

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**UTILIZAÇÃO DE TUBOS GEOTÊXTEIS PARA
CONFINAMENTO, DESAGUAMENTO E
EMPILHAMENTO DE REJEITO DE OURO**

Laís Cristina Freitas Silva

Belo Horizonte

2017

Laís Cristina Freitas Silva

**UTILIZAÇÃO DE TUBOS GEOTÊXTEIS PARA
CONFINAMENTO, DESAGUAMENTO E
EMPILHAMENTO DE REJEITO 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

Coorientadora: Karla Cristina Araújo Pimentel Maia

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017

F866u	<p>Freitas Silva, Laís Cristina. Utilização de tubos geotêxteis para confinamento, desaguamento e empilhamento de rejeito de ouro [manuscrito] / Laís Cristina Freitas Silva. - 2017. xvii, 142 f., enc.: il.</p> <p>Orientadora: Maria das Graças Gardoni Almeida. Coorientadora: Karla Cristina Araújo Pimentel Maia.</p> <p>Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 136-142.</p> <p>Bibliografia: f. 129-135.</p> <p>1. Mecânica do solo - Teses. 2. Resíduos - Teses. 3. Tubos - Teses. 4. Ouro - Minas e mineração - Teses. I. Gardoni, Maria das Graças A. II. Maia, Karla Cristina Araújo Pimentel. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p>
	CDU: 624.13(043)



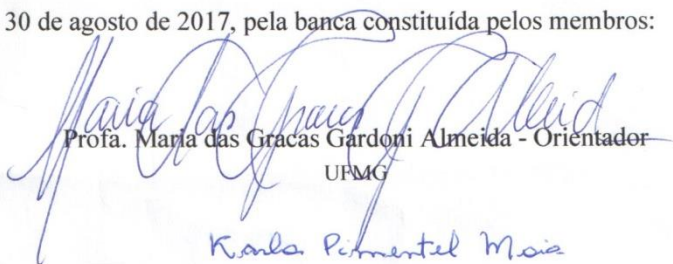
FOLHA DE APROVAÇÃO


UTILIZAÇÃO DE TUBOS GEOTÊXTEIS PARA CONFINAMENTO, DESAGUAMENTO E EMPILHAMENTO DE REJEITO DE OURO


LAÍS CRISTINA FREITAS SILVA

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

Aprovada em 30 de agosto de 2017, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Maria das Graças Gardoni Almeida - Orientador
UFMG


Prof. Karla Cristina Araujo Pimentel Maia
UFMG


Prof. Felipe de Moraes Russo
CEFET-MG


Prof. Lucio Flavio de Souza Villar
UFMG

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2017.

AGRADECIMENTOS

Concluir esta dissertação não foi tarefa fácil, e talvez bem mais complexa que anunciaram ser. No entanto, nenhum desafio é dado sem que possa ser superado, mas para isso, aqueles que estiveram comigo nessa caminhada foram fundamentais para que esta jornada fosse concluída.

Literalmente renasci durante esta pesquisa, e por isso, preciso agradecer a nova oportunidade de vida que me foi dada. Meus pais, Vânia e Dirceu, e minha irmã Lara, foram fundamentais no replanejamento deste recomeço. Obrigada por compreenderem o momento. Por mais complexo que fosse para vocês e silenciosamente me acalentarem com a ideia do “tudo passa”. Enfrentar tudo isso só foi possível com o apoio de vocês.

Professora Gardoni, com a senhora tenho a dívida de poder estar aqui hoje. Quando me propôs a pesquisa, alertou que os obstáculos seriam muitos. No entanto, jamais poderíamos imaginar que haveria uma barragem no meio do caminho, e nós no caminho da barragem. Passado todo o susto, só tenho a dizer: “que bom que foi com a senhora!”. Uma pessoa perspicaz para perceber o quão grande são os pequenos sinais ao nosso entorno; que tem a sutileza em traduzir os sentimentos mais difíceis de serem explicados; motivadora quando tudo parece sem perspectiva; e que deu liberdade para as ideias desenvolvidas no trabalho. Obrigada pela paciência e dedicação!

À professora Karla, por transmitir tanta tranquilidade. E pela visão objetiva que permitiu concretizar ideias e conceitos que pareciam muito complexos de serem abordados.

Bruno, obrigado pelos incentivos quando o cansaço começava a abater. Às vezes parece ser impossível atingir os objetivos traçados, mas com paciência chegamos.

Rodrigo e Alan, obrigada por me ensinarem o significado da palavra “resiliência”.

Agradeço à Yamana Gold e a Brio Gold, principalmente à pessoa do Rafael Jabur, por acreditar no projeto de pesquisa e permitir que a proposta fosse colocada em prática. Ainda ao Rafael Magno, Tiandra e Gabriel, pela presteza em compartilhar conhecimento, informações e principalmente, pelo tempo dedicado.

À Allonda Ambiental, nas pessoas do Leo César, Priscila, Flávio, Tiago, Lucas e Murilo, que têm consigo a visão da importância das pesquisas acadêmicas para o desenvolvimento de novos métodos e que, não pouparam esforços para proporcionarem a aplicação e o aperfeiçoamento da metodologia proposta, tanto nos ensaios de bancada quanto de campo.

Ao Elder Beirigo e ao Felipe Russo, que ajudaram a compor a estrutura de um projeto de pesquisa muito mais amplo. Pelas dúvidas sanadas, conhecimentos repassados e experiência compartilhada.

Aos professores do ETG, por compreenderem os percalços que tivemos durante a pesquisa e, aos alunos Domingos, Luis Paulo e Fernanda, pelo apoio na execução dos ensaios de laboratório e estrutura da dissertação. Fernanda, para você o agradecimento é especial, tanto pelo momento que entrou na pesquisa e abraçou a causa, quanto pela sua dedicação na preparação execução do trabalho de campo. Tenho certeza que a semente que plantou aqui dará muitos frutos na continuidade desta pesquisa.

Aos colegas da TEC3, por proporcionarem um ambiente onde as ideias fomentam. Em especial ao Fet, Rc e Luciana, que com sugestões simples permitiram a obtenção de resultados muito importantes nesta pesquisa. Luciana, obrigada ainda pela sua habilidade com gráficos! E Gabriela, obrigada pelos almoços que por vezes deram aquela injeção de ânimo nos dias que prometiam ser longos.

Aos meus familiares e amigos que compreenderam as ausências. Fé, Jojoca, Maridan, Zeca e Camila... Estou voltando!

À FUNDEP e FAPEMIG pela apoio.

RESUMO

A aplicação de alternativas de disposição de rejeito, como os tubos geotêxteis, permitam não só reduzir a área ocupada, como ainda diminuir o risco ou o passivo de um potencial acidente, não só pelos aspectos de segurança geotécnica e convívio sustentável com meio ambiente e comunidade, mas ainda pela conscientização da relevância destes aspectos frente à extração mineral. O uso de tubos geotêxteis para a disposição de rejeito de ouro, é uma das técnicas de engenharia disponíveis, e permite a separação física natural entre a fração sólida e líquida do rejeito. Para tanto, este trabalho tem por objetivo apresentar a experiência com a aplicação de tubos fabricados com geotêxtil tecido como alternativa no desaguamento, confinamento e empilhamento de rejeito de ouro. A pesquisa abrangeu a realização de ensaios de bancada para a caracterização do rejeito e avaliação do desaguamento e ainda ensaios de protótipo em grande escala na área da mineradora, onde atualmente é utilizada a técnica de ciclonagem para a disposição do rejeito de ouro gerado. A fase experimental teve início com os ensaios de caracterização do rejeito (granulometria por peneiramento e sedimentação, massa específica dos grãos, limites de consistência e adensamento hidráulico), e do geotêxtil (gramatura e espessura) em laboratório, prosseguindo para os ensaios de avaliação da qualidade do desaguamento que englobaram ensaio de jar-test, cone geotêxtil e bolsa pequena, também conhecido como GDT. Concluída a fase de análise de bancada, foi iniciado o ensaio de grande escala, a partir do qual foi possível compreender o tempo de enchimento de tubos geotêxteis em função do volume bombeado; a modificação da forma e comportamento associada à variação da altura e largura do tubo; aspectos do processo de enchimento e empilhamento; características do efluente desaguado e; deformações da seção do tubo individual e no empilhamento. O ensaio de campo permitiu ainda avaliar as condições de solicitação externa, principalmente, o rolamento de tubos geotêxteis. O resultado dos experimentos realizados mostra um bom desempenho, indicando que ainda na fase de enchimento é eliminada praticamente toda a água livre do sistema, sendo ainda observado ao final do desaguamento um teor de sólidos superior a 70%. Baseado nas medidas aferidas em campo, foram estimadas as solicitações internas no tubo geotêxtil a partir de formulações que correlacionam tensões de tração no tecido do tubo geotêxtil com os parâmetros geométricos como altura, largura, diâmetro e perímetro.

ABSTRACT

The use of non-traditional methods to dispose mine tailings, such as geotextile tubes, has several advantages. For instance, it is possible to decrease risks regarding failure probability as well as to reduce the necessary area to dispose tailings. If damage associated with a possible structural failure is considerably minimized, then the relationship among mining companies, communities, and environment is more sustainable. Also, it helps to raise awareness about these aspects concerning mineral extraction. Therefore, geotextile tubes is an available engineering technique to dispose gold tailings; once the tube is permeable, it allows the excess water to pass through the geotextile skin while the retained tailings attains a compact and stable mass within the tube. The study aims to present the field experience on using woven geotextile tubes as an alternative on dewatering, confining and also to construct an engineering structure by stacking tubes. This research project covered several laboratory tests to characterize both gold ore tailings and the woven-geotextile used to manufacture the tubes. Tests to evaluate dewatering efficiency were also conducted in laboratory. Cycloned gold tailings came from a specific mining area where a large scale prototype was developed at. Gold ore tailings were submitted to geotechnical and hydraulic laboratory tests, such as specific weight measurement, particle-size analysis by sieving and sedimentation, consistency limits, and hydraulic consolidation test. Also, woven-geotextile used to fabricate tubes had its mass per unite area and thickness measured in laboratory. Dewatering efficiency was evaluated by means of jar-test, geotextile cone test, and geotextile dewatering test (GDT) which utilizes a pillow-shaped bag that allows dewatering in all directions. The large scale-prototype was installed at the field when laboratory tests were finished. Important project variables were then evaluated: time required to fill geotextile tubes as a function of pumped volume; observed changes in shape and behavior of tubes when its width and height varied along the filling process; design aspects of pumping and stacking; dewatered fluid characteristics; deformation and settlement of individual geotextile tubes and during the process of stacking tubes. Likewise, field tests were important to analyze external limit state modes, specially the one in regards to sliding stability, when tubes start to roll. Both laboratory and field tests results have shown a good performance for the technique. Almost all free water was allowed to flow out of the geotextile tubes over the filling process. It was observed a solid content greater than 70% when dewatering was completed. Data collected at the field was used to estimate internal stresses developed at the geotextile tube from formulations that relate stresses at tubes fabric to tubes geometric parameters, as height, width, diameter and perimeter.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	XVII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	3
1.2 ESTRUTURA GERAL DA DISSERTAÇÃO.....	4
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 CONTEXTO GERAL DA PRODUÇÃO DE OURO NO BRASIL.....	4
2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	5
2.3 CARACTERÍSTICAS DO REJEITO DE OURO.....	6
2.4 SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS.....	8
3 ALTERNATIVA DE DESAGUAMENTO DE REJEITO POR MEIO DE TUBOS GEOTÊXTEIS 10	
3.1 CASOS HISTÓRICOS.....	12
3.2 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DOS GEOSSINTÉTICOS PARA USO EM TUBOS GEOTÊXTEIS.....	17
3.2.1 <i>Propriedades físicas</i>	18
3.2.2 <i>Propriedades mecânicas</i>	18
3.2.3 <i>Propriedades hidráulicas</i>	20
3.2.4 <i>Durabilidade dos geotêxteis</i>	22
3.3 COMPORTAMENTO DOS TUBOS GEOTÊXTEIS SOB SOLICITAÇÕES HIDRÁULICAS.....	23
3.3.1 <i>A estrutura do geotêxtil e do meio a filtrar</i>	24
3.3.2 <i>Critérios de retenção</i>	27
3.3.3 <i>Critério contra a colmatção do filtro</i>	28
3.3.4 <i>Critério de permeabilidade</i>	31
3.3.5 <i>A influência de flocculantes no comportamento hidráulico</i>	33
3.3.6 <i>Eficiência hidráulica do geotêxtil nas fases de enchimento e desaguamento</i>	34
3.4 COMPORTAMENTO DOS TUBOS GEOTÊXTEIS SOB SOLICITAÇÕES MECÂNICAS.....	40
3.4.1 <i>Estados limites últimos de solicitações externas</i>	40
3.4.2 <i>Estados limites últimos de solicitações internas</i>	41
3.4.3 <i>Medidas para proteção de tubos geotêxteis</i>	52
3.5 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO DESAGUAMENTO.....	53
3.5.1 <i>Ensaio de Cone Geotêxtil</i>	54
3.5.2 <i>Ensaio de Bolsa Suspensa de Geotêxtil (HBT)</i>	55
3.5.3 <i>Ensaio de Bolsa Fechada de Geotêxtil</i>	57
3.5.4 <i>Ensaio de Protótipo em grande dimensão</i>	59
4 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	61
4.1 EXUMAÇÃO DE TUBOS GEOTÊXTEIS EM DISPOSIÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO.....	62
4.2 ESTUDO DE CAMPO EM GRANDE ESCALA.....	69
4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO REJEITO.....	72
4.3.1 <i>Teor de umidade, massa específica dos grãos e teor de umidade</i>	72
4.3.2 <i>Distribuição granulométrica do rejeito</i>	73
4.3.3 <i>Ensaio de Adensamento Hidráulico com bomba de fluxo</i>	73
4.4 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO GEOTÊXTEL.....	79
4.4.1 <i>Amostragem aleatória estratificada</i>	79
4.4.2 <i>Determinação da espessura nominal (t_{GT})</i>	80
4.4.3 <i>Determinação da gramatura</i>	80
4.5 AVALIAÇÃO DO DESAGUAMENTO.....	80
4.5.1 <i>Ensaio de cone geotêxtil com rejeito de ouro</i>	82
4.5.2 <i>Desaguamento por meio de Bolsa Fechada de Geotêxtil (GDT)</i>	82
4.5.3 <i>Desaguamento em protótipo de grande dimensão realizado em área teste na mineradora</i>	84
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	89
5.1 ENSAIOS GEOTÉCNICOS COM O REJEITO.....	89
5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO GEOTÊXTEL.....	93

5.3	ENSAIOS DE DESAGUAMENTO COMO GEOTÊXTEL.....	93
5.3.1	<i>Ensaio de cone geotêxtil</i>	93
5.3.2	<i>Ensaio de bolsa fechada de geotêxtil (GDT)</i>	98
5.4	PROTÓTIPO DE GRANDE DIMENSÃO—ENSAIO DE CAMPO.....	101
5.4.1	<i>Preparo da área de teste</i>	101
5.4.2	<i>Aspectos do enchimento de tubos geotêxteis com rejeito de ouro</i>	103
5.4.3	<i>Análise da forma dos tubos geotêxteis</i>	110
5.4.4	<i>Dessecamento do rejeito em tubo de grandes dimensões</i>	116
5.4.5	<i>Empilhamento de tubos geotêxteis</i>	117
5.4.6	<i>Procedimento para o enchimento de tubos geotêxteis</i>	122
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	124
6.1	CONCLUSÕES.....	124
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	126
	REFERÊNCIAS	129
	APÊNDICE A	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Vistas de tubos empilhados: (a) desaguamento do tubo geotêxtil durante enchimento (OBER, 2013); (b) condições do tubo de geotêxtil após desaguamento e adensamento do rejeito.	3
Figura 2.1: Principais produtos minerais exportados pelo Brasil no segundo semestre de 2015. (adaptado de IBRAM, 2015).	5
Figura 2.2: Curvas granulométricas de diferentes rejeitos de ouro (adaptado de VICK, 1983)	7
Figura 2.3: Curvas Granulométricas de diferentes rejeitos de mineração (adaptado de ABRÃO, 1987).	8
Figura 3.1: Representação esquemática do posicionamento dos bocais de enchimento ao longo do tubo geotêxtil (adaptado de LAWSON, 2006).	11
Figura 3.2: Processo simplificado de enchimento e desaguamento dos tubos de geotêxtil (adaptado de MORI ET AL, 2002).	11
Figura 3.3: Uso de tubos geotêxteis para a retirada de material contaminado no canal de Fundação, no Rio de Janeiro (STHEPHEN ET AL, 2009).	12
Figura 3.4: Confinamento e desaguamento de material contaminado dragado do canal do Porto de Santos (CARVALHO, 2013).	13
Figura 3.5: Uso de tubos geotêxteis para confinamento de material contaminado dragado do canal marítimo do Porto de Santos e utilização como base da terraplanagem do terreno da área de estocagem de <i>containers</i> (CARVALHO, 2013).	13
Figura 3.6: Desaguamento com tubo de geotêxtil tecido de grandes dimensões (NEWMAN, 2004 apud MARTINS, 2006).	14
Figura 3.7: Abertura do tubo 10 dias após o desaguamento (NEWMAN, 2004 apud MARTINS, 2006).	14
Figura 3.8: Empilhamento final com 4 empilhamentos de tubos geotêxteis. Atenção para o berço de drenagem em enrocamento para direcionamento do efluente para a lagoa (TRAINER, 2009).	15
Figura 3.9: Sistema de bombeamento para enchimento simultâneo dos tubos geotêxteis (TRAINER, 2009).	15
Figura 3.10: Em (a) processo de recuperação da área com cobertura de solo e em (b) configuração final da área recuperada (b) (TRAINER, 2009).	16
Figura 3.11: Vista geral dos setores de dragagem e disposição de sedimentos no reservatório da UHE Risoleta Neves (Candongas) (SAMARCO, 2016).	17
Figura 3.12: Curvas genéricas da carga aplicada versus deformação do geotêxtil, para amostras com diferentes dimensões (PALMEIRA, 2007 apud GARDONI, 2015).	19
Figura 3.13: Parâmetros hidráulicos de permissividade e transmissividade de geotêxteis onde Q é a vazão infiltrada, t_{GT} é a espessura, L o comprimento (adaptado de GARDONI, 2000).	21
Figura 3.14: (a) Visualização em microscópio do comportamento do solo uniforme com formação de arco; (b) esquema de formação de zona de “ <i>filter cake</i> ” em solos bem graduados (adaptado de GARDONI (2015), e CASTRO (2005).	26
Figura 3.15: Zonas de filtração de material poroso e partículas em suspensão durante o processo de bombeamento/desaguamento (adaptado de CASTRO, 2005).	27
Figura 3.16: Mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis: (a) cegamento, (b) bloqueamento, (c) colmatação física. (adaptado de PALMEIRA, 2003).	29
Figura 3.17: Formação do “ <i>filter cake</i> ” e distribuição do teor de umidade no interior do tubo (adaptado de CASTRO, 2005).	30
Figura 3.18: Fases de enchimento, desaguamento e consolidação no interior de um tubo geotêxtil (adaptado de LAWSON, 2006).	35

