i é o diâmetro equivalente através do qual passam i por cento das partículas do rejeito; C_u é o coeficiente de não uniformidade; C_c é o coeficiente de curvatura e \bar{m} a massa específica média dos grãos que compõe o rejeito; **CD** refere-se aos ensaios de granulometria realizados com de flocculante; **SD** aos e aos ensaios de granulometria realizados sem defloculante; **L** refere-se aos ensaios de granulometria a laser; \bar{x} é a média dos valores, σ é o desvio padrão.

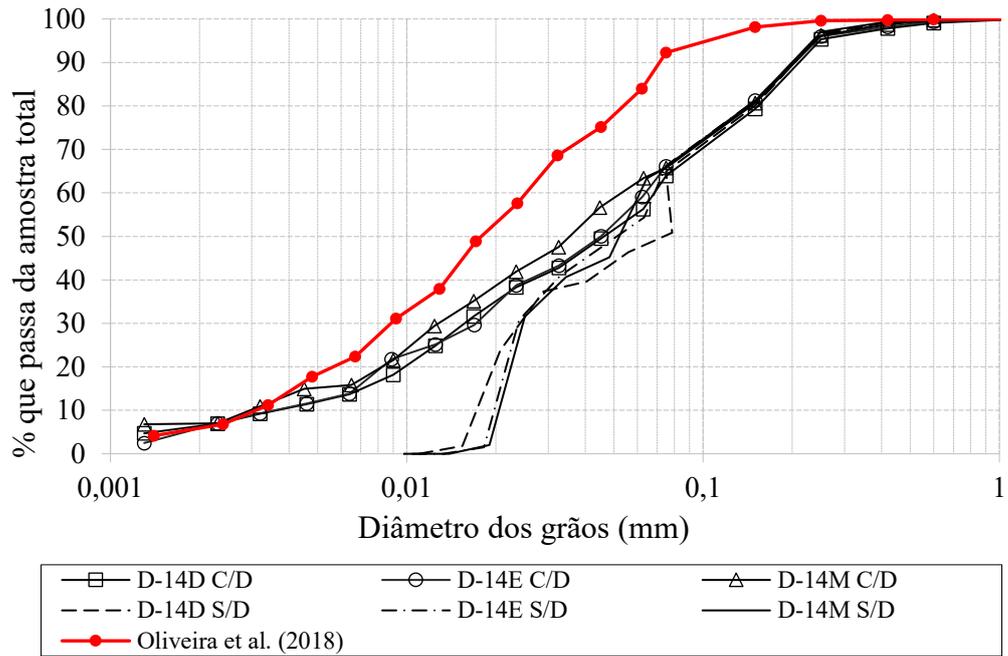


Figura 6-6: Curvas granulométricas das amostras coletadas no TG-14.

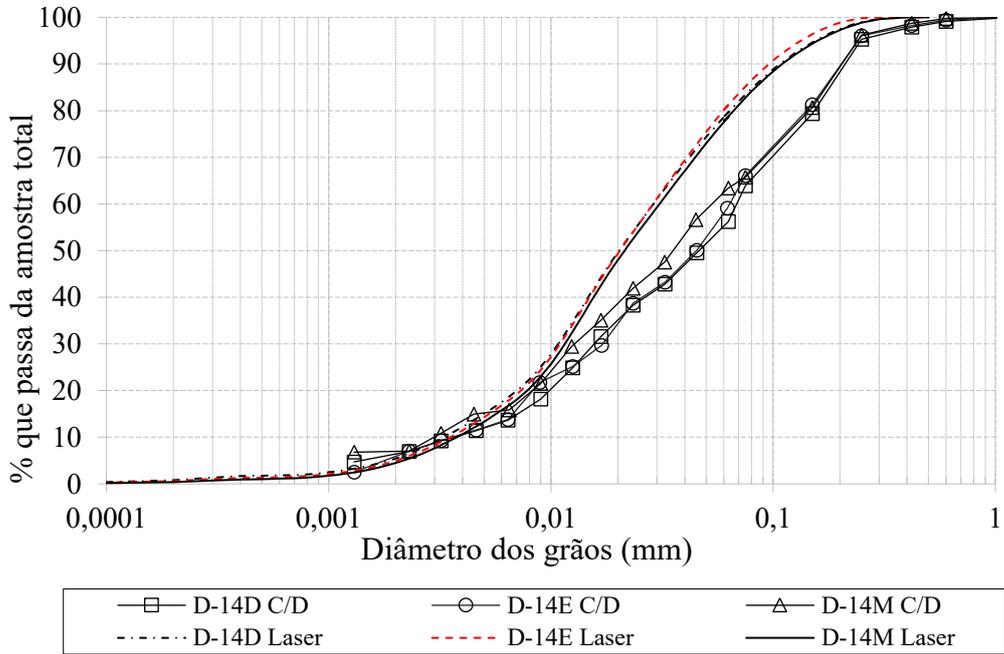


Figura 6-7: Curva granulométrica de acordo com a NBR 7181 e à laser das amostras coletadas no TG-14.

Apresentação das curvas granulométricas do TG-10

Nota-se na Tabela 6-5 que as amostras obtidas no TG-10 apresentaram valores numéricos de C_c e C_u próximos aos obtidos para as amostras do TG-14. Com relação às curvas granulométricas apresentadas na Figura 6-8 e Figura 6-9, valem as mesmas observações realizadas para as amostras D14: foi possível notar uma clara distinção entre as curvas obtidas por peneiramento e sedimentação com e sem defloculante, especialmente nas frações menores que 0,003 mm (Figura 6-8); na Figura 6-9, nota-se que as curvas à laser estão deslocadas para esquerda na região localizada entre 0,01mm e 0,5mm, além de apresentarem um aspecto suavizado em relação às curvas obtidas por peneiramento e sedimentação.

Para todas as curvas o diâmetro efetivo para o qual 50% das partículas tem tamanho inferior (D_{50}) foi inferior a 0,07 mm. Trata-se, portanto, de um rejeito fino, com classificação textural pelo triângulo de *Feret* de silte-arenoso.

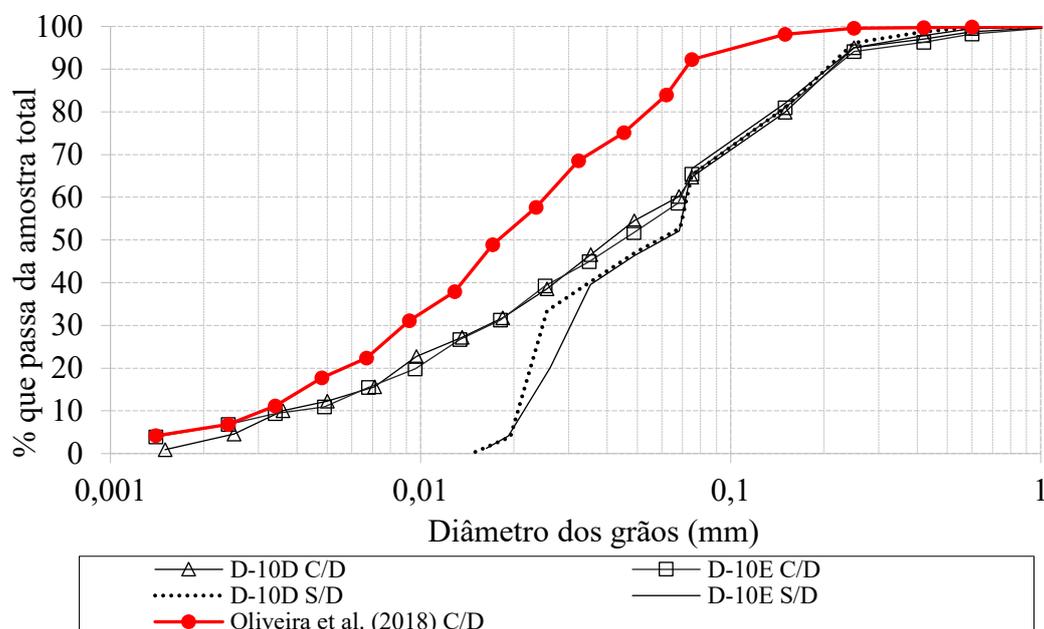


Figura 6-8: Curvas granulométricas das amostras coletadas no TG-10.

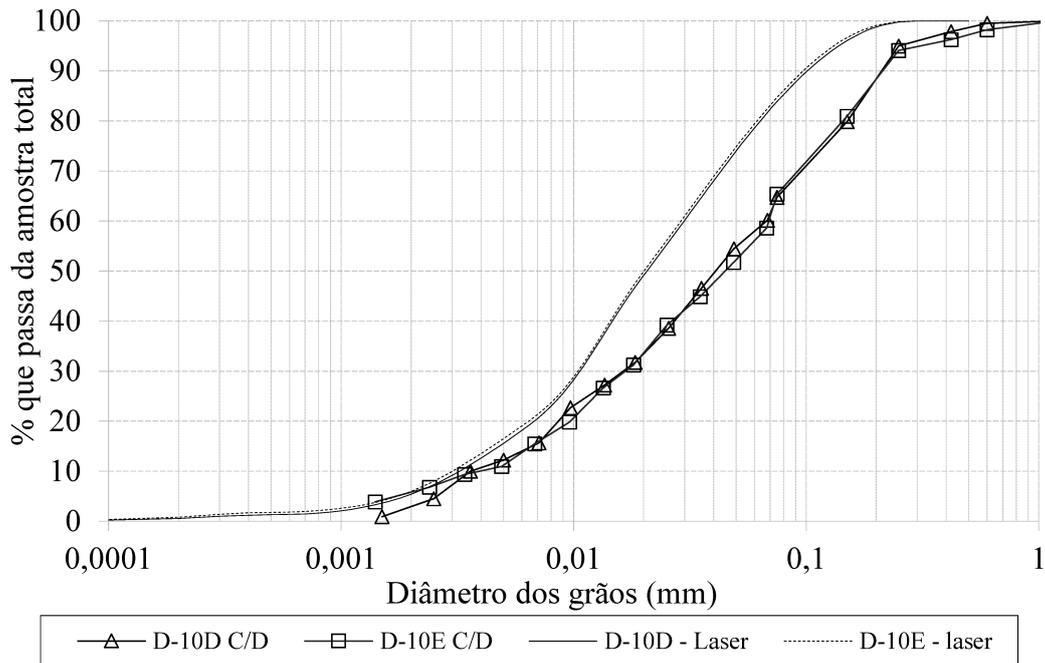


Figura 6-9: Curva granulométrica de acordo com a NBR 7181 e à laser das amostras coletadas no tubo geotêxtil 10

Tabela 6-5: Caracterização das amostras de rejeitos coletados no TG-10.

Amostra	D ₅₀ (mm)			C _c			C _u		
	CD	SD	L	CD	SD	L	CD	SD	L
D-10D	0,041	0,061	0,021	1,0	0,4	1,2	18,9	3,3	9,2
D-10E	0,045	0,067	0,020	1,1	0,4	1,2	17,6	3,0	9,6
\bar{x}	0,043	0,064	0,021	1,05	0,4	1,2	18,3	3,15	9,4
σ	0,003	0,004	0,001	0,07	0	0	0,9	0,21	0,3

Nota: Valem as mesmas notas da Tabela 5.3. [

Apresentação das curvas granulométricas do TG-5

Por fim, a Tabela 6-6 apresenta os resultados de caracterização das 5 amostras obtidas no TG-5. Os resultados numéricos para C_c e C_u estão próximos aos obtidos para as amostras do TG-14 e TG-10 e todas as observações feitas anteriormente são válidas para as amostras do TG-5. Para todas as curvas granulométricas obtidas, apresentadas na Figura 6-10 e Figura 6-11 (exceto da amostra D5MS, ensaiada sem defloculante) o diâmetro efetivo para o qual 50% das partículas tem tamanho inferior (D₅₀) foi inferior a 0,07 mm.

Trata-se de um rejeito fino, com classificação textural pelo triângulo de *Feret* de silte-arenoso.

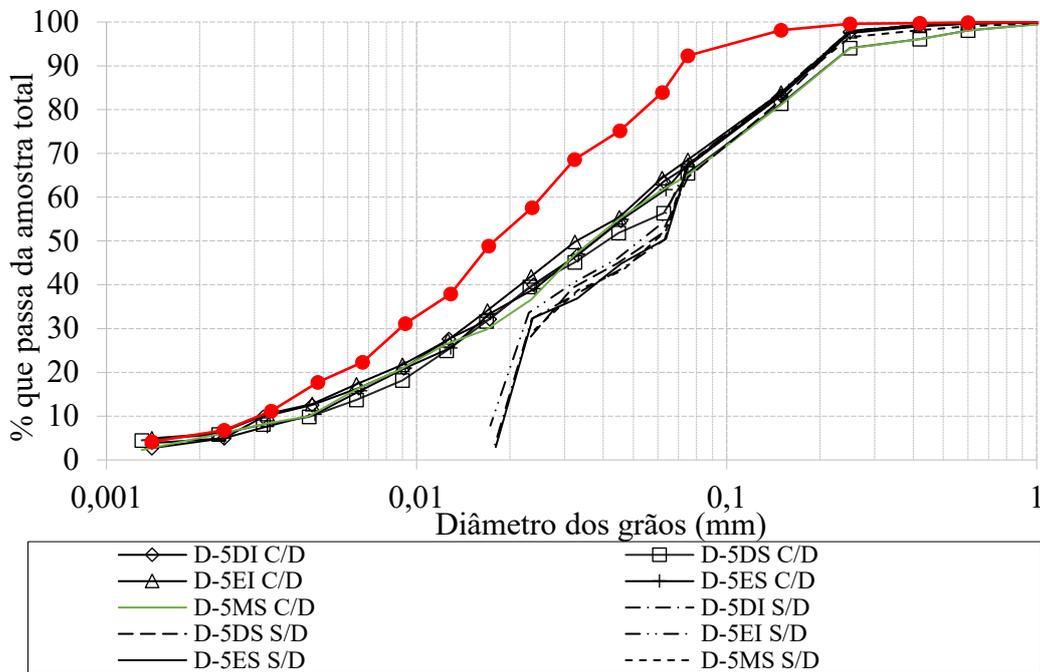


Figura 6-10: Curvas granulométricas das amostras coletadas no TG-5.

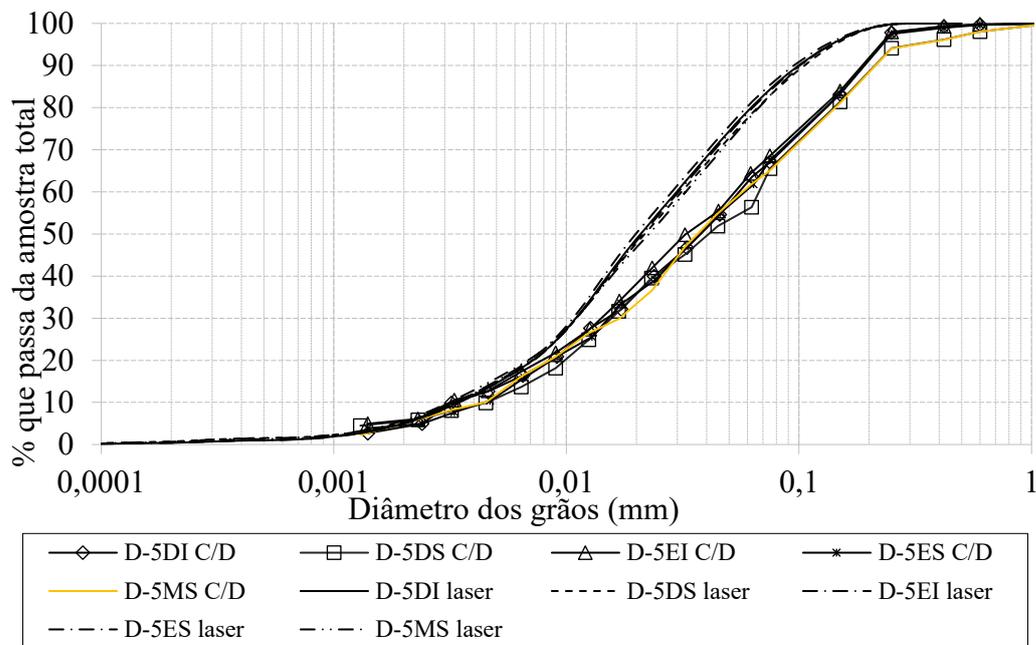


Figura 6-11: Curva granulométrica de acordo com a NBR 7181 e à laser das amostras coletadas no TG-5.

Tabela 6-6: Caracterização das amostras de rejeitos coletados no TG-5.

Amostra	D ₅₀ (mm)			C _C			C _U		
	CD	SD	L	CD	SD	L	CD	SD	L
D-5DI	0,037	0,063	0,021	1,2	0,4	1,2	18,2	3,7	8,6
D-5DS	0,040	0,065	0,022	0,9	0,4	1,2	15,2	3,5	9,4
D-5EI	0,032	0,058	0,020	1,2	0,4	1,3	18,1	3,9	8,4
D-5ES	0,038	0,067	0,021	0,8	0,4	1,1	13,7	3,7	8,7
D-5MS	0,037	0,078	0,023	1,0	0,4	1,2	13,8	3,5	10,3
\bar{x}	0,037	0,066	0,021	1,0	0,4	1,2	15,8	3,7	9,1
σ	0,003	0,007	0,001	0,2	0	0,1	2,2	0,2	0,8

Nota: Valem as mesmas notas da Tabela 5.3

6.3 Peso específico dos grãos

O gráfico apresentado na Figura 6-12 apresenta a variação da massa específica dos grãos das amostras deformadas ao longo do eixo longitudinal dos tubos geotêxteis exumados.

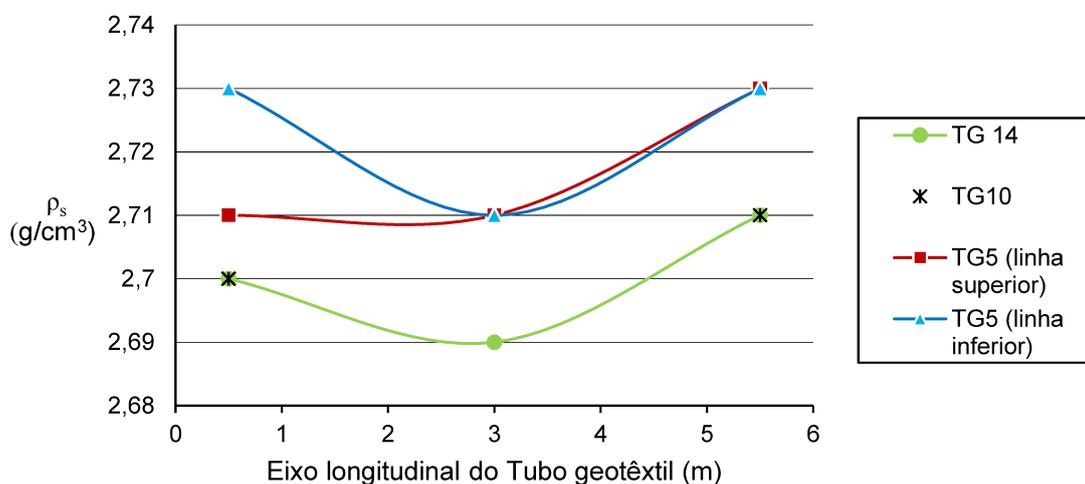


Figura 6-12: Variação da massa específica dos grãos ao longo do eixo dos TG.

Observa-se que a magnitude da variação ocorrida foi pequena, com valores contidos no intervalo de 2,69 g/cm³ a 2,73 g/cm³. Nota-se que a massa específica dos grãos correspondentes ao TG-14 e TG-10 foi inferior a obtida para as amostras do TG-5. Além

disso, a massa específica dos grãos obtida da amostra retirada no meio do TG-14 foi inferior às amostras retiradas nas extremidades, tendência que se repetiu para a linha inferior do TG-5.

6.4 Análise da estabilidade interna

A avaliação da estabilidade interna dos rejeitos foi feita conforme a metodologia apresentada na Seção 4.1.6. As curvas granulométricas foram comparadas com os modelos de curvas típico apresentados por Lafleur *et al.* (1989). De acordo com essa classificação, todas as três curvas selecionadas têm concavidade para cima e, portanto, são classificadas como internamente instáveis. De acordo com a metodologia gráfica, proposta por Kenney e Lau (1985), o formato da curva granulométrica tem maior influência na análise de estabilidade interna do que o diâmetro das partículas que compõe um solo não coesivo. Utilizando a metodologia gráfica de descrição da forma da curva granulométrica, apresentada na Seção 4.1.6, obteve-se o gráfico apresentado na Figura 6-13.

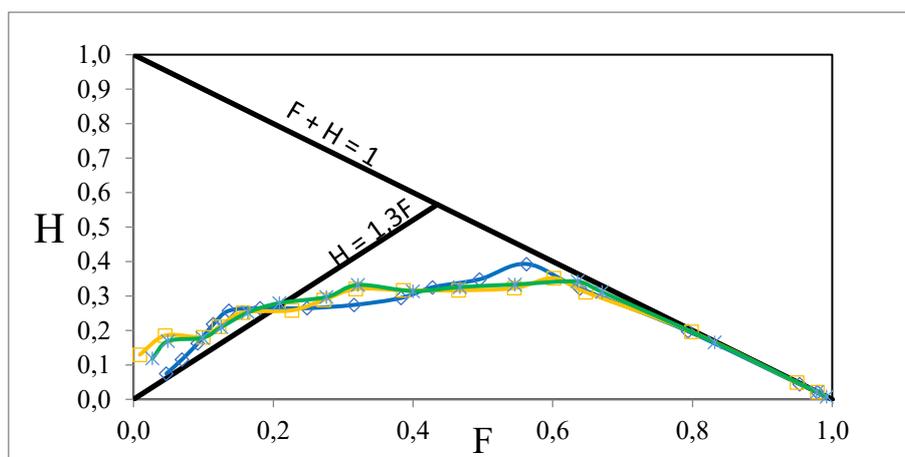


Figura 6-13: Gráfico resultante da avaliação de estabilidade interna.

Nota-se que as três curvas, que são bem graduadas ($C_c > 1,0$), apresentam algum potencial de instabilidade interna uma vez que apresentam a curva de descrição granulométrica (H versus F) muito próxima do contorno $H=1,3F$, que delimita os materiais estáveis dos instáveis, na região em que F é menor ou igual a 0,2.

As duas metodologias avaliaram o material com potencial a apresentar instabilidade interna. Se o rejeito de fato apresentar comportamento instável, pode ocorrer a colmatação

do geotêxteis que formam os tubos, o que influencia diretamente na eficiência da drenagem do sistema. Se a altura máxima de enchimento do TG não for respeitada ao longo do enchimento, o excesso de poro pressão pode causar a ruptura do tubo geotêxtil.

6.5 Adensamento Edométrico Convencional

Foram realizados três ensaios de adensamento edométrico convencional, conforme metodologia explicitada no Capítulo 4. As características dos corpos de prova encontram-se agrupadas na Tabela 6-7. Todos foram moldados a partir dos blocos indeformados coletados em campo. A Tabela 6-8 apresenta os parâmetros de compressibilidade obtidos nos três ensaios.

Tabela 6-7: Características dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométrico.

TG	Nível	G _s	ρ _t (g/cm ³)	ρ _a (g/cm ³)	w ₀ (%)	e ₀	S ₀ (%)
14	3°	2,69	1,78	1,65	7,7	0,63	32,7
10	2°	2,70	1,70	1,50	12,8	0,79	43,2
5	1°	2,73	1,80	1,57	14,5	0,74	53,8

Nota: G_s é a densidade relativa dos sólidos, ρ_t é a densidade total, ρ_a é a densidade aparente seca, w₀ é o teor de umidade, e₀ é o índice de vazios, S₀ é o grau de saturação.

Tabela 6-8: Parâmetros de compressibilidade dos ensaios de adensamento edométrico.

TG	Nível	TPA (C.G.) kPa	TPA (P.S.) kPa	C _r	C _c	C _d
14	3°	150	110	0,04	0,15	0,02
10	2°	180	160	0,05	0,16	0,02
5	1°	260	195	0,11	0,24	0,02

Nota: TPA é a tensão de pré-adensamento, C_r é o coeficiente de recompressão, C_c é o coeficiente de compressão e C_d é o coeficiente de descompressão.

As Figura 6-14 a Figura 6-16 apresentam as curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva aplicada em cada estágio de carregamento no ensaio de adensamento; também estão apresentados, nos gráficos localizados à direita, a forma como os índices de compressibilidade (C_r), (C_c) e (C_d), apresentados na Nota: G_s é a densidade relativa dos sólidos, ρ_t é a densidade total, ρ_a é a densidade aparente seca, w₀ é o teor de umidade, e₀ é o índice de vazios, S₀ é o grau de saturação.

Tabela 6-8 foram obtidos. Além disso, estão apresentadas também as tensões de pré-adensamento obtidas segundo o método Pacheco Silva (P.S.) e Casagrande (A. C.).

Para as amostras do TG-14 (Figura 6-14) e TG-10 (Figura 6-15), observa-se que o material se comporta de maneira distinta dependendo do nível de tensões a que está submetido. Quando as tensões estão abaixo da tensão de pré-adensamento, o rejeito apresenta deformações menores. Entretanto, não apresentaram um trecho de recompressão bem definido.

O trecho inicial da curva de adensamento da amostra obtida no TG-5 (Figura 6-16) apresentou um comportamento distinto dos outros ensaios, uma vez que o rejeito apresentou deformações iniciais maiores, que foram diminuindo até atingir a tensão de pré-adensamento e voltar a apresentar maiores deformações no trecho de compressão.

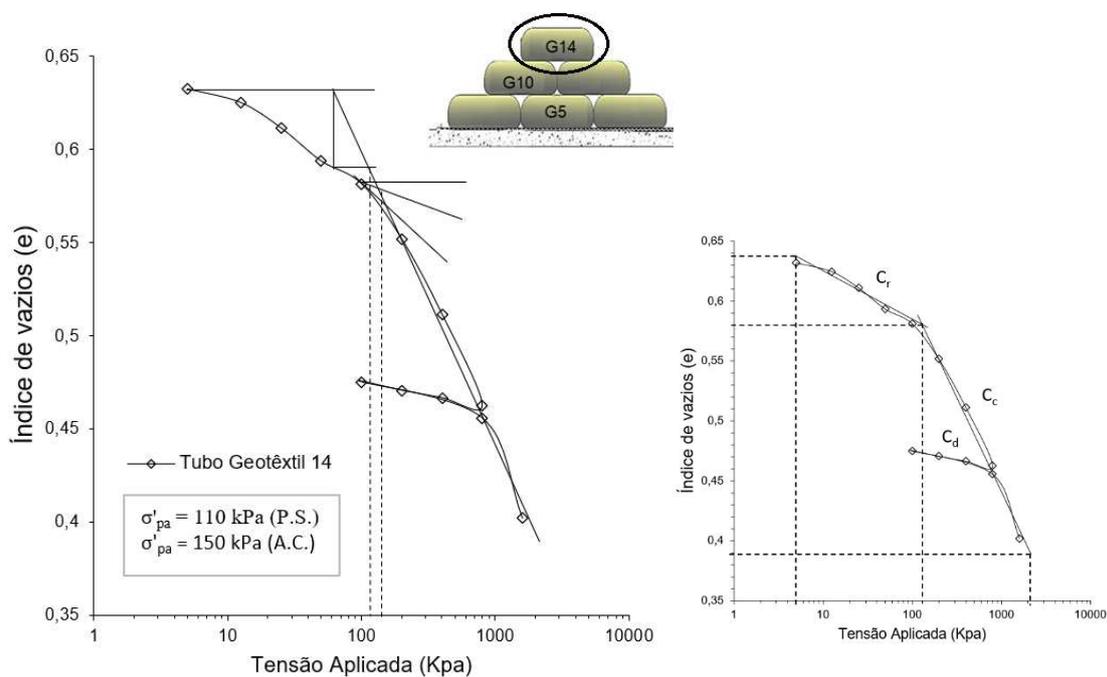


Figura 6-14: Curva de adensamento para a amostra retirada do TG-14.

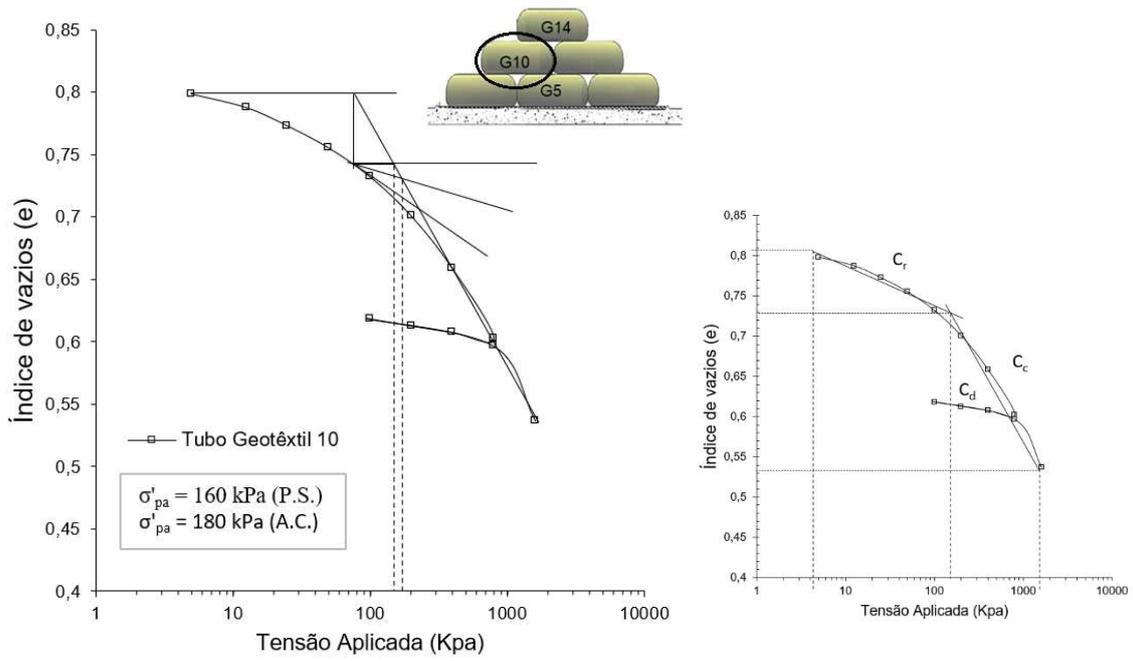


Figura 6-15: Curva de adensamento para a amostra retirada do TG-10.

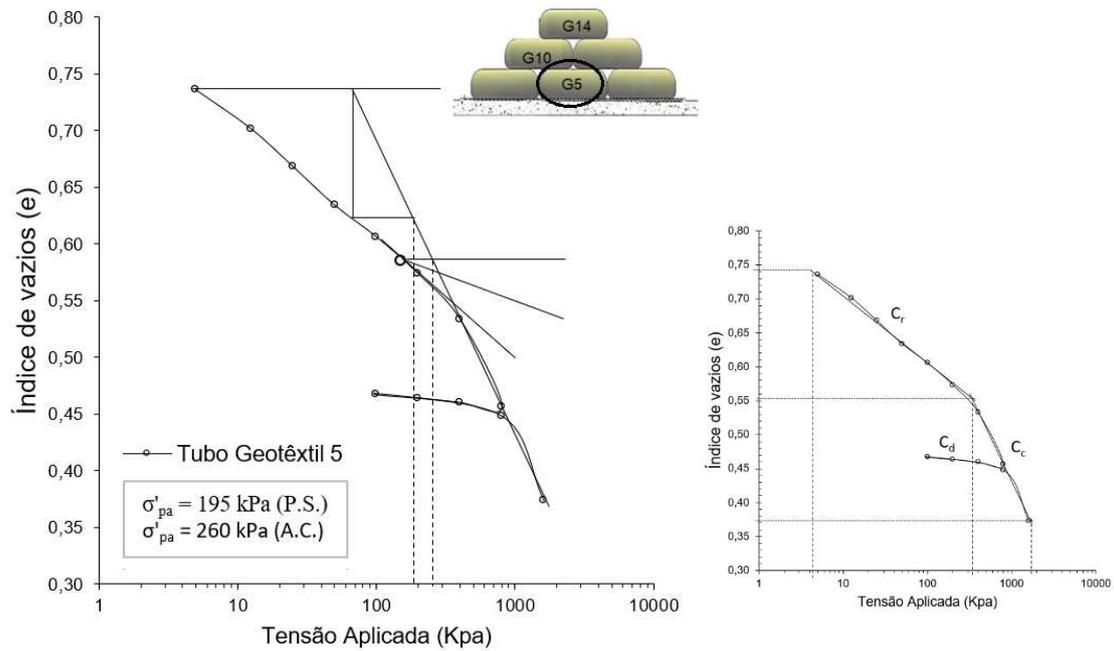


Figura 6-16: Curva de adensamento para a amostra retirada do TG-5.

As três curvas de adensamento normalizadas pelo índice de vazio inicial (e/e_0) foram inseridas no gráfico apresentado na Figura 6-17 para comparar o comportamento de cada uma das amostras. Nota-se que as curvas referentes aos TG-14 e TG-10 apresentaram

comportamento semelhante, ao passo que a curva referente ao TG-5 apresentou o trecho de recompressão de maior inclinação, o que indicaria uma maior compressibilidade desse material. No entanto, a sobrecarga à qual cada TG esteve submetido não foi elevada: o TG10 e TG5 estiveram submetidos, respectivamente, às sobrecargas de peso próprio do empilhamento de 14 kPa e 28 kPa . Esse nível de tensão é próximo às pressões que ocorrem ao longo do enchimento, da ordem de 21 kPa, de acordo com Silva (2019). Dessa forma, é possível que o amolgamento da amostra do TG5 tenha causado o comportamento atípico com maior compressibilidade na curva de adensamento.

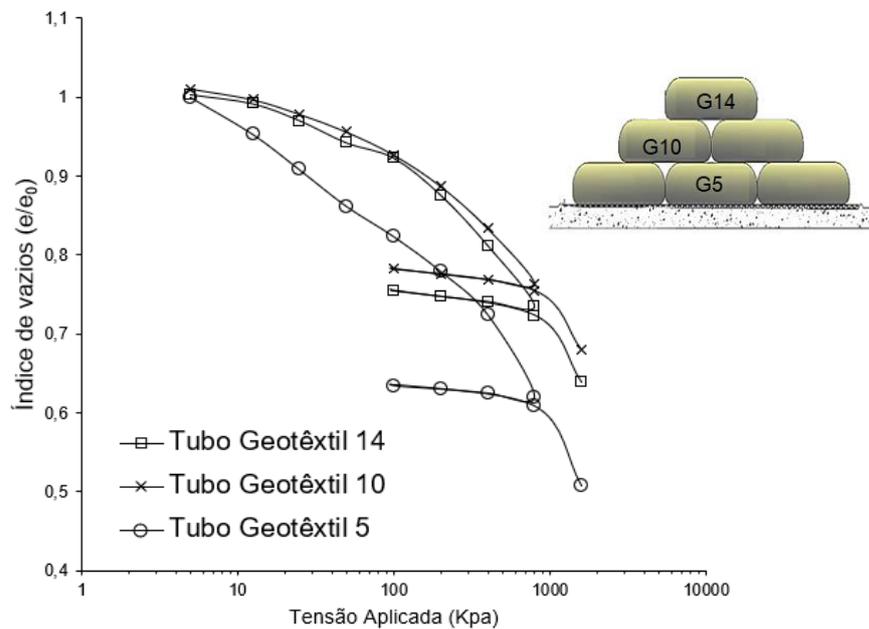


Figura 6-17: Comparação das curvas log σ' x e para os ensaios de adensamento Edométrico

Os resultados relativos às tensões de pré-adensamento (TPA) obtidos para as amostras são coerentes com a situação de campo, uma vez que o TG-5, localizado na base do empilhamento, apresentou a maior TPA, seguido do TG-10 e do TG-14. No entanto, o TG-5 apresentou elevadas deformações no trecho de recompressão. Por estar localizado na base do empilhamento e ter sido submetido a tensões mais elevadas, esperava-se que o material do TG-5 apresentasse deformações menores em relação aos dados obtidos ao TG-10 e TG-14. É possível que o amolgamento da amostra ensaiada possa ter influenciado o resultado.

A Figura 6-18 apresenta os valores de coeficiente de variação volumétrica, m_v , em função da tensão aplicada. Com exceção do trecho inicial, todas as curvas apresentaram tendência de diminuição de m_v à medida que o nível de carregamento aumentou. A curva relativa ao TG-14 apresentou uma pequena variação próxima à tensão de pré-adensamento (~ 100 kPa); esse comportamento, no entanto, não se repetiu para as outras curvas.

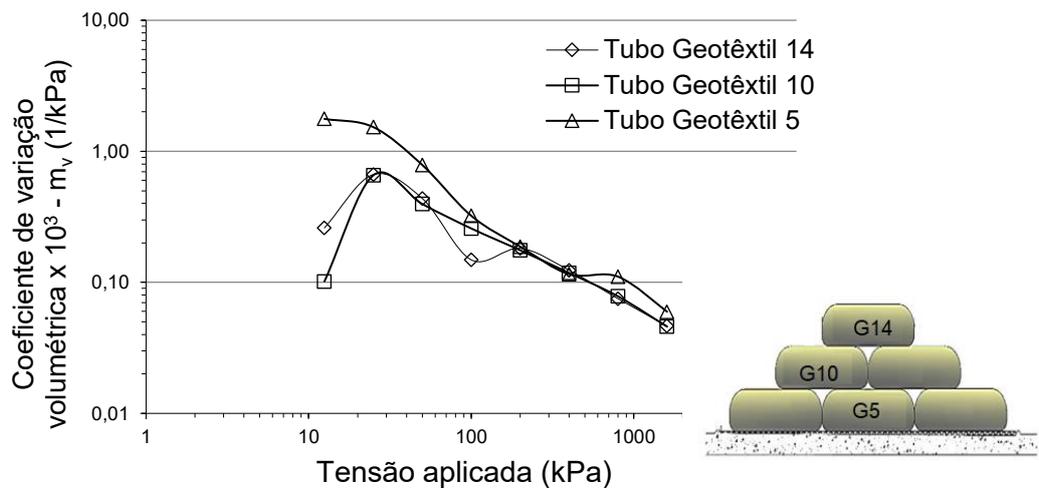


Figura 6-18: Comparação das curvas $\log \sigma' \times m_v$ para os ensaios de adensamento edométrico

O coeficiente de adensamento c_v foi calculado para cada um dos ensaios utilizando-se o método de Taylor, pois foi o método que melhor se adequou para análise dos dados obtidos nos ensaios. A Figura 6-19 apresenta a tendência obtida para esses ensaios com relação à tensão efetiva. Não foi possível notar uma mesma tendência de comportamento para as três amostras. A curva referente à amostra do TG-14 apresentou valores aproximadamente constantes até o carregamento de 200 kPa e, depois disso, aumentou até apresentar valores próximos da curva referente ao TG-10. A curva da amostra do TG-10 apresentou valores de c_v aproximadamente constantes ao longo dos carregamentos, com pequenas variações. Maiores oscilações nos valores de c_v ocorreram para a curva da amostra do TG-5, especialmente para o carregamento de 800 kPa.

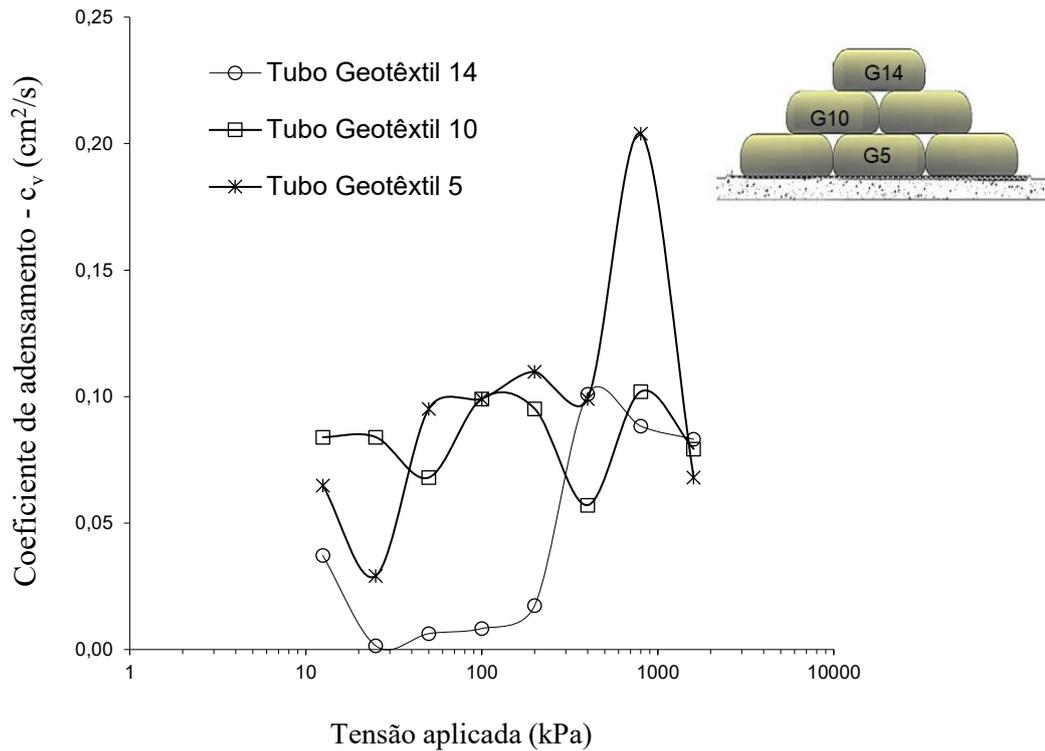


Figura 6-19: Comparação das curvas $\log \sigma' \times c_v$ para os ensaios de adensamento edométrico.

A permeabilidade do rejeito de mineração foi determinada por cálculo indireto obtendo-se o coeficiente de permeabilidade a partir de outros parâmetros do ensaio de adensamento de acordo com a teoria de Terzaghi. A Equação 6.1 propicia a determinação do coeficiente de adensamento pela teoria de Terzaghi:

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w, \quad (6.1)$$

Onde: k = coeficiente de permeabilidade do rejeito; c_v = coeficiente de adensamento; m_v = coeficiente de variação volumétrica; $e\gamma_w$ = peso específico da água.

A Figura 6-20 apresenta a variação dos coeficientes de permeabilidade calculados com a tensão efetiva.

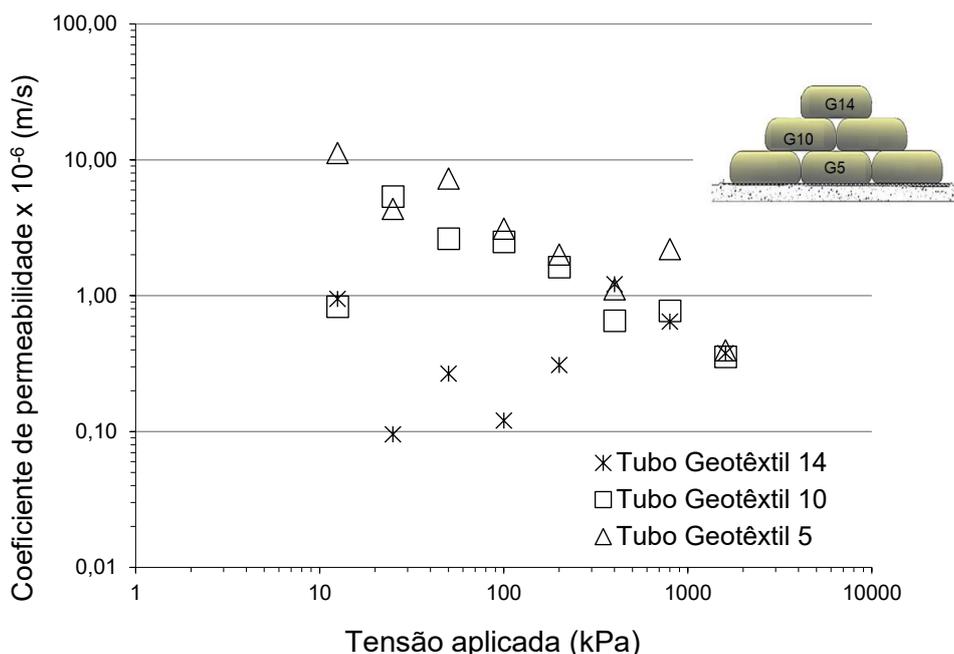


Figura 6-20: Variação do coeficiente de permeabilidade com o nível de carregamento.

Observou-se uma tendência de diminuição da permeabilidade com o aumento do nível de carregamento para as amostras referentes aos TG-10 e TG-5; a permeabilidade diminuiu em duas ordens de grandeza com aumento dos carregamentos, passando de 10^{-5} m/s para 10^{-7} m/s, valores típicos para siltes, de acordo com Pinto (2000). Os valores calculados para o TG-14, no entanto, apresentaram-se dispersos, ora aumentando ora diminuindo com o aumento dos carregamentos; ocorreram variações nos valores de permeabilidade de até uma ordem de grandeza.

6.6 Adensamento Edométrico com Medida de Permeabilidade

O ensaio de adensamento edométrico com medida de permeabilidade foi realizado em um corpo de prova moldado a partir do bloco indeformado coletado no TG-14, localizado no topo do empilhamento. Como não foi possível fazer o restante dos ensaios nesse equipamento, esse resultado está sendo inserido devido à medida da permeabilidade. As características do corpo de prova estão apresentadas na Tabela 6-9.

A Tabela 6-10 apresenta a tensão de pré-adensamento (σ'_{pa}), os coeficientes de compressibilidade obtidos por meio do gráfico da Figura 6-21(b), os coeficiente de adensamento (c_v) para o carregamento de 50 kPa e 100 kPa e a permeabilidade (k) para

os carregamento de 25 kPa, 200 kPa e 800 kPa. Verificou-se diminuição da permeabilidade à medida que os carregamentos aumentaram. A amostra indeformada de rejeito apresentou valores de permeabilidade com ordem de grandeza variando entre 10^{-6} m/s a 10^{-10} m/s, de acordo com o carregamento aplicado. De acordo com Pinto (2000), esses são valores típicos dos siltes.

Tabela 6-9: Características dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométrico

TG	Nível	G _s	ρ _t (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)	w ₀ (%)	e ₀	S ₀ (%)
14	3º	2,69	1,72	1,55	11,4	0,74	41,4

Nota: G_s é a densidade relativa dos sólidos, ρ_t é a densidade total, ρ_d é a densidade aparente seca, w₀ é o teor de umidade, e₀ é o índice de vazios, S₀ é o grau de saturação.

Tabela 6-10: Parâmetros obtidos por meio do ensaio de adensamento edométrico com medida de permeabilidade.

TPA (kPa)	C _r	C _c	C _d	C _v (m ² /s) 50 kPa	C _v (m ² /s) 100 kPa	k (m/s) 25 kPa	k (m/s) 200 kPa	k (m/s) 800 kPa
75 80	0,05	0,21	0,03	3,25x10 ⁻⁷	7,28x10 ⁻⁶	1,8 x10 ⁻⁶	2,4 x10 ⁻⁸	8,5 x10 ⁻⁹

Nota: TPA é a tensão de pré-adensamento, C_r é o coeficiente de recompressão, C_c é o coeficiente de compressão e C_d é o coeficiente de descompressão, C_v é o coeficiente de adensamento e k é a permeabilidade.

A Figura 6-21 apresenta i. os gráficos com as variações de índices de vazios e as tensões efetivas aplicadas em escala logarítmica; ii. a obtenção dos parâmetros de compressibilidade coeficiente de recompressão (C_r), compressão (C_c) e descompressão (C_d). O ensaio resultou em uma tensão de pré-adensamento de 75 kPa pelo método Pacheco Silva e de 80 kPa pelo método de Casagrande. Observa-se que o material se comporta de maneira distinta dependendo do nível de tensões a que está submetido. Quando as tensões estão abaixo da tensão de pré-adensamento, o rejeito apresenta deformações menores, no entanto, não apresenta um trecho de recompressão de fácil identificação. Isso pode ter ocorrido devido ao nível de amolgamento da amostra ou ser resultado do confinamento hidráulico inerente ao processo de enchimento do tubo geotêxtil.

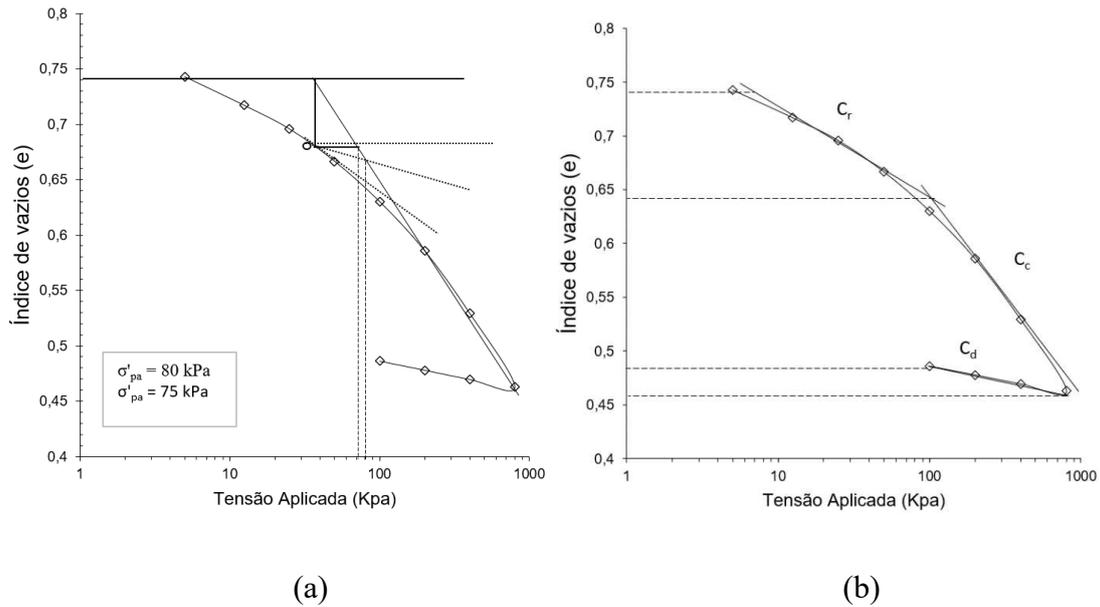


Figura 6-21: Ensaio de adensamento a) Tensão de pré-adensamento por Casagrande e Pacheco Silva; b) Parâmetros de compressibilidade.

6.7 Ensaios de Compressão Triaxial - Tipo CIU

Os ensaios de compressão triaxial do tipo CIU_{sat} (adensado isotropicamente, rápido saturado, com medida de pressões neutras) foram realizados em amostras de rejeito moldadas a partir dos três blocos indeformados coletados em campo para cada nível do empilhamento de tubos geotêxteis. A Tabela 6-11 apresenta os índices físicos de todo o corpos de prova que foram ensaiados. As curvas de tensão-deformação, trajetória de tensões, poropressão e envoltórias de ruptura estão apresentados no apêndice A.

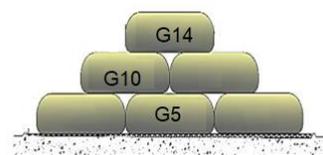
Os parâmetros de resistência do rejeito de ouro estão apresentados na Tabela 6-12. Nota-se que amostra referente ao TG-14, localizada no topo do empilhamento, e ao TG-10, localizada no segundo nível do empilhamento, apresentaram valores de ângulo de atrito próximos. Adicionalmente, houve dois pontos críticos nos resultados: o primeiro foi elevado valor de intercepto coesivo obtido no ensaio do TG-10; o segundo ponto crítico foi o ângulo de atrito do TG-5, inferior aos obtidos para o TG-14 e TG-10. Como os ensaios foram realizados de maneira padrão, e os corpos de prova foram moldados pelo mesmo técnico, é possível que a qualidade das amostras tenha interferido nos resultados.

Tabela 6-11: Dados iniciais dos corpos de prova – Ensaio CIUsat.

Corpo de Prova	G _s	ρ _t (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)	w ₀ (%)	e ₀	S ₀ (%)
1 (50kPa)	2,69	1,60	1,47	7,02	0,797	23,7
2 (100 kPa)	2,69	1,63	1,47	8,49	0,794	28,7
3 (200 kPa)	2,69	1,62	1,50	6,25	0,758	22,2
4 (50 kPa)	2,70	1,81	1,54	15,46	0,722	57,8
5 (100 kPa)	2,70	1,78	1,51	15,66	0,751	56,3
6 (200 kPa)	2,70	1,81	1,55	14,78	0,710	56,2
7 (50 kPa)	2,73	1,80	1,54	14,88	0,742	54,8
8 (100 kPa)	2,73	1,76	1,55	12,69	0,743	46,6
9 (200 kPa)	2,73	1,82	1,55	15,49	0,726	58,2

Tabela 6-12: Parâmetros de resistência do rejeito confinado no interior dos tubos geotêxteis.

Amostra	c' (kPa)*	Φ' (°)*
Tubo Geotêxtil 14	2,04	32,05
Tubo Geotêxtil 10	15,64	31,40
Tubo Geotêxtil 5	1,08	26,18



Nota: c' é o intercepto coesivo e Φ' é o ângulo de atrito efetivo.

Conforme explicitado na metodologia, um corpo de prova de cada ensaio triaxial foi submetido a ensaio de permeabilidade sob carga variável. A Tabela 6-13 apresenta os resultados desses ensaios. O TG-14, localizado no topo do empilhamento, apresentou a menor permeabilidade, da ordem de 10⁻⁷ m/s. A permeabilidade aumentou para os tubos geotêxteis localizados nos níveis inferiores do empilhamento, chegando à ordem de 10⁻⁵ m/s no TG-5, localizado no primeiro nível da obra. A permeabilidade ao longo do empilhamento chegou a variar em três ordens de grandeza.

Tabela 6-13: Permeabilidade das amostras de rejeito de ouro

Amostra	k (m/s)
Tubo Geotêxtil 14	6,83x10 ⁻⁷
Tubo Geotêxtil 10	1,30x10 ⁻⁶
Tubo Geotêxtil 5	1,64x10 ⁻⁵

6.8 Difração de Raios-X

A difração de raios-X possibilitou identificar, de forma semiquantitativa, as fases minerais nas amostras de rejeito coletadas nos tubos geotêxteis. Foram identificados quartzo (SiO_2); albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), pertencente ao grupo dos plagioclásios; Chamosita ($(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{O})_8$) e a calcita (CaCO_3). Os minerais Ilmenita ($\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e Biotita ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$) também foram identificados em menores concentrações. Os minerais encontrados em maior quantidade corresponderam ao que foi indicado por Pena (2008), que fez um estudo geológico da região da mina de Fazenda Brasileiro.

Foram selecionadas uma amostra do TG-14, uma amostra do TG-10 e duas amostras do TG-5. O motivo de selecionar duas amostras do TG-5 foi verificar se a diferença de coloração apresentada pelo rejeito confinado nesse tubo apresentaria diferença significativa nos teores minerais presentes.

A Figura 6-22 apresenta um esquema com as seções longitudinais dos tubos geotêxteis exumados e as amostras que foram analisadas por difração em raio-X circuladas de vermelho; na figura está também apresentada a seção longitudinal do empilhamento com a localização dos tubos geotêxteis exumados.

A Tabela 6-14 apresenta os teores de minerais obtidos em cada amostra testada e as densidades dos minerais presentes. Todas as amostras são compostas majoritariamente por quartzo, albita, chamosita e calcita, de tal maneira que a porcentagem desses materiais varia de 95,5 a 99 do peso total de todas de cada amostra. Nota-se que não os valores das densidades dos minerais constituintes do rejeito estudado não diferem de forma considerável, estando situados entre 2,6 e 3,4 g/cm^3 . As duas amostras selecionadas do TG-5 apresentaram diferenças mais significativas com relação ao teor de calcita e à presença de dolomita na amostra D5-DI. Os resultados gráficos obtidos nos ensaios de difratometria estão apresentados na Figura 6-23 (D5-DI), Figura 6-24 (D5-MS), Figura 6-25 (D10-D) e Figura 6-26 (D14-E). A chamosita, identificada entre os minerais que aparecem em quantidades mais representativas, é um mineral argiloso pertencente ao grupo das cloritas com arranjo de camadas 2:1:1 que têm a característica de apresentar expansibilidade e perda de resistência quando em contato com a água, podendo influenciar nas características de resistência do rejeito (Pereira, 2004).

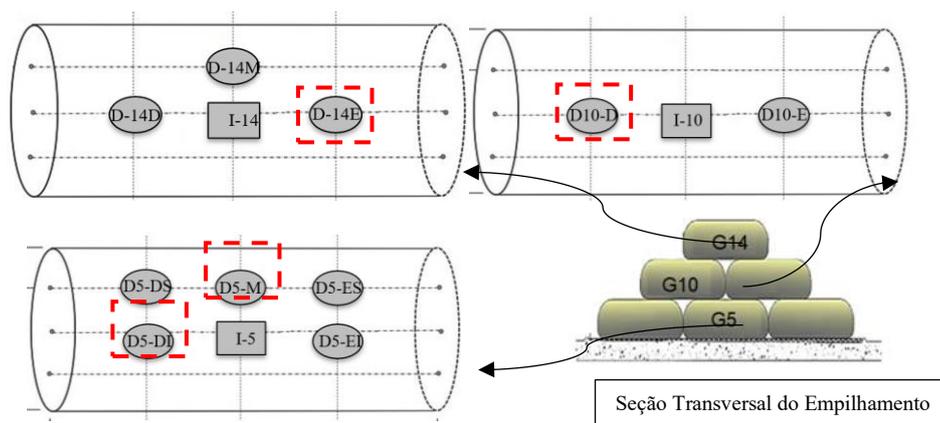


Figura 6-22: Amostras submetidas a ensaio de difração de raio-X

Tabela 6-14: Resultado dos ensaios de difração de Raios-X - teores dos minerais.

Teores (%)	Densidade dos minerais (g/cm ³)	Amostras			
		TG* 14 D14-E	TG* 10 D10-D	TG* 5 D5-DI	TG* 5 D5-MS
		3º Nível	2º Nível	1º Nível	1º Nível
Quartzo	2,65	32,6	34,4	35,9	36,6
Albita	2,60 – 2,65	30,5	27,8	26,7	25,0
Chamosita	3,0 – 3,4	22,8	21,7	21,1	21,3
Calcita	2,71	13,1	13,2	11,8	15,7
**		99	97,1	95,5	98,6
Annita	3,30	0,4	0,7	0,8	-
Ilmenita	4,1 – 4,90	0,6	-	-	0,8
Dolomita	2,86 – 3,36	-	2,2	3,5	-
Biotita	2,7 – 3,3	-	-	-	0,5

*TG – Tubo Geotêxtil ** Soma das porcentagens dos minerais Quartzo, Albita, Chamosita e Calcita.

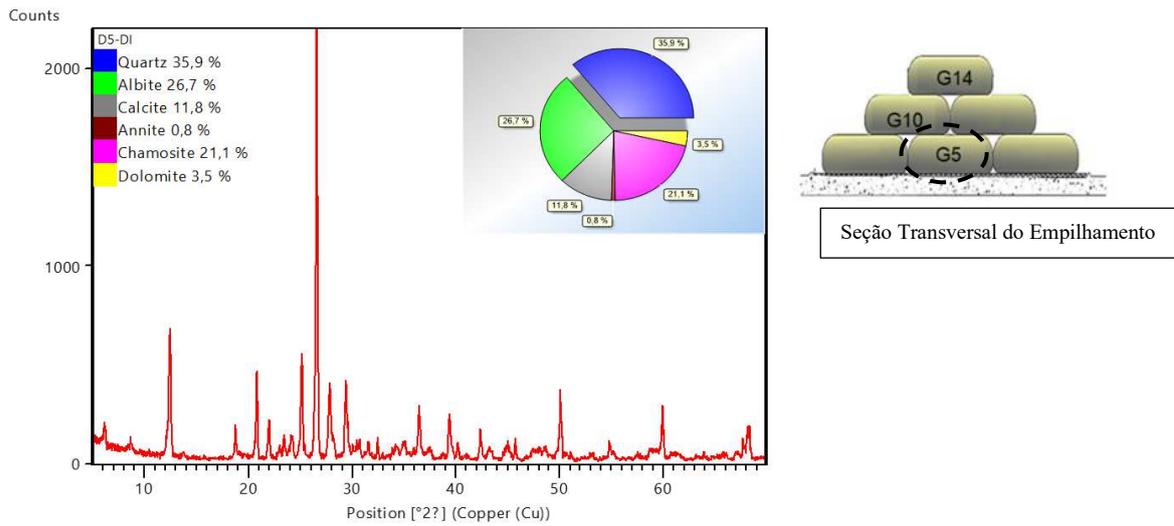


Figura 6-23: Difractometria de Raios-X realizada com o pó total da amostra D5-DI, retirada do TG-5.

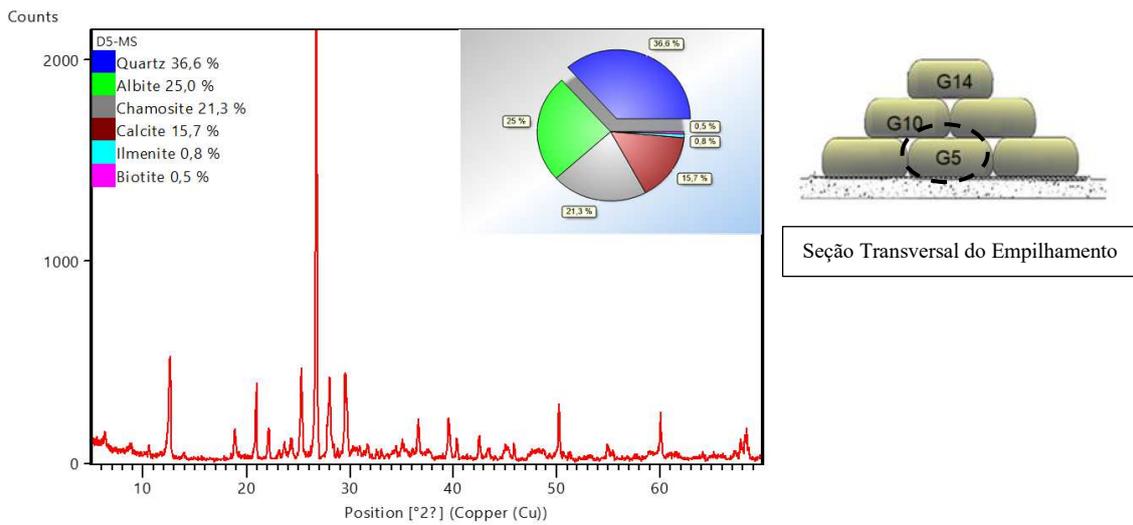
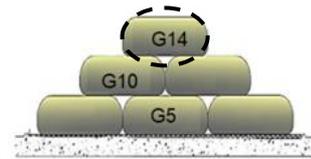
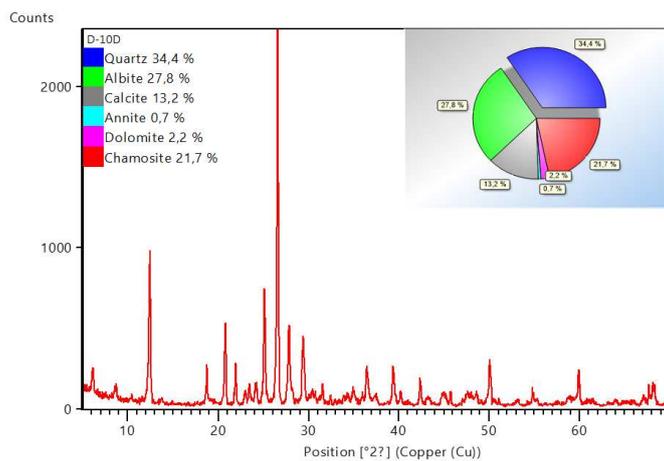
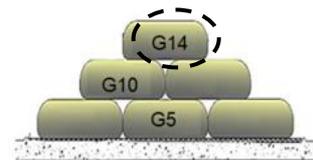
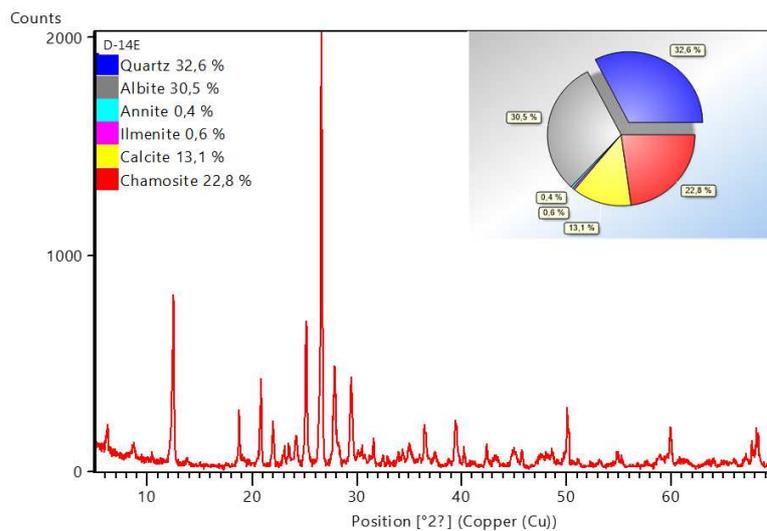


Figura 6-24: Difractometria de Raios-X realizada com o pó total da amostra D5- M, retirada do TG-5.