Figura 3.19: Taxa de desaguamento em função do tempo para protótipo em grandes dimensões (adaptado de YEE E LAWSON, 2012)	36
Figura 3.20: Condições no interior do tubo geotêxtil durante os diferentes estágios de enchimento e desaguamento: (a) início do enchimento; (b) fase de desaguamento inicial; (c) final da fase de desaguamento inicial; (d) final da fase de enchimento dos ciclos subsequentes; (e) início e (f) fim da fase de desaguamento dos ciclos subsequentes (adaptado de YEE e LAWSON, 2012).....	37
Figura 3.21: Condições de Estado Limite Externo: (a) estabilidade ao deslizamento; (b) estabilidade ao tombamento; (c) estabilidade ao rolamento; (d) estabilidade global; (e) estabilidade ao escorregamento; (f) capacidade de suporte da fundação (adaptado de LAWSON, 2006).....	41
Figura 3.22: Condições de Estado Limite Interno: (a) ruptura do geotêxtil por esforços de tração excessivos; (b) perda da integridade do confinamento do geotêxtil frente à solicitações hidráulicas; (c) solicitações no geotêxtil frente à deformações do material de preenchimento (adaptado de LAWSON, 2006).	42
Figura 3.23: Análise da seção transversal do tubo em forma de falsa elipse (a), elipse perfeita (b) e máximo enchimento (c) (adaptado de PILARZICK, 2000).....	43
Figura 3.24: Elementos de forma relevantes na seção transversal de um tubo (adaptado de PLAUT E SUHERMAN (1998).....	46
Figura 3.25: Tensões atuantes ao longo do tubo durante o enchimento (adaptado de Lawson, 2006).....	48
Figura 3.26: Elementos geométricos e esforços atuantes em seção transversal de um tubo (adaptado de PLAUT E SUHERMAN, 1998).	48
Figura 3.27: (a) Distribuição das tensões circunferenciais no entorno de tubos geotêxteis; (b) razão de distribuição da tensão circunferencial em função da porcentagem da $[T_{MAX}]$ (adaptado de LAWSON, 2006).	49
Figura 3.28: Máxima Tensão Circunferencial em tubos geotêxteis em função da relação H/D (adaptado de LAWSON, 2006).	50
Figura 3.29: Máximas tensões axiais e circunferenciais atuantes em um tubo (adaptado de LAWSON, 2006).....	50
Figura 3.30: Análise das tensões atuantes proposta por Kazimierowicz (1994): (a).tensão atuante em função da pressão de enchimento; (b) tensão atuante em função da pressão de enchimento e peso específico do material de preenchimento; (c) tensão atuante em função do peso específico do material de preenchimento.	51
Figura 3.31: Montagem e vertimento da mistura no ensaio de Cone de Geotêxtil (LAWSON, 2006).....	54
Figura 3.32: Montagem do procedimento B (adaptado de ASTM D7701, 2011).....	56
Figura 3.33: Montagem e execução do ensaio de Bolsa Suspensa de Geotêxtil (MARTINS, 2006).....	57
Figura 3.34: Montagem do ensaio de Bolsa Fechada de Geotêxtil (adaptado de ASTM 7880, 2013).....	58
Figura 3.35: Exemplo de resultado do ensaio de pequena dimensão GT15 (TOMINAGA, 2010).....	59
Figura 3.36: (a) Ensaio de protótipo em grandes dimensões; (b) consistência da polpa de ETE 24 horas após desaguamento e remoção do tubo geotêxtil (adaptado de FOWLER, LARKINS E DUKE, 2005).	60
Figura 3.37: Enchimento de tubo em grande escala (adaptado de FOWLER, LARKINS E DUKE, 2005).....	60
Figura 4.1: Em (a) dragagem do rejeito de minério de ferro do reservatório da barragem; (b) consistência do rejeito para bombeamento para o interior do tubo de geotêxtil;(c) conexão do mangote da bomba ao tubo. durante o enchimento (OBER GEOSSINTÉTICOS, 2013).....	62

Figura 4.2: Empilhamento de tubos de geotêxteis não tecidos logo após enchimento (OBER GEOSINTÉTICOS, 2013).....	63
Figura 4.3: Tubos geotêxteis revestidos com camada de cobertura para permitir o acesso de pessoas e veículos.	64
Figura 4.4: Aspecto geral da consolidação da superfície dos tubos geotêxteis após 6 anos do enchimento.	64
Figura 4.5: Bocal de enchimento dos tubos geotêxteis.	65
Figura 4.6: Escorregamento entre tubos podendo ser evidenciado pelo deslocamento da costura lateral.....	65
Figura 4.7: Deformações ao longo de tubo geotêxtil.	66
Figura 4.8: Deformação na região de contato e superposição de tubos geotêxteis.....	66
Figura 4.9: Desenvolvimento de vegetação 6 anos após realizado o empilhamento.	67
Figura 4.10: Superfície craquelada de rejeito no interior do tubo de geotêxtil.	68
Figura 4.11: (a) Amostra indeformada de rejeito durante a moldagem e extração; (b) segregação das partículas de rejeito dentro do tubo.	68
Figura 4.12: Sistema de disposição de rejeito da área de estudo (SANTOS, 2014).	69
Figura 4.13: Fluxograma de Processo de beneficiamento do minério da área de estudo (BRIO GOLD, 2016).....	71
Figura 4.14: Equipamento de ensaio HCT com bomba de fluxo.	74
Figura 4.15: Corpos de prova, CP-01 e CP-02, moldados para o ensaio HCT com bomba de fluxo.....	75
Figura 4.16: (a) Corpo de prova para a fase de sedimentação (Fase 1) após sua preparação; (b) corpo de prova após 18 horas em repouso para sedimentação.	76
Figura 4.17: Esquema da fase de adensamento induzido por percolação com bomba de fluxo (BOTELHO, 2001).....	76
Figura 4.18: Exemplo de amostragem aleatória estratificada para a obtenção das amostras...	79
Figura 4.19: Obtenção da espessura nominal do geotêxtil a partir da base de peso equivalente a 2 kPa apoiada sob o geotêxtil.	80
Figura 4.20: Abertura da bombona e homogeneização do rejeito com misturador.....	81
Figura 4.21: Montagem do ensaio de bolsa fechada de geotêxtil.....	83
Figura 4.22: Comparador visual digital utilizado para determinação de cor e turbidez das amostras e sensor para determinação de pH e teor de sólidos.....	84
Figura 4.23: Esquema de empilhamento de tubos geotêxteis proposto para estudo.	85
Figura 4.24: Layout do empilhamento de protótipos em grandes dimensões executado em campo.	86
Figura 4.25: Representação esquemática de preparação do terreno para recebimento do empilhamento.	87
Figura 4.26: Resultado do cálculo das solicitações circunferenciais e axiais máximas atuantes no tubo geotêxtil, de acordo com análise realizada pelo Geotube Simulator.....	88
Figura 4.27: Monitoramento dos deslocamentos verticais do tubo geotêxtil a partir da miralaser.....	89
Figura 5.1: Curvas granulométricas obtidas para as amostras de rejeito de ouro ensaiadas. ...	90
Figura 5.2: Curva de compressibilidade do rejeito de ouro obtida no ensaio HCT com bomba de fluxo modificada.	92
Figura 5.3: Curva de permeabilidade do rejeito de ouro obtida no ensaio HCT com bomba de fluxo modificada.....	92
Figura 5.4: Em (a) amostra de rejeito bruto homogeneizada; em (b) aspecto da amostra após adição do polímero LT27 AG; em (c) vertimento da amostra de rejeito no interior do cone; em (d) rejeito retido no geotêxtil; e em (e) fase de gotejamento do ensaio de cone geotêxtil e obtenção do volume final do percolado.....	94

Figura 5.5: Amostra com adição do polímero aniônico A110 a 0,1%. Em (a) recipiente com amostra bruta, em (b) amostra com formação de floculado após a adição do polímero e em (c) aspecto final do efluente percolado.	95
Figura 5.6: Amostra com adição do polímero catiônico 934 SH a 0,1%. Em (a) recipiente com amostra bruta, em (b) amostra com formação de floculado após a adição do polímero e em (c) aspecto final do efluente percolado.	95
Figura 5.7: Amostra com adição do polímero aniônico Axfloc AP 1110 a 0,1%. Em (a) recipiente com amostra bruta, em (b) amostra com formação de floculado após a adição do polímero e em (c) aspecto final do efluente percolado.....	95
Figura 5.8: Amostra com adição do polímero aniônico Axfloc AP 1110 a 0,1%. Em (a) recipiente com amostra bruta, em (b) amostra com formação de floculado após a adição do polímero e em (c) aspecto final do efluente percolado.....	96
Figura 5.9: Em (a) amostra de rejeito bruto a ser ensaiada e em (b) amostra final do percolado.	96
Figura 5.10: Desaguamento por GDT utilizando amostra de rejeito sem adição de polímero. Em (a) aspecto geral do rejeito da bombona I, em (b) realização do ensaio e (c) detalhe do aspecto do percolado acumulado na superfície do GDT.	98
Figura 5.11: Aspecto final do percolado retido no recipiente coletor.	99
Figura 5.12: Ensaio de desaguamento em GDT utilizando a adição de polímero LT 27 AG. Em (a) aspecto do material vertido; em (b) enchimento da bolsa de geotêxtil; em (c) percolado no recipiente coletor.	100
Figura 5.13: Amostra de percolado em (a) do ensaio sem adição de polímero; e em (b) amostra de percolado do ensaio com o polímero LT 27 AG.....	100
Figura 5.14: Variação do teor de sólidos retido no interior do GDT em função do tempo....	101
Figura 5.15: Visão geral da área de teste do protótipo em grande dimensão.	102
Figura 5.16: Em (a) tanque de reservação de rejeito e sistema de bombeamento; em (b) tanque de polímero; em (c) sistema de chincana e caixa de verificação da eficiência do polímero e; em (d) rede de alimentação dos tubos geotêxteis.	102
Figura 5.17: Disposição dos tubos geotêxteis sob a base drenante de ensaio. Detalhe para a superposição do tubo central sob os laterais.....	103
Figura 5.18: Aspecto do comportamento do polímero e rejeito. Em (a) excesso de polímero na mistura, em (b) quantidade de polímero insuficiente e em (c) proporção adequada de polímero.....	104
Figura 5.19: Em (a) presença de partículas de rejeito na superfície do tubo geotêxtil e em (b) aspecto do percolado com turbidez refletindo a baixa concentração do polímero na mistura.	105
Figura 5.20: Em (a) superfície do tubo geotêxtil durante desaguamento, após verificação da proporção adequada de polímero e em (b) aspecto visual do percolado coletado.	105
Figura 5.21: Variação da altura do enchimento (Dh) e desaguamento em função do tempo no tubo geotêxtil G1.	107
Figura 5.22: Aspecto dos tubos geotêxteis após: (a) a primeira fase de enchimento e tubo com H ~15 cm; (b) segunda fase de enchimento e tubo com H ~35 cm; (c) terceira fase de enchimento e tubo com H~50 cm; (d) quarta fase de enchimento e tubo com aproximadamente H ~75 cm; (e) quinta fase de enchimento e H ~ 98 cm; e (f) sexto enchimento e H~100 cm.....	108
Figura 5.23: Deformação e irregularidade no tubo geotêxtil devido à acumulo de rejeito próximo ao ponto de lançamento.....	108
Figura 5.24: Aspecto visual da distribuição irregular do rejeito no interior do tubo em (a) tempo inicial, em (b) após 30 minutos, em (c) após 45 minutos e em (d) após 70 minutos. .	109
Figura 5.25: Aplicação de hidrojateamento durante o processo de desaguamento.	110
Figura 5.26: Evolução da forma do tubo geotêxtil ao longo das etapas de enchimento.	110

Figura 5.27: Em (a) transpasse de 20 cm na disposição inicial dos tubos; em (b) deslocamento horizontal entre os tubos em etapa intermediária; em (c) tubos já sem contato lateral.....	112
Figura 5.28: Variação da largura/diâmetro (W) e altura (h) do tubo geotêxtil em função do tempo.	113
Figura 5.29: Relação da Tensão Circunferencial e razão H/D.	115
Figura 5.30: Coleta de amostra de rejeito contido no interior do tubo geotêxtil.....	116
Figura 5.31: Variação do teor de sólidos do rejeito em função do tempo (dessecamento), em amostras coletadas no ensaio de grande escala (ensaio de campo) e ensaio de laboratório (GDT).	117
Figura 5.32: Primeira fase de enchimento e base do empilhamento com tubos geotêxteis. ..	118
Figura 5.33: Primeira fase de empilhamento dos tubos geotêxteis.	118
Figura 5.34: Segunda fase de empilhamento dos tubos geotêxteis e finalização do protótipo de campo.	119
Figura 5.35: Intertravamento dos tubos geotêxteis no empilhamento.....	119
Figura 5.36: Deformações no tubo geotêxtil durante enchimento no empilhamento.....	120
Figura 5.37: Tubo indicando iminência de rolamento.....	121
Figura 5.38: Ações para controle externo ao rolamento (adaptado de VETERMATTI, 2015).	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Massa específica dos grãos de rejeito de ouro (GONZALES MAMANI, 2012). ...	8
Tabela 3.1: Coeficientes para o critério de retenção do CFGG (1986 apud Gardoni 1995). ...	28
Tabela 3.2: Critério de permeabilidade hidráulica para dimensionamento de tubos geotêxteis (adaptado de LAWSON, 2006).	32
Tabela 3.3: Resumo dos tipos polímeros mais utilizados (adaptado de Vertematti, 2015).....	34
Tabela 3.4: Relação entre elementos geométricos em tubos geotêxteis (adaptado de LAWSON, 2006).....	46
Tabela 4.1: Etapas do ensaio de carregamento.....	78
Tabela 5.1: Resumo dos ensaios de caracterização do rejeito.....	89
Tabela 5.2: Resumo das características do corpo de prova CP-02.....	91
Tabela 5.3: Parâmetros Constitutivos obtidos diretamente pelo SICTA.....	91
Tabela 5.4: Resultado do ensaio de espessura do geotêxtil.....	93
Tabela 5.5: Resultado do ensaio de gramatura do geotêxtil.....	93
Tabela 5.6: Resultados do ensaio de cone têxtil com rejeito de ouro e diferentes polímeros ensaiados para auxílio do desague.....	97
Tabela 5.7: Resumo da relação entre volume bombeado e sólido confinado no tubo G1.....	106
Tabela 5.8: Comparação da evolução da forma do tubo para seção elipse ou falsa elipse propostos por Pilarzick (2000).	114
Tabela 5.9: Comparação dos resultados da formulação de Lawson (2006) com os resultados medidos em campo.	114

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

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*

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

HBT – Ensaio de desaguamento em bolsa suspensa

NBR – Norma Brasileira

Nugeo – Núcleo de geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto

B – Base do tubo em contato com a fundação

CP – Corpo de prova

FS – Fator de Segurança

H – Altura do tubo

IP – Índice de Plasticidade

LabGeo – Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Minas Gerais

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

M_A – Gramatura

O – Abertura de filtração

T_a – Tensão de tração axial

T_c – Tensão de tração circunferencial

t_{GT} – Espessura

W – Máxima largura do tubo

1 INTRODUÇÃO

Nas atividades de mineração, uma quantidade elevada de rocha mineral é explotada, cominuída e processada para a recuperação do bem mineral de interesse. A demanda crescente por metais, a exaustão de antigas jazidas, o crescimento do espaço urbano, a dificuldade para licenciar novos empreendimentos e o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais modernas, tornaram necessária e possível a exploração de minérios mais complexos e com teores minerais mais baixos, até então economicamente inviáveis. Como exemplo, tem-se a viabilidade econômica e comercial da exploração de ouro associado à minerais sulfetados, o que só se tornou possível mediante a evolução ao longo dos anos das técnicas de beneficiamento de minério (BISSACOT, 2014).

A exploração de jazidas com teores minerais mais baixos implica em maior volume de rejeitos gerados, o que na prática, tem levado à construção de estruturas geotécnicas cada vez mais robustas. No entanto, é importante uma reflexão sobre o manejo de rejeitos pelas mineradoras e a importância da utilização de alternativas que permitam não só reduzir a área ocupada pelo rejeito, mas ainda a gestão de estruturas cujo risco ou passivo de um potencial acidente possam ser rapidamente administrados pelo empreendimento. Por vezes, técnicas de disposição de rejeitos têm sido adotadas visando principalmente custo, sendo importante a conscientização de que a segurança de estruturas geotécnicas e o convívio sustentável com o ambiente e a comunidade em seu entorno são tão importantes quanto a extração mineral. A ocorrência de acidentes em um sistema de disposição de rejeito pode paralisar a produção da mina, levar à perda de equipamentos e vidas humanas, além de inviabilizar a operação do empreendimento devido à pressões sociais e ambientais contrárias à mineração.

Recentemente o Brasil vivenciou o que pode ser considerado o seu maior desastre socioambiental, a ruptura da barragem de Fundão, na cidade de Mariana em Minas Gerais. Este acidente, definido por muitos como o maior do mundo envolvendo barragens de rejeito, causou danos sociais e ambientais irreversíveis e afetou uma das principais bacias hidrográficas que alimenta os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, a bacia do Rio Doce. Diante dos riscos e possíveis impactos associados à disposição de rejeito, torna-se latente a necessidade de utilização de métodos alternativos que possibilitem a construção de estruturas menos robustas, o manejo do rejeito de modo mais controlado, uma gestão de risco mais ajustada e de menor impacto ao meio ambiente.

A tecnologia que pode ser uma das soluções diante das técnicas de engenharia disponíveis é a utilização de tubos geotêxteis para conter, desaguar e empilhar rejeitos de mineração. Devido às características do geossintético utilizado, estes tubos possuem propriedades que permitem sua utilização em sistemas de filtração, contenção e desaguoamento de resíduos.

Considerando que a saturação é um dos pontos críticos na estabilidade de estruturas geotécnicas, a retirada da água em sistemas de disposição por meio do desaguoamento natural do rejeito permite não só o aumento das condições de segurança, como ainda a redução dos volumes requeridos para a reservação do material descartado, uma vez que polpas de rejeito chegam a conter até mais de 60% de água em relação ao seu volume total.

O desaguoamento de materiais com alto teor de umidade utilizando tubos geotêxteis, pode ainda ser uma técnica eficiente para aumentar a qualidade do efluente e reduzir os custos com tratamentos químicos de sistemas que operam com balanço hídrico positivo ou em circuito fechado. Estudos realizados com desaguoamento de lodos de estação de tratamento de esgoto, confinamento de material contaminado e ainda rejeitos de mineração, indicaram bons resultados tanto para a redução do volume final quanto para a diminuição da turbidez e concentração de contaminantes. Essa melhoria da qualidade do efluente pode ser justificada pela capacidade de filtração do geotêxtil do tubo utilizado.

O uso de tubos geotêxteis na disposição de rejeitos, pode envolver o bombeamento da lama ou polpa de rejeito da planta de processamento ou reservatório para o interior dos tubos, os quais permitem a filtragem de água pelas aberturas da trama do tecido, confinando as partículas sólidas no interior do geotêxtil, reduzindo o volume ocupado no reservatório. Martins e Vidal (2006) realizaram estudos avaliando a aplicabilidade e eficiência de tubos geotêxteis quanto à filtração e desaguoamento quando preenchidos com rejeito de origem do *underflow* e *overflow* de mineração de fosfato. Na ocasião, o processo de desaguoamento de rejeito foi associado ao uso de flocculantes, sendo obtidos bons resultados e o indicativo de que as características químicas e granulométricas do rejeito são de relevância no processo.

Experimentalmente, foi utilizado em uma mineradora em Minas Gerais tubos de geotêxtil não-tecido, agulhado, de fibras curtas para confinamento de rejeito fino de minério de ferro e aumento do volume útil disponível em seu reservatório. Nesta condição, o rejeito depositado na barragem era bombeado para o interior dos tubos com uma concentração de sólidos a 50%. Na ocasião, não foram utilizados agentes químicos adicionais para a floculação. O aspecto dos

tubos geotêxtil durante o enchimento e após 6 anos da realização do processo, pode ser observado respectivamente, na Figura 1.1 (a) e (b).



Figura 1.1: Vistas de tubos empilhados: (a) desaguamento do tubo geotêxtil durante enchimento (OBER, 2013); (b) condições do tubo de geotêxtil após desaguamento e adensamento do rejeito.

Baseado nos resultados destas aplicações, entende-se como alternativa viável o uso de tubos geotêxteis para disposição de rejeito de minério de ouro, uma vez que além de desaguar o rejeito, é possível reduzir a turbidez e a concentração de metais pesados do efluente e, conseqüentemente, minimizar os riscos e impactos ambientais da atividade mineradora. No entanto, esta tecnologia ainda requer estudos específicos a fim de adequá-la às aplicações em mineração, e melhor compreensão do comportamento de um elemento único e do comportamento do conjunto destes tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração e empilhados.