Seção Transversal do Empilhamento

Figura 6-25: Difratometria de Raio X realizada com o pó total da amostra D10-D, retirada do TG-10.



Seção Transversal do Empilhamento

Figura 6-26: Difratometria de Raio X realizada com o pó total da amostra D14-D, retirada do TG-14.

6.9 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 6-26 apresenta as imagens obtidas a partir da análise de MEV da amostra deformada com ampliação de 100x, 300x e 500x. Nota-se uma distribuição ampla de tamanho de grãos e que as partículas possuem arestas angulosas. Observam-se também

partículas aparentemente aglomeradas, especialmente na ampliação de 500x. A microscopia eletrônica de varredura (MEV), acoplada identificou a presença dos seguintes elementos químicos: Silício (Si), Alumínio (Al), Oxigênio (O), Ferro (Fe), Fósforo (P) Carbono (C), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Sódio (Na), Potássio (K), Titânio (Ti).

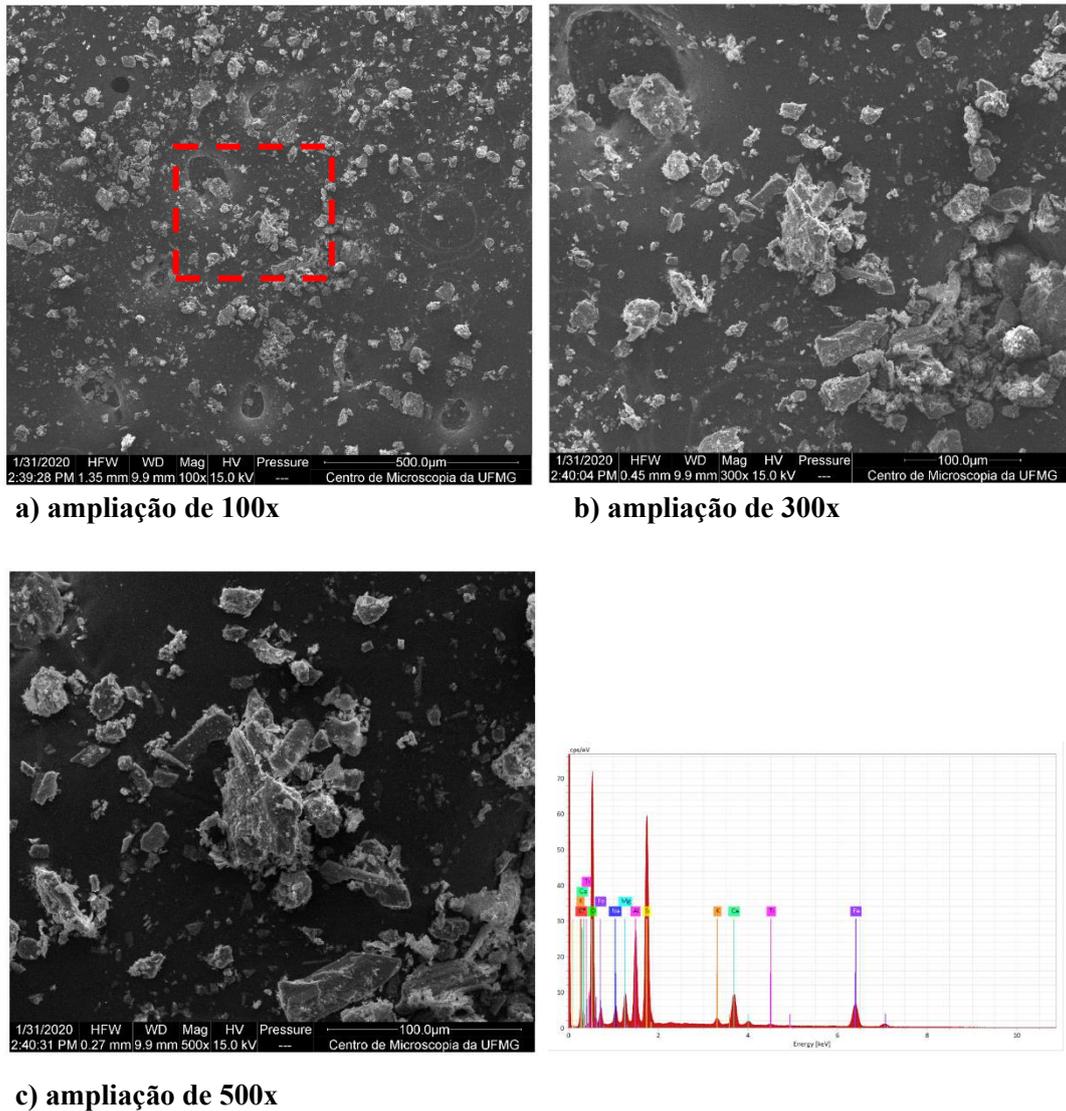


Figura 6-27: MEV da amostra deformada de rejeito.

Com relação às amostras indeformadas, a Figura 6-28, Figura 6-29 e Figura 6-30 apresentam, respectivamente, imagens com ampliação de 100x , 500x e 1000x das amostras de rejeito indeformado coletado em cada um dos tubos geotêxteis. Essas

imagens apresentam a superfície das amostras. O objetivo de realizar a microscopia nas amostras indeformadas é o no entendimento do efeito da adição de floculante ao rejeito na estrutura final que este adquire ao ser confinado nos tubos geotêxteis.

Na Figura 6-28, é possível notar que a superfície da amostra correspondente ao tubo geotêxtil TG-5 (localizado no 1º nível do empilhamento e, portanto, sujeito a um maior nível de tensões) está, aparentemente, mais compacta. Não foi possível notar na amostra TG-5 os poros que podem ser vistos no canto inferior esquerdo da amostra correspondente ao tubo geotêxtil TG-10. A superfície da amostra correspondente ao TG-14 também tem aparência mais porosa; é possível notar espaços vazios em toda a superfície. As marcações feitas na região central de cada uma das amostras mostram a área que foi ampliada pelo microscópio.

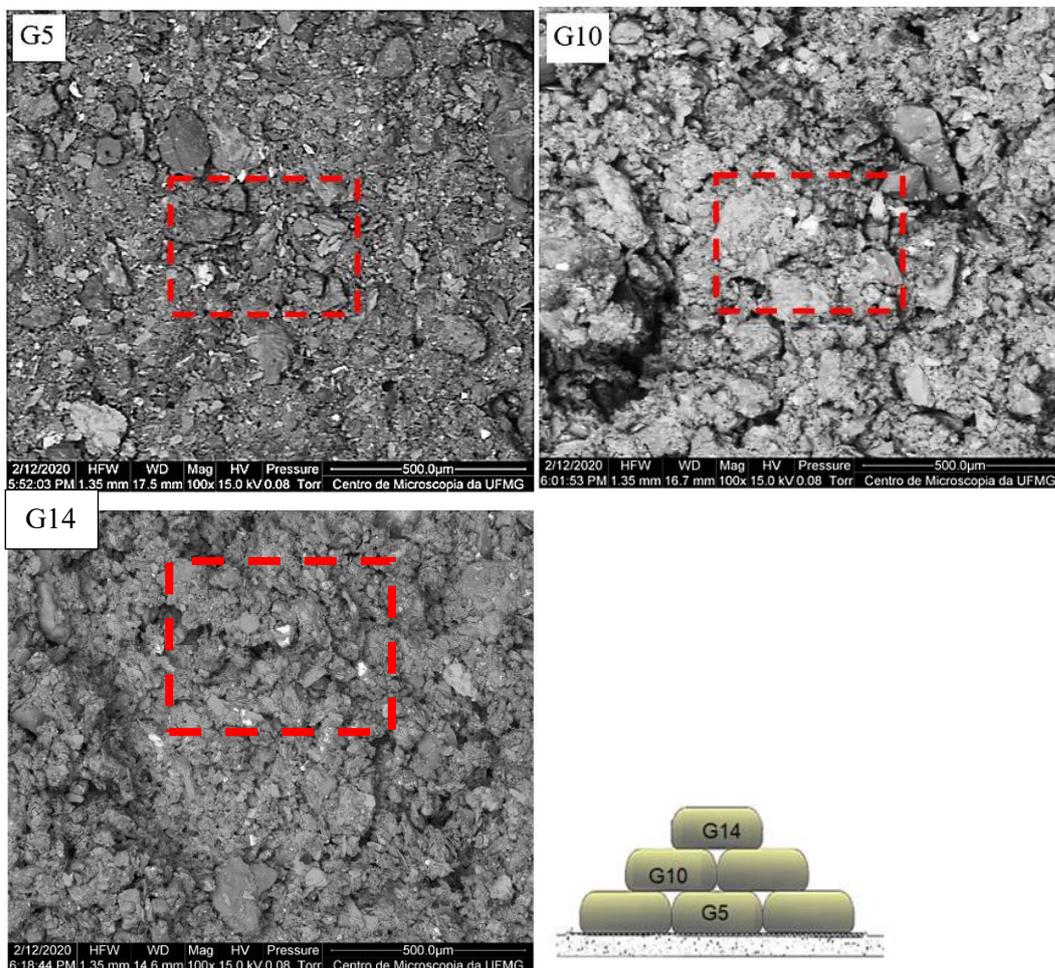


Figura 6-28: Imagem das amostras indeformadas com ampliação de 100x para o TG-5; TG-10; tubo geotêxtil G14 e esquema da seção transversal do empilhamento.

As áreas delimitadas em vermelho na Figura 6-28 foram ampliadas e estão apresentadas na Figura 6-29. Com a ampliação de 500x é possível notar os vazios existentes entre as partículas na superfície da amostra do tubo geotêxtil G5. As partículas tem distribuição de tamanho variado, são angulosas sendo possível notar partículas em formato lamelar. Da mesma forma, a superfície da amostra do tubo geotêxtil G10 apresenta distribuição variada no tamanho das partículas. Percebe-se, na área central, uma partícula com coloração mais clara, formada por um mineral diferente das demais partículas; também é possível notar vazios ao longo da superfície da amostra. Com relação à amostra do tubo geotêxtil G14, é possível notar uma distância considerável entre partículas que formam algum grumos. Na região central, é possível notar um espaço vazio e a presença de partículas maiores aglomeradas a partículas de menor dimensão.

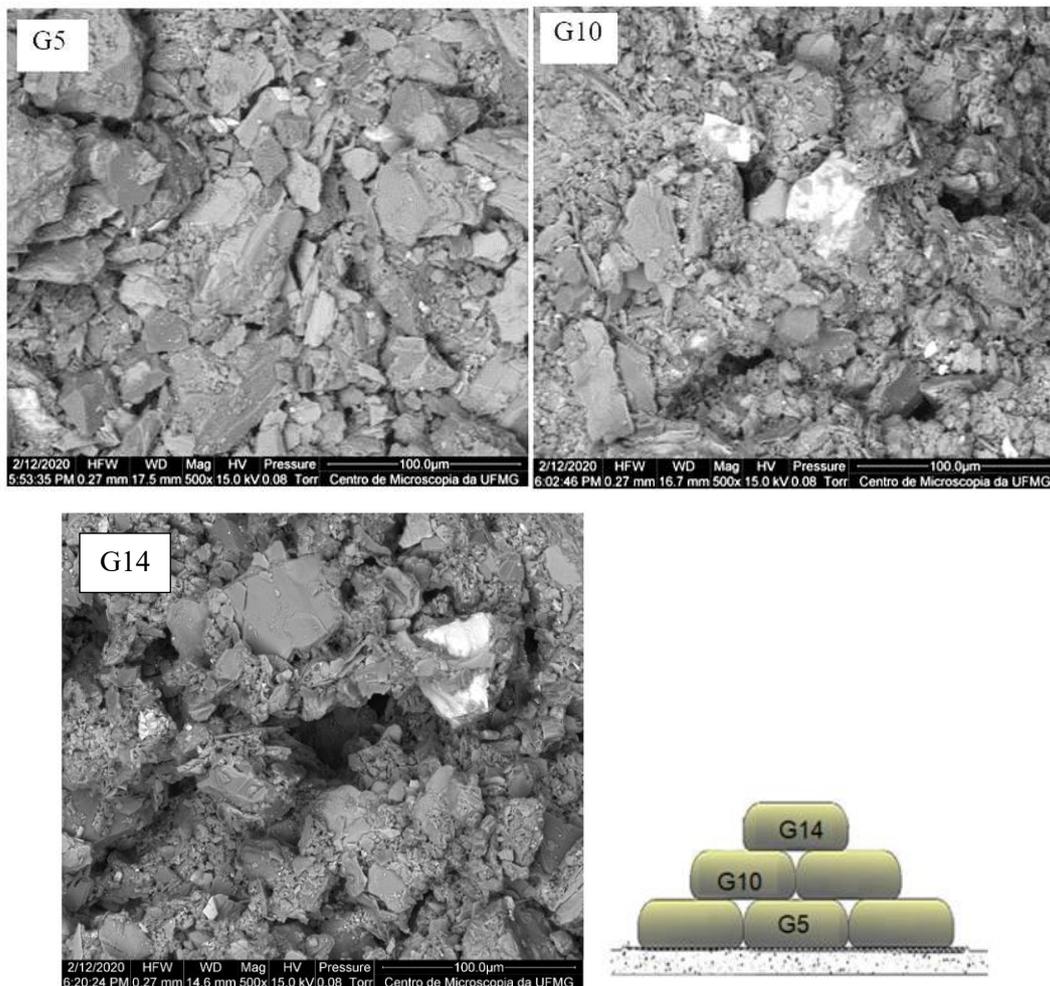


Figura 6-29: Imagem das amostras indeformadas com ampliação de 500x para a) tubo geotêxtil 5; b) tubo geotêxtil 10; c) tubo geotêxtil 14 – tirar a imagem do tubo g14 e

A Figura 6-30 apresenta a ampliação de 1000X da superfície das amostras indeformadas de rejeito. Na imagem da amostra G5, as partículas com formato lamelar estão mais nítidas, e é possível visualizar partículas de diferentes tamanhos; os vazios entre as partículas ficaram evidenciados nessa aproximação. Com relação à amostra G10, é possível notar a variabilidade no tamanho das partículas: há uma partícula maior, na área central, de cor mais clara, rodeada por partículas menores, de forma aleatória; os espaços vazios entre as partículas também ficam mais evidentes nessa ampliação. Com relação à amostra G14, há, aparentemente, um depósito de partículas mais finas sobre uma partícula maior.

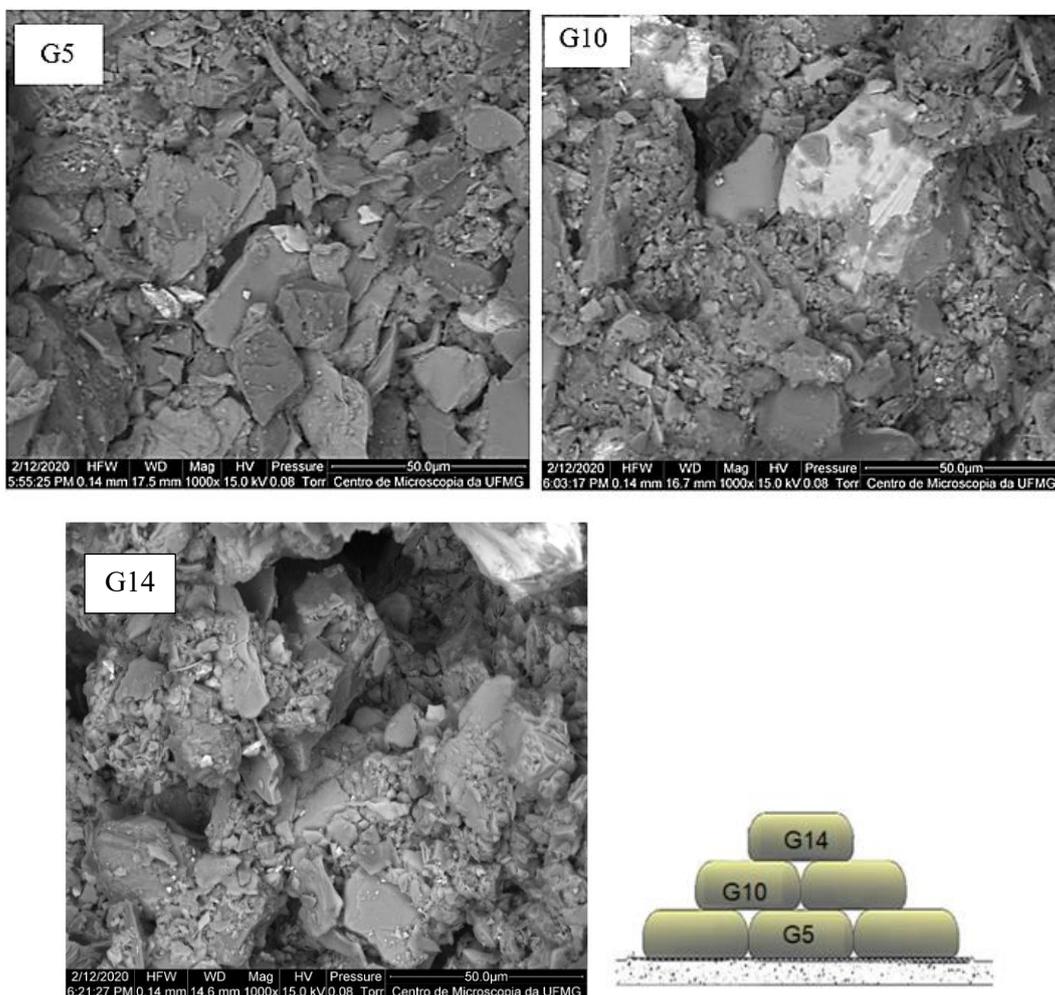


Figura 6-30: Imagem das amostras indeformadas com ampliação de 1000x para a) tubo geotêxtil 5; b) tubo geotêxtil 10; c) tubo geotêxtil 14.

7 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS – GEOTÊXTIL

7.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com o geotêxtil tecido e suas respectivas análises.

7.2 Propriedades físicas

Cada um dos três tubos geotêxteis exumados tiveram três amostras retiradas: uma localizada à direita, chamada genericamente de T-1S, uma amostra localizada à esquerda (T-3S) e por fim uma central (T-2S). A Figura 7-1 mostra um esquema da vista superior do tubo geotêxtil, com indicação do bocal de enchimento dos tubos localizado na amostra central; cada amostra de geotêxtil tinha, aproximadamente, 1,0 m de largura e 1,5 m de comprimento.

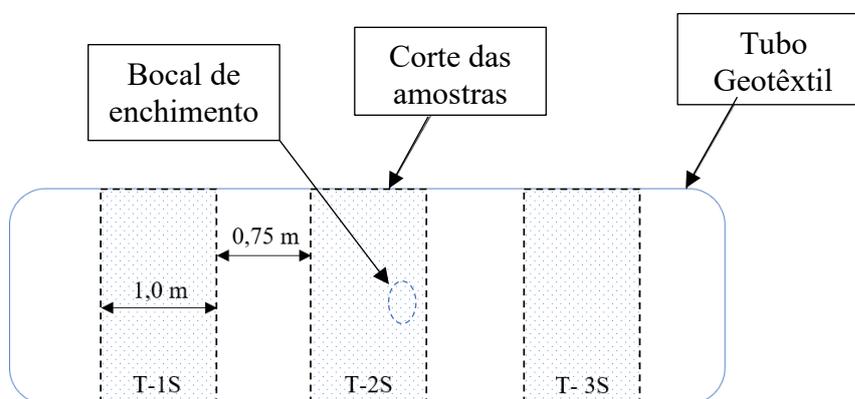


Figura 7-1: Vista superior do tubo geotêxtil com indicação da posição de coleta

Como os espécimes cortados para os ensaios de tração tiveram dimensão de 100 mm x 700 mm, o corte foi feito de forma a ter aproveitamento ótimo de todo o material coletado em campo. A identificação do local em que cada espécime geotêxtil foi retirado foi anotada para avaliar estatisticamente se a posição do espécime influenciaria na resistência à tração e alongamento na ruptura. A Figura 7-2 mostra o esquema da vista superior do TG-14, localizado no topo do empilhamento, com o mapa dos espécimes cortados. Foram cortados 54 espécimes que estiveram submetidos à radiação UV e intempéries ao longo de dois anos e, por isso, estão coloridos de amarelo. Os espécimes 1-12, 18-30 e 36-49

foram cortados na direção de fabricação, ou *Machine Direction* (MD). Já os espécimes 13-17, 31-35, 50-54 foram cortados na direção contrária à de fabricação, ou *Cross machine Direction* (CMD). A posição da sede da mineradora está indicada pois foi utilizada como referência na coleta do material.

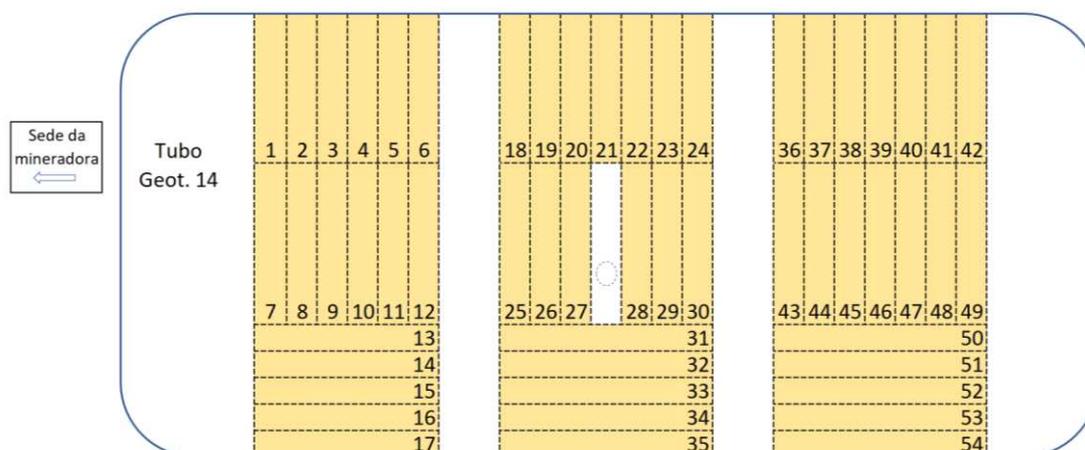


Figura 7-2: Mapa de espécimes geotêxteis obtidos do TG-14 para ensaios de tração.

A Figura 7-3 mostra o esquema da vista superior do TG-10, localizado no topo do empilhamento, com o mapa dos espécimes cortados. Foram cortados 40 espécimes a partir do material coletado. De maneira similar ao TG-14, os espécimes que estiveram submetidos à radiação UV e às intempéries estão coloridos de amarelo. Os espécimes obtidos de regiões não sujeitas a radiação UV estão coloridos com a cor cinza.

O esquema da vista superior e o mapa dos espécimes cortados do TG-5, localizado no primeiro nível do empilhamento, está apresentado na Figura 7-4. Foi possível cortar um total de 49 espécimes a partir do material coletado. Todos os espécimes que estiveram protegidos das intempéries e luz UV e, por isso, estão coloridos com a cor cinza. Adicionalmente, foram cortados um total de 12 espécimes de geotêxtil virgem, sendo 6 espécimes cortados na direção MD e 6 cortados na direção CMD. Esses espécimes também foram rompidos a tração para serem utilizados como critério de comparação.

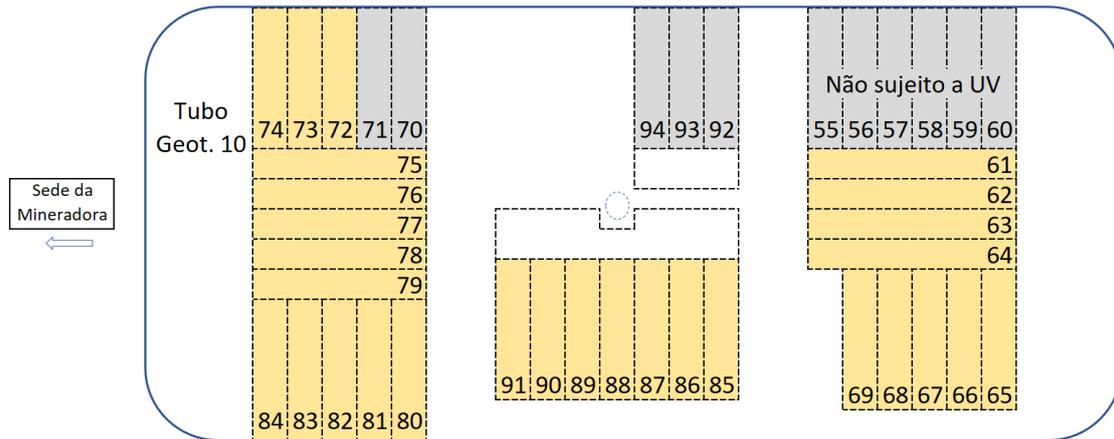


Figura 7-3: Mapa de espécimes geotêxteis obtidos do TG 10 para ensaios de tração.

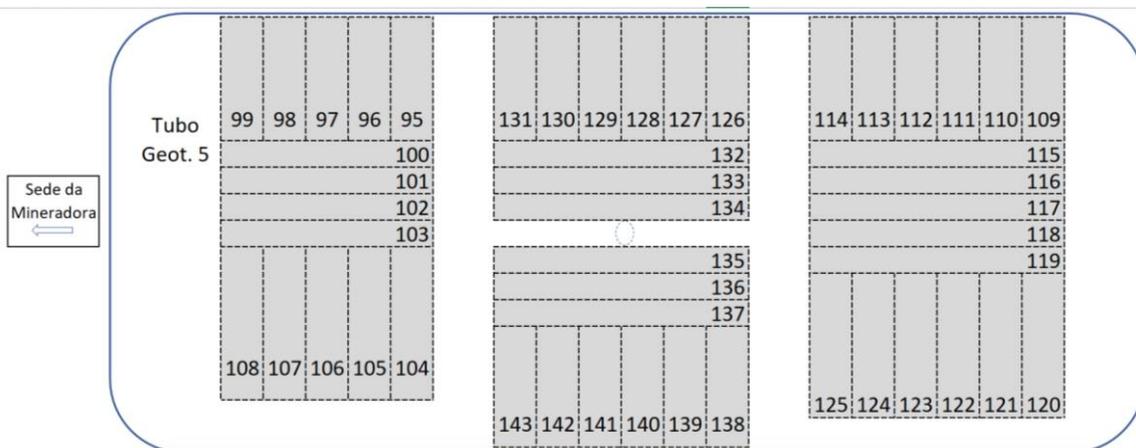


Figura 7-4: Mapa de espécimes geotêxteis obtidos do-TG 5 para ensaios de tração.

A Tabela 7-1 apresenta a média, desvio padrão e coeficiente de variação para os valores de espessura e massa por unidade de área obtida para todos os grupos de espécimes cortados. Nota-se que a média de espessura dos espécimes obtidos para os TG-14 e TG-10 foram inferiores às amostras virgens. A média de espessura dos espécimes do TG-5, por outro lado, foi ligeiramente superior às amostras virgens. Por meio dos valores de desvio padrão e coeficiente de variação pode-se observar a elevada dispersão dos resultados dos espécimes exumados comparado às virgens.

Com relação à massa por unidade de área, todos os espécimes exumados apresentaram valores superiores em relação aos espécimes virgens. No entanto, nota-se uma considerável dispersão nos resultados por meio dos valores de desvio padrão e coeficiente

de variação, superiores em pelo menos uma ordem de grandeza em relação às amostras virgens.

Tabela 7-1: Espessura e massa por unidade de área dos grupos de espécimes geotêxteis.

TG	Espessura (mm)				Massa por unidade de área (g/m ²)			
	14	10	5	Virgem	14	10	5	Virgem
\bar{x}	1,91	2,09	2,38	2,16	736,2	763,1	708,5	564,7
σ	0,29	0,22	0,22	0,08	98,4	106,5	77,9	6,7
C.V.	14,9%	10,4%	9,2%	3,9%	13,4%	13,6%	11,0%	1,2%

A distribuição dos gráficos de espessura em forma de diagrama de caixas está apresentada na Figura 7-5. Esse gráfico deixa evidente a variabilidade dos resultados dos espécimes exumados. É possível notar a tendência na diminuição da espessura no sentido do TG-5 para o TG-14. No entanto, observa-se a sobreposição entre as distribuições dos valores. Salienta-se que só foi possível obter a espessura da região central de cada espécime geotêxtil. Portanto, os dados de espessura apresentados refletem os 100 mm de comprimento central de espécimes cujo comprimento total era de 700 mm.

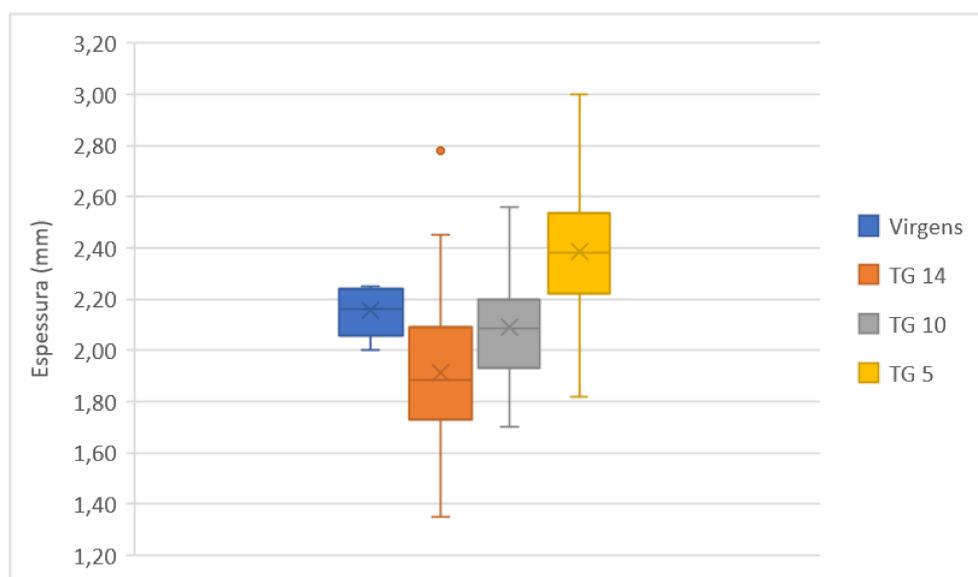


Figura 7-5: Espessura dos espécimes geotêxteis.

Ao longo da preparação das amostras, observou-se que a dispersão nos resultados de espessura ocorreu, principalmente, devido à aderência de rejeito na superfície do geotêxtil tecido no local em que a espessura foi medida. Mesmo com o manuseio cuidadoso das

amostras, uma parte do rejeito se soltava com a preparação e corte dos espécimes. Por outro lado, foi possível observar que algumas regiões do geotêxtil continha uma camada de rejeito firmemente aderida à superfície. Observou-se que esses locais ocorreram de forma aleatória nas amostras coletadas.

Como exemplo, a Figura 7-6 mostra uma imagem dos espécimes 38 a 41 antes de serem submetidos aos ensaios de tração. Enquanto a superfície externa está uniforme, é possível ver rejeito aderido na superfície interna dos espécimes.