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho, é a avaliação do uso de tubos de geotêxtil tecido para o confinamento, desaguamento e empilhamento de rejeito de ouro, por meio de ensaios em laboratório e experimentos em campo.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Realizar ensaios geotécnicos para caracterização do rejeito e obtenção da curva granulométrica, massa específica dos grãos, índice de vazios inicial, parâmetro de permeabilidade, adensamento hidráulico;

- Realizar ensaio de bolsa de pequena dimensão para avaliar a qualidade do desaguamento;
- Realizar ensaio de protótipo em grande escala, com empilhamento do tipo 3:2:1 (3 tubos geotêxteis na base, 2 tubos no meio e 1 tubo no topo). O protótipo será monitorado durante e após o enchimento por meio de levantamento topográfico a laser para a obtenção de parâmetros e condições de contorno que viabilizem a obtenção de medidas de variação da forma do tubo e correlação com as solicitações mecânicas durante o enchimento;
- Propor procedimentos de controle e metodologia para o processo de enchimento dos tubos geotêxteis com rejeito de mineração.

1.2 Estrutura geral da dissertação

Esta dissertação é composta por este capítulo introdutório e outros 5 capítulos. Nos Capítulos 2 e 3, serão apresentadas a revisão da literatura, sendo que no Capítulo 2 será apresentada uma contextualização geral da mineração de ouro e manejo de rejeito e, no Capítulo 3 a alternativa de desaguamento de rejeito por meio de tubos geotêxteis. No Capítulo 4, é apresentada a metodologia de pesquisa baseada na contextualização geral apresentada nas referências bibliográficas. Os resultados e discussões obtidos com a aplicação da metodologia são apresentados no capítulo 5 e as considerações finais da pesquisa, no Capítulo 6.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Contexto geral da produção de ouro no Brasil

A história da mineração no Brasil tem início no período colonial, com as expedições chamadas Entradas e Bandeiras (séculos XVII e XVIII), que promoviam a busca de ouro e prata pelo interior do país. Neste período foram descobertas e exploradas as primeiras jazidas de ouro de aluvião, onde hoje estão localizados os estados de Minas Gerais e São Paulo. Durante o período colonial, o Brasil alcançou o posto de maior produtor de ouro do mundo. Entretanto, a exploração predatória, interrupção de campanhas para a descoberta de novas jazidas associada ao desenvolvimento da sociedade, levou ao declínio do ciclo do ouro e ao aproveitamento de outras substâncias minerais para abastecimento de indústrias de países que vivenciavam a Revolução Industrial.

Nos dias de hoje a produção mineral apresenta-se diversificada com exploração de 72 diferentes substâncias minerais ao longo do território brasileiro, das quais 23 são minerais metálicos, 45 não metálicos e 4 combustíveis, mantendo o país em posição de destaque na produção mineral mundial (IBRAM, 2015). Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, em 2015, entre os principais bens minerais exportados pelo Brasil, como ferro, cobre, nióbio, manganês, pedras ornamentais, entre outros. O ouro abarcou cerca de 10% deste comércio, conforme exposto na Figura 2.1. Em relação ao mercado internacional, o Brasil possui uma reserva aurífera estimada em 2.400 toneladas, o equivalente a 4% da reserva do mundo, sendo o 11º maior produtor mundial de ouro (DNPM, 2015).

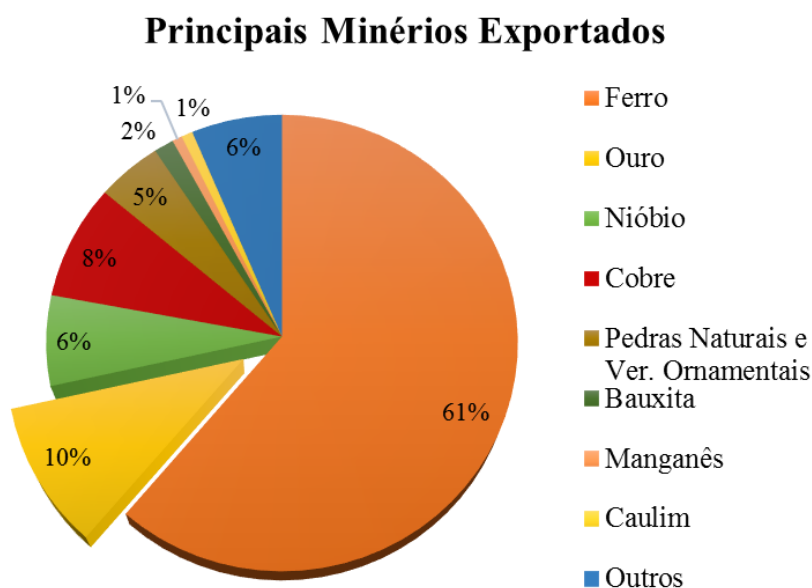


Figura 2.1: Principais produtos minerais exportados pelo Brasil no segundo semestre de 2015. (adaptado de IBRAM, 2015).

A mineração de ouro é geograficamente bem distribuída e ocorre nas cinco macro regiões brasileiras. Entretanto, é considerada apenas a produção de ouro primário. Minas Gerais mantém o posto conquistado no período colonial como maior produtor nacional. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral, em 2013, Minas Gerais foi responsável por cerca de 47% da produção de ouro nacional, seguida por Pará (12,8%), Mato Grosso (7,8%), Bahia (7,2%), Amapá (6,9%) e Maranhão (3,2%).

2.2 Aspectos gerais sobre rejeitos de mineração

Ao minério total explorado em uma mina são aplicadas operações para modificar a granulometria, concentração relativa ou forma das espécies minerais. Sem entretanto, alterar

as características físicas ou químicas do mineral (LUZ E LINS, 2010). Os resíduos provenientes deste processo, ou a fração do minério destituída de valor econômico, são denominados rejeito.

Para um bom conhecimento das características do rejeito gerado é importante entender o processo de beneficiamento empregado. A extração de bens minerais depende de procedimentos diversos, no entanto, algumas etapas fundamentais como britagem, peneiramento, concentração e desaguamento, são comuns à diferentes processos de beneficiamento. Peres et al (2002), distinguem o beneficiamento de minério de ouro de outros métodos de tratamento devido o ouro ser uma entidade química em sua forma elementar metálica, caracterizada por elevada densidade e maleabilidade.

Ainda segundo Peres et al (2002), o beneficiamento do minério de ouro pode se restringir a etapa de preparação, que consiste em adequações granulométricas do minério para subsequentes remoções mecânicas do mineral e impurezas, ou ainda envolver etapas de concentração para a remoção das impurezas do minério por diferença de densidade natural ou induzida. Assim, pode-se dizer, que a preparação envolve as etapas de britagem, peneiramento, moagem e classificação. E permite a preservação das partículas de ouro livre, enquanto o beneficiamento como um todo, complementado pelas etapas de concentração gravítica, magnética, eletrostática e flotação, prioriza a recuperação de ouro contido no concentrado.

2.3 Características do rejeito de ouro

De modo geral, os principais minerais presentes na rocha de origem da mineração de ouro, são: quartzo, albita, clorita e sulfetados (pirita, arsenopirita, pirrotita e calcopirita). O ouro chamado de nativo, pode ser encontrado no preenchimento de faturas em sulfetos, principalmente da pirita e arsenopirita, ou ainda formando pequenos dentes, devido à presença de lentes na superfície de sulfetos associado à fraturas em veios de quartzo e, menos frequentemente como inclusão em arsenopirita (PERES et al, 2002).

A composição da rocha de origem e a forma como é encontrado o ouro tem impacto não só no processo de beneficiamento a ser empregado, mas ainda na composição do rejeito resultante deste processo. A composição do rejeito resultante da oxidação de sulfetos, por exemplo, é altamente solúvel e apresenta reação fortemente ácida, pH geralmente inferior a 2, sendo

facilmente dissolvido na fase líquida, acidificando águas de drenagem (ABRÃO E OLIVEIRA, 1998). Em função deste pH reduzido, elementos tóxicos como: alumínio, manganês, zinco, magnésio, cádmio, mercúrio, arsênio, chumbo e cobre, que podem estar presentes em um meio, são solubilizados e mobilizados em drenagens, podendo ser absorvidos em níveis tóxicos pelas plantas, sendo assim inseridos na cadeia alimentar (ABRÃO E OLIVEIRA, 1998; SHU et al, 2001 apud GONZALES MAMANI, 2012).

Ainda de acordo com Gonzalez Mamani (2012), os elementos principais provenientes do processamento de ouro são ferro, silício e alumínio. O carbono e o sódio identificados são também provenientes do beneficiamento, mais especificamente da etapa de cianetação (cloreto de sódio, NaCl).

As características da rocha, o processo de extração e o beneficiamento têm influência direta não só nas características químicas, como também físicas do rejeito. Os rejeitos de mineração apresentam ampla variação da faixa granulométrica em função não só da mineralogia da rocha, tipo de frente de lavra ou do beneficiamento do minérios, mas segundo Pinto (2006), materiais de mesma origem, apesar de possuírem características comuns podem apresentar uma razoável dispersão de constituição granulométrica. Quanto à dimensão dos grãos, Vick (1983) cita que rejeitos de mineração possuem a faixa granulométrica dos siltes, podendo ocorrer também, frações de areias ou argilas. Na Figura 2.2, são apresentadas diferentes curvas granulométricas de rejeitos de ouro, e na Figura 2.3, uma comparação com as de diferentes rejeitos.

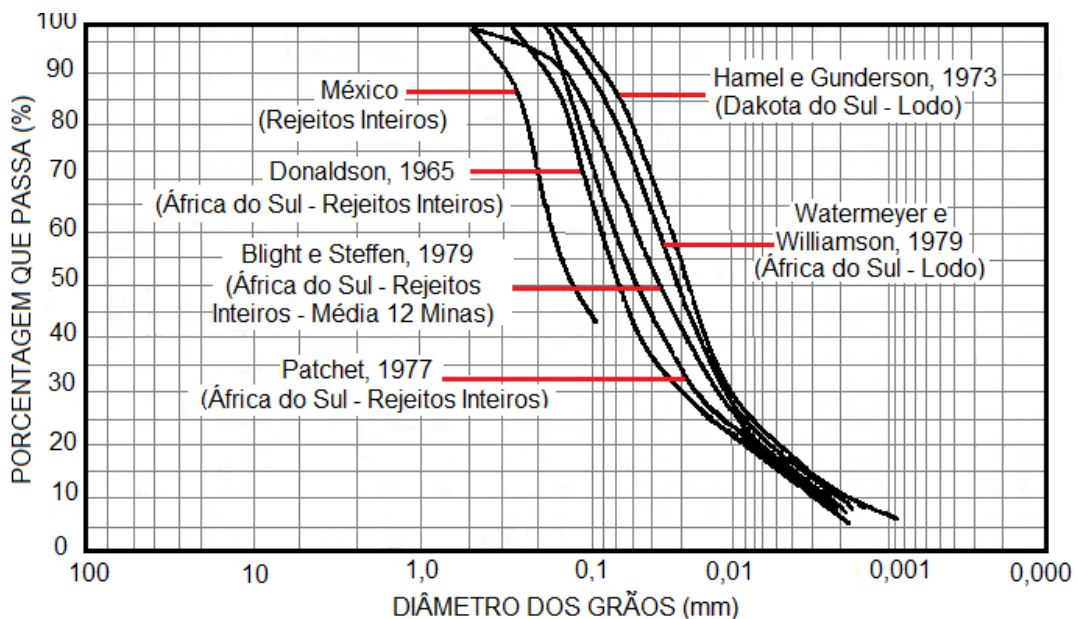


Figura 2.2: Curvas granulométricas de diferentes rejeitos de ouro (adaptado de VICK, 1983)

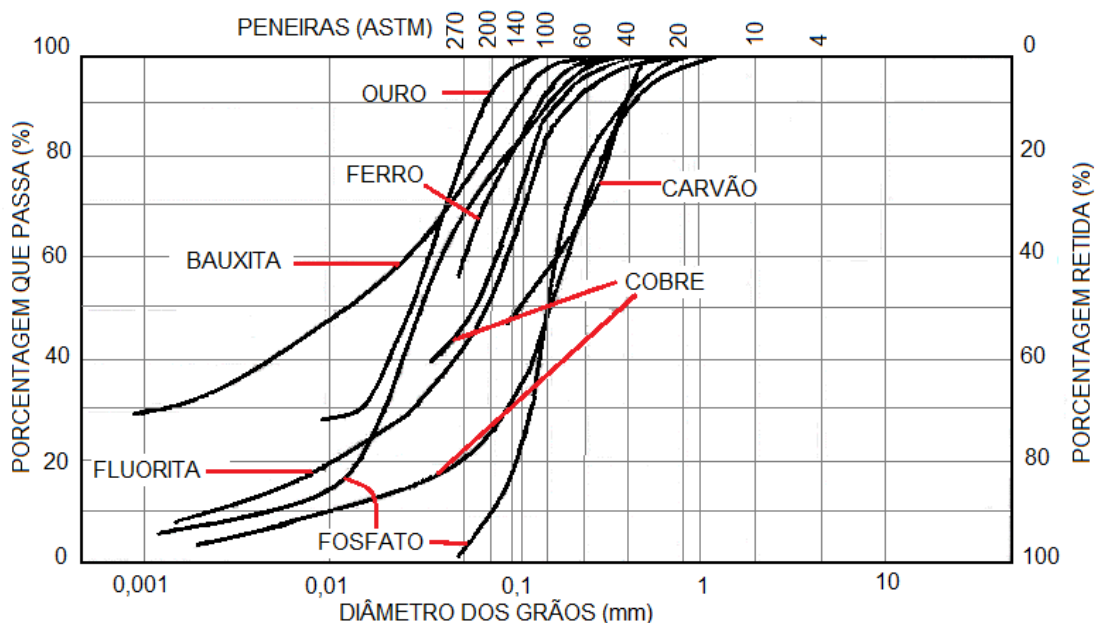


Figura 2.3: Curvas Granulométricas de diferentes rejeitos de mineração (adaptado de ABRÃO, 1987).

Ao longo de um depósito de rejeito ocorre variabilidade das características, tanto pelo dinamismo do processo operacional, como pela variação dos teores de sólido do rejeito lançado. Considerando ainda que a massa específica dos grãos é definida pela razão entre a massa de partículas sólidas sobre volume de sólidos, deve-se considerar os efeitos da segregação das partículas no momento do lançamento do rejeito para o interior do depósito. No entanto, apesar destas variações, observa-se que de modo geral os rejeitos de ouro tendem a valores da ordem de 2,6 g/cm³ a 2,9 g/cm³, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Massa específica dos grãos de rejeito de ouro (GONZALES MAMANI, 2012).

Referência	ρ_s (g/cm ³)
Barbosa e Santos (2003) 2012)	2,9
Costa Filho et al (2002)	2,89 – 2,93
Soderberg e Bush (1977)	2,6 – 2,7
Hamel e Gunderson (1973)	2,6 – 2,7
Mcphail et al (2004)	3,4 – 3,6

2.4 Sistemas de Disposição de Rejeitos

De acordo com DNPM (2016), dos 144.409.249 t de ouro bruto (*ROM*) produzido no ano de 2015, apenas cerca de 83 t são minério. Considerado o substancial volume gerado, é latente a discussão a respeito do adequado armazenamento deste material, sejam em estruturas

temporários ou permanentes. Estes depósitos podem ser em grandes corpos d'água, subterrâneo ou em superfície. No entanto, para qualquer modo de disposição, é importante que sejam avaliados fatores técnicos, econômicos, sociais e ambientais (OLIVEIRA E ABRÃO, 2015).

Ainda segundo Oliveira e Abrão (2015), a disposição de rejeito em grandes corpos d'água é controversa, pois remonta o período no qual era comum na prática da mineração, o lançamento de rejeito em qualquer curso d'água, causando assoreamento e impactos nas condições de drenagem à jusante da mina. Atualmente esta alternativa de disposição deve buscar estudos que comprovem a solução como diluição do rejeito e, que indiquem ainda que esta é a solução menos impactante frente às demais.

A disposição em subsuperfície consiste no preenchimento dos vazios de lavra subterrânea, o que caracteriza o termo "*backfill*". O retorno do rejeito às cavas minerais é por si só uma solução ambiental, pois evita a ocupação ou degradação de áreas em superfície, e pode aumentar as condições de segurança à medida que ao preencher os vazios, pode evitar o abatimento e subsidência do terreno e ainda servir como solução operacional na formação de plataformas de trabalho em lavras subterrâneas.

Considerados os tipos de lavra e questões ambientais e sociais, o modo de disposição mais adotado é em superfície. Em superfície, estes rejeitos podem ser lançados na forma fluida ou polpa, em cavas exauridas ou em reservatórios formados por barramentos. O rejeito pode ainda ser descartado na forma úmida ou seca, de modo natural ou a partir de técnicas de desaguamento ou espessamento. Para rejeitos descartados sob a forma úmida ou seca, é possível a disposição em empilhamento construído ao longo da vida útil do empreendimento.

O descarte de rejeito na forma fluida é o convencionalmente adotado. Visando a melhoria das condições de segurança, tem-se buscado técnicas para a remoção da água do rejeito ainda na planta, ou na própria área de disposição. No desague em planta, tem-se os métodos de polpa espessada, pasta e rejeito filtrado. Quando o desague é feito na área de disposição, pode ser utilizada a técnica de empilhamento drenado para rejeitos de características arenosas, ou disposição subárea para rejeitos finos.

O modo de disposição mais utilizado no Brasil foi por muito tempo o lançamento de polpas em barragens. No entanto, histórico de acidentes envolvendo ruptura de barragens;

dificuldades de obtenção de licenças; pressões ambientais, sociais e escassez de materiais para a construção, geraram a necessidade de aplicação de outros métodos de disposição.

Alternativas de disposição que envolvem o desaguamento do rejeito tem ganhado cada vez mais espaço. Neste sentido, vê-se o potencial do uso de tubos geotêxteis para o desaguamento natural de rejeito de mineração.

3 ALTERNATIVA DE DESAGUAMENTO DE REJEITO POR MEIO DE TUBOS GEOTÊXTEIS

Tubos geotêxteis são sistemas tubulares fechados fabricados em geossintético. Exercem aplicações estruturais, como na construção de quebra-mares para a prevenção de erosões costeiras, como elementos de proteção de pilares de ponte, túneis ou tubulações em fundo de mares, por exemplo; ou ainda utilizados para desaguamento e disposição de materiais com alto teor de umidade e contaminados, como lodos de estação de tratamento de esgoto. Quando destinados ao desaguamento, o geotêxtil exerce a função de filtro, liberando para o ambiente externo a fração líquida e retendo em seu interior a fração sólida do material.

Estes tubos podem ser constituídos por geotêxteis tecidos, não-tecidos ou compostos (formados por duas camadas de geotêxtil). Segundo Pilarzyk (2000), Moo-Young e Tucker (2002) e Castro (2005), quando constituído por dupla camada, tem-se o geotêxtil não-tecido como camada interna, e o geotêxtil tecido na camada externa. Este na camada externa, é designado à resistir as tensões geradas durante o processo de preenchimento e consolidação do tubo.

As dimensões do tubo geotêxtil podem ser adaptadas às necessidades de campo como espaço físico disponível, volume de material a ser contido, aproveitamento ou lançamento do fluido drenado, e ainda, finalidade do tubo após o enchimento e desaguamento. Quando utilizado para desaguamento de lodo de ETE, por exemplo, o tubo pode ser aberto ao final do processo e o material transportado para outro destino, reabilitando o local utilizado no desague para as suas configurações originais. Todavia, há casos nos quais o projeto pode prever o uso de tubos em grandes dimensões e a reintegração do elemento ao meio ambiente, como no caso de proteções costeiras ou dragagem de material contaminado.