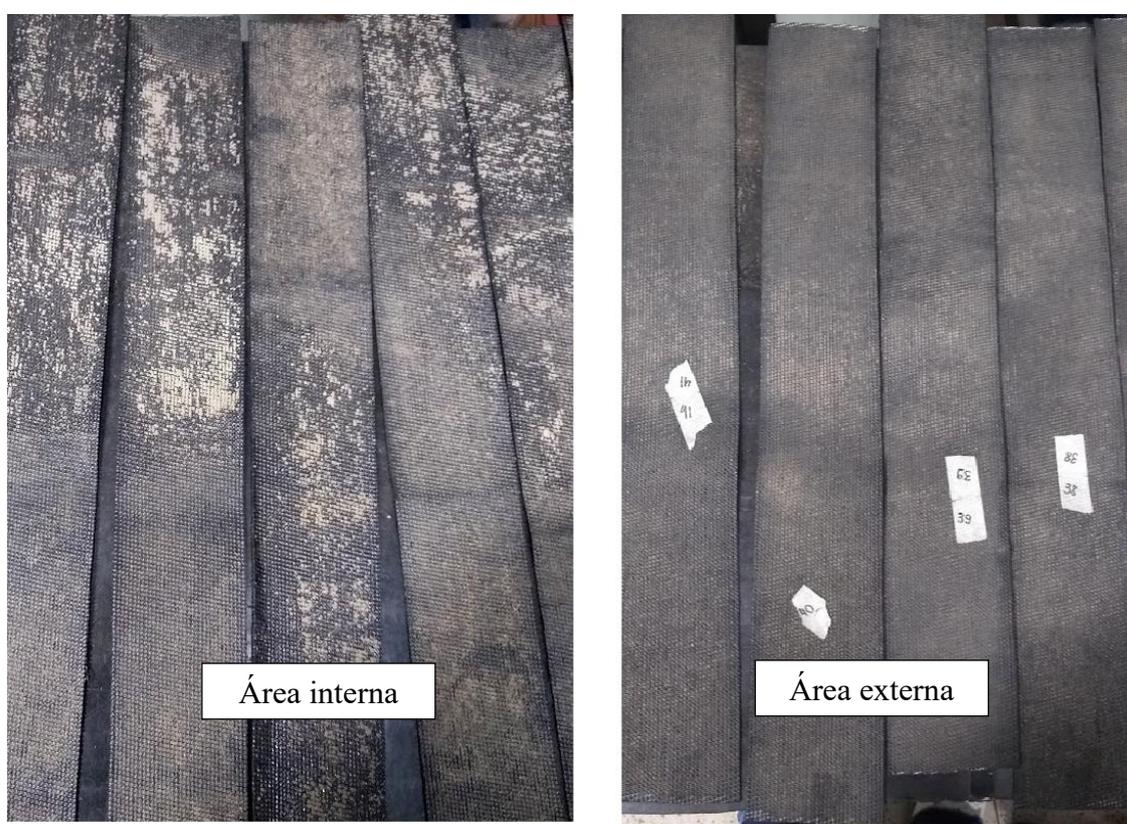


Figura 7-6: Aspecto dos espécimes geotêxteis 38-41 – TG-14.

Um gráfico de caixas também foi elaborado para avaliar a distribuição dos valores de massa por unidade de área dos espécimes geotêxteis, apresentado na Figura 7-7. É possível notar a elevada variabilidade dos espécimes exumados quando comparados aos espécimes virgens. Observa-se também que todos os espécimes exumados têm massa por unidade de área superior, resultado esperado após a utilização em campo e contato com o

rejeito. Apesar da distinção entre os valores médios de cada um dos grupos, há uma ampla sobreposição entre a distribuição dos valores.

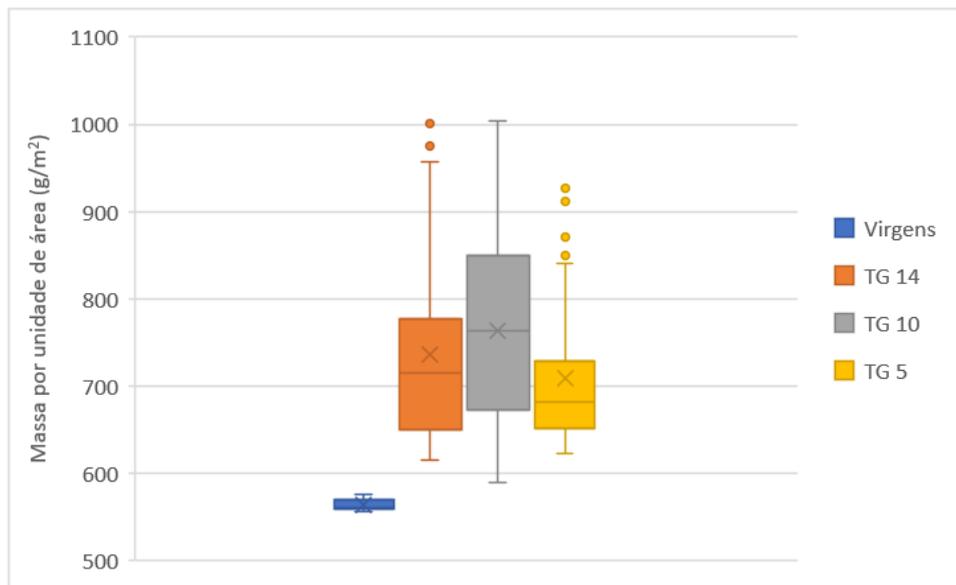


Figura 7-7: Massa por unidade de área dos espécimes geotêxteis.

7.3 Resultado dos ensaios de resistência à tração simples

Um total de 142 espécimes geotêxteis foram submetidos a ensaios de tração simples, de tal forma que para cada ensaio se obteve uma curva tensão x deformação. A Figura 7-8 apresenta, como exemplo, o gráfico das curvas obtidas para os espécimes 43-49, retirados do TG-14 e cortados na direção MD, (direção de fabricação). A Figura 7-9 apresenta o gráfico das curvas obtidas para a ruptura dos espécimes 75-79, cortados na direção CMD (direção contrária à de fabricação) e retirados do TG-10. Em ambos os gráficos é possível notar que a variabilidade relativa à resistência máxima chega a 10%. As demais curvas obtidas estão apresentadas no Apêndice B.

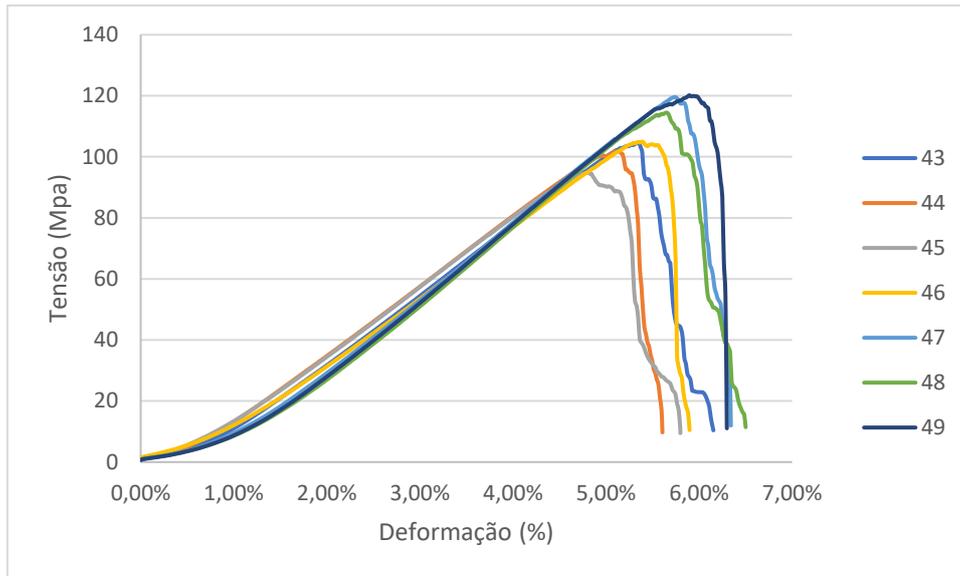


Figura 7-8: Exemplo de curvas tensão x deformação – espécimes MD.

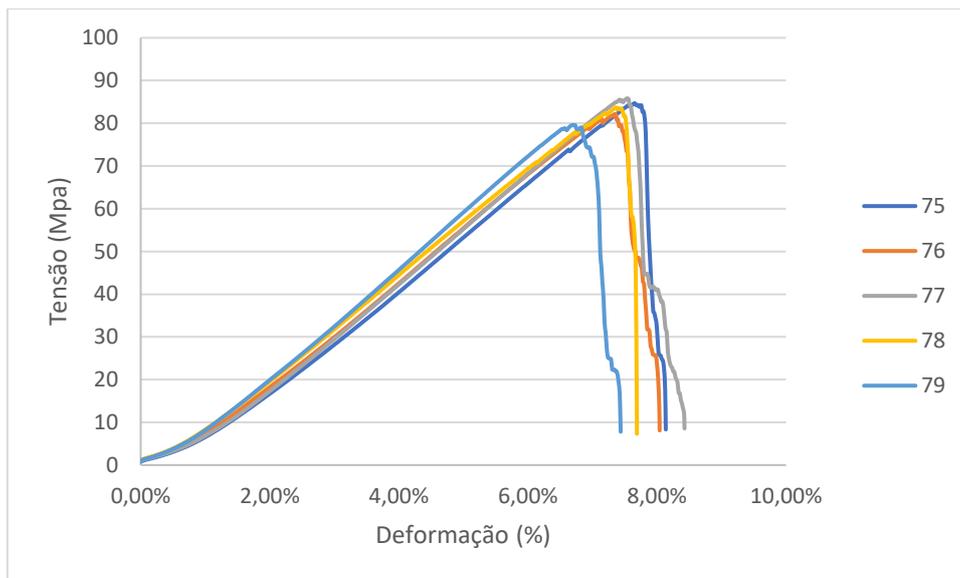


Figura 7-9: Exemplo de curvas tensão versus deformação – espécimes CMD.

Foram utilizados dois parâmetros principais a partir de cada ensaio para comparação dos resultados, que foram a resistência a tração (kN.m) e o alongamento na ruptura (%). Como análise inicial, gráficos de caixas ou *Box plot* foram traçados para avaliar comparativamente os resultados obtidos entre cada um dos tubos geotêxteis exumados e as amostras virgens.

A Figura 7-10 apresenta o gráfico de caixas para os valores de alongamento na ruptura obtidos para os espécimes cortados na direção de fabricação do geotêxtil (MD). Nota-se que houve uma redução significativa do alongamento na ruptura para os espécimes exumados de todos os tubos geotêxteis. Apesar de haver sobreposição das variâncias para os espécimes exumados, houve a tendência de diminuição no alongamento na ruptura no sentido do TG-5 (localizado no primeiro nível do empilhamento) para o TG-14 (localizado no topo do empilhamento). Esses resultados indicam que, de maneira geral, os geotêxteis exumados deformam menos antes de romper.

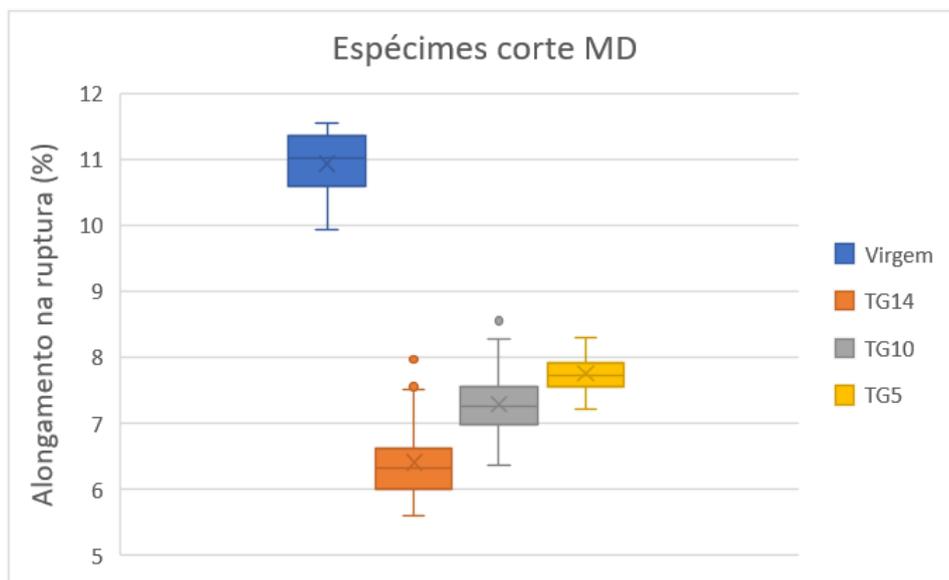


Figura 7-10: Alongamento na ruptura dos espécimes cortados na direção MD.

Com relação aos resultados dos espécimes cortados na direção CMD, houve também redução significativa no alongamento na ruptura, como mostra a Figura 7-11. A redução no alongamento na ruptura foi semelhante para os espécimes obtidos dos TG-14 e TG-5 e um pouco inferior para os espécimes obtidos do TG 10. No entanto, houve sobreposição das distribuições obtidas para os três grupos. Nota-se que os espécimes cortados na direção CMD também deformam menos antes de romper em relação aos espécimes virgens.

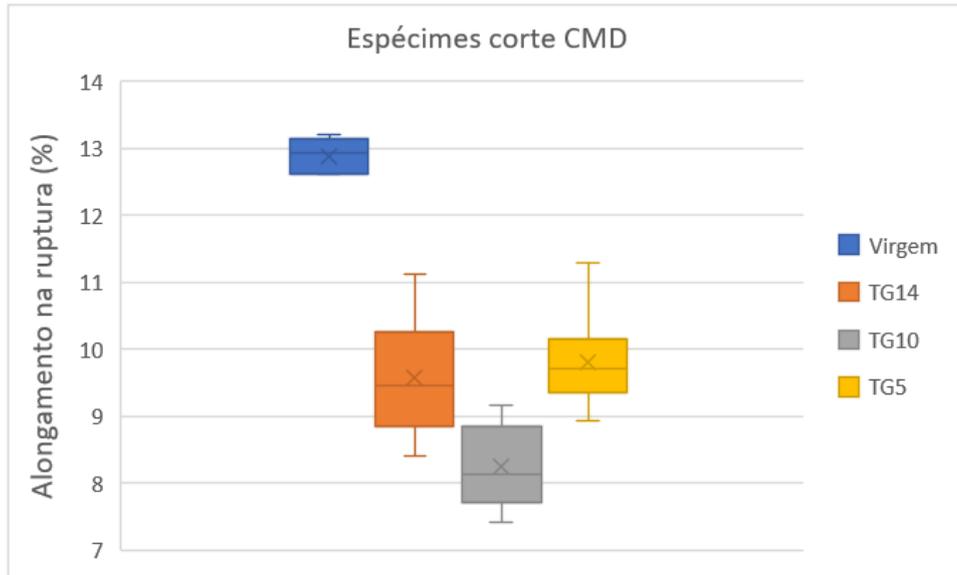


Figura 7-11: Alongamento na ruptura dos espécimes cortados na direção CMD.

O aspecto dos espécimes cortados no sentido MD e CMD após a ruptura está apresentado, respectivamente, nas Figura 7-12 e Figura 7-13. Nota-se que a ruptura ocorreu na região central dos espécimes e que o padrão de ruptura difere consideravelmente entre os dois sentidos do geotêxtil tecido.



Figura 7-12: Aspectos dos espécimes após a ruptura cortados no sentido MD.



Figura 7-13: Aspectos dos espécimes cortados no sentido CMD após a ruptura.

O gráfico apresentado na Figura 7-14 compara três curvas de ensaio de tração de espécimes exumados com o ensaio realizado em espécime virgem cortados no sentido MD. Tais curvas foram selecionadas de forma aleatória apenas para comparação de comportamento entre espécimes virgens e exumados. Nota-se a diferença entre a curva do espécime virgem e dos espécimes exumados: o espécime virgem apresentou deformação superior na ruptura e a inclinação inicial da curva referente ao espécime virgem é menor.

A Figura 7-15 apresenta o gráfico de caixas para os resultados de resistência à tração dos espécimes cortados no sentido MD. Uma quantidade significativa de espécimes apresentou resistência à tração superior às amostras virgens. Observa-se, então, que as amostras exumadas apresentaram, de maneira geral, diminuição no alongamento na ruptura e aumento na resistência a tração, caracterizando o enrijecimento do material. Nota-se a variabilidade dos dados obtidos para os espécimes exumados, especialmente em relação ao TG-14.

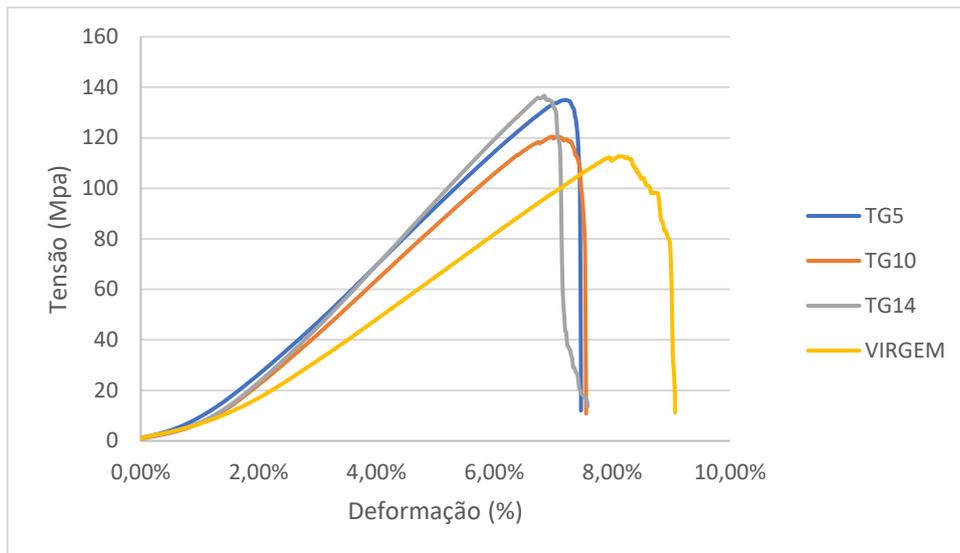


Figura 7-14: Curvas tensão-deformação de espécimes MD virgem e exumados.

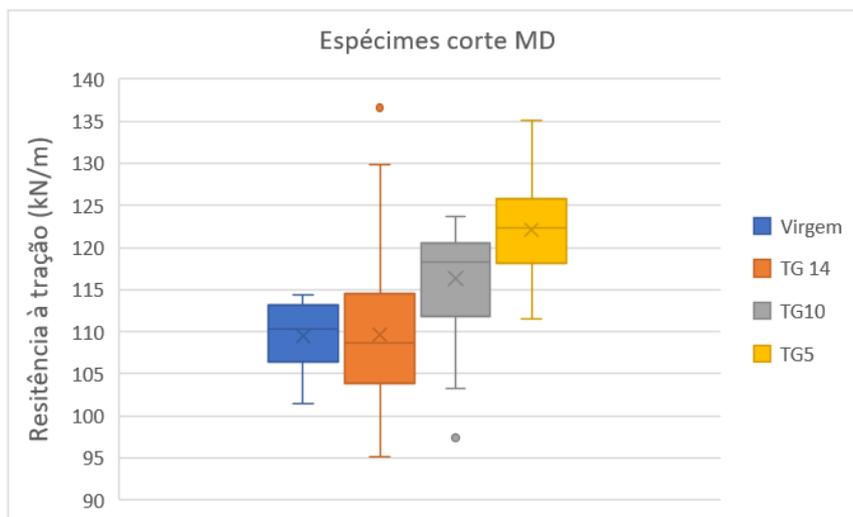


Figura 7-15: Resistência à tração dos espécimes cortados na direção MD.

O gráfico apresentado na Figura 7-16 compara três curvas de ensaio de tração de espécimes exumados com o ensaio realizado em espécime virgem cortados no sentido CMD. Tais curvas foram selecionadas de forma aleatória apenas para comparação de comportamento entre espécimes virgens e exumados. Nota-se que a diferença entre a curva do espécime virgem e dos espécimes exumados foi semelhante ao que ocorreu com os espécimes cortados no sentido MD (Figura 7-14).

Com relação ao gráfico de caixas dos espécimes cortados no sentido CMD, apresentados na Figura 7-17, poucos espécimes apresentaram resistência superior às amostras virgens. Nota-se uma maior variabilidade nos resultados para o TG-10. As médias dos espécimes obtidos do TG-14 e TG-5 estão próximas aos resultados dos espécimes virgens. Além disso, nota-se a sobreposição das variâncias para todos os grupos.

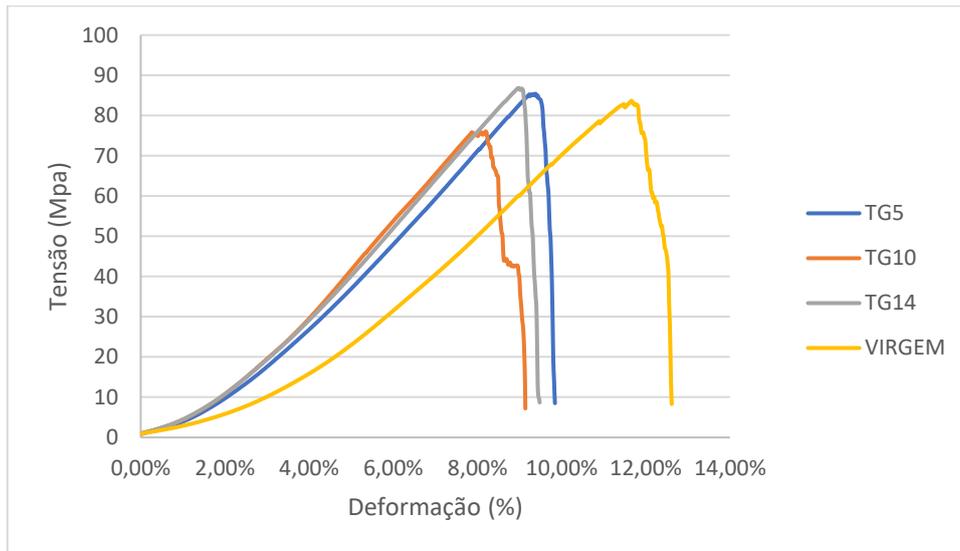


Figura 7-16: Curvas tensão-deformação de espécimes CMD virgem e exumados.

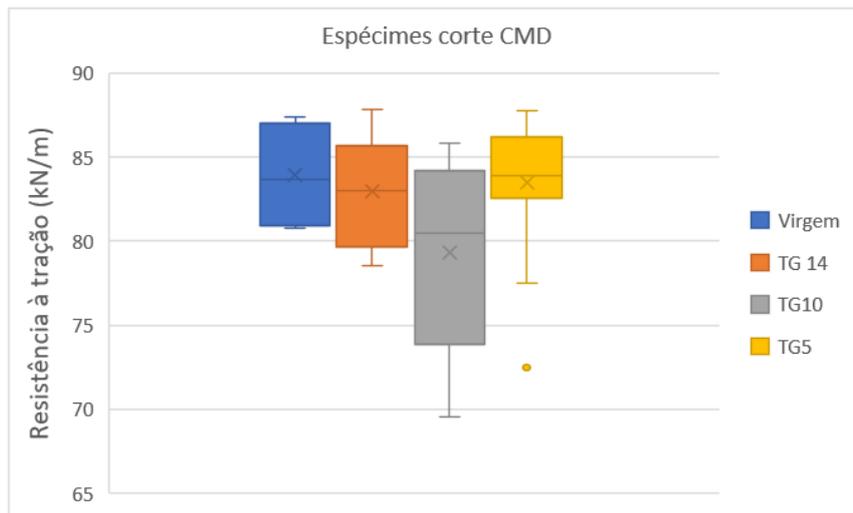


Figura 7-17: Resistência à tração dos espécimes cortados na direção CMD.

7.3.1 ANOVA

Os dados de resistência à tração e alongamento na ruptura foram organizados em arquivo de texto e tratados no ambiente de desenvolvimento *Jupyter notebook* utilizando a linguagem de programação *Python 3.7*. A modelagem foi realizada considerando os cinco fatores (corte, exposição ao UV, nível no empilhamento, posição longitudinal e posição transversal) com intervalo de confiança de 99%. Nas duas modelagens realizadas, os fatores que, estatisticamente, influenciam o comportamento de tração do geotêxtil são:

- i) Direção do Corte
- ii) Exposição ao UV
- iii) Posição no sentido transversal ao TG

Os comandos utilizados e resultados de cada modelo estão apresentados no Apêndice C. Também estão apresentados no Apêndice C os testes de validação das premissas do modelo. O teste de *Barlett*, que avalia a homogeneidade das variâncias dos grupos formados pelo ANOVA, não passou. Como o ANOVA é relativamente robusto a violações dessa premissa e as outras premissas do modelo foram atendidas, decidiu-se por seguir as análises para verificar, por meio do gráfico das magnitudes dos efeitos, se os grupos criados realmente apresentaram resultados discrepantes de resistência à tração e alongamento na ruptura.

O gráfico da magnitude dos efeitos para os resultados de resistência a tração está apresentado na Figura 7-18. Os resultados dos espécimes cortados na direção de fabricação, MD, estão localizados na área esquerda, circulado em vermelho. As seguintes avaliações podem ser feitas para esse grupo:

1. O grupo de espécimes que estiveram expostos às intempéries está marcados em azul claro (UV 'S', na legenda) e o grupo que esteve protegido está marcado de azul escuro (UV 'N' na legenda). Nota-se que a resistência à tração do grupo que esteve protegido das intempéries e radiação UV foi estatisticamente superior ao grupo que esteve protegido.
2. Dentre aqueles que estiveram expostos à radiação UV, o grupo de espécimes retirados na borda ("pos. trans" B) apresentou resultados de resistência à tração estatisticamente superior ao grupo de espécimes retirados no centro da amostra de geotêxtil.

Com relação aos grupos de espécimes cortados no sentido CMD, cujos resultados de resistência à tração estão localizados na área direita circulada de verde, foi possível fazer as seguintes avaliações:

1. A resistência à tração para os grupos de espécimes CMD foram estatisticamente inferiores ao dos grupos MD. Tal resultado era esperado uma vez que essa é uma característica intrínseca do geotêxtil utilizado na fabricação dos tubos.
2. Os grupos de espécimes expostos às intempéries e luz UV, apresentaram resistência média menor que os espécimes que retirados de locais em que o geotêxtil estava protegido, em azul escuro. No entanto, houve sobreposição das variâncias desses grupos, de forma que tal diferença não tem relevância estatística.
3. O grupo de espécimes retirados na borda “B”, sentido transversal, apresentaram resistências médias superiores em relação aos retirados na região central “C”. No entanto, houve sobreposição das variâncias desses grupos, de forma que tal diferença não tem relevância estatística.

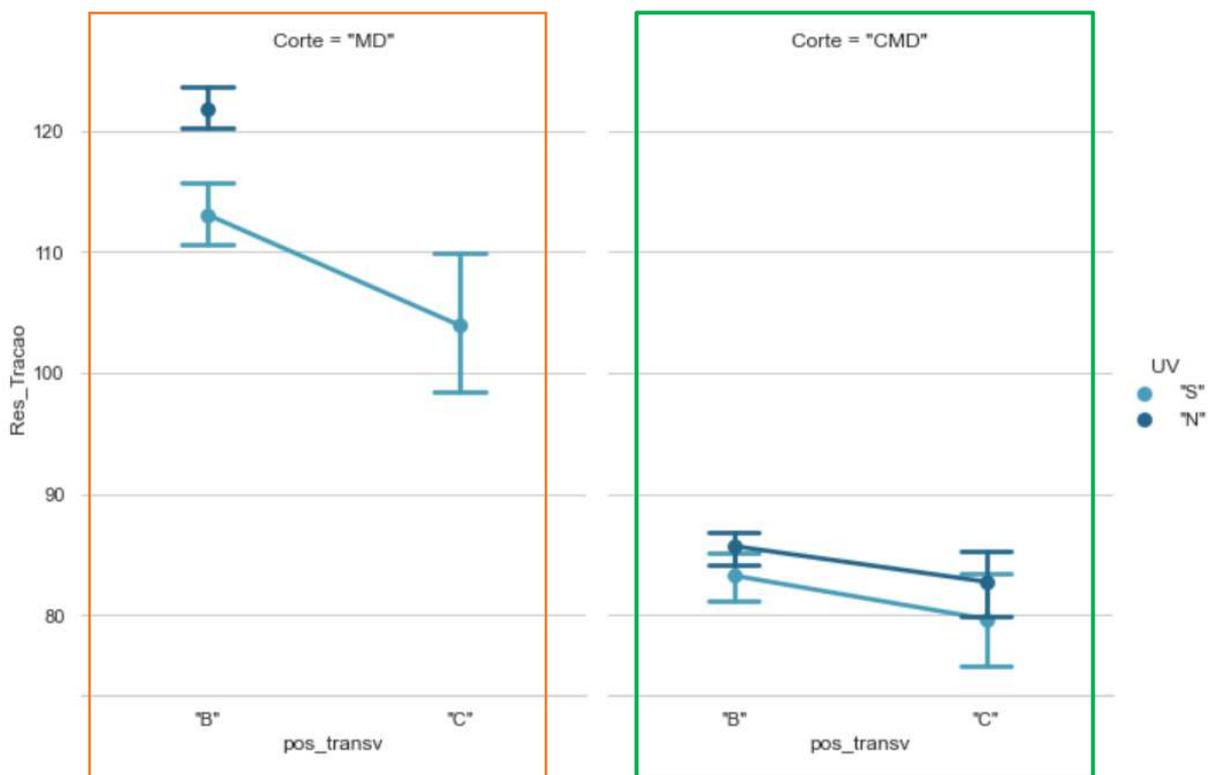


Figura 7-18: Magnitude dos efeitos – modelo resistência à tração.

Os resultados da análise de variância mostraram que a exposição às intempéries e à radiação UV por dois anos em campo foi um fator que impactou diretamente na resistência à tração das amostras cortadas no sentido MD. Como indicado na literatura

(Lopes e Lopes, 2010; Carneiro, 2009; Koerner, 2016), a exposição à radiação UV por longos prazos causa a deterioração das propriedades mecânicas dos geossintéticos. Com relação à posição dos espécimes, é difícil definir com precisão quais os motivos pelos quais espécimes retirados no centro das amostras, próximo ao bocal do tubo geotêxtil, apresentaram resultados inferiores de resistência. Um dos motivos pode ser que as solicitações de tração que ocorrem durante o enchimento foram mais elevadas na região central, próxima ao bocal.

A Figura 7-19 apresenta o gráfico da magnitude dos efeitos do alongamento na ruptura. Os resultados dos espécimes cortados na direção de fabricação, MD, estão localizados na área esquerda do gráfico, circulada em vermelho. As seguintes avaliações podem ser feitas para esse grupo:

1. O grupo de espécimes que estiveram expostos às intempéries está marcado em azul claro (UV 'S', na legenda) e o grupo que esteve protegido está marcado de azul escuro (UV 'N' na legenda). Nota-se que o alongamento na ruptura do grupo que esteve protegido das intempéries e radiação UV foi estatisticamente superior ao grupo que esteve protegido.
2. Dentre aqueles que estiveram expostos à radiação UV, o grupo de espécimes retirados na borda ("pos. trans" B) apresentou resultados de alongamento na ruptura estatisticamente superior ao grupo de espécimes retirados no centro da amostra de geotêxtil.

Com relação aos grupos de espécimes cortados no sentido CMD, cujos resultados de alongamento na ruptura estão localizados na área direita circulada de verde, é possível fazer as seguintes avaliações:

1. O alongamento na ruptura para os grupos de espécimes CMD é estatisticamente superior ao dos grupos MD. Tal resultado era esperado uma vez que essa é uma característica intrínseca do geotêxtil utilizado na fabricação dos tubos.
2. Os grupos de espécimes expostos às intempéries e luz UV e que foram retirados na borda das amostras apresentaram alongamento na ruptura, em média, menor que os espécimes que retirados de locais em que o geotêxtil estava protegido, em azul escuro. No entanto, houve sobreposição das variâncias desses grupos, de forma que tal diferença não tem relevância estatística. Essa diferença apresentou relevância estatística no caso dos espécimes retirados na região central.
3. O grupo de espécimes retirados na borda "B", sentido transversal, apresentou alongamento na ruptura, em média, superior em relação ao grupo de espécimes obtidos região central "C". No entanto, houve sobreposição das variâncias para o

grupo protegido das intempéries, de forma que tal diferença não tem relevância estatística.