O preenchimento de tubos geotêxteis é realizado por meio de bombeamento do do rejeito para o interior do tubo. O lançamento deste material se dá por meio da inserção da unidade de descarga da bomba no interior de orifícios de enchimento, bocais, existentes na porção superior, conforme esquema apresentado na Figura 3.1. A GT10 (2012), recomenda que esses bocais tenham cerca de 30 cm a 45 cm de diâmetro e 0,9 m a 1,5 m de comprimento, espaçados a cada 7,6 m quando o preenchimento é realizado com materiais granulares, e distando aproximadamente 30 m para materiais finos. Esta mesma norma recomenda ainda o fechamento destes orifícios por meio de grampos ou anéis após a conclusão do enchimento.

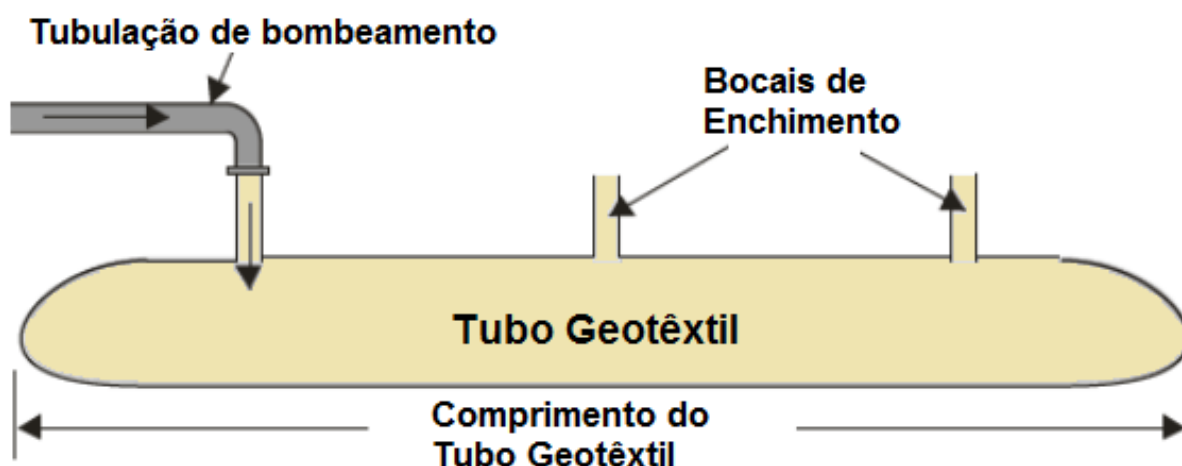


Figura 3.1: Representação esquemática do posicionamento dos bocais de enchimento ao longo do tubo geotêxtil (adaptado de LAWSON, 2006).

Um esquema geral e simplificado do enchimento e desaguamento dos tubos foi apresentado por Mori et al (2002) e Castro (2005) e é mostrado na Figura 3.2.

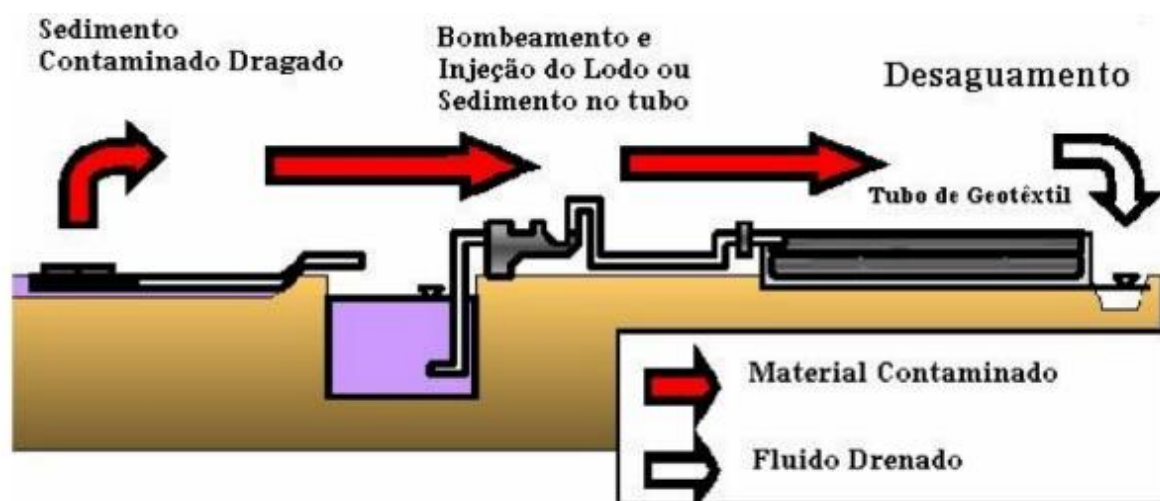


Figura 3.2: Processo simplificado de enchimento e desaguamento dos tubos de geotêxtil (adaptado de MORI ET AL, 2002).

3.1 Casos históricos

Tubos geotêxteis são internacionalmente aplicados desde o final da década de 1970. Teve seu uso intensificado no início da década de 1980 como estruturas de gravidade, preenchidas hidráulicamente e utilizados como diques de contenção, espigões, quebra-ondas, entre outros. Um dos precursores desta tecnologia foi Vertematti (2004), que utilizou em 1981 tubos de geotêxtil preenchidos hidráulicamente com areia para controle de erosões na cidade de São Luís do Maranhão. Nesta experiência, durante o enchimento houve o rompimento do tubo devido à fatores externos, o que resultou na saída de água e consequente queda de pressão interna. Nos testes seguintes, Vertematti (2004) utilizou sistemas de válvulas de alívio uniformemente espaçadas, que permitiram o controle adequado de preenchimento dos tubos.

Em 2009, no projeto de revitalização do Canal de Fundão, localizado na cidade do Rio de Janeiro, foram utilizados tubos geotêxteis (Figura 3.3) de 80 m de comprimento, 27 m de largura e 2,4 m de altura para confinamento de aproximadamente 450 mil m³ de material contaminado dragado do fundo do canal (STEPHENS et al, 2009).



Figura 3.3: Uso de tubos geotêxteis para a retirada de material contaminado no canal de Fundação, no Rio de Janeiro (STEPHEN ET AL, 2009).

Procedimento semelhante foi realizado no terminal da Embraport no Porto de Santos, onde cerca de 580.000 m³ de material sólido contaminado foi dragado do canal de acesso marítimo e confinado em 169 unidades de tubo geotêxtil de dimensões 18,3 m x 36,5 m x 65 m (largura x comprimento de circunferência x comprimento), conforme pode ser observado na Figura 3.4 (CARVALHO, 2013). Além de confinar o material contaminado, estes tubos foram ainda utilizados como base para a terraplanagem e construção de um pátio para a colocação de *containers* e equipamentos, conforme pode ser observado na Figura 3.5.



Figura 3.4: Confinamento e desaguamento de material contaminado dragado do canal do Porto de Santos (CARVALHO, 2013).



Figura 3.5: Uso de tubos geotêxteis para confinamento de material contaminado dragado do canal marítimo do Porto de Santos e utilização como base da terraplanagem do terreno da área de estocagem de *containers* (CARVALHO, 2013).

Segundo Newman (2004 apud Martins, 2006) as minas de exploração de prata, chumbo e zinco de Maden Lakkos e Mavres Petres localizadas na península de Chalkidiki na Grécia, foram as pioneiras na aplicação de tubos de geotêxtil para desaguamento de rejeitos finos de mineração. Com o aumento da produção mineral e conseqüentemente geração de rejeitos, os tubos de geotêxtil foram utilizados para desaguar cerca de 30% da sua produção e o restante continuou a ser disposto nas lagoas de desaguamento convencionalmente utilizadas.

Para alcançar este resultado, foram realizados ensaios de bolsa suspensa e ensaio de protótipo em grande escala, com um tubo de 60 m de comprimento, 14,7 m de perímetro e uma altura crítica da ordem de 2,50 m, conforme pode ser observado na Figura 3.6. Os resultados deste ensaio indicaram que em 10 dias o rejeito continha cerca de 60% do volume de sólidos, e poderia ser transportado para o pátio de disposição de resíduos secos (Figura 3.7).



Figura 3.6: Desaguamento com tubo de geotêxtil tecido de grandes dimensões (NEWMAN, 2004 apud MARTINS, 2006).



Figura 3.7: Abertura do tubo 10 dias após o desaguamento (NEWMAN, 2004 apud MARTINS, 2006).

Em 2007, a usina de beneficiamento de carvão mineral da mina de North River, na cidade de Berry no estado do Alabama nos Estados Unidos, quase foi paralisada devido à problemas para a disposição dos rejeitos gerados. Devido à novas restrições regulatórias vigentes, a mineradora que gerava aproximadamente 1.500 m³ de rejeito por dia, ficou impedida de continuar a dispor seus rejeitos pelo método convencional de injeção em minas subterrâneas. Diante do problema, a disposição de rejeitos por meio de tubos de geotêxteis permitiriam o desaguamento, confinamento e estabilidade dos sólidos desaguados para futura recuperação do local, além de dispensar a movimentação dos sólidos (TRAINER, 2009)

Ainda de acordo com Trainer (2009), os locais escolhidos para a disposição do rejeito por meio dos tubos geotêxteis foram próximos à lagoa de lama existente na mina, para a qual o

efluente dos tubos foi drenado. Para otimização dos locais ocupados, foram projetados quatro empilhamentos de tubos geotêxteis, conforme pode ser observado na Figura 3.8.



Figura 3.8: Empilhamento final com 4 empilhamentos de tubos geotêxteis. Atenção para o berço de drenagem em enrocamento para direcionamento do efluente para a lagoa (TRAINER, 2009).

Adjacente aos empilhamentos, foi montado um sistema de bombeamento que permitisse o enchimento de tubos simultaneamente (Figura 3.9). Uma draga, operada em dois turnos de 12 horas, foi utilizada permitindo o bombeamento médio de 1.750 m³ de rejeito por dia.



Figura 3.9: Sistema de bombeamento para enchimento simultâneo dos tubos geotêxteis (TRAINER, 2009).

O projeto concluído demandou um total de 240 unidades de tubos, e aproximadamente 200.000 m³ de rejeito foram bombeados. À medida que o ciclo de desaguamento era concluído nos quatro empilhamentos de tubo, era iniciado o processo de recuperação do local utilizando solo vegetal (Figura 3.10 (a)), estocado da fase de limpeza do terreno, e plantio de

sementes para revegetação. A configuração final da recomposição da área pode ser observada na Figura 3.10 (b).



Figura 3.10: Em (a) processo de recuperação da área com cobertura de solo e em (b) configuração final da área recuperada (b) (TRAINER, 2009).

Em novembro de 2016, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana – MG, no qual cerca de 32 milhões de metros cúbicos de rejeito foram carregados pelas águas dos rios, provocando impactos em comunidades e vilarejos ribeirinhos da bacia do Rio Doce. Entre as áreas impactadas está a Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves (Candongas), situada a cerca de 120 km à jusante do local da ruptura. No reservatório da UHE ficaram retidos cerca de 10,5 milhões de metros cúbicos de rejeito e sedimentos (SAMARCO, 2016) ¹. Visando o desassoreamento do reservatório da UHE e a recuperação da qualidade da água do Rio Doce, foram contratados pela mineradora serviços de dragagem e a utilização de tubos geotêxteis para desaguamento, confinamento e empilhamento dos sólidos dragados.

Para a primeira etapa da dragagem, foram destinados cinco pontos para a disposição dos sedimentos, todos localizados ao longo do reservatório de UHE Risoleta Neves, nas áreas já impactadas (Figura 3.11). No denominado Setor 1 (Figura 3.11), próximo ao primeiro quilômetro de tratamento do reservatório, os sólidos dragados foram desaguados, confinados e empilhados por meio de tubos geotêxteis do tipo tecido (SAMARCO, 2016) ². Nesta primeira etapa foi prevista a retirada de cerca de 5.000 m³ de sólidos por dia sendo totalizando cerca de 1,3 milhão de m³ de sedimento ao término destes serviços.



Figura 3.11: Vista geral dos setores de dragagem e disposição de sedimentos no reservatório da UHE Risoleta Neves (Candongas) (SAMARCO, 2016).

3.2 Propriedades e características relevantes dos geossintéticos para uso em tubos geotêxteis

Os tubos geotêxteis utilizados para desaguamento, dessecação e acondicionamento de materiais precisam desempenhar três funções fundamentais: resistência, filtração e durabilidade (FOWLER, LARKINS E DUKE, 2005). O geotêxtil deve ter resistência à tração necessária para suportar as tensões mecânicas aplicadas durante o enchimento do tubo. Em segundo lugar, o geotêxtil deve ter as propriedades hidráulicas necessárias para permitir a passagem do fluido e a retenção de partículas sólidas existentes na mistura. Em terceiro lugar, o geotêxtil deverá ter a durabilidade necessária à vida útil de projeto, suportando além das cargas e esforços aplicados durante o processo de instalação e as condições sofridas ao longo do tempo.

Para que sejam garantidas estas funções dos tubos geotêxteis, o geossintético a ser utilizado deve ser especificado quanto a resistência à tração, permeabilidade, abertura de filtração, resistência à luz solar, resistência química, resistência ao puncionamento e ainda à resistência da costura utilizada para fazer o fechamento dos tubos.

3.2.1 Propriedades físicas

Os geossintéticos podem ser caracterizados pela gramatura, espessura, porosidade, forma, abertura de filtração e arranjo estrutural dos fios. Além da distribuição dos poros. Exercendo a função de filtro, o geotêxtil, enquanto tubo de preenchimento, as propriedades de espessura, porosidade e abertura de filtração são de notável relevância e serão melhor discutidas neste trabalho.

A gramatura (M_A) é a nomenclatura utilizada para exprimir o peso por unidade de área de um geotêxtil. Para um dado tipo de polímero a gramatura pode ser diretamente relacionada às propriedades mecânicas do geotêxtil.

A espessura (t_{GT}) pode simplificadaamente ser definida como a distância entre as superfícies superior e inferior do material, para uma dada pressão. A NBR ISO 9863 (ABNT, 2013), prescreve o método para determinação da espessura nominal do geotêxtil, que tem influência direta no comportamento mecânico e hidráulico dos geotêxteis.

A porosidade de um geotêxtil pode ser definida como a razão entre o volume de vazios do geotêxtil e seu volume total ou ainda, segundo Giroud (1996), relacionar a gramatura (M_A) expressa em g/m^2 , espessura de um geotêxtil em mm e massa específica das fibras (ρ_f) em gramas, conforme Equação 3.1:

$$n = 1 - \frac{M_A}{\rho_f t_{GT}} \quad \text{Equação 3.1}$$

Giroud (1996) sugere ordens de grandeza de porosidades em torno de 0,9 para geotêxteis não-tecidos agulhados e porosidade de 0,7 para os geotêxteis tecidos termo ligados.

Segundo Gardoni (2000), a abertura de filtração (O) de um geotêxtil é o parâmetro mais importante para o dimensionamento de filtros de geotêxteis. Essa abertura de filtração é definida como o tamanho da maior partícula de solo capaz de atravessar o geotêxtil.

3.2.2 Propriedades mecânicas

Durante a aplicação em obra, os tubos geotêxteis estão sujeitos à diferentes ações mecânicas, estáticas ou dinâmicas, como os esforços de tração, compressão, puncionamento e rasgamento. Deste modo, é importante o conhecimento das propriedades do material a ser utilizado.

De modo geral, a condição crítica de solicitação de um tubo geotêxtil é a fase de enchimento, na qual as tensões axiais de tração do geotêxtil podem atingir valores próximos ao limite máximo. O comportamento à tração de um geotêxtil depende de fatores como o polímero constituinte, a estrutura, processo de fabricação, tipo de ligação, entre outros. Este comportamento de geotêxteis submetidos à tração, é geralmente caracterizado pela curva que relaciona a força por unidade de largura da amostra ensaiada (kN/m) (Figura 3.12). A partir desta curva é possível obter a resistência à tração, as deformações na ruptura e o módulo de rigidez do material em questão (BALTAZAR, 2008). Palmeira (2007) apresenta a influência das dimensões das amostras no comportamento carga aplicada versus deformação em ensaios de tração.

Outra propriedade mecânica importante é a resistência ao rasgamento, que corresponde à ruptura progressiva resultante de duas ações: a perfuração que se refere à condição local; e a tração referente às tensões distribuídas. Deste modo, a força de rasgamento reflete a resistência do geossintético à propagação de rasgos locais.

Há ainda que se avaliar o atrito nas interfaces geotêxtil-solo, caso o geotêxtil seja utilizado como sistema de reforço.

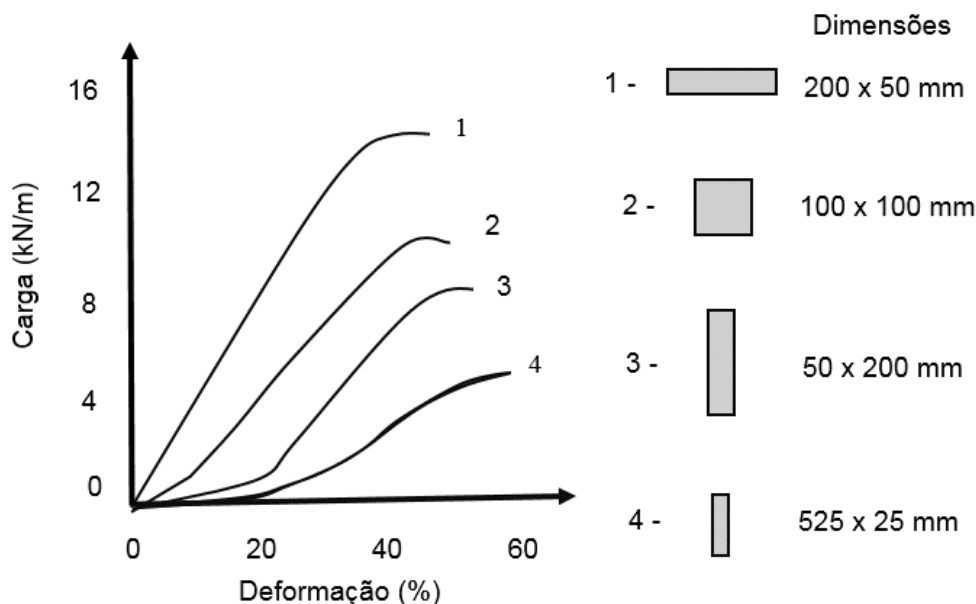


Figura 3.12: Curvas genéricas da carga aplicada versus deformação do geotêxtil, para amostras com diferentes dimensões (PALMEIRA, 2007 apud GARDONI, 2015).

3.2.3 Propriedades hidráulicas

O desaguamento de materiais com alto teor de umidade em tubos geotêxteis é possível devido à capacidade filtrante dos geotêxteis utilizados para a confecção dos tubos. A filtração consiste no equilíbrio do sistema solo-geotêxtil que permite um adequado fluxo de líquidos com reduzida perda de partículas sólidas através do plano do geotêxtil (GARDONI, 1995). Nos tubos geotêxteis o escoamento do fluido ocorre através do tecido sendo a parte líquida a que deve ser expelida para o exterior dos tubos e a fração sólida retida em seu interior.

Sistemas de filtro com geotêxteis são dimensionados para atender ao critério de retenção e permeabilidade. Sob um fluxo de água em condições estáticas ou dinâmicas, o atendimento ao critério de retenção visa impedir a passagem das partículas de solo através do filtro. Por outro lado, segundo o critério de permeabilidade, deve-se permitir o livre escoamento dos fluidos. Assim, o filtro deverá ter aberturas pequenas o suficiente para prevenir a excessiva migração de partículas de solo para o exterior do tubo, mas grandes o suficiente para permitir um adequado fluxo de líquido, sem redução substancial da vazão filtrada.

Em projetos com filtros de geotêxteis, os parâmetros hidráulicos de permeabilidade, permissividade e transmissividade, são de grande importantes para a especificação do material mais adequado para a obra geotécnica.

Sob condições de fluxo laminar a permeabilidade do geotêxtil pode ser determinada pela Lei de Darcy:

$$v = ki \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Onde:

v é a velocidade aparente de fluxo [m/s];

k é o coeficiente de permeabilidade do geotêxtil [m/s];

i é o gradiente hidráulico [m/m].

Gourc (1982 apud Gardoni 2000), afirma que geotêxteis de estruturas e porosidades idênticas mas de espessuras distintas, apresentarão mesmo valor de permeabilidade (k), uma vez que esta é uma propriedade intrínseca do geotêxtil que varia com a porosidade do tecido. No entanto, é sabido que o geotêxtil apresenta uma permeabilidade normal a seu plano (k_n) e uma permeabilidade ao longo de seu plano (k_t) e estas grandezas variam em função da espessura do geotêxtil.

A permeabilidade no plano normal do geotêxtil é definida para a função de filtração como permissividade, sendo (GOURC, 1982 apud GARDONI 2000):

$$\psi = \frac{k_n}{t_{GT}} \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

ψ é a permissividade [s^{-1}];

k_n é o coeficiente de permeabilidade através do geotêxtil [cm/s];

t_{GT} é a espessura do geotêxtil sob tensão normal [cm].

Baseado na relação apresentada (Equação 3.3), observa-se que a permissividade é inversamente proporcional à espessura do geotêxtil sob tensão normal. Deste modo, quanto mais espessa for a manta têxtil, menor será o fluxo no plano normal.

A permeabilidade ao longo do próprio plano do geotêxtil (k_p) é a transmissividade (θ). Essa é uma propriedade inerente ao geotêxtil não-tecido e é relacionada por meio da seguinte expressão:

$$\theta = k_p \cdot t_{GT} \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

θ é a transmissividade do geossintético [cm^2/s];

k_p é a permeabilidade do geossintético ao longo do seu plano [cm/s].

As propriedades de permissividade e transmissividade dos geotêxteis são ilustradas na Figura 3.13.

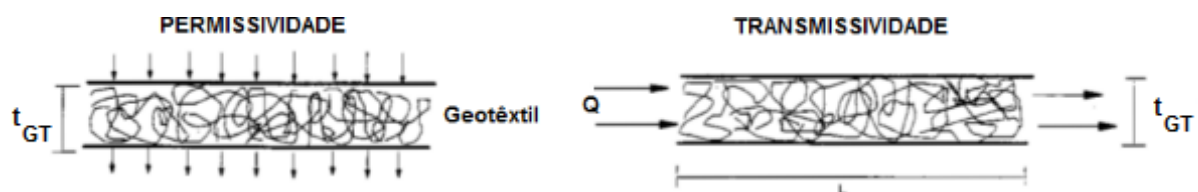


Figura 3.13: Parâmetros hidráulicos de permissividade e transmissividade de geotêxteis onde Q é a vazão infiltrada, t_{GT} é a espessura, L o comprimento (adaptado de GARDONI, 2000).

3.2.4 Durabilidade dos geotêxteis

A durabilidade é uma propriedade que está associada à integridade do geossintético durante a instalação na obra, e ao longo da vida útil do empreendimento. Durante a instalação podem ocorrer perfurações por queda de objetos, ou ainda rasgos e abertura de orifícios pela presença de materiais pedregulhosos, angulosos sob a superfície do terreno na qual foi instalado o geotêxtil. Durante o tempo de vida dos materiais, danos por exposição à luz solar, ataque biológico, químico, entre outros, podem comprometer propriedades essenciais do geotêxtil como a resistência.

Considerada as principais aplicações dos tubos geotêxteis no desaguamento e confinamento de materiais contaminados, deve-se atentar que a degradação mecânica, química e biológica pelo contato com contaminantes pode provocar uma redução significativa do tempo de vida dos materiais (CARNEIRO, 2009)

I: Degradação por Danos Mecânicos

A degradação por danos mecânicos ou de instalação pode ser definida por alterações sofridas pelo material devido aos esforços provenientes de manuseio, instalação, compactação de solo sobrejacente, entre outros. Os danos físicos mais comuns na fase de instalação são provocados pelo tráfego de equipamentos pesados sobre os geossintéticos, ou ainda queda de objetos cortantes, emendas mal feitas, furos por objetos pontiagudos e abrasões.

Os danos mecânicos desta fase de obra devem ser quantificados assim que concluída a instalação, e comparados com os fatores de redução considerados enquanto na fase de dimensionamento de projeto. De modo geral, este fator de redução considera a relação da resistência do material intacto e a resistência do material danificado.

II Degradação Química

Segundo Santos (2014), a degradação química pode ser provocada pela ação do oxigênio, íons metálicos, ácidos, bases, solventes e da água. Estes fatores podem implicar em profundas alterações nas cadeias poliméricas, como: quebra de ligações químicas, ou ainda alteração das cadeias poliméricas, o que leva a formação de espécies quimicamente alteradas. Esse tipo de alteração modifica propriedades dos polímero e pode comprometer a função a qual o geotêxtil

foi destinada, tanto em relação ao comportamento mecânico, à permeabilidade, ou ainda em colmatações químicas que levam à obstrução do geotêxtil.

III Degradação Biológica

Os microorganismos que podem levar à degradação de geossintéticos podem ser encontrados em condições ambientais distintas, mas, de modo geral, necessitam de matéria orgânica encontrada em aditivos e polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos, para a produção de carbono e criação de um ambiente adequado para se desenvolverem. Essa degradação biológica é comumente realizada por fungos, bactérias e algas. A temperatura, pH do meio e umidade podem ser catalizadores da proliferação destes microorganismos. A ação destes microorganismos pode diminuir a massa molecular dos polímeros e conseqüentemente torna-los mais frágeis e quebradiços, ou ainda levar à obstrução e impregnação dos espaços vazios dos geossintéticos, ocasionando sua colmatação.

Carneiro (2009) adverte ainda que a degradação biológica pode ser realizada por organismos vivos de maior porte como roedores, ou ainda, raízes de plantas que podem penetrar na estrutura e gerar obstruções.

IV Degradação por fatores diversos

A ação da temperatura pode acelerar mecanismos de degradação, ou provocar dilatação ou contração térmica dos materiais. Quando expostos ao ar livre, os geossintéticos sofrem degradação pela luz solar em combinação com o oxigênio atmosférico a temperatura e umidade, comprometendo o material em sua superfície exterior e evoluindo progressivamente em direção ao centro da estrutura polimérica.

Santos (2014) aponta ainda para a possibilidade de degradação por efeitos sinérgicos. Os fenômenos de degradação podem ocorrer individualmente, no entanto, pode acontecer que dois ou mais organismos atuem simultaneamente.

3.3 Comportamento dos tubos geotêxteis sob solicitações hidráulicas

Para que o desaguamento de rejeito de ouro por meio de tubos geotêxteis seja eficaz, é importante que sejam avaliados quatro critérios hidráulicos: a estrutura do geotêxtil e do meio

a filtrar, a capacidade de retenção do geotêxtil, a suscetibilidade à colmatação e a sua condutividade hidráulica.

3.3.1 A estrutura do geotêxtil e do meio a filtrar

O dimensionamento de filtros para os critérios de retenção e permeabilidade é diretamente relacionado com a estrutura do geotêxtil e do solo a ser filtrado.

I A estrutura do geotêxtil

A estrutura de um geotêxtil está relacionada ao processo pelo qual eles são formados, e da utilização de aditivos químicos para a obtenção de diferentes estruturas. A variação de parâmetros inerentes a determinados processos de fabricação podem resultar em materiais com diferentes características, como espessura, dimensão de suas “constrições”, que são os poros ou vazios entre as fibras do geotêxtil (GARDONI, 1995). De modo geral, as estruturas básicas as quais são encontrados os geotêxteis são tecidos e não-tecidos.

Os geotêxteis tecidos, são fabricados em teares mecânicos similares aos utilizados na indústria têxtil, e possuem uma estrutura ordenada com fios em duas direções ortogonais ao plano da manta. O que confere certa uniformidade ao produto final. Os poros do tecido apresentam praticamente as mesmas dimensões e, portanto, existe um único obstáculo entre as partículas e o filtro, o que define se a partícula passa ou fica retida. Se a partícula fica retida pode ocorrer uma obstrução do poro ou desenvolver uma estrutura com outras partículas;

O geotêxtil não-tecido pode ser diferenciado em agulhado e termoligado, à depender da forma utilizada no processo de fabricação para a ligação entre as fibras do geotêxtil. O geotêxtil não-tecido agulhado, é obtido pelo processo de tecelagem com disposição aleatória de monofilamentos, possui uma estrutura tridimensional e as fibras do material são ligadas por meio de entrelaçamento aleatório mecânico de agulhas, tendo como resultado um geotêxtil com poucos contatos entre as tramas sob condições normais de pressão. Pode-se dizer que esta estrutura propicia uma porosidade da ordem de 90%, cuja forma e dimensão dos vazios variam em todas as direções.

O geotêxtil não-tecido termoligado possui ligação entre as fibras do geotêxtil por meio da utilização de calor ou aplicação de resinas. Este tipo de ligação confere uma estrutura ao geotêxtil com vazios de forma e dimensão variáveis. A superfície e espessura do geotêxtil são

elementos de obstáculo da passagem da partícula sólida através do geotêxtil, no entanto, devido à pequena espessura de geotêxteis termoligados, as condições se aproximam mais dos geotêxteis tecidos que do não-tecido agulhado.

II A estrutura do meio a filtrar

Quando submetidos à fluxo, o comportamento do solo tem caráter relevante no que se refere ao potencial de migração de partículas por meio de vazios adjacentes. Segundo Giroud (1994), o conhecimento da estrutura do solo a ser filtrado é parâmetro relevante para o dimensionamento de filtros com geotêxteis, uma vez que a estabilidade interna de um solo pode ser associada a sua capacidade de prevenir a perda de partículas.

Quando o material a reter é uniforme o comportamento da filtração está diretamente ligado à dimensão das partículas e ao sentido do fluxo. Se o fluxo atuar na direção da gravidade e a porosidade do material não for superior à abertura de filtração, as partículas de solo formam um arco sobre o poro do filtro, estabilizando o sistema (Figura 3.14 (a)). Para fluxos no sentido contrário a gravidade solos uniformes apresentam perda contínua de partículas (VIDAL E URASHIMA, 1999).

Partículas menores de solo bem graduado localizadas próximas da interface solo-geotêxtil, quando submetidas a fluxos, se movem e acumulam na interface com o filtro formando uma camada denominada “*cake*”, que reduz a permeabilidade do sistema. A migração das partículas de solo de menor dimensão podem criar uma zona de transição, “*filter cake*”, de permeabilidade um pouco maior que o resto do solo (GARDONI, 2015).

Para estes solos bem graduados, as aberturas do filtro devem ser grandes o suficiente para permitir a passagem das pequenas partículas que não estão presas à estrutura do solo. Um esquema simplificado deste comportamento é indicado na Figura 3.14 (b) (GARDONI, 2015) e (CASTRO, 2005).

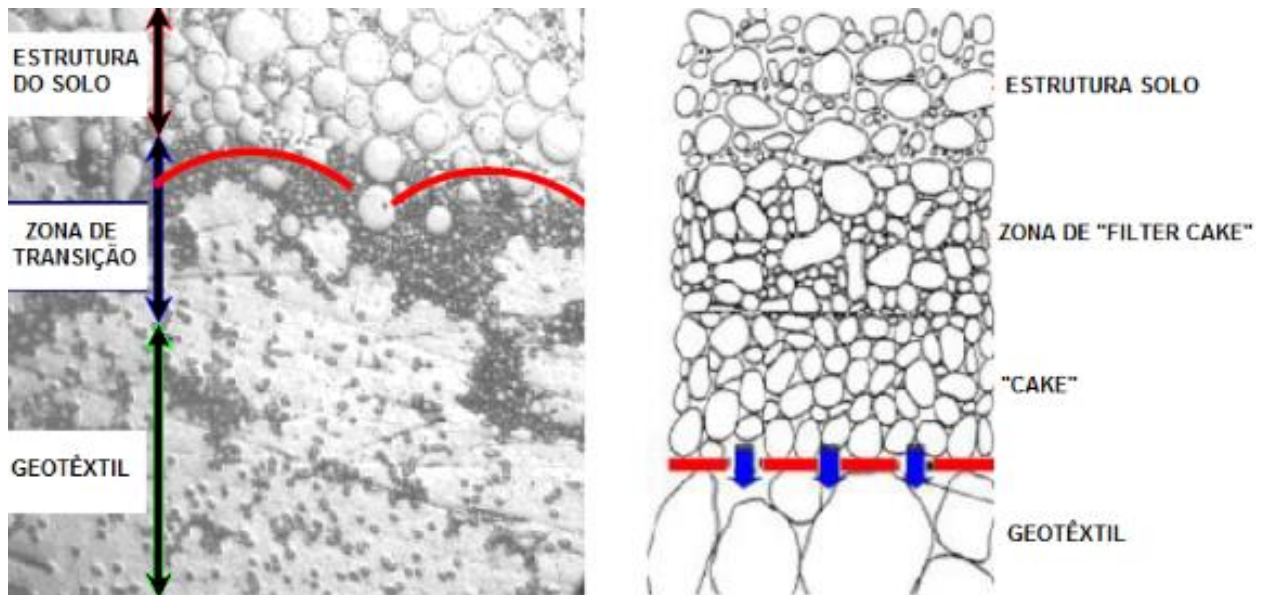


Figura 3.14: (a) Visualização em microscópio do comportamento do solo uniforme com formação de arco; (b) esquema de formação de zona de “*filter cake*” em solos bem graduados (adaptado de GARDONI (2015), e CASTRO (2005)).

Solos mal graduados e não uniformes geralmente são internamente instáveis e suscetíveis a fenômenos de sufusão. Assim, a depender das condições do fluxo, pode haver perda de partículas de menor dimensão através dos poros do geotêxtil durante a filtração.

Vidal e Urashima (1999) analisam ainda a influência da estrutura de partículas em suspensão. Quando partículas em suspensão entram em contato com o geotêxtil ocorre uma perda de carga considerável, que faz com que a partícula em suspensão se depositem na superfície do geotêxtil, mesmo estas tendo dimensões muito inferiores a abertura de filtração. Esta circunstância pode ser comumente associada à colmatação física do geotêxtil.

Em tubos geotêxteis é observada tanto a filtração de meios porosos quanto de partículas em suspensão, conforme apresentado na Figura 3.15. Durante o preenchimento, as partículas maiores se depositam na porção inferior dos tubos e portanto, nesta região é possível observar a filtração de meios porosos, enquanto a filtração de partículas em suspensão ocorre nas laterais do tubo (GAFFNEY et al 1999 e CASTRO, 2005).

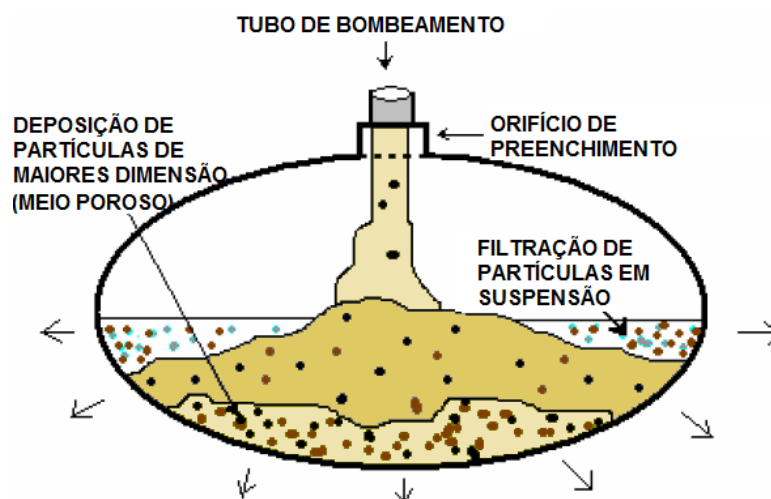


Figura 3.15: Zonas de filtração de material poroso e partículas em suspensão durante o processo de bombeamento/desaguamento (adaptado de CASTRO, 2005).

3.3.2 Critérios de retenção

Reter o solo não significa impedir a passagem de toda e qualquer partículas de solo, mas sim que, na retenção do solo adjacente ao filtro, algumas partículas podem migrar através do filtro desde que esta migração não afete a estabilidade da estrutura do solo (GIROUD, 1994 apud GARDONI, 2000). Este critério de retenção é geralmente expresso como uma relação entre o tamanho da partícula de solo e o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil, sendo (Equação 3.5)

$$O < N \cdot d \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

O = abertura de filtração do geotêxtil [mm];

N = porcentagem de poros menores do que O, sendo geralmente representada pela abertura de filtração do geotêxtil [adimensional];

d = diâmetro característico das partículas de solo a ser retido, geralmente, o d_{95} (diâmetro correspondente a 95% das partículas passantes) [mm];

Geralmente o valor da abertura de filtração é assumido como o valor do maior grão que passou pelo geotêxtil no ensaio de abertura.

O Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG, 1986), apud Gardoni (1995), propõe um critério de retenção semelhante, considerando as características da curva granulométrica do solo, conforme dado na Equação 3.6 e Tabela 3.1.

$$O_{95} < C1. C2. C3. C4. d_{85} \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde:

O_{95} é a abertura de filtração na qual 95% das partículas passantes [mm];

d_{85} é o diâmetro corresponde a 95% das partículas passantes.

Tabela 3.1: Coeficientes para o critério de retenção do CFGG (1986 apud Gardoni 1995).

Coeficiente	Valor	Caso
C1	1,00	Solo bem graduado
	0,80	Solo mal graduado
C2	1,25	Solo denso e confinado
	0,80	Solo fofo e desconfinado
C3	1,00	Gradiente hidráulico $i < 5$
	0,80	$5 < i < 20$
	0,60	$20 < 40$
C4	1,00	Somente para filtração
	0,30	Filtração

3.3.3 Critério contra a colmatação do filtro

Satisfeitas as condições de permeabilidade e retenção de filtro geotêxtil, Carrol (1983) mostrou que é necessário avaliar o funcionamento do filtro em função das interações entre o material a ser filtrado e o geotêxtil que podem levar ao processo de colmatação. O processo de colmatação pode ser entendido como a penetração de partículas finas dentro do geotêxtil, bloqueando os canais de fluxo ou formando películas de partículas finas a montante do filtro, reduzindo sua permeabilidade.

Durante a filtração é estabelecido um fluxo de água que pode levar ao arraste de algumas poucas partículas de solo, que não se encontram consolidadas em sua matriz, em direção ao filtro geotêxtil. Estas partículas de solo deslocadas podem interagir com o geotêxtil de diferentes maneiras levando à erosão interna (*piping*), cegamento (*blinding*) ou “*filter cake*”,

bloqueamento (*blocking*) ou colmatção física (*clogging*). Estes mecanismos estão ilustrados na Figura 3.16 e podem ser explicados como:

- “*Piping*” ou erosão interna: partículas do material desaguado passam continuamente através do geotêxtil;
- “*Filter Cake*” ou cegamento: as partículas mais finas do material desaguado migram, segundo o processo de sufusão (movimento de partículas mais finas através dos poros da matriz de partículas mais grossas do solo), em direção ao geotêxtil. Caso essas partículas não sejam pequenas o suficiente para passar através dos poros do geotêxtil, elas se agrupam formando uma fina camada na superfície interna do tubo geotêxtil. Esta fina camada é denominada “*filter cake*” e reduz substancialmente a capacidade drenante do filtro;
- Bloqueamento: partículas individuais do material filtrado obstruem as aberturas do geotêxtil tecido, formando o mecanismo conhecido como bloqueamento de filtro, que implica numa severa redução da permeabilidade do geotêxtil;
- Colmatção física: partículas individuais do material desaguado migram junto com o fluido percolante, penetram no geotêxtil, ficando retidas ao longo da estrutura do filtro.