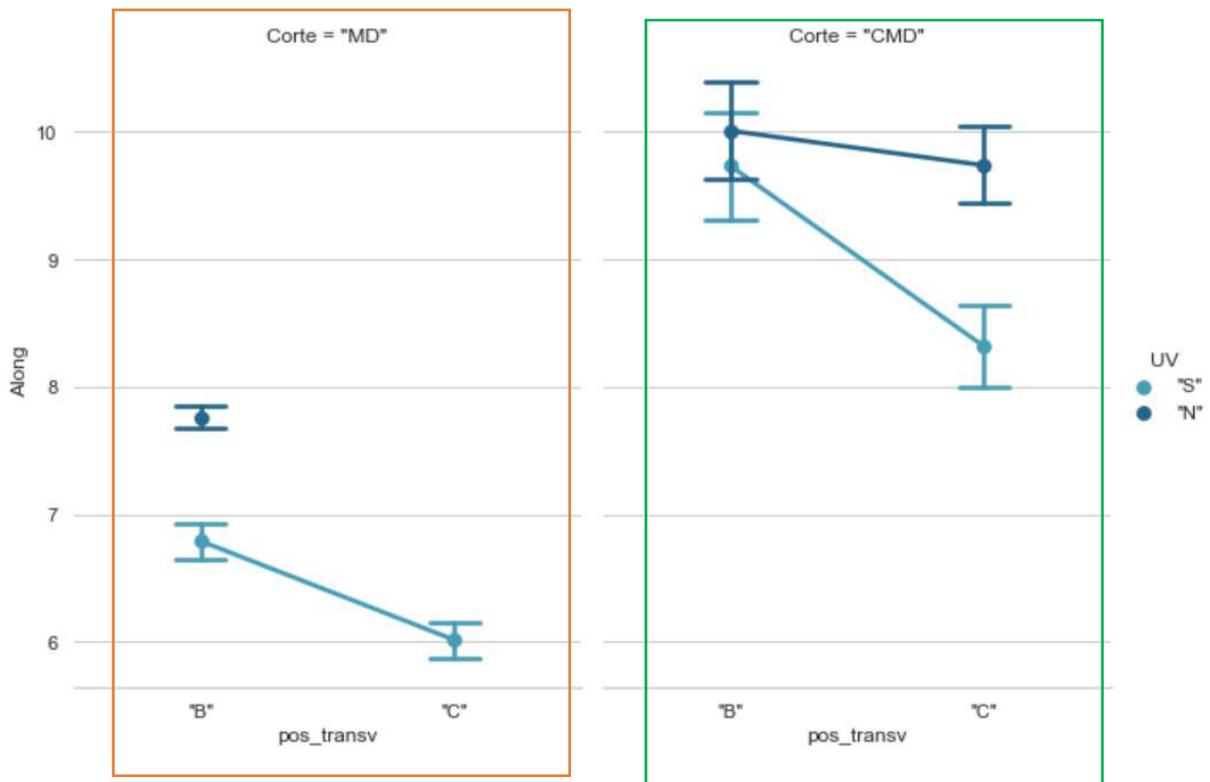


Figura 7-19: Magnitude dos efeitos – modelo alongamento na ruptura.

De maneira geral, os resultados das análises de variância para a resistência à tração e alongamento na ruptura mostraram que a exposição às intempéries bem como às elevadas temperaturas da região da mineradora afetou o comportamento do geotêxtil de maneira significativa, especialmente no sentido de corte MD, que é o sentido da circunferência dos tubos geotêxteis. Como indicado por Lopes e Lopes (2010), o geotêxtil consiste em cadeias moleculares que podem ser atacadas sob determinadas condições, como por exemplo, oxidação catalisada pelo efeito da temperatura ou promovida pela radiação UV, ou ainda pelo efeito conjunto de produtos químicos e cargas aplicadas.

7.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises de microscopia eletrônica realizadas nas amostras de geotêxtil exumadas e virgem. As Figura 7-20-a, b e c apresentam, respectivamente, as imagens com aumento de 40, 100 e 300 vezes da amostra

virgem, que foi retirada do mesmo lote de fabricação dos tubos geotêxteis e enviada ao laboratório na mesma época da construção do empilhamento. Nota-se que as fibras têm aparência mais uniforme, mas percebe-se a presença partículas sólidas na superfície.

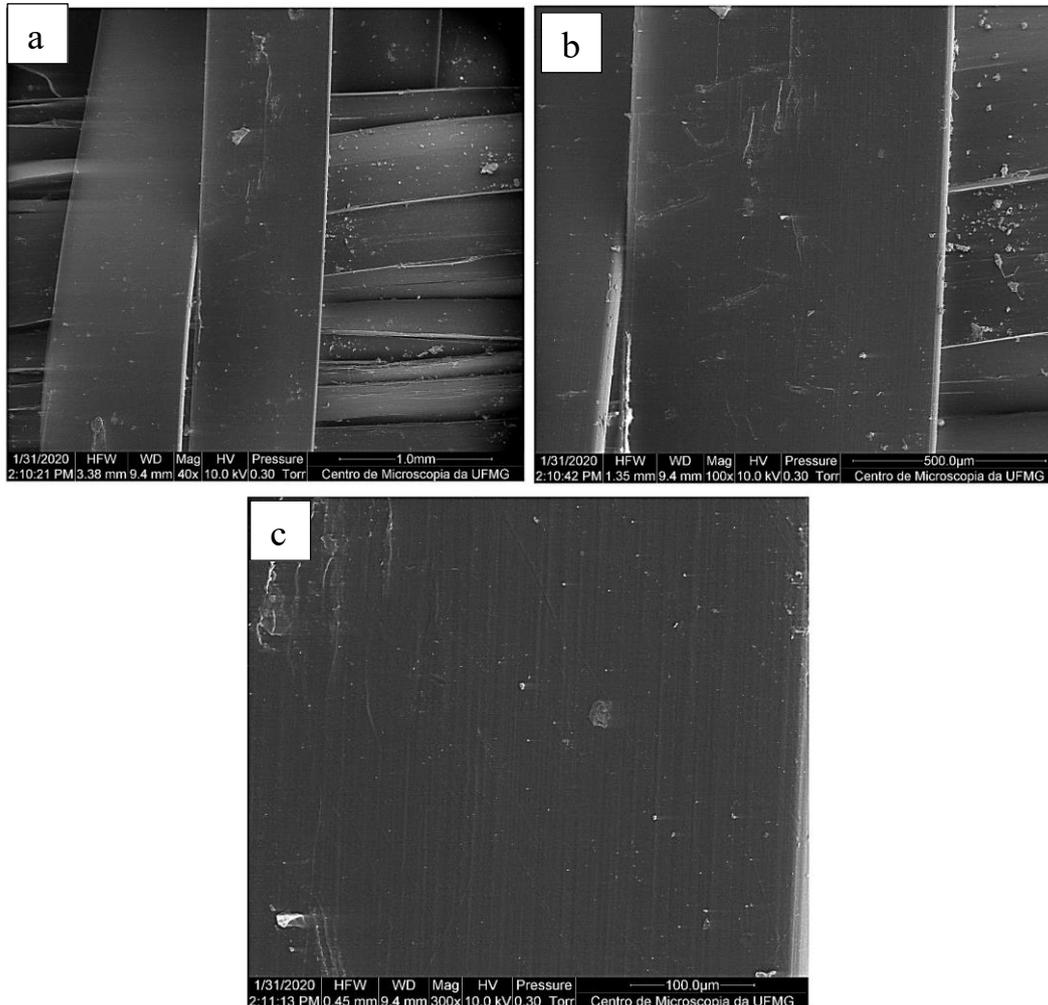


Figura 7-20: Microscopia eletrônica das amostras virgens: (a) ampliação de 40x,; (b) ampliação de 100x e (c) ampliação de 300x.

As Figura 7-21-a, b, c apresentam as imagens da amostra coletada na área superior do TG-14, com as ampliações de 40, 100 e 300 vezes, respectivamente. Nota-se, na ampliação de 40x, a presença de partículas aderidas à superfície da fibra geotêxtil, que apresenta uma coloração mais opaca em relação às amostras virgens (Figura 7-20-a). Na ampliação de 100x é possível notar que a fibra geotêxtil tem uma superfície mais rugosa. Por fim, na ampliação de 300x é possível ver que a aparência rugosa da fibra se deve à presença de ranhuras na direção transversal à fibra, uniformemente distribuídas ao longo

de toda a superfície. As imagens da amostra coletada na área inferior do tubo geotêxtil G14 (protegida das intempéries, mas sujeita ao carregamento causado pelo rejeito) estão apresentadas nas Figura 7-21-d, e, f com as respectivas ampliações de 40, 100 e 300 vezes. Nota-se a presença de partículas aderidas à fibra na ampliação de 40x, mas o aspecto do geotêxtil é mais uniforme, se comparado à amostra retirada da área superior. É possível notar algumas ranhuras no sentido longitudinal da fibra na ampliação de 100x. Na ampliação de 300x é possível ver com maior as ranhuras, aparentemente superficiais, bem como a presença de partículas de rejeito aderidas à superfície do rejeito aparecem com maior nitidez.

As imagens apresentadas na Figura 7-22 apresentam à esquerda (a, b e c) as imagens da amostra obtida na parte superior, exposta às intempéries do TG-10 com ampliações de 40, 100 e 300 vezes; à direita (d, e e f) as imagens da amostra obtida na parte superior do TG-10, mas protegida das intempéries, também com ampliação de 40, 100 e 300 vezes. Em ambas as amostras, é possível notar a presença de partículas de rejeito aderidas às fibras do geotêxtil tecido. Em especial, na imagem b, que mostra a ampliação da superfície sujeita às intempéries com aumento da 100 vezes, é possível notar um aglomerado de partículas aderido à fibra do geotêxtil, e a fibra na parte inferior da imagem aparece com coloração opaca, com aparência de oxidação.

Por fim, as imagens apresentadas na Figura 7-23 apresentam as imagens obtidas da amostra retirada na parte superior do TG-5, à esquerda (a, b e c) com ampliações de 40, 100 e 300 vezes respectivamente; à direita (d, e, f) tem-se as imagens da amostra retirada da parte inferior do TG-5 com ampliações de 40, 100 e 300 vezes, respectivamente. Ambas as amostras estiveram protegidas da exposição às intempéries, uma vez que o TG-5 estava completamente confinado pelo empilhamento. É possível notar uma menor presença de partículas aderidas ao rejeito, se comparada ao TG-10. Nota-se a presença de ranhuras nas fibras do geotêxtil, mas que aparentam ser mais superficiais à medida que a ampliação aumentou. De maneira qualitativa, essas imagens mostram que as fibras do geotêxtil retirado do TG-5 parecem estar mais íntegras em relação às imagens obtidas para o TG-14 e TG-10.

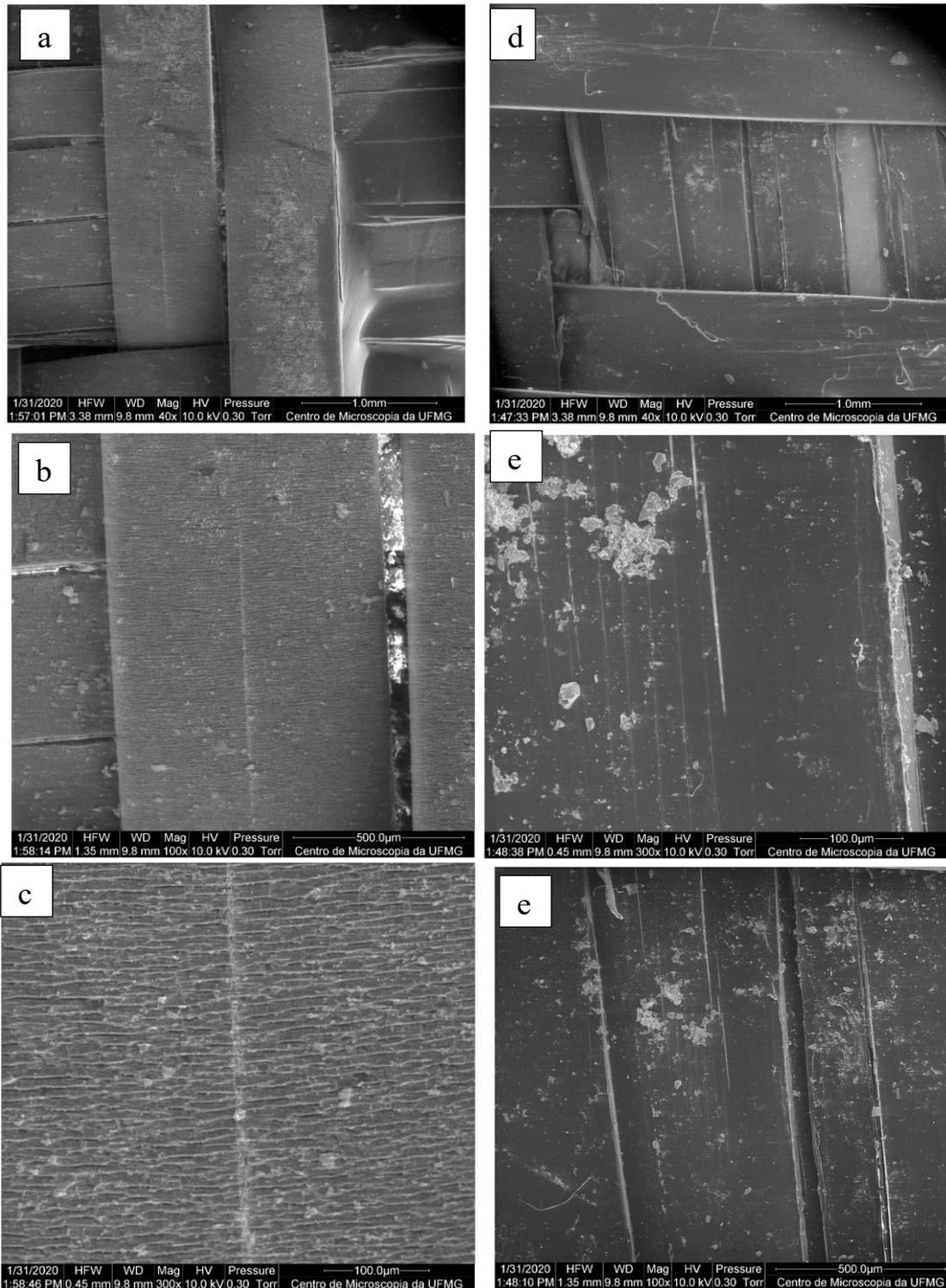


Figura 7-21: Microscopia eletrônica das amostras do TG-14: ‘a’, ‘b’ e ‘c’ são ampliações de 40, 100 e 300 vezes, respectivamente, da amostra superior; ‘d’, ‘e’, e ‘f’ também apresentam ampliações de 40, 100 e 300 vezes para a amostra inferior.

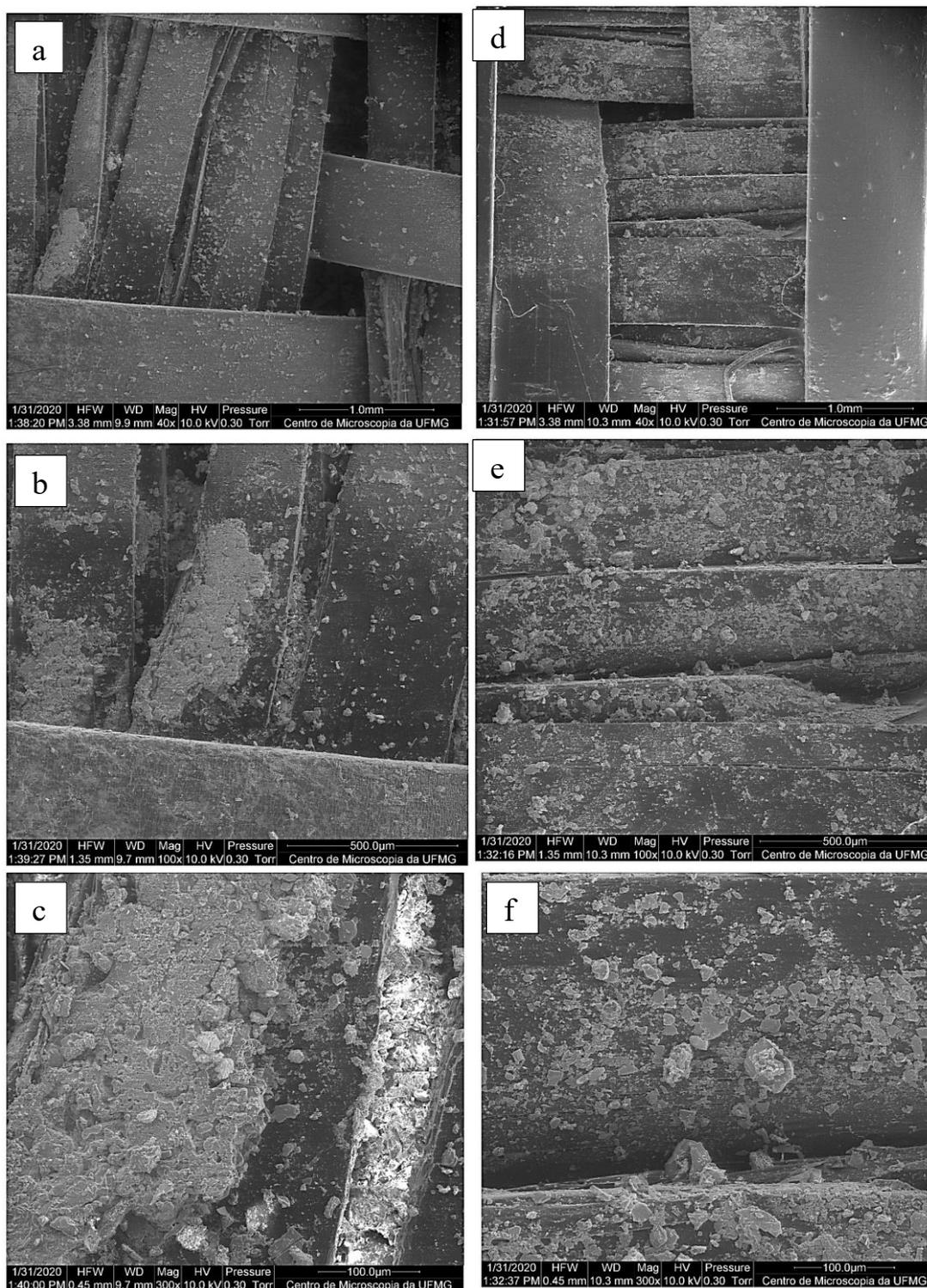


Figura 7-22: Microscopia eletrônica das amostras do TG-10: 'a', 'b' e 'c' são ampliações de 40, 100 e 300 vezes, respectivamente, da amostra sujeita a UV; 'd', 'e', e 'f' também apresentam ampliações de 40, 100 e 300 vezes para a amostra não sujeita a UV.

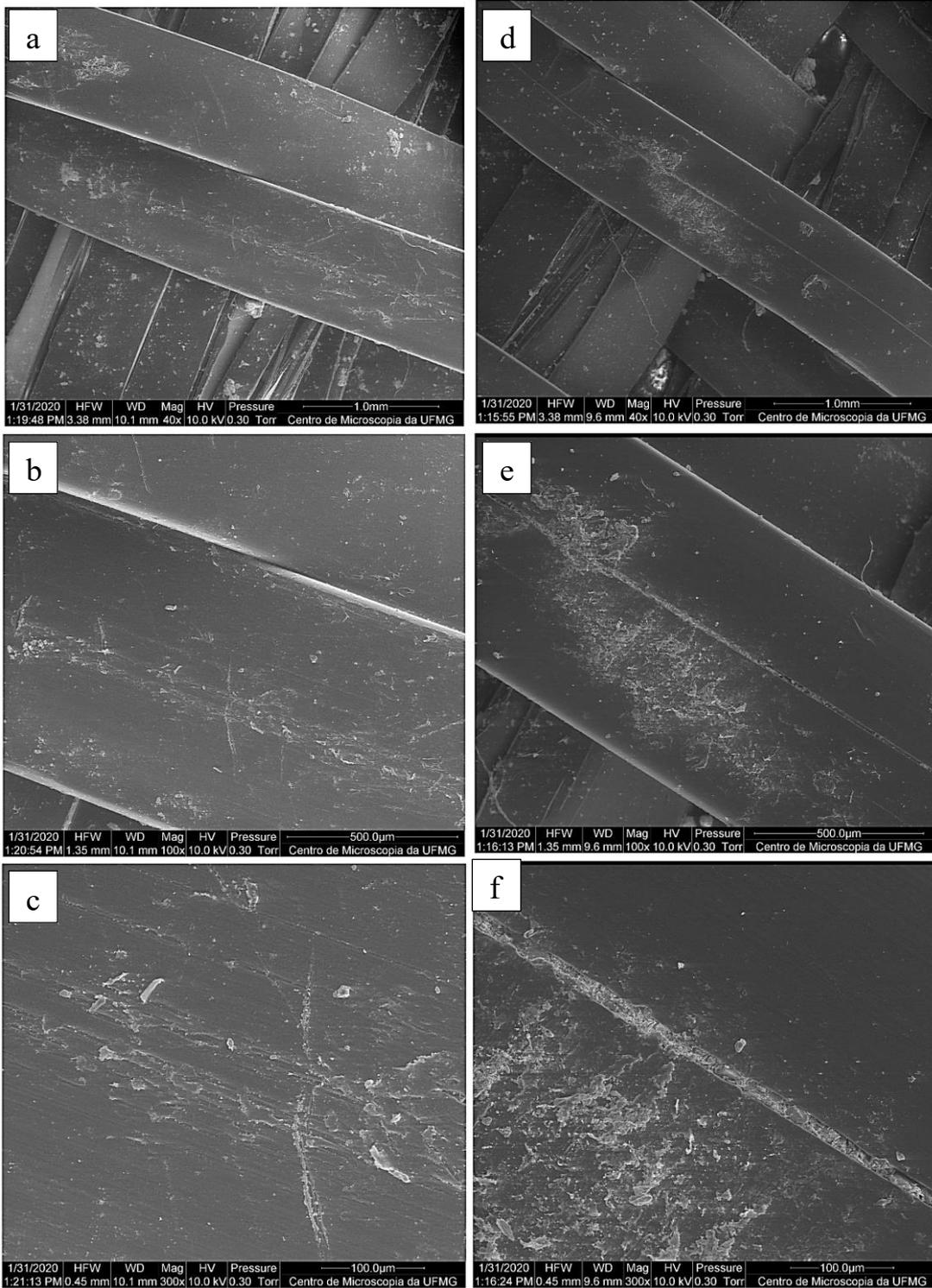


Figura 7-23: Microscopia eletrônica das amostras do TG-14: ‘a’, ‘b’ e ‘c’ são ampliações de 40, 100 e 300 vezes, respectivamente, da amostra superior; ‘d’, ‘e’, e ‘f’ também apresentam ampliações de 40, 100 e 300 vezes para a amostra inferior.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a avaliação do desempenho de um empilhamento de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito fino de mineração de ouro. Foi possível verificar que a altura dos tubos geotêxteis não apresentou variações consideráveis desde a finalização do empreendimento. Constatou-se que o eixo do TG-14, localizado no topo do empilhamento, apresentou uma distorção próxima a 12° , resultado da iminência de deslizamento ocorrida durante o enchimento. Dessa forma, é importante que as camadas do empilhamento sejam finalizadas com alturas semelhantes formando, assim, bases niveladas para o enchimento de outros tubos geotêxteis. Além disso, foram observadas deformações nas junções, ao longo do comprimento, de tubos geotêxteis adjacentes. Essas deformações também podem afetar o enchimento das camadas seguintes e comprometer o desempenho do empilhamento como estrutura.

Os índices físicos obtidos a partir do ensaio de densidade in situ apresentaram resultados coerentes com o nível de tensão que cada TG foi submetido. Como exemplo, o TG que foi submetido ao maior nível de carregamento apresentou também o menor índice de vazios. Comportamento semelhante foi observado para os valores medidos de massa específica natural e massa específica aparente seca. No entanto, o ensaio de adensamento edométrico da amostra TG-5, localizada na base do empilhamento e sujeita ao maior nível de tensões, apresentou compressibilidade superior, principalmente no trecho de recompressão, em relação às amostras do TG-10 e TG-14. Os ensaios de adensamento realizados em amostras indeformadas revelaram que o formato da curva de variação do índice de vazios em função do carregamento apresentou formato típico de materiais reconstituídos.

Os valores de resistência dos ensaios de compressão triaxial do tipo CIUsat também não apresentaram uma tendência clara de comportamento. Os valores dos ângulos de atrito obtidos para o TG-14 e TG-10 foram semelhantes, mas houve variação considerável no valor do intercepto coesivo obtido para o TG-10; ademais, o ângulo de atrito relativo ao TG-5 foi inferior. Mesmo realizando um transporte cuidadoso dos blocos indeformados, não se descarta a hipótese de amolgamento das amostras. Com relação à permeabilidade, o TG-5 apresentou o maior valor de permeabilidade (na ordem de 10^{-5} m/s), seguido pelo TG-10 (10^{-6} m/s) e pelo TG-14 (10^{-7} m/s). Assim, a permeabilidade do TG-5 foi superior em uma ordem de grandeza em relação à permeabilidade relativa ao TG-10 e TG-14.

A análise de segregação hidráulica das amostras deformadas foi feita a partir da comparação entre os diâmetros característicos D_{10} , D_{30} , D_{60} e D_{90} . De fato, a variação nos valores de diâmetro característicos das curvas granulométricas não foi expressiva e apresentou uma tendência clara de comportamento nesses valores ao longo do eixo do tubo geotêxtil para todas as amostras deformadas. As curvas granulométricas obtidas para todas as amostras deformadas apresentaram classificação textural, pelo triângulo de *Feret*, de silte-arenoso. A difração de raios-x mostrou, de forma semi-quantitativa, que a densidade dos minerais presentes não varia de forma expressiva. As imagens de microscopia eletrônica de varredura mostraram a superfície das amostras indeformadas, possibilitando a avaliação qualitativa do formato dos grãos e da aparente estrutura do rejeito.

Foram coletadas amostras de geotêxtil da área superior dos tubos geotêxteis exumados e, a partir dessas amostras, 143 espécimes foram obtidos e rompidos em ensaios a tração. Cada espécime geotêxtil teve sua espessura medida e o gráfico de caixas mostrou que os espécimes obtidos do TG-5 apresentaram maiores valores de espessura, seguidos pelo TG-10 e TG-14. Esses conjuntos de valores foram comparados aos obtidos para espécimes virgens. Houve uma variabilidade considerável nos dados obtidos em decorrência da aderência de rejeito na superfície dos espécimes exumados. Mesmo assim, todos os grupos de geotêxteis exumados apresentaram espécimes com espessura inferior ao obtido para as amostras virgens. Todos os valores de massa por unidade de área dos espécimes exumados foram superiores aos obtidos para os espécimes virgens.

Os ensaios de resistência à tração mostraram que uma quantidade considerável de espécimes cortados no sentido de fabricação (MD) apresentou resistência superior ao obtidos para as amostras virgens. Observou-se também que a resistência das amostras aumentou; a diminuição consistente na deformação na ruptura mostra o enrijecimento dos espécimes exumados.

Os resultados das análises de variância mostraram que, dentre os espécimes exumados, os que foram expostos às intempéries e à radiação UV sofreram redução na resistência à tração e no alongamento na ruptura. Adicionalmente, os espécimes cortados no sentido de fabricação (MD) e retirados na região central do tubo geotêxtil, apresentaram menores valores de resistência à tração e alongamento na ruptura. Por meio da análise de variância, foi verificado que a posição do tubo geotêxtil e, conseqüentemente, o nível de

carregamento não influenciaram, estatisticamente, nos resultados de resistência à tração e alongamento na ruptura. A exposição à luz UV e às intempéries foi o principal fator causador de envelhecimento do geotêxtil exumado. Dessa forma, o projeto de uma estrutura de contenção construída por meio do empilhamento de tubos geotêxteis deve considerar a degradação que pode ocorrer no geotêxtil caso os tubos geotêxteis fiquem expostos à luz UV por longos períodos. As análises de microscopia eletrônica das amostras exumadas mostraram que as fibras do geotêxtil exumado apresentaram ranhuras bem como a presença de partículas de rejeito aderido às fibras. Assim, a microscopia mostrou, de forma qualitativa, a degradação que ocorreu nas fibras do geotêxtil exumado.

De forma geral, conclui-se que os tubos geotêxteis preenchidos com rejeitos finos de mineração de ouro podem ser utilizados para desaguar, confinar e empilhar tais rejeitos e formar uma estrutura geotécnica. No entanto, cuidados devem ser tomados, especialmente no aspecto construtivo, para evitar deformações excessivas que possam comprometer o processo de enchimento dos tubos e o uso do empilhamento como estrutura de contenção.