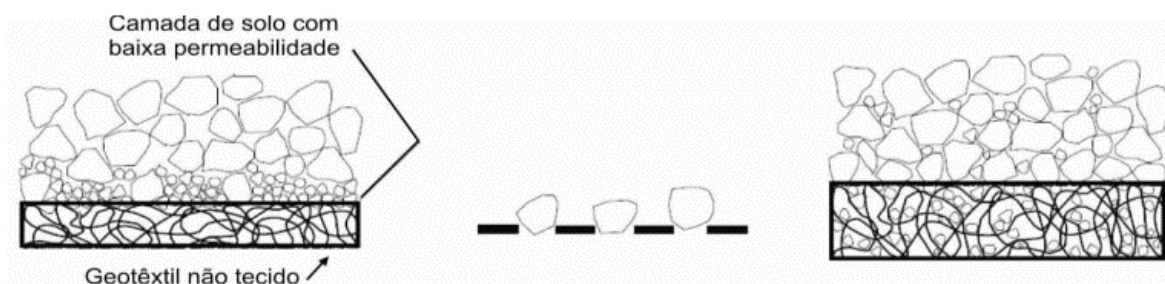


Figura 3.16: Mecanismos de colmatção de filtros geotêxteis: (a) cegamento, (b) bloqueamento, (c) colmatção física. (adaptado de PALMEIRA, 2003).

Estudos realizados por Gaffney et al (1999), Leshchinsky e Leshchinsky (1996), indicam que na filtração de sedimentos de granulometria fina a perda de partículas através do geossintético cessa rapidamente, e a água drenada torna-se menos turva. Essa redução da turbidez associada à redução da permeabilidade foi justificada pelos autores pela formação do “*filter cake*”, o qual aumenta a filtração, porém diminui a permeabilidade. Essa teoria foi ainda reforçada por Moo-Young e Tucker (2002), que observou em seus experimentos que a quantidade de

sólidos em suspensão no início do processo de filtração por meio de tubos geotêxteis é alta, mas diminui sensivelmente assim que ocorre a formação de “*filter cake*”.

Estes fenômenos de colmatação foram ainda associados por Gaffney et al (1999), com o teor de umidade da fração sólida retida no interior do tubo. Em seus estudos observou que a colmatação dificulta a saída de fluido do sistema, o que implica em um teor de umidade elevado para os sólidos retidos no interior dos tubos. Gaffney et al (1999) observou ainda que a umidade diminui gradativamente do centro para as extremidades do tubo, o que em alguns casos pode levar a necessidade de abertura de tubos para exposição e secagem do material retido.

Na Figura 3.17 é apresentada um aspecto geral do “*filter cake*” formado e a distribuição da umidade do sólido confinado no interior do tubo.

Considerados os mecanismos de colmatação, é importante que o dimensionamento de um filtro geotêxtil seja realizado considerando a interação das partículas sólidas com o geotêxtil. O dimensionamento de filtros de geotêxtil quanto ao critério de colmatação deve garantir que o geotêxtil seja suficientemente aberto para que o acúmulo de partículas de solo, químicas ou biológicas precipitadas não reduzam a permeabilidade ao ponto no qual o filtro se torne menos permeável que o solo base. Luetlich et al (1992) recomenda que para filtros geotêxteis:



Figura 3.17: Formação do “*filter cake*” e distribuição do teor de umidade no interior do tubo (adaptado de CASTRO, 2005).

- Deve-se usar o maior tamanho de abertura que satisfaça os critérios de retenção;
- Para geotêxteis não-tecidos, utilizar a maior porosidade disponível e não inferior a 30%;

- Para geotêxteis tecidos, utilizar a maior porcentagem de abertura de filtração disponível e não inferior a 4%.

3.3.4 Critério de permeabilidade

De modo geral, os critérios de permeabilidade para geotêxteis baseiam-se na relação da condutividade hidráulica no plano do geotêxtil e da permeabilidade do meio a filtrar, sendo adotada a expressão da Equação 3.7 para exemplificar a relação:

$$K_{NGT} > y \cdot K_{solo} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde:

K_{nGT} – condutividade hidráulica normal ao plano do geotêxtil [cm/s];

y – constante cujo valor depende do autor do critério;

K_{solo} – condutividade hidráulica do solo a reter [cm/s].

A condutividade hidráulica do geotêxtil e do meio a filtrar são grandezas físicas e diretamente proporcionais, e o valor da constante “y”, depende do critério de permeabilidade a ser utilizado. Christofer et al (1992 apud Castro, 2005), em seus estudos mostram que o valor de y pode variar entre 0,1 e 10. Lafleur (1999), propõe que “y” seja equivalente a 20 para solos não uniformes com risco de instabilidade interna. No entanto, para o *Comité Français des Géotextiles et Géomembranes* (CFGG, 1996 apud GARDONI, 1995) considera a seguinte relação:

$$\frac{K_{nGT}}{T_{GT}} > A \cdot K_{solo} \quad \text{Equação 3.8}$$

Sendo:

T_{GT} – espessura nominal do geotêxtil (m);

A – 10^3 para gradientes baixos e solos abertos e limpos; 10^4 para gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa e; 10^5 para gradientes elevados e obras de grande responsabilidade.

Os critérios propostos por Christofer et al (1992, apud Castro, 2005), Lafleur (1999) e CFGG (1986 apud Gardoni, 1995), são aplicáveis para condições gerais de permeabilidade para geotêxteis. Em tubos geotêxteis a dinâmica no processo de filtração pode sofrer influência de outros elementos como o bombeamento durante o enchimento entre outros. Castro (2005) sugere que o critério de permeabilidade em tubos geotêxteis pode ser representado por:

$$\frac{K_{GT}}{T_{GT}} \Delta h A > Q \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde:

K_{GT} – condutividade hidráulica normal ao plano do geotêxtil [cm/s];

T_{GT} – espessura do geotêxtil;

Δh = carga hidráulica [cm de coluna d'água];

A = área de filtração [cm²];

Q – vazão de entrada [cm³/s]

Lawson (2006) propôs que geotêxteis utilizados na fabricação de tubos geotêxteis apresentem as características apresentadas na Tabela 3.2. Neste critério são consideradas as possíveis solicitações as quais os tubos poderão ser submetidos, principalmente quando utilizados para proteção costeira, quebra mares ou outras funções cuja a influencia de ondas e marés seja relevante.

Tabela 3.2: Critério de permeabilidade hidráulica para dimensionamento de tubos geotêxteis (adaptado de LAWSON, 2006).

Regime Hidráulico	Período de exposição ao regime hidráulico	
	Intermitente	Contínuo
Fluxo lento	Não necessita de proteção	Não necessita de proteção
	$AOS \leq 0,5 \text{ mm}$	$AOS \leq 0,5 \text{ mm}$
	$q_{n, 100} \geq 10 \text{ L/m}^2.\text{s}$	$q_{n, 100} \geq 10 \text{ L/m}^2.\text{s}$
Velocidade de fluxo < 1,5 m/s	Não necessita de proteção	Não necessita de proteção
	$AOS \leq D_{85} \text{ (retido)}$	$AOS \leq D_{85} \text{ (retido)}$
	$q_{n, 100} \geq 10 \text{ L/m}^2.\text{s}$	$q_{n, 100} \geq 10 \text{ L/m}^2.\text{s}$

Regime Hidráulico	Período de exposição ao regime hidráulico	
	Intermitente	Contínuo
Velocidade de fluxo $\geq 1,5$ m/s	Não necessita de proteção mas podem acontecer poucas mudanças na envoltória devido a eventos intermitentes recorrentes	Não necessita de proteção mas poucas mudanças na envoltória podem ocorrer
	$AOS \leq D_{85}$ (retido)	$AOS \leq D_{85}$ (retido)
	$q_{n, 100} \geq 30$ L/m ² .s	$q_{n, 100} \geq 30$ L/m ² .s
Ondas < 1,5 m	Não necessita de proteção	
	$AOS \leq D_{50}$ (retido)	$AOS \leq D_{50}$ (retido)
	$q_{n, 100} \geq 30$ L/m ² .s	$q_{n, 100} \geq 30$ L/m ² .s
Ondas $\geq 1,5$ m	Não necessita de proteção mas podem acontecer poucas mudanças na envoltória devido a eventos intermitentes recorrentes	Necessita de proteção pois mudanças no geotêxteis podem ocorrer
	$AOS \leq D_{50}$ (retido)	$AOS \leq D_{50}$ (retido)
	$q_{n, 100} \geq 30$ L/m ² .s	$q_{n, 100} \geq 30$ L/m ² .s

Nota: AOS (abertura aparente dos poros da manta geotêxtil utilizada na fabricação dos tubos; $q_{n, 100}$ é a permeabilidade normal do geotêxtil para carga hidráulica de 100 mm.

3.3.5 A influência de floculantes no comportamento hidráulico

Floculantes são aditivos químicos comumente adicionados em misturas, contém sólidos em suspensão visando acelerar o processo de sedimentação ou aumentar a eficiência de retenção através da aglutinação, ou floculação dos coágulos existentes em uma mistura aquosa. Ao adicionar floculantes no processo de desaguamento utilizando tubos geotêxteis, tem-se como objetivo a formação de pontes químicas entre partículas em suspensão para formação de grumos ou flocos, o que permite que a retenção seja mais eficiente e também diminui o risco de colmatação do geotêxtil pelo arraste de partículas finas.

Apesar da expectativa de aumento da eficiência do processo com a utilização de floculantes, é importante que sejam realizados ensaios para verificação da reação deste tipo de polímero com o material a ser desaguado. Em testes realizados por Satyamurthy e Bhatia (2009), foi observado que o tipo e a concentração de alguns polímeros pode até mesmo ter efeito reverso e aumentar o tempo de desaguamento, implicando em resultado contrário ao desejado para

estes testes que visam uma redução no tempo de desaguamento e diminuição da turbidez do efluente.

Vertematti (2015), apresenta um resumo dos tipos de coagulantes e floculantes mais utilizados e o seu funcionamento quando em contato com sólidos suspensos. Na Tabela 3.3 é apresentado um resumo destes principais floculantes.

Tabela 3.3: Resumo dos tipos polímeros mais utilizados (adaptado de Vertematti, 2015)

Coagulante ou Floculante	Função
Polímeros aniônicos	Geração de “pontes” entre partículas já coaguladas e a cadeia de polímero, gerando flocos de maior diâmetro.
Polímeros catiônicos	Neutralização das cargas elétricas superficiais que envolvem os sólidos suspensos e incremento do tamanho dos flocos formado (via formação de pontes). Usualmente utilizado no tratamento de lamas orgânicas.
Cátions	São polieletrólitos catiônicos de baixa peso molecular, os quais possuem como função principal a neutralização das cargas elétricas superficiais e aumento do tamanho dos flocos. Utilizada em substituição aos floculantes inorgânicos convencionais.
Hidróxido de Cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	Usualmente utilizado como agente controlador do pH. Porém, alguns íons de cálcio atuam também como agentes de neutralização das cargas elétricas superficiais, funcionando como um coagulante inorgânico.
Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$); Policloreto de Alumínio (PAC); Cloreto Férrico (FeCl_3); Sulfato ferroso (FeSO_4)	Cátions polivalentes (Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , etc) neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas e os hidróxidos metálicos ao adsorverem as partículas, gerando uma floculação parcial

3.3.6 Eficiência hidráulica do geotêxtil nas fases de enchimento e desaguamento

Em desaguamentos por meio de sistemas de tubo geotêxteis, o geossintético atua como um filtro, retendo a fração sólida no interior do tubo e permitindo que a água livre flua através dos poros do tecido sintético, resultando numa desidratação efetiva. Os sólidos suspensos na mistura a ser desaguada podem formar um pré-filtro, comumente chamado de “*filter cake*”. A sua formação ocorre inicialmente na porção inferior do tubo evoluindo para as áreas adjacentes (CASTRO, 2005).

O processo de enchimento do tubo pode ser realizado em uma única , ou ser constituído de múltiplas fases alternadas com etapas de desaguamento, isso por que ao eliminar a água livre através do geotêxtil, ocorre uma desidratação efetiva do material retido e uma considerável redução do volume inicial. Esta redução de volume permite que cada unidade de tubo possa ser preenchido por bombeamentos sucessivos, até que a seção ótima do tubo seja quase

inteiramente ocupada pela fração sólida do material bombeado. Os ciclos de enchimento e desaguamento podem possibilitar o melhor aproveitamento do volume útil dos tubos, dependendo das características do resíduo a ser desaguado, e podem ser repetidos quantas vezes forem necessárias para a obtenção do desempenho requerido. Em 2006, Lawson ilustrou de maneira simplificada possíveis ciclos de enchimento, desaguamento e consolidação por meio de tubos geotêxteis (Figura 3.18).

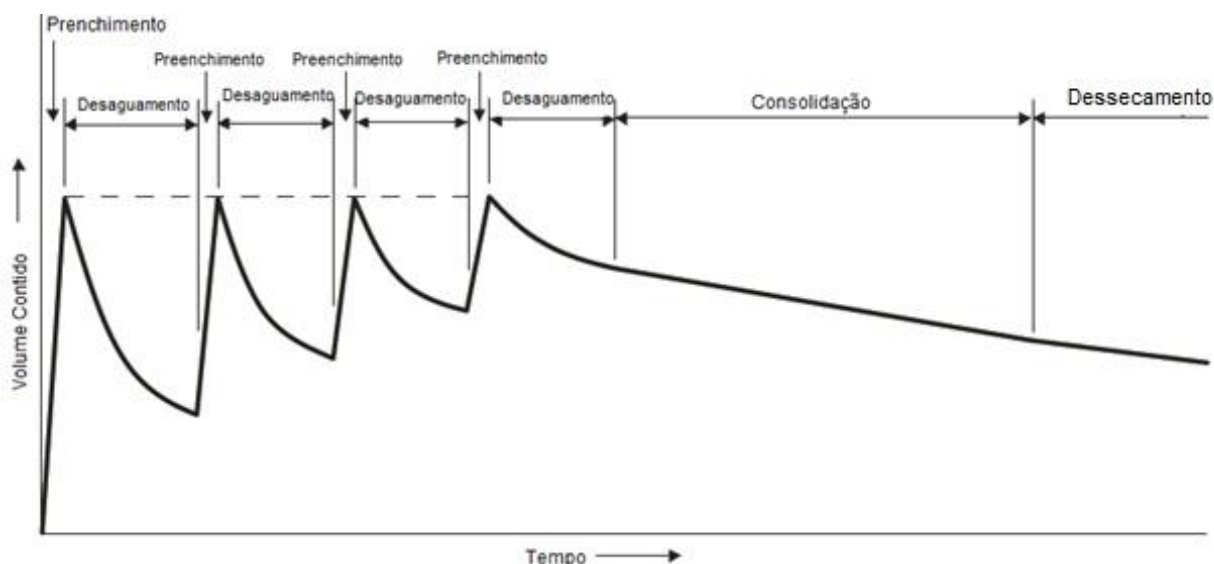


Figura 3.18: Fases de enchimento, desaguamento e consolidação no interior de um tubo geotêxtil (adaptado de LAWSON, 2006).

A fase de enchimento hidráulico consiste em bombear a polpa de rejeito para o interior dos tubos geotêxteis por meio de orifícios de acesso denominados mangas, posicionados nas extremidades do tubo. A fase de desaguamento consiste na filtração pelas aberturas da trama do geotêxtil e a velocidade na qual ocorrerá depende das características dos sólidos suspensos, da concentração de sólidos, a taxa a qual a polpa é bombeada para o interior do tubo e das características do geotêxtil utilizado.

Apesar da simplificação em representar graficamente as fases de enchimento e desaguamento separadas, o desaguamento ocorre ininterruptamente ao longo de todo o processo. Yee et al (2012), mostraram que em tubos de grandes dimensões há uma diferença significativa da taxa de filtração 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, enquanto na fase de desaguamento, a fração líquida é liberada em regime laminar e o desaguamento ocorre em taxas mais baixas devido à ausência da pressão de bombeamento, conforme ilustrado na Figura 3.19. A partir de

observações semelhantes, Cantré e Saathoff (2011) propuseram subdividir o desaguamento em duas fases: a fase de enchimento dos tubos como “turbulento e dinâmico”; e a fase de desaguamento a longo prazo como “hidrostático”.

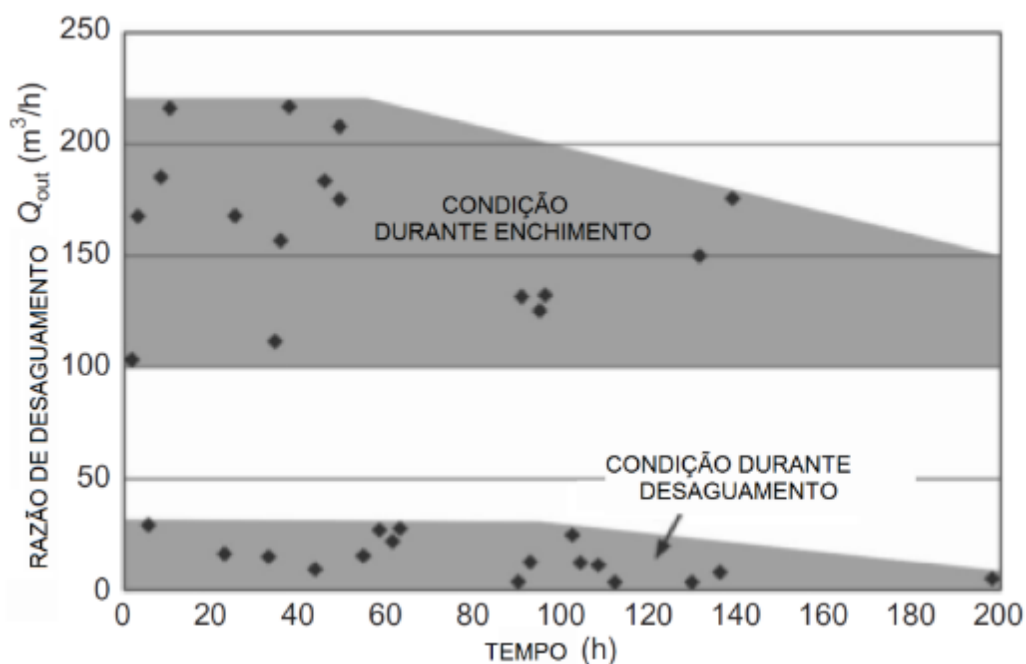


Figura 3.19: Taxa de desaguamento em função do tempo para protótipo em grandes dimensões (adaptado de YEE E LAWSON, 2012)

Baseado nos estudos de Cantré e Saathoff (2011), Yee e Lawson (2012) explicou as diferentes condições no interior do tubo geotêxtil durante os ciclos de enchimento e desaguamento. Na fase inicial (Figura 3.20 (a)) a mistura é introduzida sob pressão criando um regime turbulento e uma zona de sólidos suspensos no interior do tubo. Ainda durante o enchimento, é iniciada a filtragem através do geotêxtil e, dependendo das características da mistura, a fração sólida mais densa pode sedimentar mais rápido formando uma camada de sólidos sedimentados na porção inferior do tubo (Figura 3.20 (b)). Ao atingir a altura desejada neste primeiro ciclo, o bombeamento da polpa é paralisado e o tubo entra na fase apenas de desaguamento. Durante o desaguamento, os sólidos suspensos sedimentam de acordo com a lei de Stokes, Figura 3.20 (c), e a fração líquida é eliminada 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.

Concluída a fase de desaguamento, o bombeamento é retomado sendo observado o soerguimento do geotêxtil e mudança na forma do tubo devido ao material injetado e pressão da bomba. De modo simplificado, nas fases de enchimento subsequentes são identificadas três

zonas distintas no interior do tubo: zona de sólidos suspensos; zona em sedimentação e zona sedimentada, conforme Figura 3.20 (d). Nas fases finais de desaguamento, Figura 3.20 (e) e Figura 3.20 (f), é observada uma redução da vazão que sai do tubo, devido à redução da superfície drenante e da colmatagem parcial do geotêxtil devido às etapas anteriores.

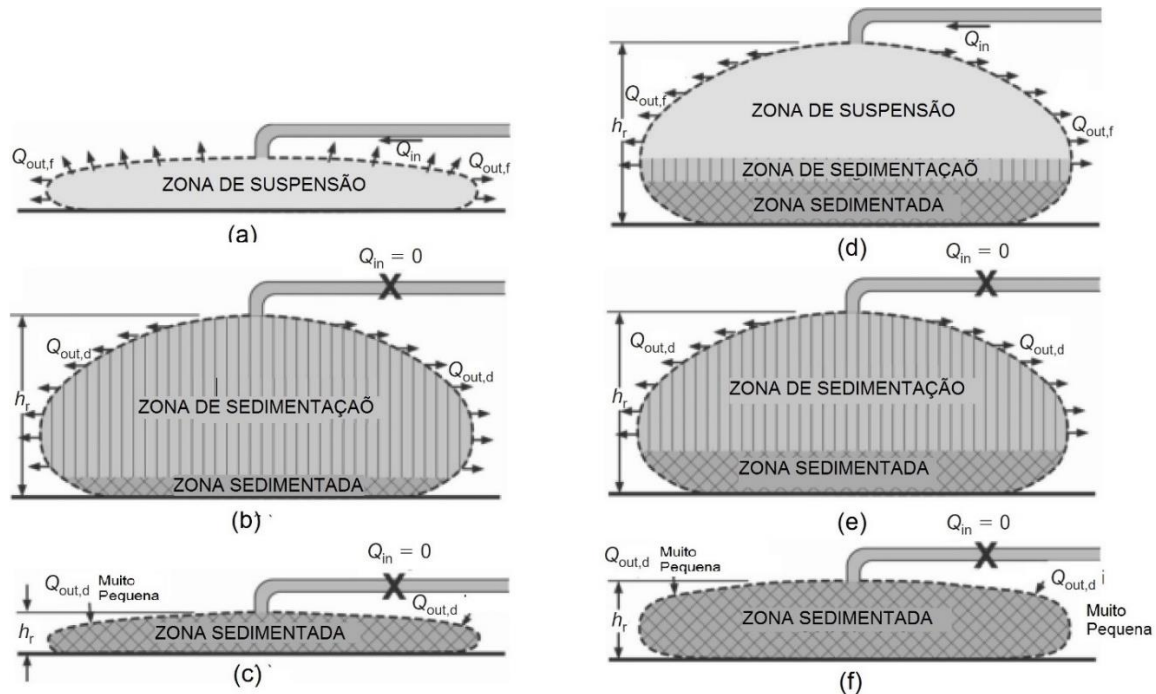


Figura 3.20: Condições no interior do tubo geotêxtil durante os diferentes estágios de enchimento e desaguamento: (a) início do enchimento; (b) fase de desaguamento inicial; (c) final da fase de desaguamento inicial; (d) final da fase de enchimento dos ciclos subsequentes; (e) início e (f) fim da fase de desaguamento dos ciclos subsequentes (adaptado de YEE e LAWSON, 2012).

Após os ciclos de enchimento e desaguamento, os sólidos confinados no interior do tubo continuam a passar pelo processo natural de consolidação e a fração líquida residual entre os vazios das partículas sólidas é eliminada por evaporação, dando início à fase de consolidação.

II Expressões analíticas e empíricas da fase de enchimento

De modo a quantificar os processos físicos que ocorrem no desaguamento de tubos geotêxteis, Yee e Lawson (2012) propuseram formulações matemáticas baseadas em experimentos realizados em protótipos de grande escala. A taxa de desaguamento (A_p), foi relacionada com a vazão que entra (Q_e), e a vazão que sai do tubo (Q_s), conforme Equação 3.10, sendo considerado um desaguamento eficiente quando $A_p > 0,5$ e ineficiente se $A_p < 0,5$.

$$A_p = Q_s/Q_e$$

$$(Equação 3.10)$$

Na fase de enchimento, a porosidade da mistura na zona de sólidos suspensos no interior do tubo pode ser considerada como equivalente à mistura bombeada. A porosidade (n) na fase de enchimento pode ser calculada pela seguinte equação:

$$n = (1 - C) = \frac{G(1 - CS)}{G(1 - CS) + CS} \quad (\text{Equação 3.11})$$

Onde:

C: concentração de sólidos (por volume) na mistura;

G: densidade real dos grãos;

CS: concentração de sólidos suspensos (por peso) na mistura.

Uma importante grandeza a ser avaliada é a variação do volume do tubo em função da taxa de desaguamento. Devido à complexidade geométrica do tubo preenchido, que varia em função do tipo de material de preenchimento principalmente, Yee e Lawson (2012) desenvolveu uma relação empírica (Equação 3.12), que correlaciona volume do tubo (V_T), comprimento (S), altura (H) e diâmetro (D_T) teórico do tubo.

$$V_T = S \cdot D_T^2 \left[\left(\frac{H}{D_T} \right)^{0,815} - \left(\frac{H}{D_T} \right)^{8,6} \right] \quad (\text{Equação 3.12})$$

Ainda segundo Yee e Lawson (2012), essa equação é representativa de tubos cuja razão de altura no enchimento e diâmetro teórico seja inferior a 0,7 ($H/D_T < 0,7$).

II Expressões analíticas empíricas da fase de desaguamento

Durante o desaguamento as variações de altura e volume são grandes em função do volume da fração líquida que flui para fora do tubo. Para modelar numericamente este processo Yee e Lawson (2012) realizaram ensaios de coluna de água para avaliar as taxas de sedimentação de partículas, e conseqüentemente a taxa de liberação de fração líquida livre. Estas grandezas estão relacionadas com a porosidade dos sólidos suspensos na mistura, sendo justificada portanto, a importância de estimar a porosidade nas fases de enchimento e desaguamento. No desaguamento tem-se (Equação 3.13).

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = -n_x^q \quad (\text{Equação 3.13})$$

Onde:

n_x é a porosidade média;

ΔH é a variação da altura

Δt é o intervalo de tempo;

q é uma constante empírica utilizada para relacionar a altura do tubo durante a fase de desaguamento. O valor desta constante é determinado a partir de um ciclo de desaguamento em um ensaio de grande escala. Yee e Lawson (2012) não recomendam a obtenção do parâmetro q em ensaios de laboratório.

As variações de volume do tubo também estão diretamente relacionadas com mudanças da porosidade média (n_x) da mistura em um determinado intervalo de tempo Δt (Equação 3.14):

$$\frac{V_{T(t)}}{V_{T(t-1)}} = \frac{1 - n_{x-1}}{1 - n_x} \quad \text{Equação 3.14}$$

Onde:

V_T é volume do tubo;

n_x é a porosidade média;

A concentração de sólidos (em peso) na mistura pode ser determinada em função da porosidade média em um intervalo de tempo Δt , conforme equação a seguir:

$$CS = \frac{G(1-n)}{G(1-n)+n} \quad \text{Equação 3.15}$$

Onde:

CS é a concentração de sólidos;

A vazão no desaguamento (Q_s) pode ser calculada em função da variação do volume (ΔV) em um determinado intervalo de tempo (Δt), como expresso na Equação 3.16.

$$Q_{s,d} = \frac{-\Delta V}{\Delta t} = \frac{f(\Delta H)}{\Delta t}$$

Equação 3.16

Onde:

$Q_{s,d}$ é a vazão no desaguamento;

ΔH é a variação da altura

Δt é o intervalo de tempo;

ΔV é a variação da altura.

3.4 Comportamento dos tubos geotêxteis sob solicitações mecânicas

Para a utilização de tubos geotêxteis como solução de engenharia, 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, aqueles que afetam o desempenho da estrutura global, e os modos internos, aqueles que afetam o desempenho da estrutura do geotêxtil (LAWSON, 2006).

3.4.1 Estados limites últimos de solicitações externas

Para tubos geotêxteis é importante que seis modos de estado limite externo sejam: estabilidade ao deslizamento, estabilidade ao tombamento, estabilidade ao rolamento, estabilidade global, estabilidade ao escorregamento e capacidade de suporte da fundação, tal como ilustrado na Figura 3.21 (LAWSON, 2006).

De modo geral, os tubos geotêxteis são elementos estáveis quando avaliada a relação de diâmetro de contato com a fundação (B) e altura (H) da seção como, sendo $B/H \sim 1,5$, no entanto, as condições externas do local de instalação são importantes, principalmente se considerado o peso por comprimento linear do tubo, características da fundação e condições de enchimento dos tubos.

Fundações em solos não adensados ou tubos de diâmetro teórico pequeno, $D < 2$ m, apresentam maior suscetibilidade à ocorrência de rolamento de tubos (Figura 3.21 (c)). Quando realizado o empilhamento de tubos, é importante que seja avaliada a estabilidade global do conjunto tubo geotêxtil – fundação (Figura 3.21 (d)). Na estabilidade global é importante que seja considerada ainda as condições de nível d'água no interior e exterior dos tubos.

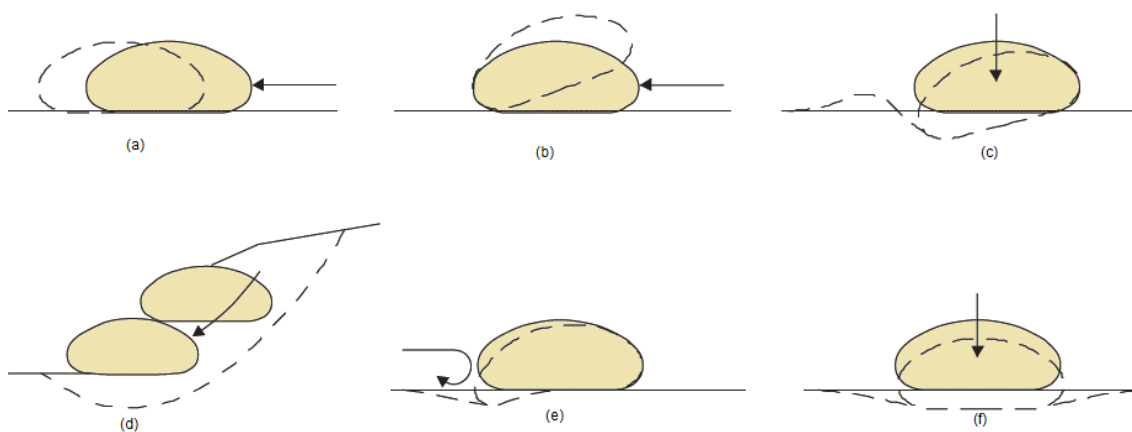


Figura 3.21: Condições de Estado Limite Externo: (a) estabilidade ao deslizamento; (b) estabilidade ao tombamento; (c) estabilidade ao rolamento; (d) estabilidade global; (e) estabilidade ao escorregamento; (f) capacidade de suporte da fundação (adaptado de LAWSON, 2006).

O escorregamento de tubos uns sobre os outros, Figura 3.21 (e), pode ser evidenciado pelas torções das costuras dos elementos. Este 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 desaguamento. O fluxo deste 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.

Para controle de erosões na fundação, é prática comum a instalação de um geotêxtil com função de separação entre a fundação e os tubos, e ainda a implantação de sistema de drenagem superficial para a coleta do efluente desaguado.

Algumas estruturas como diques e quebra mares, construídas com tubos geotêxteis, precisam de geometria e principalmente altura específica para exercerem as funções para as quais foram projetadas. Nestas circunstâncias, e quando identificada fundação compressível, é importante que sejam realizados estudos para avaliação da capacidade de suporte da fundação (Figura 3.21 (e)).

3.4.2 Estados limites últimos de solicitações internas

No estudo de solicitações internas de tubos geotêxteis três modos de estabilidade devem ser avaliados: resistência a tração do geotêxtil, estabilização das propriedades hidráulicas do

geotêxtil quanto à passagem de partículas através da manta e resistência do geotêxtil em função das deformações do material de preenchimento contido, conforme ilustrado na Figura 3.22.

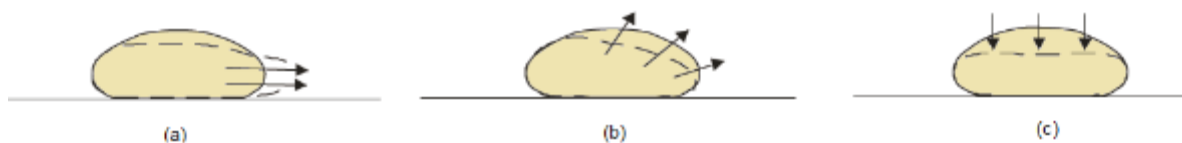


Figura 3.22: Condições de Estado Limite Interno: (a) ruptura do geotêxtil por esforços de tração excessivos; (b) perda da integridade do confinamento do geotêxtil frente a solicitações hidráulicas; (c) solicitações no geotêxtil frente a deformações do material de preenchimento (adaptado de LAWSON, 2006).

I Solicitação de tração em tubos geotêxteis durante o enchimento

Para a utilização de tubos geotêxteis como alternativa de disposição de rejeito de mineração é importante que as solicitações mecânicas as quais o tubo será submetido sejam verificadas. Até o momento a maior parte dos estudos desenvolvidos foram voltados para tubos preenchidos com material granular dragado na formação de aterro hidráulico ou contenção de lodo de ETE. Em Leshchinsky e Leshchinsky (1996), Plaut (1998), Pilarzick (2000), Cantré (2002), Lawson (2006) e Liu *et al* (2010), são observadas propostas de dimensionamento envolvendo análises da forma da seção do tubo em função das características do geotêxtil, como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade, e pressão de bombeamento no enchimento.

A forma assumida para a seção do tubo geotêxtil está por sua vez diretamente relacionada aos processos de instalação, enchimento, desaguamento e consolidação aos quais são submetidos. De modo geral, as formas elípticas, elípticas achatadas, falsa elipse e retangular são as mais estudadas. A forma elíptica é comumente adotada para representar a altura ao final do bombeamento; e a elipse achatada (ou falsa elipse) utilizada para cálculo da altura final na condição adensada após o desaguamento. Para Martins e Vidal (2006), tubos preenchidos com material de baixa permeabilidade tendem a apresentar formas mais achatadas que tubos preenchidos com material drenante.

Para estimar a seção transversal crítica, ou seja máxima altura (H) e largura (W), que o tubo pode atingir, alguns autores propõem a relação entre a seção transversal e a área do elemento considerado. Pilarzick (2000), propôs relações considerando a seção transversal como falsa elipse (Figura 3.23 (a)), elíptica (Figura 3.23 (b)) e ainda aprecia que para uma condição de

enchimento máximo, dificilmente conseguido, a forma da seção se aproxima de um elemento circular (Figura 3.23(c)).

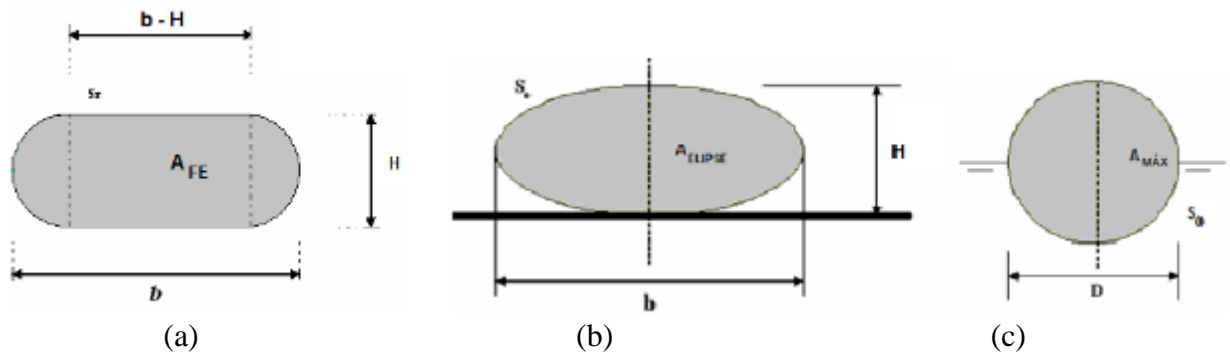


Figura 3.23: Análise da seção transversal do tubo em forma de falsa elipse (a), elipse perfeita (b) e máximo enchimento (c) (adaptado de PILARZICK, 2000).

Elipse Perfeita:

Estimada a forma de uma elipse perfeita e a partindo das equações elementares, Pilarzik (2000) considerou que para um perímetro constante, tem-se que (Equação 3.17 e Equação 3.18):

$$S = \pi \sqrt{\frac{H^2 + b^2}{2}} = \pi D \quad \text{Equação 3.17}$$

Onde:

S é o comprimento de circunferência [m];

H é a altura do tubo geotêxtil em um determinado tempo [m];

b é a maior distância entre vértices da elipse [m];

D é o diâmetro teórico [m];

$$b = \sqrt{2D^2 - H^2} \quad \text{Equação 3.18}$$

Onde:

b é a maior distância entre vértices da elipse [m];

H é a altura do tubo geotêxtil em um determinado tempo [m];

D é o diâmetro teórico [m];

A relação entre a área da seção transversal assumida após o enchimento e a área da seção totalmente preenchida é definida como razão de preenchimento, φ , e é representada pela Equação 3.19.

$$\varphi = \frac{Ae}{A_0} = \frac{\frac{\pi}{4} Hb}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{Hb}{D^2} \quad \text{Equação 3.19}$$

Onde:

Ae é a área da seção transversal assumida após o enchimento [m];

A_0 a área da seção totalmente preenchida [m];

H a altura do tubo [m];

b base de contato com a fundação [m];

D o diâmetro teórico [m];

Substituindo a Equação 3.18 na Equação 3.19 e considerando que $D = \frac{S}{\pi}$ tem-se que:

$$H = \pm \frac{S}{\pi} \sqrt{1 \pm \sqrt{1 - \varphi}} \quad \text{Equação 3.20}$$

Onde:

H é a altura da elipse [m];

S é o perímetro do tubo [m];

φ é a razão de enchimento do tubo;

Falsa Elipse:

Para uma seção transversal próxima a de uma falsa elipse, Pilarzick (2000) propõe que:

$$S_{fe} = 2(b - H) + \pi H \quad \text{Equação 3.21}$$

S_{fe} é o perímetro da falsa elipse [m];

H é a altura da falsa elipse [m];

b é a maior distância entre vértices da falsa elipse [m];

A área da falsa elipse pode ser calculada por (Equação 3.22):

$$A_{fe} = (b - H)H = \pi \frac{H^2}{4} \quad \text{Equação 3.22}$$

Onde:

b é a maior distância entre vértices da falsa elipse [m];

A_{fe} é o perímetro da falsa elipse [m²];

H é a altura da falsa elipse [m];

Fazendo $S = S_{fe}$, $\varphi = A_{fe}/A_0$ e $D = S/\pi$, tem-se pela Equação 3.23 e Equação 3.24:

$$b = \frac{\pi(D-H)+2H}{2} \quad \text{Equação 3.23}$$

Onde:

H é a altura máxima atingida na seção transversal crítica [m];

b é a largura de contato na base [m]

D é o diâmetro teórico do tubo [m];

$$H = \frac{S}{\pi} (1 \pm \sqrt{1 - \varphi}) \quad \text{Equação 3.24}$$

Onde:

S é o perímetro da falsa elipse [m];

φ é a razão de enchimento dada pela área da falsa elipse e a área de um círculo de mesmo perímetro e diâmetro [adimensional]

Lawson (2006) propõe uma relação simplificada entre os elementos geométricos principais do tubo geotêxtil, conforme exposto na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Relação entre elementos geométricos em tubos geotêxteis (adaptado de LAWSON, 2006).

Parâmetros de dimensionamento	Sigla	Em função do diâmetro teórico	Em função da circunferência
Máxima Altura (tubo preenchido)	H	$H=0,6D$	$H=0,19S$
Largura (tubo preenchido)	b	$b=1,4D$	$b=0,45S$
Largura de contato da base	B	$B=0,9D$	$B=0,29S$
Área da seção transversal	A	$A=0,65D^2$	$A=0,07S^2$
Tensão vertical média na base	Px	$Px = 0,72\gamma D^*$	$Px = 0,24\gamma S^*$

* γ = densidade do material de preenchimento.