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- i) Avaliar o desaguamento do rejeito de ouro por meio de geotêxteis com diferentes aberturas de filtração, fazendo um comparativo com a concentração de floculante requerida para a filtração;
- ii) Avaliar se ocorre segregação hidráulicas em tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração sem o uso de defloculantes
- iii) Comparar o desaguamento do rejeito de ouro por meio de geotêxtil tecido com o desaguamento por meio de tubos geotêxteis não tecidos e dupla camada;
- iv) Instrumentar com células de pressão, um tubo geotêxtil de pequena escala, para a obtenção das tensões atuantes na base do tubo e nas regiões de contato com os elementos adjacentes;
- v) Avaliar, por meio de ferramenta computacional (Plaxis 2D, Phase2 ou similar), as tensões axiais de tração atuantes no interior de um tubo geotêxtil durante o enchimento;
- vi) Comparar os sistemas de cobertura de barragem de rejeito atualmente existente com o sistema de cobertura a ser utilizado em tubos geotêxteis, considerando para tanto, a eficiência do geotêxtil na filtração e sua influência na função separação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2016-a). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2016-b). NBR 9813. *Solo – Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação*. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2017) NBR 13028. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2018). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2018-a) NBR ISO 10318-1. *Geossintéticos Parte 1: Termos e definições*, Rio de Janeiro – RJ.
- ABNT (2013) NBR ISO 9863-1. *Geossintéticos – Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camada única*. Rio de Janeiro
- ABNT (2013-a) NBR ISO 10319. *Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga*. Rio de Janeiro
- ABNT (2013-b) NBR ISO 12956. *Geotêxteis e produtos correlatos – Determinação da abertura de filtração característica*. Rio de Janeiro
- ARAÚJO, C. B. (2006) *Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro
- ARNAU, D.F.; JAMETT, R.; BRIERS, M. (2017) Geotextile dewatering tubes for water reclamation technique in tailings storage facilities. 4th International Seminar on Tailings Management, 2017, Santiago, Chile.
- ASSINDER, P. J.; WIEMERS, J.; HORTKORN, F. (2015) Utilizing Geotextile Tubes to Extend the Life of a Tailings Storage Facility. Proceedings of the First Southern African Geotechnical Conference. DOI 10.1201/b21335-66. 6 p.
- ASSIS, A. P.; ESPÓSITO, T. J.; GARDONI, M.G.A.; MAIA, J. A. C. (2018) Métodos estatísticos e probabilísticos aplicados à geotecnia. Publicação: G.AP-AA002/2018, Brasília, DF.
- ASTM (2011) D2435 – *Standard Test Methods for One-Dimensional consolidation properties of soils using incremental loading*. West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM (2017) D4595 - *Standard Test Methods tensile properties of geotextiles by the wide-width method*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2013) D7880 – *Standard test method for determining flow rate of water and suspended solids retention from a closed geosynthetic bag*.
- BALTAZAR, P. M. R. (2008) *Interfaces Solo-Geossintético em corte em Plano Inclinado*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 11 p.
- BHATIA, S. K; HUANG, Q. (1995) Geotextile filters for internally stable/unstable soils. *Geosynthetics International*, v. 2, n. 3, p. 537-565.
- BEDIN, J. (2010) *Estudo do Comportamento Geomecânico de Resíduos de Mineração*. Tese de doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- BOGOSSIAN, F., SMITH, R.T., VERTEMATTI, J.C., E YAZBEK, O. (1982) Continuous retaining dikes by means of geotextiles. 2ND International Conf. on Geotextiles, Las Vegas, Nev., p. 211-216.
- CANTRÉ, S. & SAATHOFF, F. (2011). Design parameters for geosynthetic dewatering tubes derived from pressure filtration tests. *Geotextile and Geomembranes*, 18, No.3, 90-103.
- CARNEIRO, A.; FOURIE, A.B. (2018) A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia. *Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, 2018, Perth, Australia.
- CHU, J.; ZHOU, B. (2015). Model Test on Methods to Improve Dewatering Efficiency for Methods for Sludge-Inflated Geotextile Tubes. *Geosynthetics International*. V. 22, p. 380-392.
- CHRISTOPHER, B. R.; HOLTZ, R.D. (1985) *Geotextile engineering manual*. Report n. FHWA-TS-86/203. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1044 p.
- DAS, U.K. (2016) A Case Study on Performance of Jia Bharali River Bank Protection Measure Using Geotextile Bags. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2:12. DOI 10.1007/s40891-016-0052-8
- DNPM (2018) Departamento Nacional de Produção Mineral - Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas., 2018 ano base 2017. Disponível em http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf. Acesso em 24 de maio de 2019

- ESPÓSITO, T.J. (2000). *Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 363 p.
- FERNANDES, M. M. (2016). *Mecânica dos solos – conceitos e princípios fundamentais*, Vol 1. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 447 p.
- FOWLER, J.; LARKINS, K.; DUKE, M. (2005) Dredging aerobis digested biosolids into geotextile tubes for dewatering, New Orleans East Municipal Sewage Treatment Plant. 25th Annual WEDA Conference, New Orleans, USA, p. 247-262.
- GAFFNEY, D. A. (2001) Geotextile tube dewatering: Part 1 – design parameters. *Geosynthetics Fabric Report Magazine*, 19, n. 7, p. 1-5.
- GARDONI, M. G. A. (2000). *Estudo do comportamento dreno filtrante de geossintéticos sob compressão*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 313 f.
- IBRAM (2018) Instituto Brasileiro de Mineração. Relatório Anual de Atividades – Julho 2017-Junho 2018. Disponível em http://portaldaminerao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/07/Diagramação_RelatórioAnual_versãoweb.pdf Acesso em 22 de maio de 2019.
- KARACA, O., CAMESELLE, C. & REDDY, K.R. (2018) Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation. *Rev Environ Sci Biotechnol* 17: 205.
- KENNEY, T. C.; CHAHAL, R.; CHIU, E.; OFOEGBU, G. I.; OMANGE, G. N.; UME, C. A. (1985) Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 32-43.
- KENNEY, T. C & LAU, D. (1985). Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 215-225.
- KHACHAN, M.M; BHATIA, S. K. (2017) The efficacy and use of small centrifuge for evaluating geotextile tube dewatering performance. *Geotextile and Geomembranes*, 45, No. 4, p.280-293.
- KIM, H-J; WON, M-S; JAMIN, J.C. (2014) Finite-Element analysis on the Stability of Geotextile Tube-Reinforced embankments under scouring. Technical Note – American Society of Civil Engineers DOI: 10.1061/(ASCE)GM.19435622.0000420

- KLAHOLD, P.A. (2013) *Interpretação de Ensaios de Campo em Solos com Permeabilidade Intermediária*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- KOERNER, R. M. (2016) *Designing with Geosynthetics*. Robert M. Koerner, EUA, vol. 1, 508p.
- KOERNER, R.; KOERNER, G. (2010) Performance test for the selection of fabrics and additives when used as geotextile bags, containers, and tubes. *Geotechnical Testing Journal* 33, n. 3, p. 236-242.
- LAFLEUR, J. (1999) Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. *Geotextile and Geomembranes*, v. 17, n. 5-6, p. 299-312.
- LANGSRUD, Ø. (2003) ANOVA for Unbalanced Data: Use Type II instead of Type III sums of squares. *Statistics and Computing*, 13, 163-167.
- LAWSON, C. R. (2008) Geotextile Containment for Hydraulic and Environmental Engineering. *Geosynthetics International*, 15, No. 6, 384-427
- LIAO, K.; BHATIA, S. K. (2005). Geotextile tube: Filtration performance of woven geotextiles under pressure. *Proceedings of NAGS 2005/GRI – 19 Cooperative Conference*, Las Vegas, USA.
- LOPES, M. P.; LOPES, M. L. (2010). A Durabilidade dos Geossintéticos. FEUP Edições, Porto, 294p.
- LUZ, A.B. e LINS, F.F. (2010). Introdução ao Tratamento de Minérios. In: *Tratamento de Minérios. 5ª Edição*. LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A. e FRANÇA, S.C.A. (Editores), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 932p.
- MAMANI, G. L. G. (2012). Comportamento de um Aterro Experimental sobre um depósito de rejeitos de ouro – Mineração Paracatu. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 226 p.
- MARTINS, P. M. (2006) *Utilização de Tubos Geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração*. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 161 p.
- MAURER, B. W. (2011) *Flocculation and Filtration in the Geotextile Tube Environment*, Dissertação de mestrado, B.S. Syracuse University, Syracuse, New York, 144 p.
- MORGAN, K. R. (2014) *Geotextile Tubes and Their Application to Dewatering*, Dissertação de Mestrado, Graduate Faculty of Georgia Southern University, Statesboro, Georgia, 147 p.
- MONTGOMERY, D. C. (2001). *Design and Analysis of experiments*, 5th edition. John Wiley & Sons, New York, 684 p.

- MOO-YOUNG, H; GAFFNEY, D.; MO, X. (2002). Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes. *Geotextile and Geomembranes*, 20, n. 5, 289-303.
- NEWMAN, P.; HODGSON, M.; ROSSELOT, E. (2004) The disposal of tailings and minewater sludge using geotextile dewatering techniques. *Minerals Engineering*, v.17, p. 115-121.
- NIERWINSKI, H.P.(2013) *Potencial de Liquefação de Rejeitos de Mineração Estimado através de Ensaio de Campo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- OLIVEIRA, W.; GARDONI, M.G.A; MORAIS, F.T.C. (2018) Avaliação dos fatores de influência no ensaio do cone geotêxtil. - XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia
- ORTIZ, R. N., SANTOS O. J., LADCHUMADASIVAM, R. (2003) Tubos de Geotêxtil Aplicados a Obras de Defesa Costeira, II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa.
- PALMEIRA, E. M. (2018). Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 294 p.
- PENA, Z. G. (2008) *As rochas vulcanossedimentares do greenstone belt do Rio Itapicuru na área da mina fazenda brasileiro:petrografia e geoquímica*. Dissertação (mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 174 p.
- PEREIRA, E. M. (2004). *Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação guabirotuba em ensaios com sucção controlada*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 253 p.
- PERES, A. E.; CHAVES, A. P.; LINS, F. A. F.; TOREM, M. L. (2002) Beneficiamento de Minérios de Ouro. In: Cap. 2 de Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambientes. Eds. TRINDADE, R. B. D. e BARBOSA FILHO, O. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ, 322p.
- PORTES, A. M. C. (2013) *Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências de Polpa e Torta*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, (2013)
- QUINN, G. P.; KEOUGH, M. .J (2002) Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge University Press, New York, 537 p.
- RAUMANN, G. (1979). A Hydraulic tensile test with zero transverse strain for geotechnical fabrics. *Geotechnical Testing journal*. GTJODJ, Vol. 2, n. 2, p. 69-76.

- SATYAMURTHY, R.; LIAO, K.; BHATIA, S.K. (2011) Investigations of Geotextile Tube Dewatering. GeoFrontiers Congress 2011, Dallas, Texas, United States, ASCE, p. 2121-2130.
- SHIN, E.C.; OH, I. Y. (2003) Analysis of geotextile tube behavior by large-scale field model tests. *Geosynthetics International*, v. 10, nº 4, p. 134-141.
- FREITAS SILVA, L. C. F. (2017) *Utilização de Tubos Geotêxteis para Confinamento, Desaguamento e Empilhamento de Rejeito de Ouro*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 157 p.
- SILVA, V. L. (2019). *Análise do comportamento de tubos geotêxteis para confinamento de rejeito fino de mineração por meio de modelagem numérica*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 169 p.
- SOSNOSKI, J. *Interpretação de ensaios de CPTU e DMT em solos com permeabilidade intermediária*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2016.
- TOMINAGA, E. (2010). *Análise dos procedimentos para avaliação de desempenho de sistemas fechados com geotêxtil para desaguamento*. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura Aeroportuária) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 126 p.
- VAN KESSEL, M. T., BREYTENBACH, M., WILKE, M. (2016) Common Practice and Innovations in Tailings Dams Using Geotextile Tubes. International Symposium on “Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries”, Johannesburg, South Africa, 9 p.
- VICK, S. G. (1983) *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. John Wiley & Sons, Inc., 369p.
- VERTEMATTI, J.C. (2015) *Manual brasileiro de geossintéticos*, 2. ed., Edgar Blucher Ltda, São Paulo, SP, Brasil, 570 p.
- YEE, T.W., LAWSON, C.R., WANG, Z. Y., DING, L. & LIU, Y. (2012) Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin Edo-City, China, *Geotextile and Geomembranes*, Elsevier, Vol. 31, p. 39-50
- YEE, T.W.; LAWSON, C.R. (2012) Modelling the geotextile tube dewatering process. *Geosynthetics International*, 19, No. 5, p 339-353.
- WILKE, M.; BREYTENBACH, M.; REUNANEN, J.; HILLA, V-M. (2015) Efficient environmentally sustainable tailings treatment and storage by geosynthetic dewatering

tubes: Working principles and Talvivaara case study, Vancouver 25-28 October, 2015.
Proc. intern. symp Tailings and Mine Waste 2015

PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P.; LINS, F. A. F.; TOREM, M. L. Beneficiamento de Minérios de Ouro. In: Cap. 2 de Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente. Eds. TRINDADE, R. B. E. e BARBOSA FILHO, O. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ, 322p, 2002.

APÊNDICE A – ENSAIOS TRIAXIAIS

CLIENTE:	UFMG
REGISTRO:	TG14
MATERIAL:	Rejeito de Ouro - CP1
PROFUNDIDADE:	-
ENSAIO:	TCIUsat

DADOS INICIAIS DE MOLDAGEM:

Tensões de Confinamento	50 kPa	100 kPa	200 kPa
-------------------------	--------	---------	---------

Peso e Geometria dos Corpos de Prova:

Diâmetro [mm]	35,53	35,44	35,96
Altura [mm]	71,52	71,95	72,10
Area [mm ²]	991,47	986,45	1015,62
Volume [cm ³]	70,91	70,98	73,23
Peso úmido [g]	113,61	115,43	119,02
Peso seco [g]	106,16	106,40	112,01

Teor de Umidade:

Massa Úmida + Tara [g]	68,99	75,32	70,93
Massa Seca + Tara [g]	65,31	70,41	67,45
Tara [g]	12,79	12,58	11,81
Água [g]	3,69	4,91	3,48
Massa Seca [g]	52,52	57,83	55,64
Umidade [%]	7,02	8,49	6,25

Dados Calculados:

Densidade Real [g/cm ³]	2,690	2,690	2,690
M. E. A. Úmida [g/cm ³]	1,602	1,626	1,625
M. E. A. Seca [g/cm ³]	1,497	1,499	1,530
Índice de Vazios Inicial	0,797	0,794	0,758
Grau de Saturação Inicial [%]	23,69	28,75	22,18
Volume de Vazios [%]	44,35	44,27	43,13

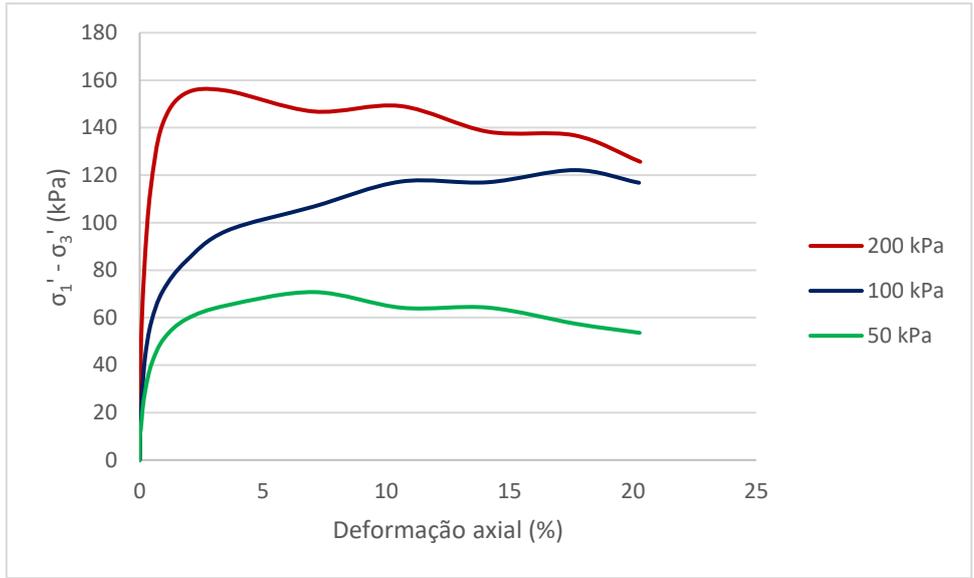


Figura A-1: Gráfico Tensão desviadora x deformação axial para o ensaio relativo ao TG14

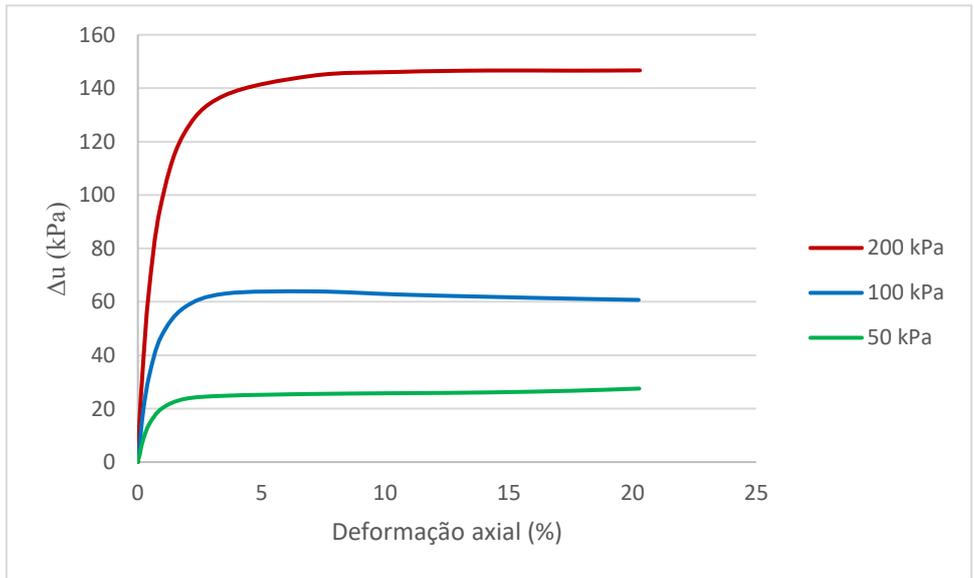


Figura A-2: Gráfico Variação da poropressão x deformação axial para o ensaio relativo ao TG14

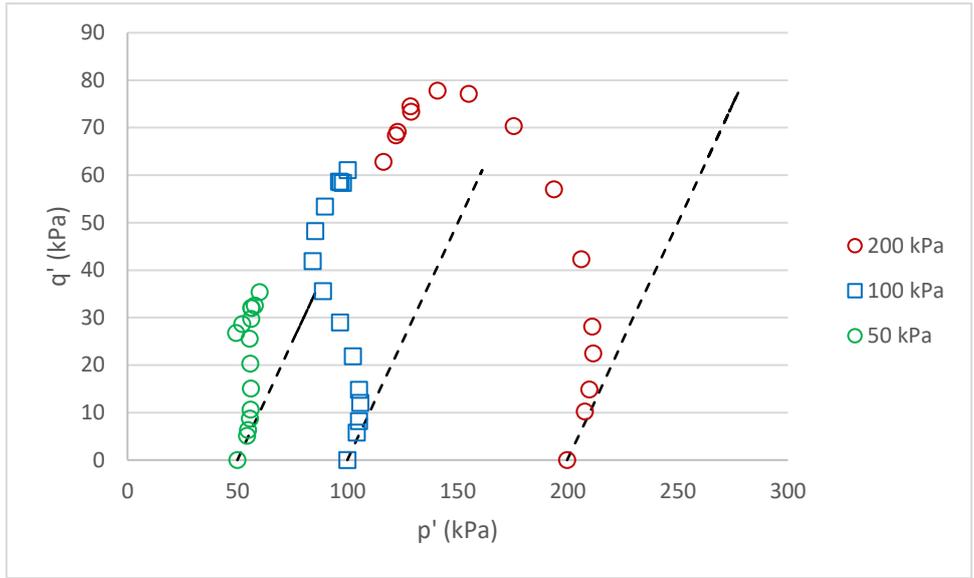


Figura A-3: Trajetória de tensão efetiva do ensaio relativo ao TG14

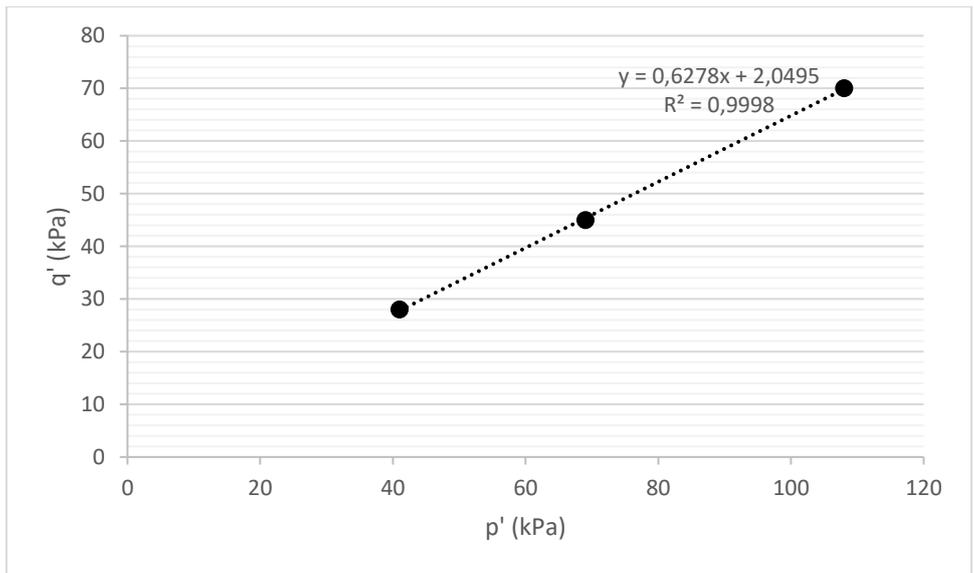


Figura A-4: Envoltória de ruptura do ensaio relativo ao TG14

CLIENTE:	UFMG
REGISTRO:	13700
MATERIAL:	TG10
PROFUNDIDADE:	-
ENSAIO:	TCIUsat

DADOS INICIAIS DE MOLDAGEM:

Tensões de Confinamento	50 kPa	100 kPa	200 kPa
-------------------------	--------	---------	---------

Peso e Geometria dos Corpos de Prova:

Diâmetro [mm]	35,34	35,69	35,50
Altura [mm]	71,83	71,69	71,79
Area [mm ²]	980,90	1000,42	989,80
Volume [cm ³]	70,46	71,72	71,06
Peso úmido [g]	127,57	127,94	128,76
Peso seco [g]	110,49	110,62	112,18

Teor de Umidade:

Massa Úmida + Tara [g]	73,36	88,66	82,30
Massa Seca + Tara [g]	65,22	78,86	73,41
Tara [g]	12,62	16,32	13,32
Água [g]	8,14	9,80	8,89
Massa Seca [g]	52,61	62,54	60,09
Umidade [%]	15,46	15,66	14,78

Dados Calculados:

Densidade Real [g/cm ³]	2,700	2,700	2,700
M. E. A. Úmida [g/cm ³]	1,811	1,784	1,812
M. E. A. Seca [g/cm ³]	1,568	1,542	1,579
Índice de Vazios Inicial	0,722	0,751	0,710
Grado de Saturação Inicial [%]	57,83	56,34	56,20
Volume de Vazios [%]	41,92	42,88	41,53

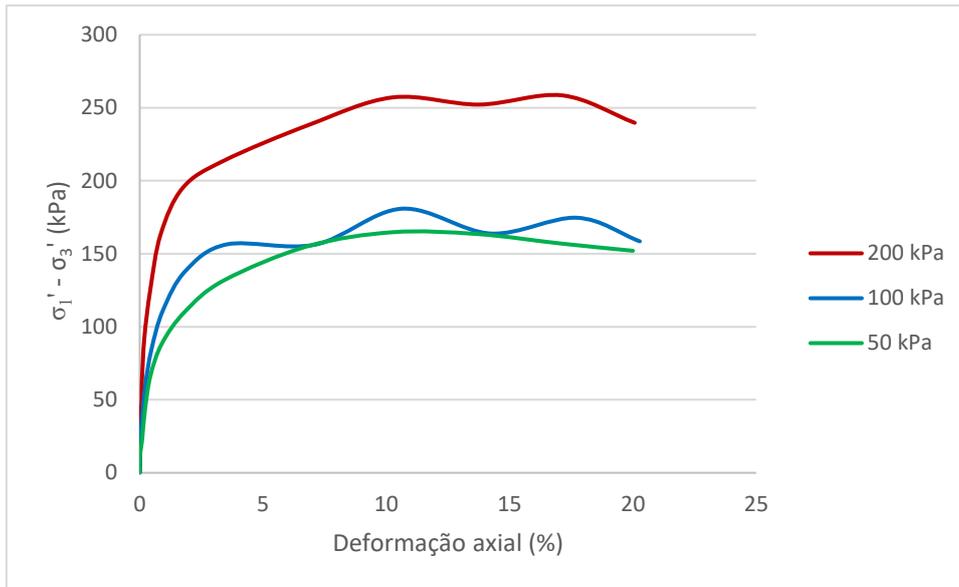


Figura A-5: Gráfico Tensão desviadora x deformação axial para o ensaio relativo ao TG10

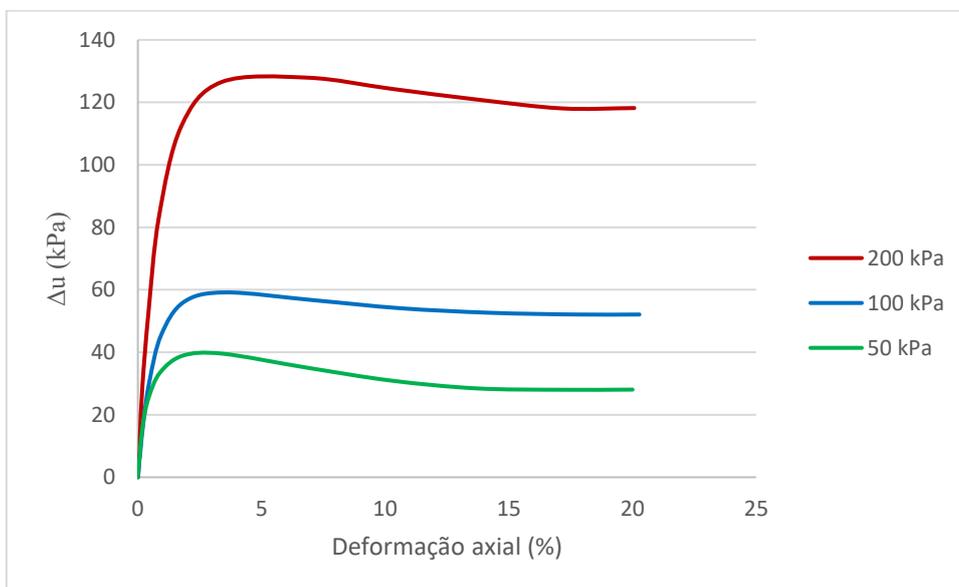


Figura A-6: Gráfico Variação da poropressão x deformação axial para o ensaio relativo ao TG10

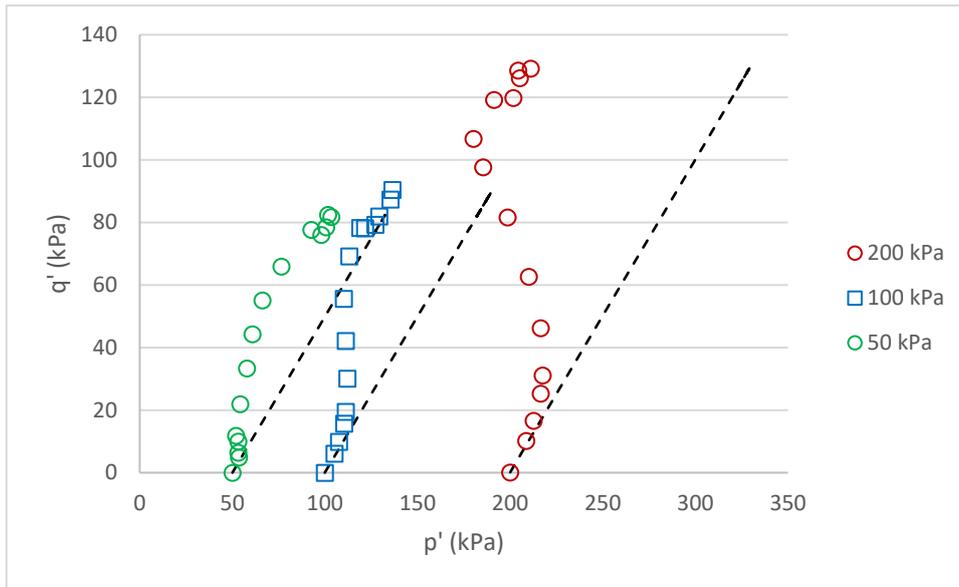


Figura A-7: Trajetória de tensão efetiva do ensaio relativo ao TG10

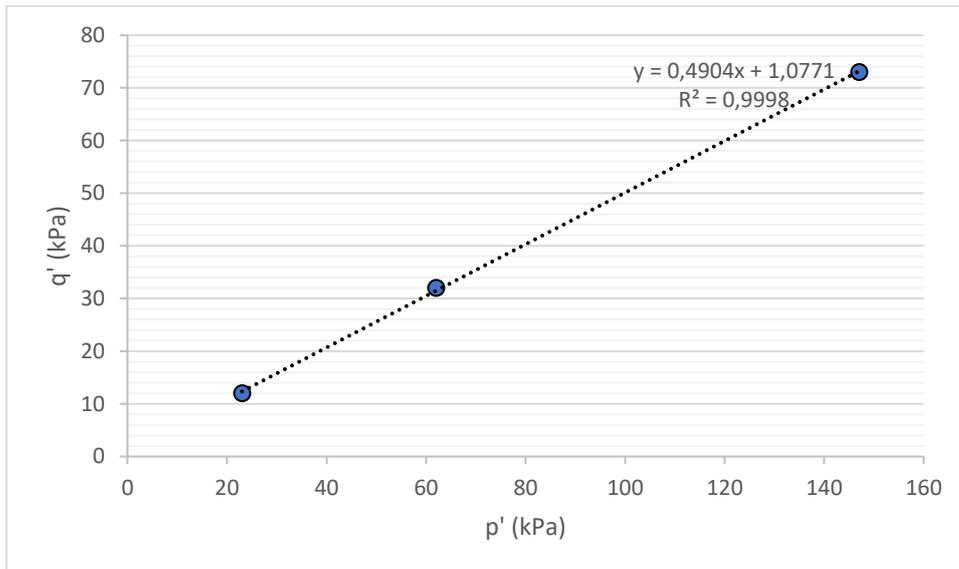


Figura A-8: Envoltória de ruptura do ensaio relativo ao TG10

CLIENTE:	UFMG
REGISTRO:	13701
MATERIAL:	TG5
PROFUNDIDADE:	-
ENSAIO:	TCIUsat

DADOS INICIAIS DE MOLDAGEM:

Tensões de Confinamento	50 kPa	100 kPa	200 kPa
-------------------------	--------	---------	---------

Peso e Geometria dos Corpos de Prova:

Diâmetro [mm]	35,58	35,42	35,30
Altura [mm]	71,40	70,95	70,74
Area [mm ²]	994,26	985,34	978,68
Volume [cm ³]	70,99	69,91	69,23
Peso úmido [g]	127,81	123,38	126,45
Peso seco [g]	111,25	109,49	109,49

Teor de Umidade:

Massa Úmida + Tara [g]	93,39	79,91	62,01
Massa Seca + Tara [g]	83,11	72,19	55,61
Tara [g]	14,00	11,39	14,30
Água [g]	10,29	7,72	6,40
Massa Seca [g]	69,11	60,80	41,31
Umidade [%]	14,88	12,69	15,49

Dados Calculados:

Densidade Real [g/cm ³]	2,730	2,730	2,730
M. E. A. Úmida [g/cm ³]	1,800	1,765	1,826
M. E. A. Seca [g/cm ³]	1,567	1,566	1,581
Índice de Vazios Inicial	0,742	0,743	0,726
Grau de Saturação Inicial [%]	54,76	46,60	58,24
Volume de Vazios [%]	42,60	42,63	42,07

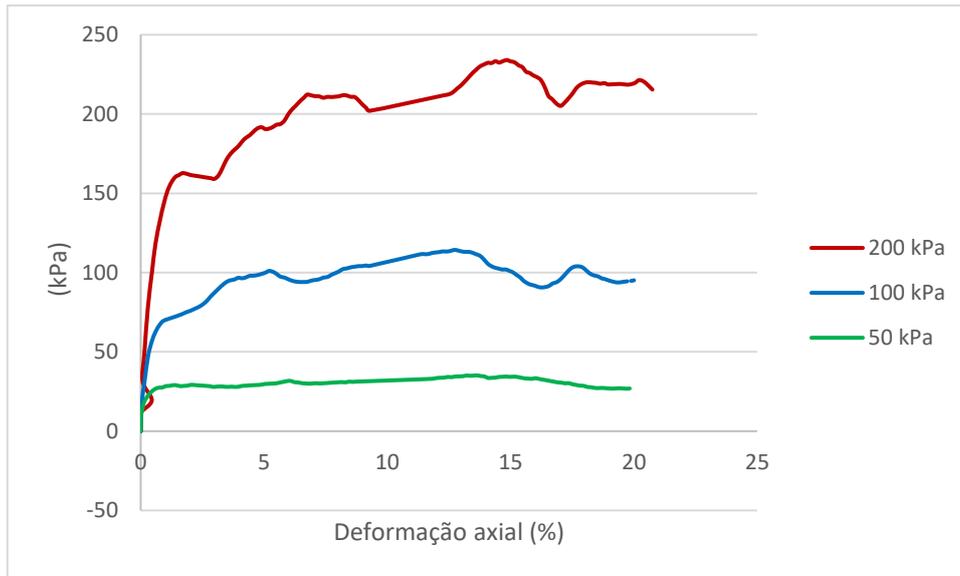


Figura A-9: Gráfico Tensão desviadora x deformação axial para o ensaio relativo ao TG5

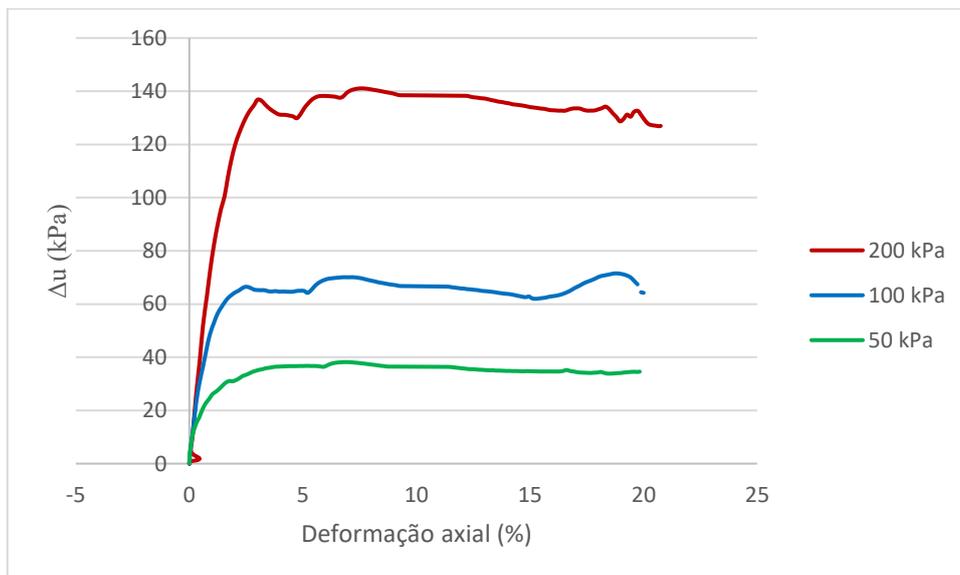


Figura A-10: Gráfico Variação da poropressão x deformação axial para o ensaio relativo ao TG5

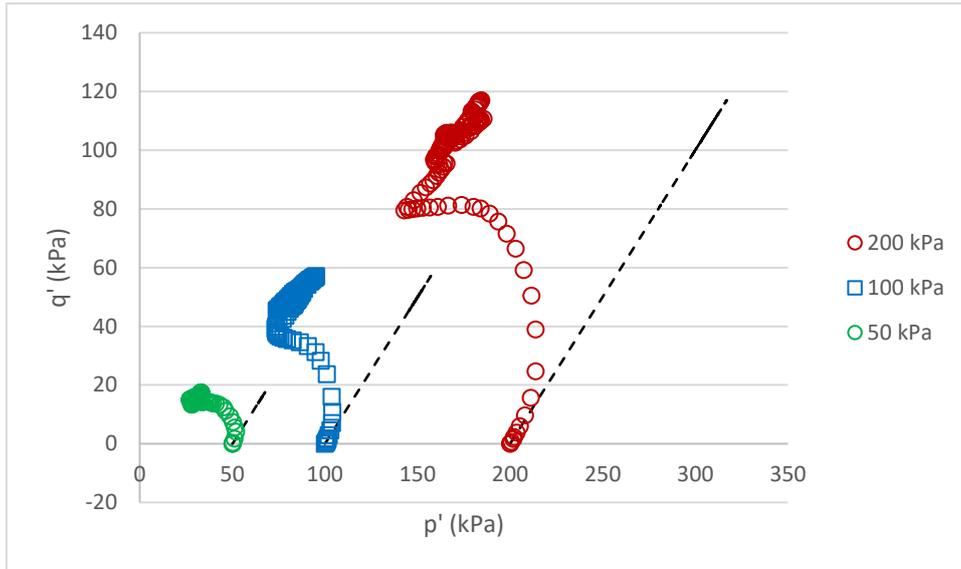


Figura A-11: Trajetória de tensão efetiva do ensaio relativo ao TG5

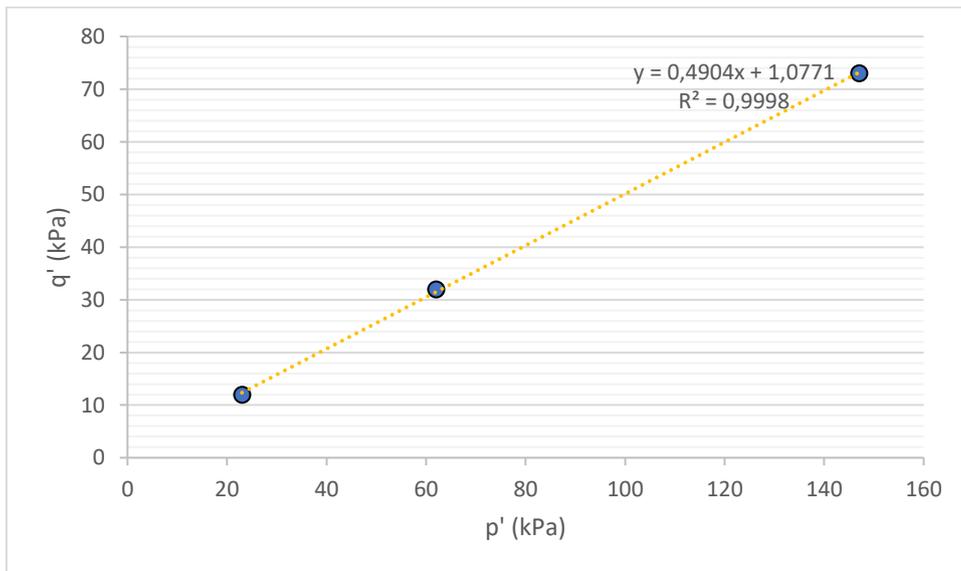


Figura A-12: Envoltória de ruptura do ensaio relativo ao TG5

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Curvas referentes ao Tubo geotêxtil 14

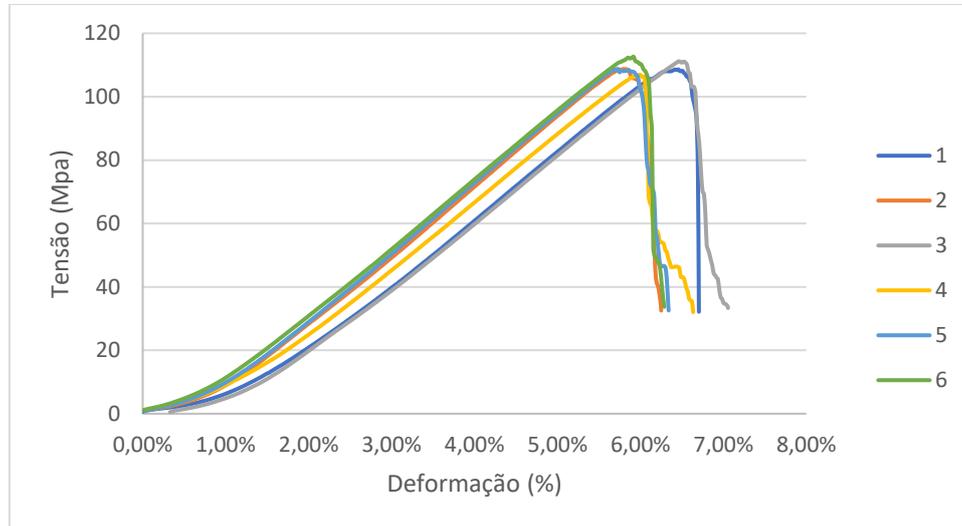


Figura B.1: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 1-6

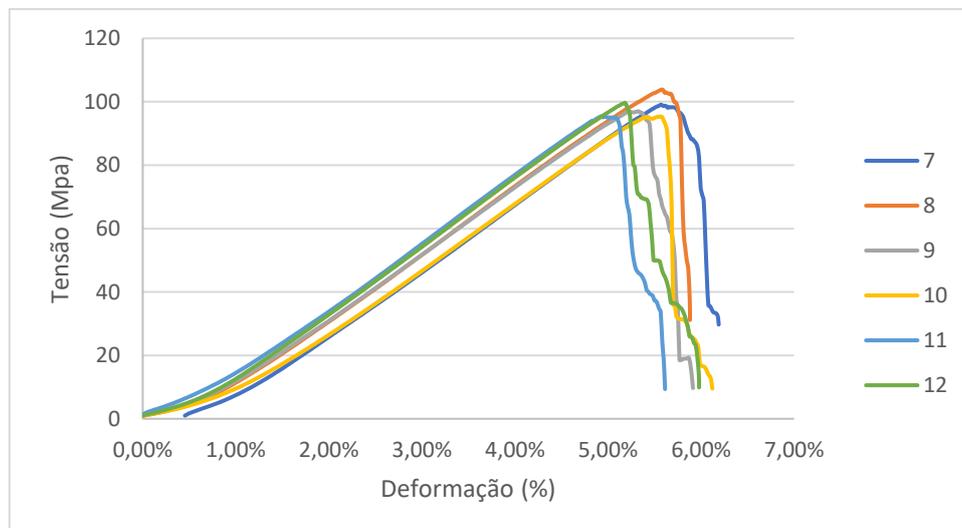


Figura B.2: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 7 - 12

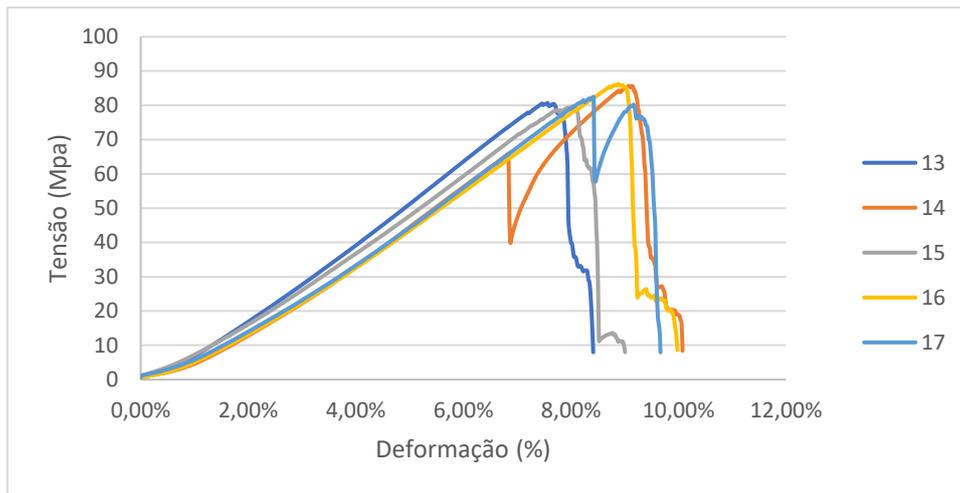


Figura B.3: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 13 - 17

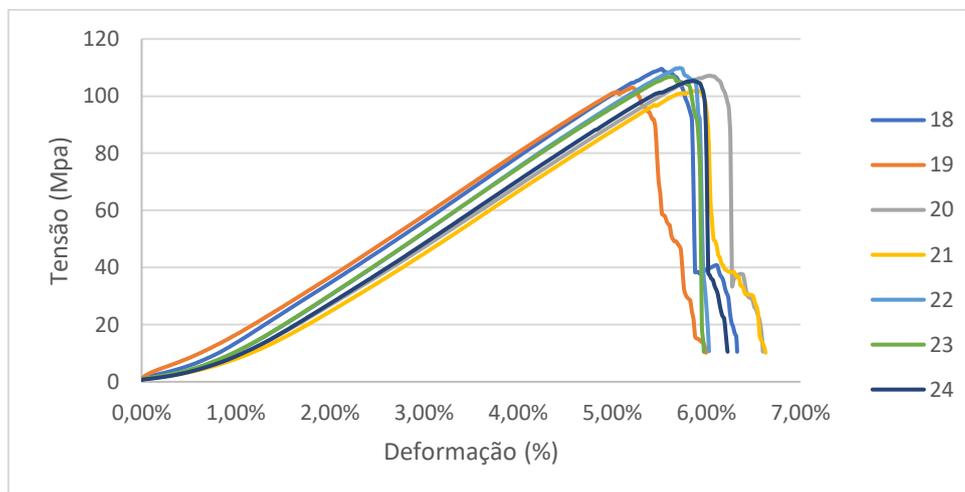


Figura B.4: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 18 - 24

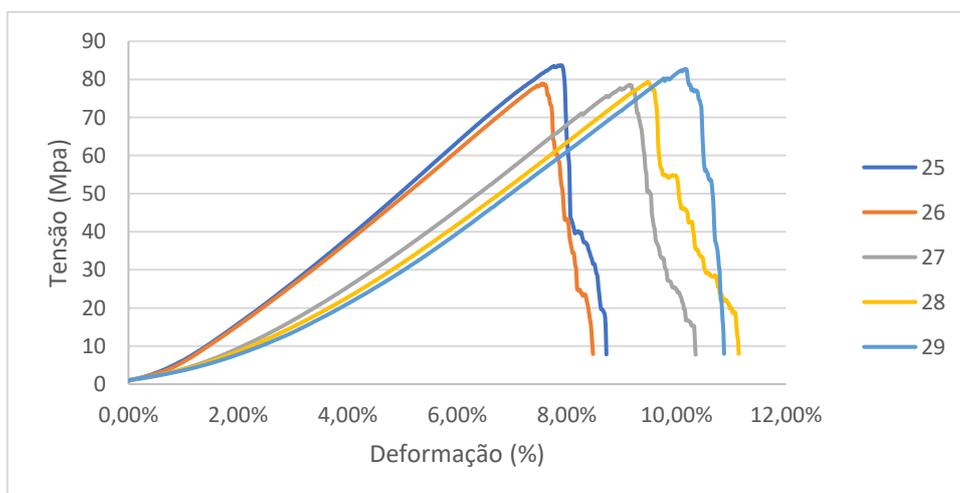


Figura B.5: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 1-6

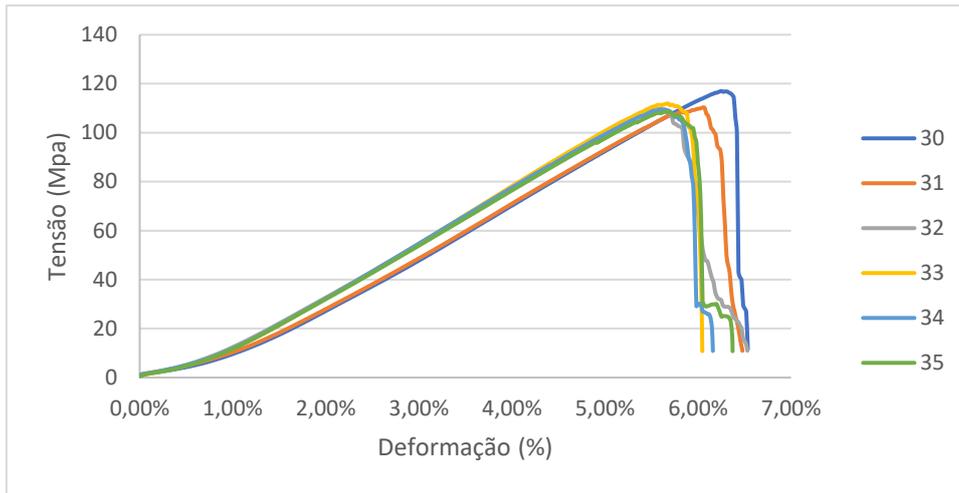


Figura B.6: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 30 - 35

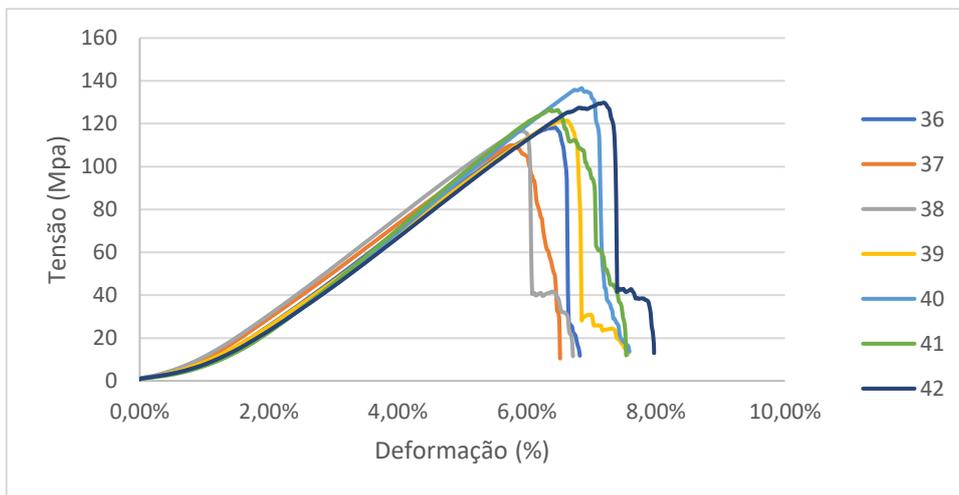


Figura B.7: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 36 - 42

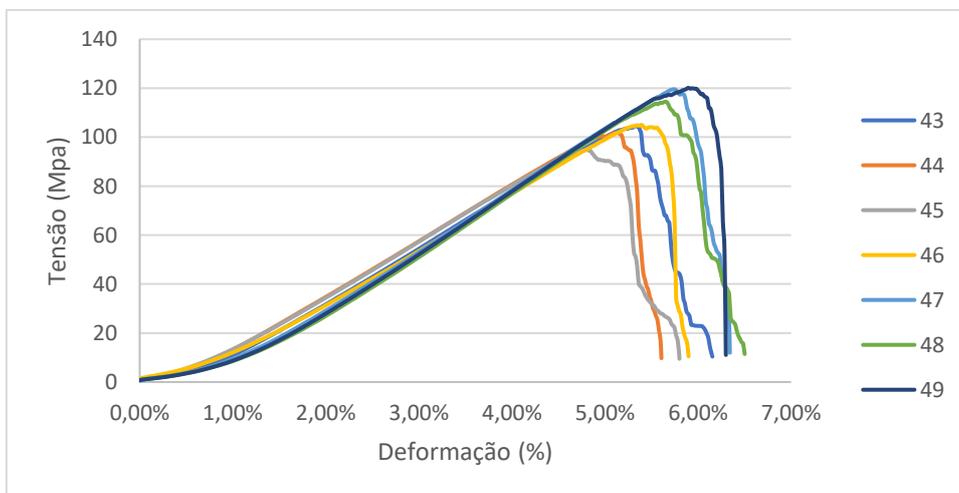


Figura B.8: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 43 - 49

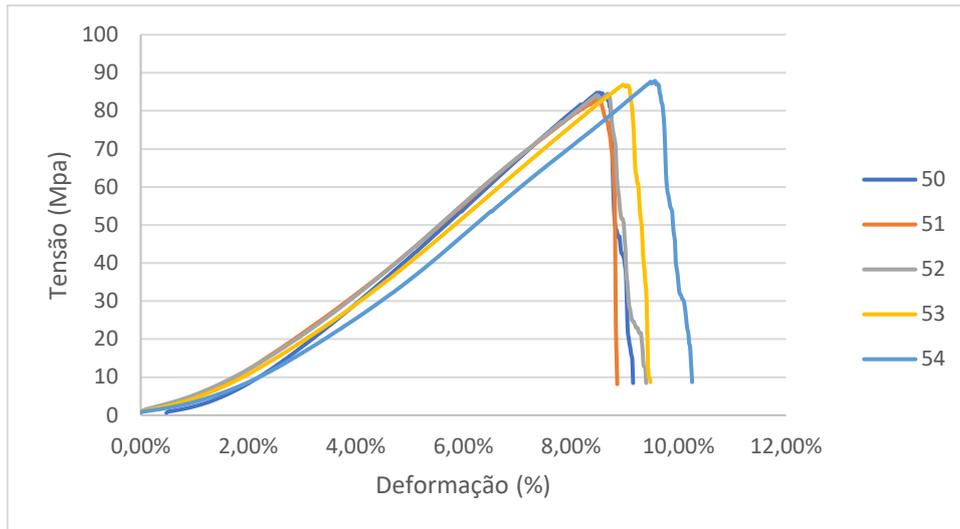


Figura B.9: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 50 - 54

Curvas referentes ao Tubo geotêxtil 10:

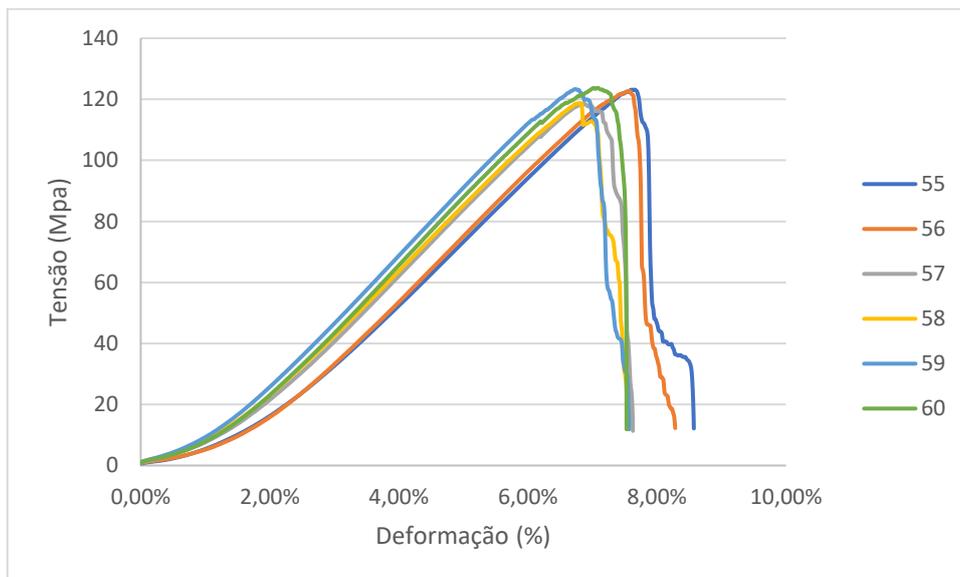


Figura B.10: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 55 - 60

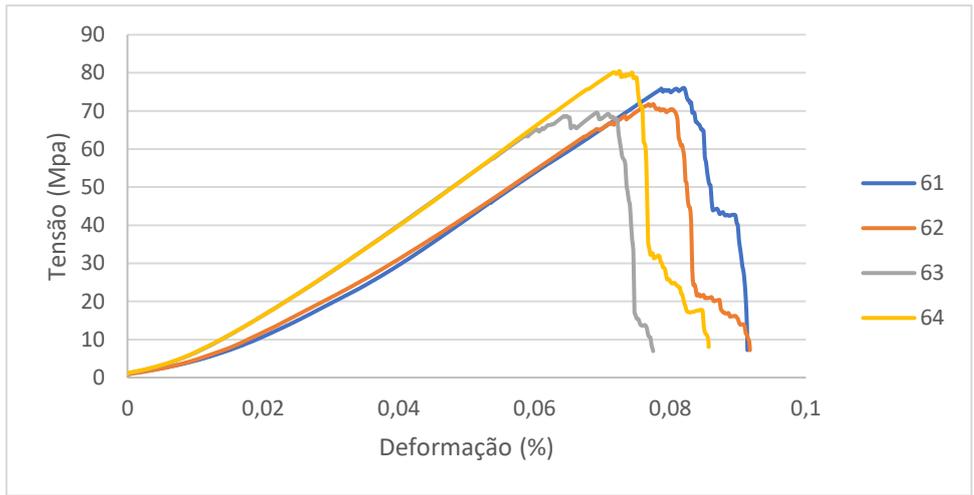


Figura B.11: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 61 - 64

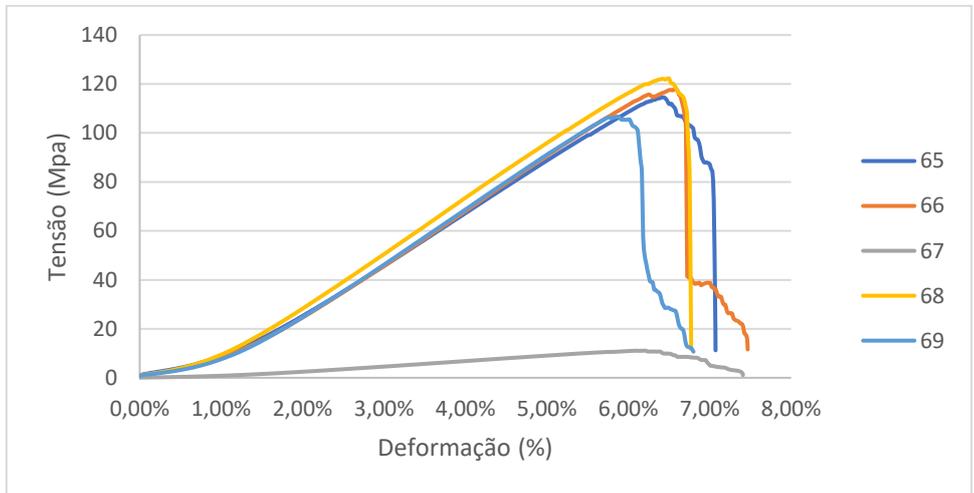


Figura B.12: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 65 – 69

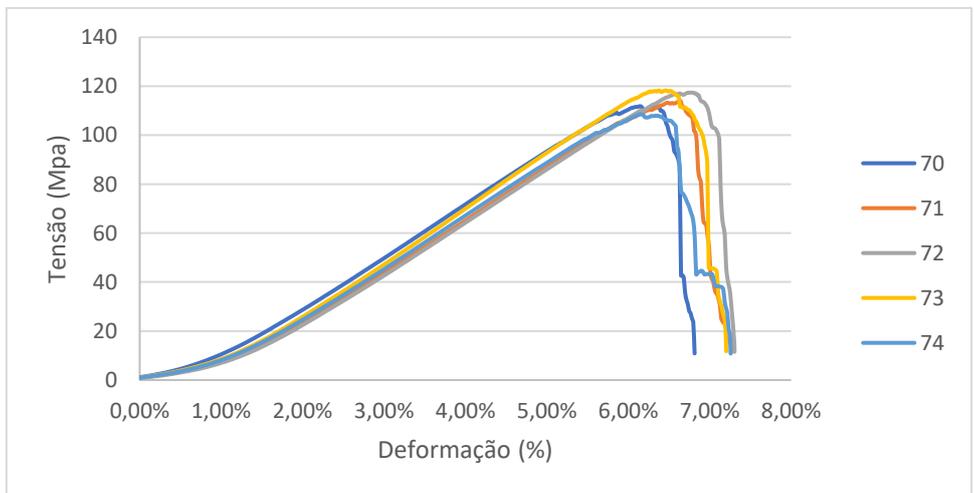


Figura B.13: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 70 - 74

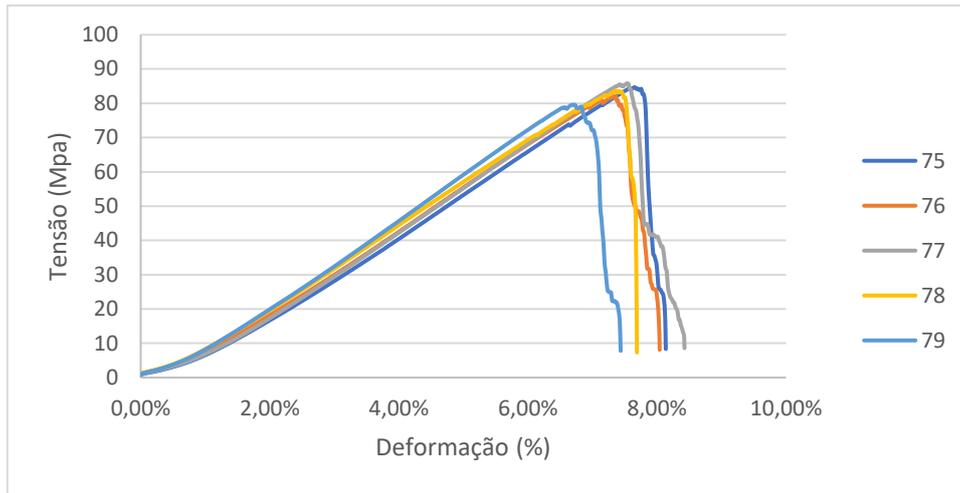


Figura B.14: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 75 - 79

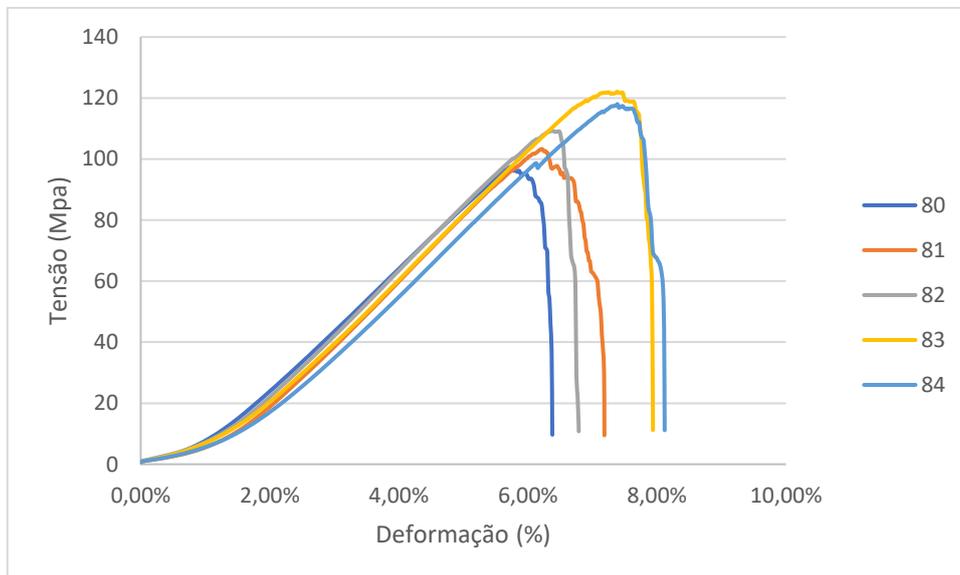


Figura B.15: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 80 - 84

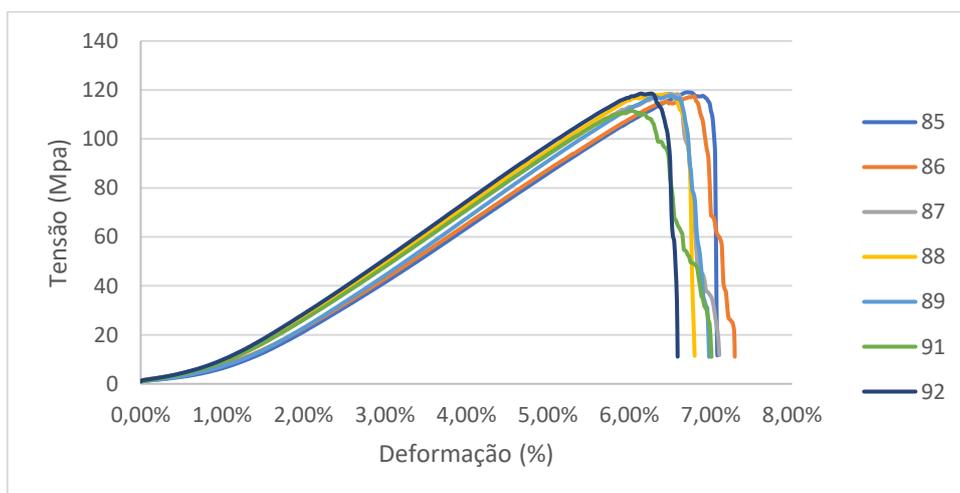


Figura B.16: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 85 - 91

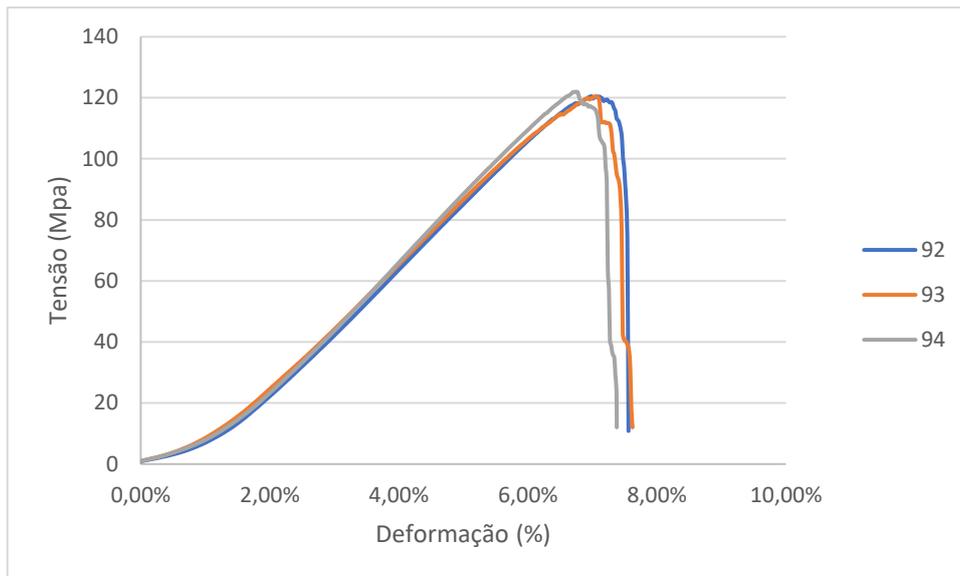


Figura B.17: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 92 - 94

Curvas referentes ao Tubo geotêxtil 5:

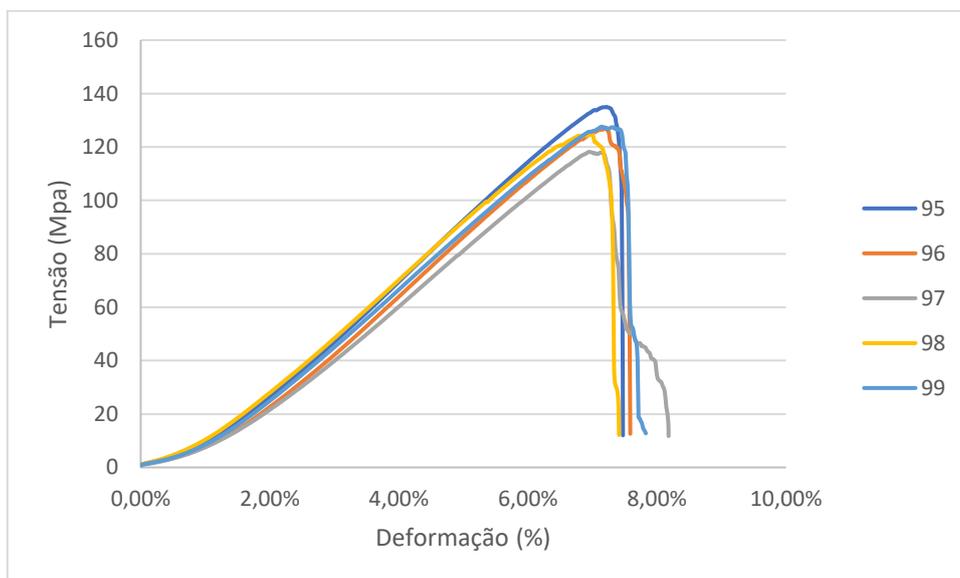


Figura B.18: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 95 - 99

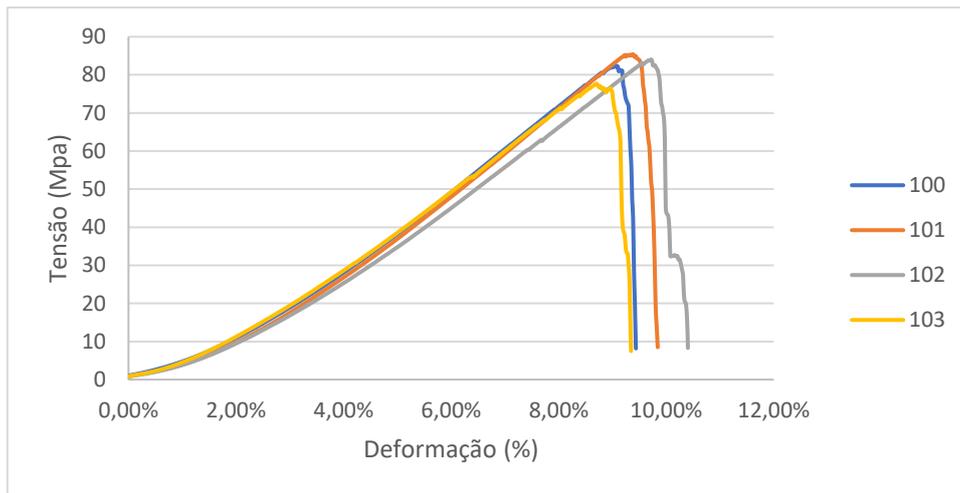


Figura B.19: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 100-103

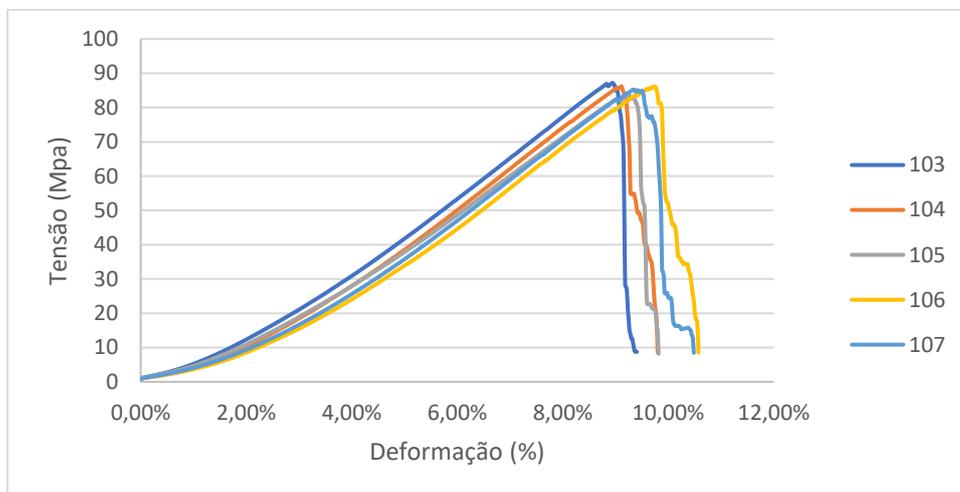


Figura B.20: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 103-107

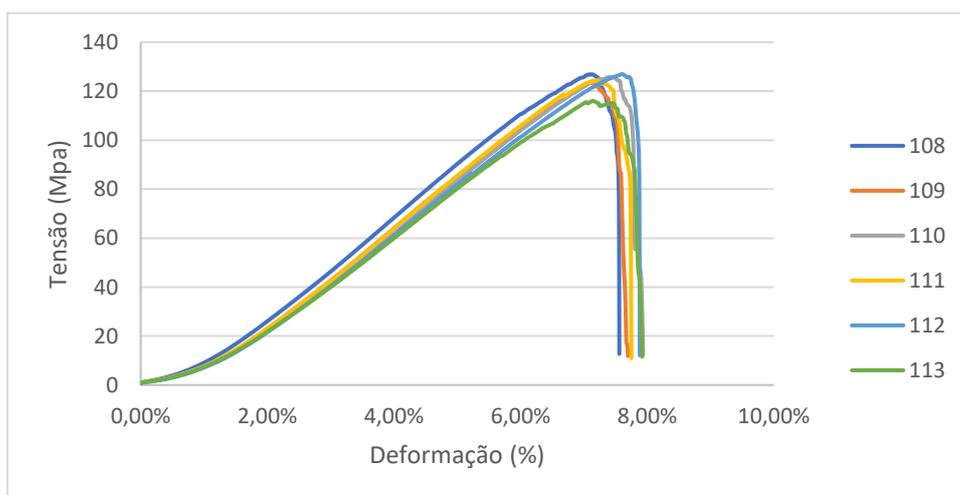


Figura B.21: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 108-113

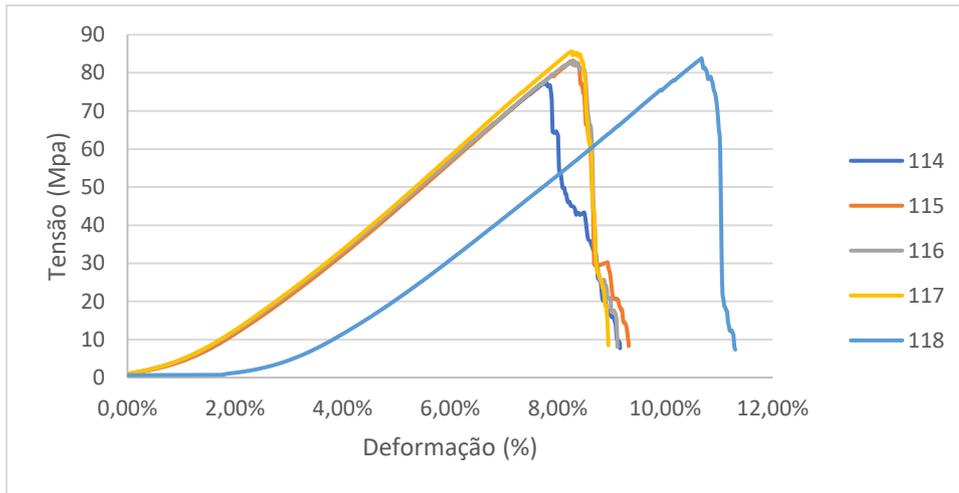


Figura B.22: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 114-118

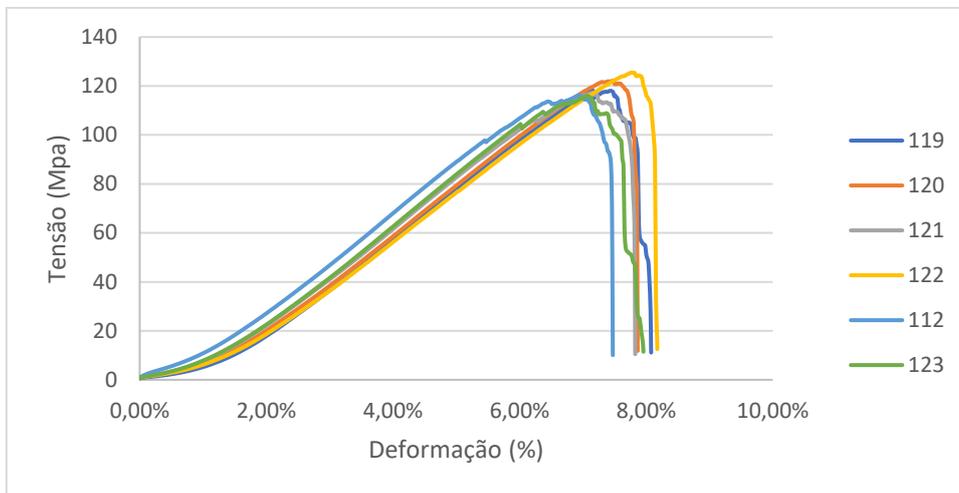


Figura B.23: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 119-123

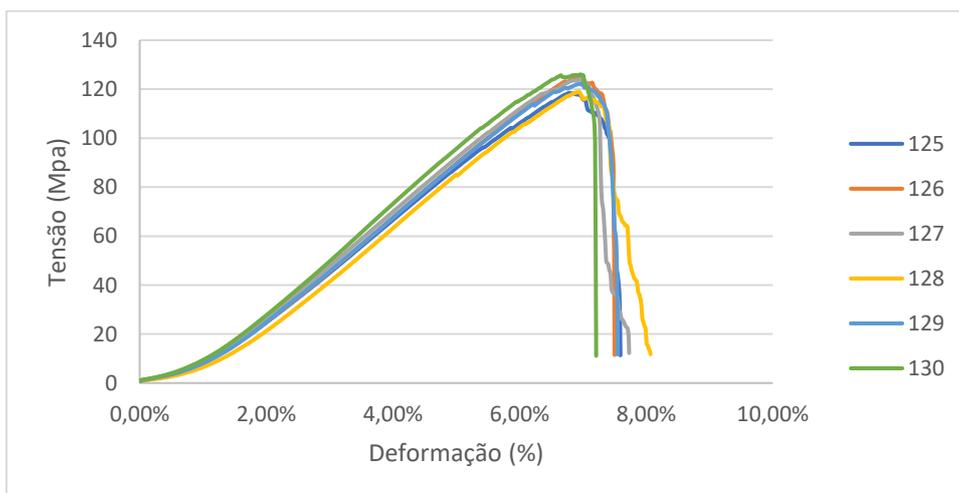


Figura B.24: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 125-130

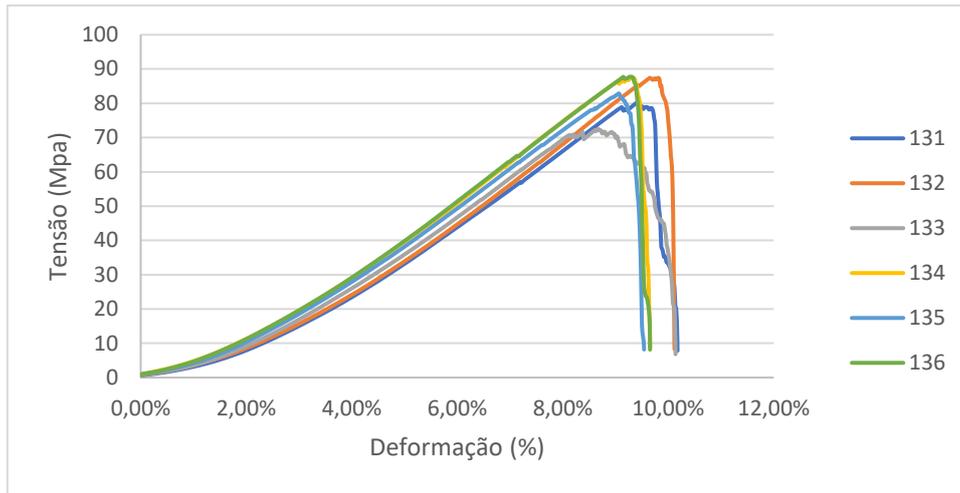


Figura B.25: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 131-136

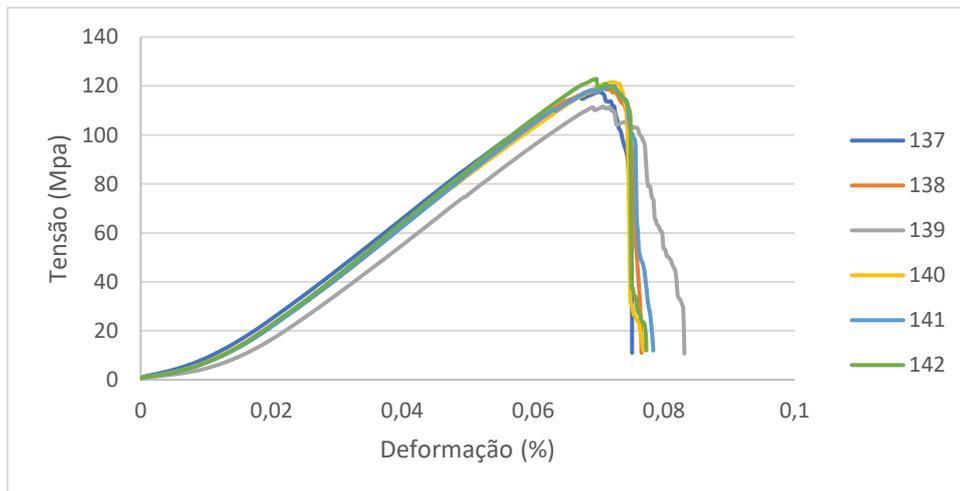


Figura B.26: Curvas tensão x deformação dos ensaios de tração dos espécimes 137-142

APÊNDICE C – ANOVA

Análise dos Resultados de Resistência a Tração

A Tabela C-1 apresenta o comando, em vermelho, e os resultados do primeiro modelo da resistência à tração. Observa-se que somente 3 fatores, marcados em negrito, com asterisco vermelho (direção do corte, a exposição à luz UV e posição transversal) tiveram relevância estatística, com o valor PR (probabilidade) superior a 1/100, considerando um teste com intervalo de confiança de 99%. O intervalo de confiança escolhido foi maior como forma de compensar a não homogeneidade de variância.

Tabela C-1: Comando e resultados do primeiro modelo para resistência a tração

```
lm = ols('Res_Tracao ~  
C(Corte)+C(UV)+C(Nivel)+C(pos_long)+C(pos_transv)', data=dataframe).fit()  
table = sm.stats.anova_lm(lm, typ=2) # Type 2 ANOVA DataFrame  
print(table)
```

Fatores	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Corte)	20453.779167	1.0	562.305301	3.683101e-50 *
C(UV)	334.939461	1.0	9.207992	2.887620e-03 *
C(Nivel)	26.442016	2.0	0.363465	6.959360e-01
C(pos_long)	120.887645	1.0	3.323384	7.049732e-02
C(pos_transv)	1210.907912	1.0	33.289689	5.120019e-08 *
Residual	4946.981579	136.0	NaN	NaN

Nota: **Sum_sq** são as somas dos quadrados para cada um dos grupos, **df** são os graus de liberdade para cada um dos fatores, **F** é o valor do teste de hipótese *F-test*

Eliminando-se do modelo o fator **Nível**, obtemos o modelo cujo comando e resultados estão apresentados na Tabela C-2. Nota-se que a eliminação desse fator não gerou impacto nos regressores remanescentes, ou seja, direção do corte, posição transversal e exposição à radiação UV continuaram relevantes. Por fim, elimina-se o fator posição longitudinal e obtém-se o modelo simplificado efetivamente utilizado cujo comando e resultados estão apresentados na Tabela C-3

Tabela C-2: Comando e resultados modelo para resistência a tração sem o fator Nível

```
lm = ols('Res_Tracao ~
C(Corte)+C(UV)+C(pos_long)+C(pos_transv)',data=dataframe).fit()
table = sm.stats.anova_lm(lm, typ=2) # Type 2 ANOVA DataFrame
print(table)
```

Fatores	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Corte)	20898.229623	1.0	579.873327	2.891968e-51 *
C(UV)	2060.769412	1.0	57.181170	5.035633e-12 *
C(pos_long)	166.573548	1.0	4.621997	3.330786e-02
C(pos_transv)	1214.202374	1.0	33.691063	4.236397e-08 *
Residual	4973.423595	138.0	NaN	NaN

Valem as notas da Tabela C-1

Tabela C-3: Comando e resultados do modelo simplificado para resistência a tração

```
lm = ols('Res_Tracao ~
C(Corte)+C(UV)+C(pos_transv)',data=dataframe).fit()
table = sm.stats.anova_lm(lm, typ=2) # Type 2 ANOVA DataFrame
print(table)
```

Fatores	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Corte)	21008.236581	1.0	568.121889	5.971778e-51 *
C(UV)	1972.836087	1.0	53.351044	1.974221e-11 *
C(pos_transv)	1160.086974	1.0	31.372019	1.100789e-07 *
Residual	5139.997142	139.0	NaN	NaN

Valem as notas da Tabela C-1

Depois de obter o modelo simplificado, avaliou-se se as premissas para o teste de análise de variância são atendidas pelos dados. Os testes utilizados foram *Shapiro Wilk* e *Barlett* que avaliam, respectivamente, normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias. O valor obtido para o valor de probabilidade do teste de *Shapiro Wilk* foi de 0,015, superior a 1/100. Dessa forma, não há evidência para rejeitar a hipótese nula de distribuição normal dos dados. Para uma confirmação visual, o gráfico Normal Q-Q está apresentado na Figura C-1. Quanto mais próximos da linha vermelha, maior a evidência de normalidade dos dados. Nota-se que os pontos que fogem da normalidade estão localizados nas bordas, local onde há maior tolerância.

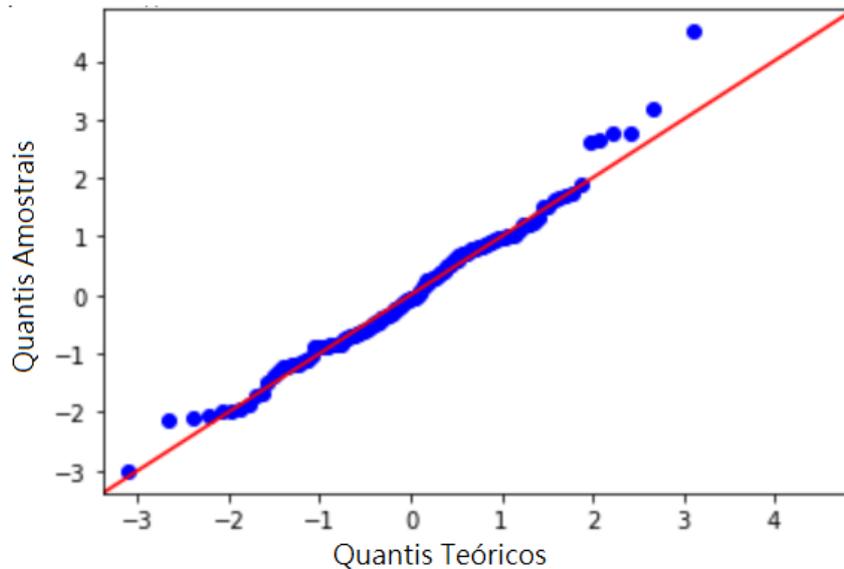


Figura C-1: Gráfico Normal Q-Q para o modelo simplificado – Resistência à tração

O resultado do teste de *Barlett*, teste de homogeneidade de variância dos grupos gerou um valor de probabilidade de $4,93 \cdot 10^{-17}$, muito inferior a $1/100$, rejeitando a hipótese nula de homogeneidade das variâncias.

Análise dos resultados de alongamento na ruptura

A Tabela C-4 apresenta o comando e resultado do primeiro modelo do alongamento na ruptura. Observa-se que somente a direção do corte, a exposição à luz UV e posição transversal tiveram relevância estatística, com valor de probabilidade (PR) inferior a $1/100$, considerando um teste com intervalo de confiança de 99%. Esses foram os mesmos fatores que tiveram relevância estatística na análise da resistência a tração.

Eliminando-se do modelo o fator Nível, obtemos o modelo cujo comando, em vermelho, e os resultados estão apresentados na Tabela C-5. Nota-se que a eliminação desse fator não gerou impacto nos regressores remanescentes, ou seja, Corte, posição transversal e exposição à radiação UV continuaram relevantes. Por fim, elimina-se o fator posição longitudinal e obtém-se o modelo simplificado efetivamente utilizado cujo comando e resultados estão apresentados na Tabela C-6.

Tabela C-4: Comando e resultados do primeiro modelo para alongamento na ruptura

```
lm = ols('Along ~
C(Corte)+C(UV)+C(Nivel)+C(pos_long)+C(pos_transv)', data=dataframe).fit()
table = sm.stats.anova_lm(lm, typ=2) # Type 2 ANOVA DataFrame
print(table)
```

Fatores	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Corte)	164.054736	1.0	636.190779	3.900703e-53 *
C(UV)	6.855507	1.0	26.585092	8.707792e-07 *
C(Nivel)	0.016681	2.0	0.032343	9.681819e-01
C(pos_long)	0.106684	1.0	0.413711	5.211749e-01
C(pos_transv)	16.412304	1.0	63.645567	5.484287e-13 *
Residual	35.070367	136.0	NaN	NaN

Valem as notas da Tabela C-1

Tabela C-5: Comando e resultados do modelo de alongamento na ruptura sem o fator
Nível

```
lm = ols('Along ~
C(Corte)+C(UV)+C(pos_long)+C(pos_transv)', data=dataframe).fit()
table = sm.stats.anova_lm(lm, typ=2) # Type 2 ANOVA DataFrame
print(table)
```

Fatores	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Corte)	168.417807	1.0	662.399914	1.567238e-54 *
C(UV)	31.835321	1.0	125.210713	4.364162e-21 *
C(pos_long)	0.151177	1.0	0.594591	4.419675e-01
C(pos_transv)	16.567784	1.0	65.162341	3.035786e-13 *
Residual	35.087048	138.0	NaN	NaN

Valem as notas da Tabela C-1

Tabela C-6: Comando e resultados do modelo simplificado de alongamento na ruptura

```
lm = ols('Along ~
C(Corte)+C(UV)+C(pos_transv)', data=dataframe).fit()
table = sm.stats.anova_lm(lm, typ=2) # Type 2 ANOVA DataFrame
print(table)
```

Fatores	sum_sq	df	F	PR(>F)
C(Corte)	168.269653	1.0	663.753123	8.737274e-55 *
C(UV)	31.698079	1.0	125.035610	4.193634e-21 *
C(pos_transv)	16.430401	1.0	64.811032	3.313370e-13 *
Residual	35.238225	139.0	NaN	NaN

Valem as notas da Tabela C-1

Os testes de *Shapiro Wilk* e *Barlett* que avaliam, respectivamente, normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias também foram realizados. O valor obtido para a probabilidade no teste Shapiro Wilk foi de 0,029, superior a 1/100. Dessa forma, não há evidência para rejeitar a hipótese nula de distribuição normal dos dados. Para uma confirmação visual, o gráfico Normal Q-Q está apresentado na Figura C-2. O resultado do teste de *Barlett*, teste de homocedasticidade, gerou um valor-p de $2,97.10^{-17}$, rejeitando a hipótese nula de homogeneidade das variâncias.

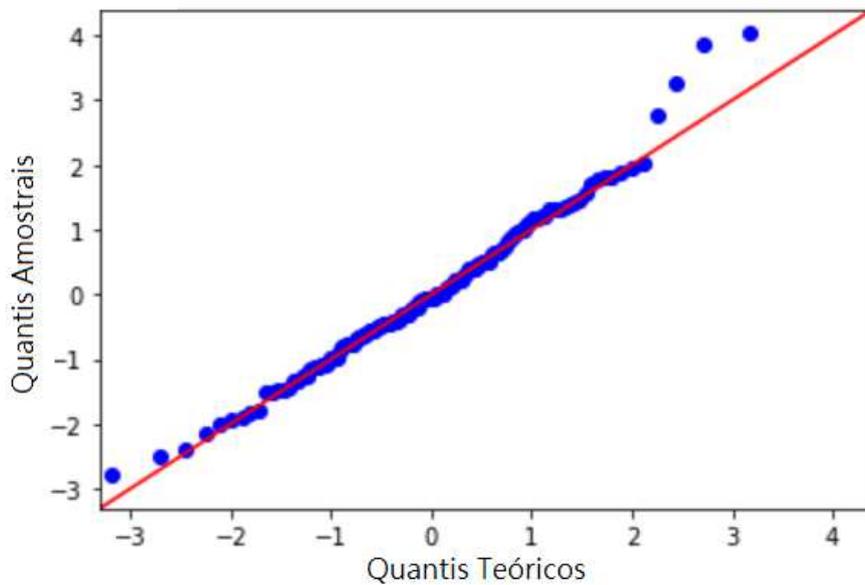


Figura C-2: Gráfico Normal Q-Q para o modelo simplificado – Alongamento na ruptura

A Tabela C-7 apresenta os dados de entrada para a análise de variância. Ao todo, foram analisados resultados de 143 ensaios de tração. Cada ensaio de tração, correspondente à ruptura de um espécime geotêxtil, foi definido com o valor da resistência à tração, o valor da resistência à ruptura, se o sentido do corte era MD ou CMD, se esteve ou não exposto à intempéries e radiação UV (UV – ‘S’ para sim, ou ‘N’ para não), a qual nível do empilhamento o espécime foi obtido (TG 14, TG 10 ou TG 5), em qual posição o espécime foi retirado, se Borda ‘B’ ou Centro ‘C’ no sentido longitudinal ou transversal das amostras.

Tabela C-7: Dados de entrada da modelagem ANOVA

num	Res_Tracao	Along	Corte	UV	Nivel	pos_long	pos_transv
"1"	108.61	7	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"

"2"	108.74	6.25	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"3"	111.16	7	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"4"	106.93	6.63	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"5"	108.69	6.34	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"6"	112.59	6.29	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"7"	99.08	6.18	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"8"	103.86	5.88	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"9"	96.98	5.9	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"10"	95.36	6.12	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"11"	95.41	5.6	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"12"	99.6	5.98	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"13"	80.68	8.41	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"14"	85.66	10.07	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"15"	79.7	8.99	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"16"	86.2	9.98	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"17"	82.49	9.65	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"18"	109.54	6.32	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"19"	102.99	5.98	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"20"	107.14	6.59	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"21"	102.01	6.62	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"22"	109.81	6.01	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"23"	106.76	5.97	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"24"	105.33	6.22	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"25"	83.73	8.71	"CMD"	"S"	"TG14"	"C"	"C"
"26"	78.91	8.47	"CMD"	"S"	"TG14"	"C"	"C"
"27"	78.52	10.34	"CMD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"28"	79.37	11.13	"CMD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"29"	82.74	10.86	"CMD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"30"	117.03	6.52	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"31"	110.33	6.47	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"32"	109.8	6.52	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"33"	111.91	6.03	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"34"	109.45	6.15	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"35"	108.47	6.37	"MD"	"S"	"TG14"	"C"	"B"
"36"	118.31	6.82	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"

"37"	110.01	6.5	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"38"	116.56	6.7	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"39"	121.51	7.55	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"40"	136.62	7.57	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"41"	126.85	7.52	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"42"	129.81	7.97	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"43"	104.51	6.14	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"44"	101.82	5.6	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"45"	95.13	5.8	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"46"	104.96	5.9	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"47"	119.54	6.33	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"48"	114.48	6.48	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"49"	120.17	6.28	"MD"	"S"	"TG14"	"B"	"C"
"50"	84.78	9.14	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"51"	83.01	8.85	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"52"	84.5	9.38	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"53"	86.84	9.47	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"54"	87.84	10.25	"CMD"	"S"	"TG14"	"B"	"B"
"55"	123.17	8.56	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"56"	122.68	8.27	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"57"	118.73	7.62	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"58"	118.74	7.56	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"59"	123.33	7.56	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"60"	123.74	7.52	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"61"	76.03	9.13	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"62"	71.77	9.17	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"63"	69.58	7.74	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"64"	80.45	8.56	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"65"	114.58	7.07	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"66"	117.82	7.46	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"67"	110.67	7.41	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"68"	122.25	6.77	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"69"	106.66	6.79	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"70"	111.83	6.8	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"71"	114.02	7.26	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"

"72"	117.41	7.3	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"73"	118.26	7.19	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"74"	108.58	7.25	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"75"	84.68	8.13	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"76"	82.14	8.04	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"77"	85.82	8.42	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"78"	83.67	7.69	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"79"	79.62	7.42	"CMD"	"S"	"TG10"	"B"	"C"
"80"	97.4	6.37	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"81"	103.28	7.18	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"82"	109.22	6.79	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"83"	122.08	7.92	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"84"	117.99	8.11	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"85"	119.07	7.07	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"86"	117.39	7.29	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"87"	118.44	7.09	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"88"	118.38	6.79	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"89"	117.63	6.98	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"90"	111.56	7	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"91"	118.56	6.59	"MD"	"S"	"TG10"	"B"	"B"
"92"	120.49	7.56	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"93"	120.48	7.62	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"94"	121.97	7.37	"MD"	"N"	"TG10"	"B"	"B"
"95"	135.04	7.47	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"96"	127.17	7.57	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"97"	118.18	8.18	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"98"	124.69	7.4	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"99"	127.64	7.82	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"100"	82.46	9.43	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"101"	85.42	9.84	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"102"	84.05	10.4	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"103"	77.65	9.33	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"104"	85.26	10.48	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"105"	86.23	10.57	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"106"	83.6	9.8	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"

"107"	86.18	9.79	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"108"	87.17	9.4	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"109"	126.89	7.55	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"110"	123.39	7.69	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"111"	125.86	7.92	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"112"	124.36	7.74	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"113"	77.53	9.15	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"114"	83.2	9.32	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"115"	83.09	9.1	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"116"	85.61	8.93	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"117"	83.78	11.29	"CMD"	"N"	"TG5"	"B"	"C"
"118"	118.1	8.07	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"119"	122.12	7.85	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"120"	117.18	7.81	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"121"	125.51	8.17	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"122"	116.34	7.46	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"123"	116.06	7.95	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"124"	126.04	7.21	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"125"	122.34	7.55	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"126"	118.95	8.06	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"127"	124.12	7.72	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"128"	125.63	7.5	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"129"	118.57	7.58	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"130"	80.36	10.17	"CMD"	"N"	"TG5"	"C"	"C"
"131"	87.44	10.12	"CMD"	"N"	"TG5"	"C"	"C"
"132"	72.49	10.14	"CMD"	"N"	"TG5"	"C"	"C"
"133"	87.53	9.65	"CMD"	"N"	"TG5"	"C"	"C"
"134"	82.89	9.53	"CMD"	"N"	"TG5"	"C"	"C"
"135"	87.78	9.65	"CMD"	"N"	"TG5"	"C"	"C"
"136"	117.5	7.51	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"137"	118.91	7.65	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"138"	111.6	8.31	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"139"	122.85	7.72	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"140"	119.9	7.84	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"
"141"	121.54	7.67	"MD"	"N"	"TG5"	"C"	"B"

"142"	127.01	7.88	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"
"143"	116.02	7.92	"MD"	"N"	"TG5"	"B"	"B"