Liu e Silvester (1977) e Plaut e Suherman (1998) descrevem a forma da seção do tubo geotêxtil a partir de integral elíptica, sendo considerada a distância entre vértices¹ (b) ou diâmetro teórico² (D), largura do contato entre o tubo e fundação (B), altura (H), o comprimento do arco da elipse (S) e o ângulo entre a horizontal e a tangente do tubo no ponto de curvatura crítica (θ). Na Figura 3.24 são apresentados estes elementos de forma relevantes na seção transversal, considerando o tubo apoiado sobre uma fundação rígida.

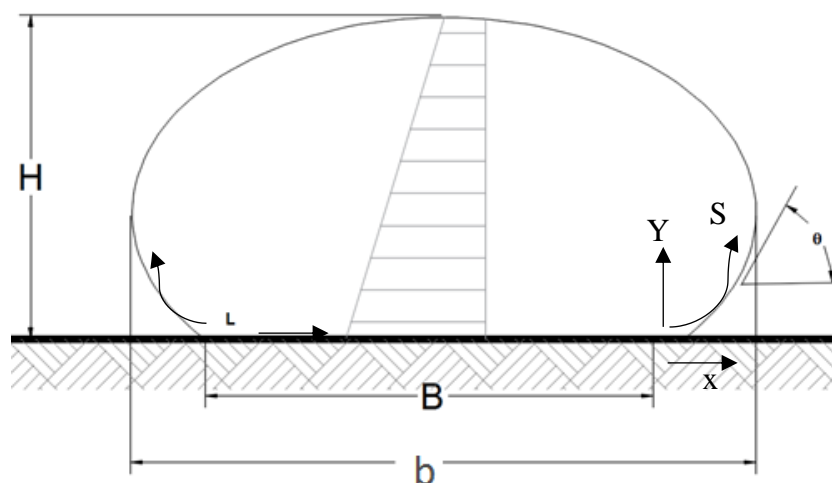


Figura 3.24: Elementos de forma relevantes na seção transversal de um tubo (adaptado de PLAUT E SUHERMAN (1998)).

¹ Nomenclatura geralmente empregada na América do Sul e do Norte.

² Nomenclatura geralmente empregada na Europa e Ásia.

Considerados os elementos geométricos apresentados na Figura 3.24 é possível dizer que a variação da altura do tubo está associada ao seno do ângulo, enquanto a variação da seção transversal está associada ao cosseno do ângulo θ . Esta relação é apresentada na Equação 3.25.

$$\frac{dX}{ds} = \cos\theta; \frac{dY}{ds} = \sin\theta; \quad (\text{Equação 3.25})$$

Quando vazio o tubo fica submetido apenas às solicitações mecânicas da fase de instalação. No início do processo de enchimento, tempo t_0 , passam a atuar a tensão circunferencial no entorno do tubo (T_c), a tensão axial ao longo do comprimento (T_a) e a tensão no bocal (T_p), que atingem seu valor máximo no tempo de completo enchimento do tubo (T_f) (LAWSON, 2006). Durante a fase de desaguamento as pressões internas se reduzem até a condição das solicitações impostas pelo peso próprio do material desaguado (CASTRO, 2005). Na Figura 3.25 é apresentada o esquema de atuação das tensões no geotêxtil durante o enchimento.

Para simular as tensões e deformações atuantes nos tubos geotêxteis, Liu (1981), Plaut e Suherman (1998), Kazimierowicz (1994), Leshinsky e Leshinsky (1996) e Palmerton (2002) utilizam a teoria das membranas e assumem as seguintes hipóteses:

- O geossintético é uma membrana inextensível, de pequena espessura, flexível e de peso desprezível;
- O problema é bidimensional (estado plano de deformações), ou seja, o tubo geotêxtil é suficientemente longo e as seções transversais idênticas em termos de geometria e material;
- O tubo está apoiado sob uma fundação rígida e indeformável;
- A perda de pressão durante o enchimento, por drenagem através do geotêxtil, é desprezível;
- O material de preenchimento é a polpa e o estado de tensões no interior do tubo é hidrostático;
- Não são desenvolvidas tensões cisalhantes entre a polpa e o geossintético;
- O carregamento é linear e atua diretamente no geotêxtil.

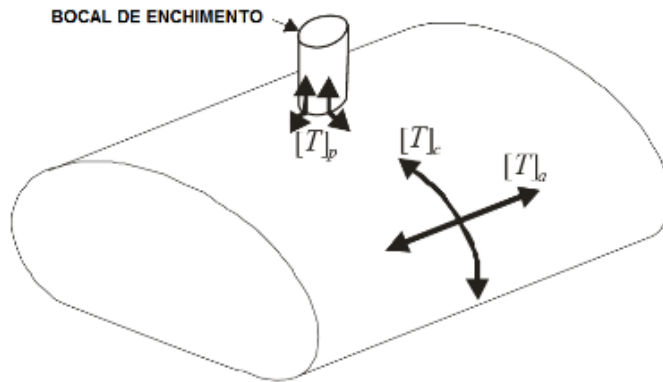


Figura 3.25: Tensões atuantes ao longo do tubo durante o enchimento (adaptado de Lawson, 2006)

Assim como apresentado na Figura 3.27, um elemento de seção transversal cujo comprimento do arco da elipse é S , com pressão interna P , a força tangencial por área Q e a tensão circunferencial por largura perpendicular ao plano da seção transversal T_c , pode ter seus esforços na direção normal (Equação 3.26) e tangencial (Equação 3.27) relacionados por:

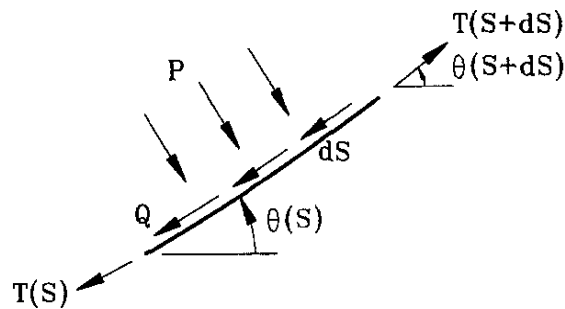


Figura 3.26: Elementos geométricos e esforços atuantes em seção transversal de um tubo (adaptado de PLAUT E SUHERMAN, 1998).

$$T(S) = \frac{dT_c}{dS} \quad (\text{Equação 3.26})$$

$$P = \frac{\tau d\theta}{dS} \quad (\text{Equação 3.27})$$

Estimados os valores das tensões atuantes em um determinado tubo geotêxtil, é importante que o geossintético a ser utilizado para a fabricação dos tubos tenham resistência última à tração (T_u) adequadas para resistir às tensões geradas durante o processo de enchimento (LAWSON, 2006). A resistência a tração final requerida pelo tubo geotêxtil é dada por:

$$[T_u]_a \text{ ou } [T_u]_c \geq FS ([T_{M\acute{A}X}]_a \text{ ou } [T_{M\acute{A}X}]_c) \quad (\text{Equação 3.28})$$

Onde

FS é o valor do fator de segurança e varia entre 4 ou 5.

$T_{u(a)}$ é a tensão de resistência à tração axial última [kN/m];

$T_{u(c)}$ é a tensão de resistência à tração circunferencial última [kN/m];

T_{MAX} é a máxima tensão de resistência à tração circunferencial última [kN/m];

Para Palmerton (2002) a magnitude da tensão circunferencial em torno de um tubo geotêtil plenamente preenchido é uma função da curvatura do geotêtil, sendo que a tensão máxima (T_{MAX}) coincide com o ponto de maior curvatura do tubo, ou seja, nas laterais inferiores do tubo, conforme pode ser observado na Figura 3.27 (a). Na base do tubo, considerada uma fundação rígida e a condição plana do geotêtil nesta porção, as tensões circunferenciais correspondem aos valores mínimos. Na Figura 3.27 (b) é apresentada uma aproximação da distribuição das tensões circunferenciais (T_c) expressas em termos de porcentagem da tensão máxima, sendo observado que na porção inferior [$T_c \sim (10\%-15\%)T_{MAX}$] e na porção superior [$T_c \sim (50\%-70\%)T_{MAX}$].

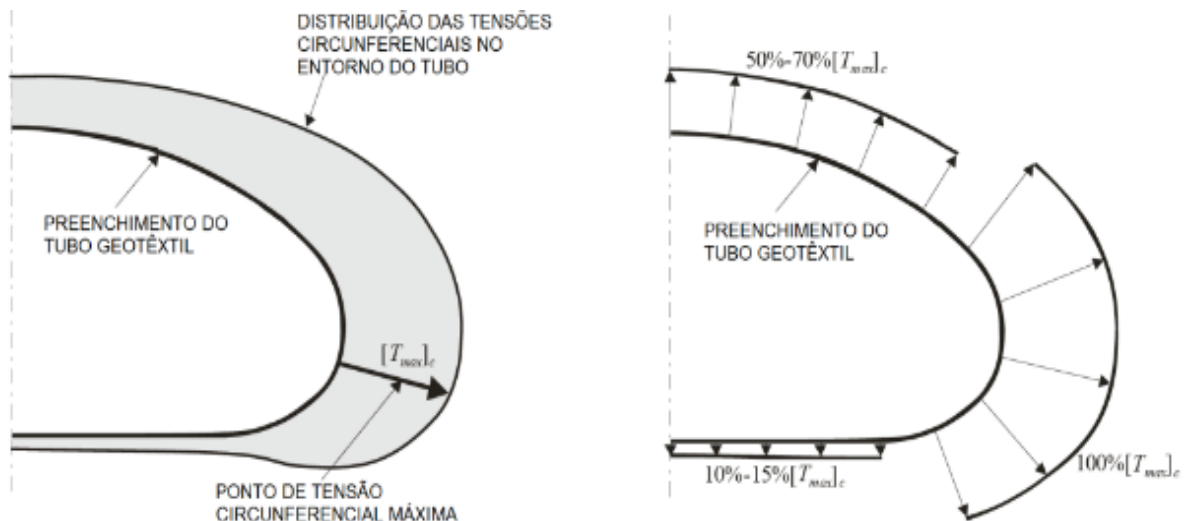


Figura 3.27: (a) Distribuição das tensões circunferenciais no entorno de tubos geotêteis; (b) razão de distribuição da tensão circunferencial em função da porcentagem da $[T_{MAX}]_c$ (adaptado de LAWSON, 2006).

A partir das considerações de Palmerton (2002) e das relações expressas na Tabela 3.4, Lawson (2006) expressou graficamente a $[T_{MAX}]_c$ em função de tubos com diâmetros teóricos de $D = 3,0$ m, $D = 4,0$ m e $D = 5,0$ m. Essa representação gráfica é apresentada na Figura 3.28.

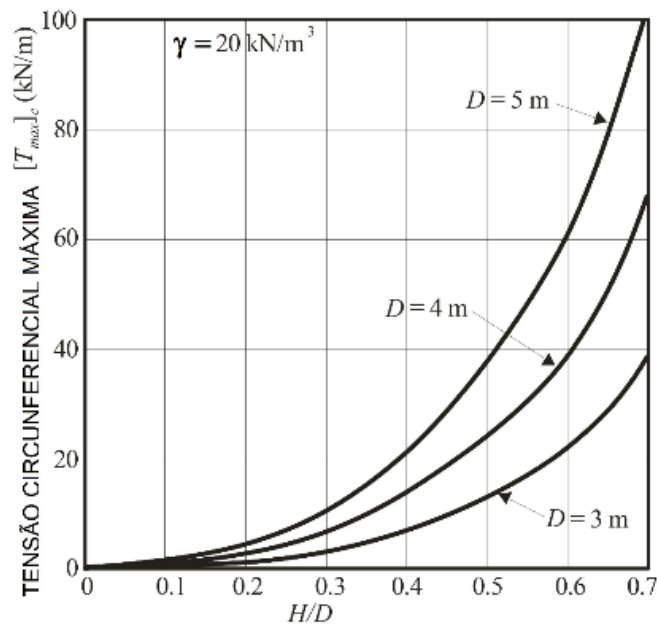


Figura 3.28: Máxima Tensão Circunferencial em tubos geotêxteis em função da relação H/D (adaptado de LAWSON, 2006).

As máximas tensões circunferenciais e axiais foram ainda correlacionadas por Lawson (2006) também a partir das proposições de Palmerton (2002), tendo $[T_{MAX}]_a = 0,63 [T_{MAX}]_c$ ou conforme ajuste apresentado na Figura 3.29.

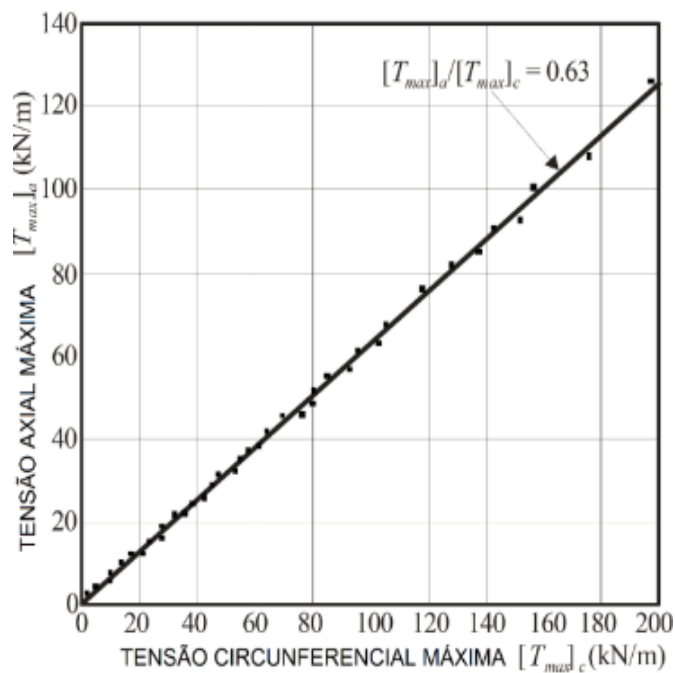


Figura 3.29: Máximas tensões axiais e circunferenciais atuantes em um tubo (adaptado de LAWSON, 2006).

Kazimierowicz (1994) estimou as tensões atuantes em função da pressão de enchimento (p_0), sendo considerados o cenário inicial, no qual o peso do material ainda não é relevante frente às solicitações sendo preponderante a pressão de enchimento; no cenário intermediário é relevante a pressão de enchimento e as tensões devido ao peso próprio do rejeito em função da altura preenchida e ; como último cenário, o tubo plenamente preenchido. Para todas estas relações é considerado o γ como o peso específico do material, H_{ext} a altura do tubo preenchido, p_0 a pressão de bombeamento, sendo (Figura 3.30):

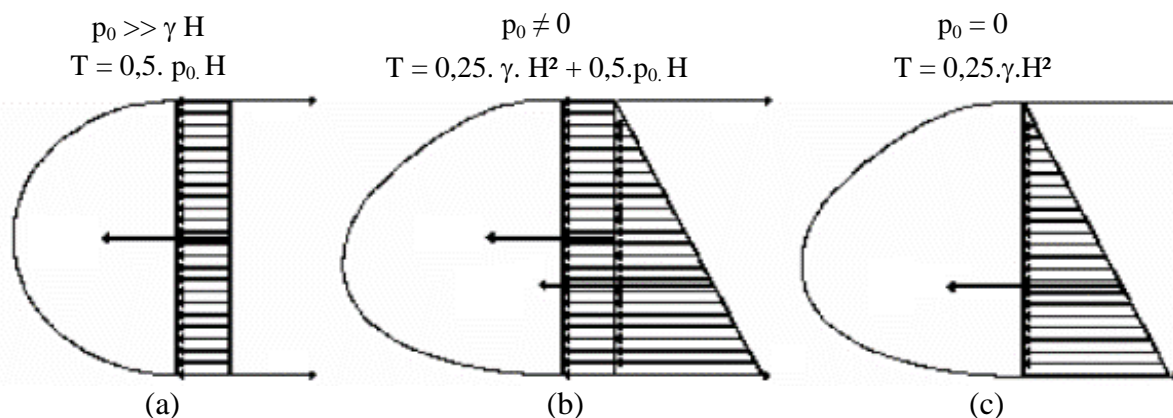


Figura 3.30: Análise das tensões atuantes proposta por Kazimierowicz (1994): (a) tensão atuante em função da pressão de enchimento; (b) tensão atuante em função da pressão de enchimento e peso específico do material de preenchimento; (c) tensão atuante em função do peso específico do material de preenchimento.

II Propriedades do geotêxtil frente à solicitações hidráulicas

Na utilização de tubos geotêxteis é importante que sejam estimadas as condições de contorno hidráulicas as quais o tubo ficará submetido, prevendo assim os dimensionamentos necessários para a proteção e conservação da integridade do geotêxtil e garantia do confinamento do material de preenchimento. Segundo Lawson (2006) o geotêxtil deve atender à dois aspectos: impacto do regime hidráulico atuante na estrutura de tubos geotêxteis, como intensidade e velocidade de correntes de água em contato direto com o geotêxtil; além do tempo de solicitação direta do sistema, se exposto por um período temporário, como no desaguamento de materiais com elevada umidade, intermitente quando utilizados como quebra mares, por exemplo, ou contínuo, quando utilizados para a formação de estruturas finais, como diques. Para tanto é proposta uma relação de abertura de filtração com o regime hidráulico que pode variar com a velocidade do fluxo de água e ainda altura de coluna d'água a qual ficará submetido.

III Deformação de tubos geotêxteis

Estruturas formadas por tubos geotêxteis são suscetíveis à deformações devidas às variações volumétricas sofridas durante o processo de enchimento, à solicitações externas, como o escorregamento de tubos, ou ainda pela consolidação do material de preenchimento que por sua vez implica em deformações do material e do tubo geotêxtil. Lawson (2006) recomenda que o enchimento seja realizado de maneira controlada de modo a permitir o máximo aproveitamento da seção do tubo, favorecendo que o material de enchimento esteja confinado e em estado denso. O uso frequente de areia como material de preenchimento é justificado pela baixa compressibilidade deste tipo de material que confere pouca consolidação e consequentemente menores deformações ao tubo.

Prever as deformações as quais o geotêxtil será submetido é importante para que a resistência à tração e o módulo de rigidez sejam suficientes para que o geotêxtil não se rompa e que o material de preenchimento continue confinado.

3.4.3 Medidas para proteção de tubos geotêxteis

Para maior flexibilidade e aplicabilidade de tubos geotêxteis é importante que seja garantida uma vida útil de projeto relativamente longa para estes elementos. Considerados os estados limite últimos externos e internos, aos quais um tubo geotêxtil é submetido, e as degradações às quais o material é exposto devido à ambientes agressivos como materiais contaminantes, variações bruscas de temperatura, raios ultra violetas e carregamentos hidráulicos, Lawson (2006) sugere algumas medidas adicionais para a garantia da vida útil do geotêxtil.

- Uso de tubos geotêxteis adicionais: projeta-se a estrutura com números adicionais de tubos geotêxteis formando uma camada de sacrifício de tubos de modo a preservar os tubos indispensáveis para a estabilidade da estrutura;
- Aumento da espessura do geotêxtil ou uso de geotêxtil de multicamada: a maior espessura de material demorará mais tempo para ser degradada proporcionando uma vida útil maior para os tubos;
- Coberturas geotêxteis: aplica-se um geotêxtil de cobertura envolvendo a estrutura de tubos geotêxteis. Assim, a cobertura externa exerce a função de camada de sacrifício

proporcionando uma vida útil prolongada para os tubos geotêxteis internos. Esta é uma medida que pode ser adotada quando há uma exposição contínua ao ambiente degradante e os carregamentos hidráulicos não são altos;

- Camada de cobertura: aplica-se uma camada de cobertura de solo, geomanta, biomanta ou geocélula preenchida, evitando assim a exposição aos raios ultra violetas a longo prazo e ao desgaste da superfície do geotêxtil por variação ou fluxo de nível d'água;
- Revestimento metálico: aplica-se uma cobertura metálica flexível em torno da estrutura do tubo geotêxtil evitando assim a exposição aos raios ultra violetas e diminuindo as solicitações hidráulicas em mares ou rios, por exemplo.

Ao elaborar um projeto com tubos geotêxteis e considerar os possíveis danos deve-se levar em consideração situações extremas, como fluxo atípico de água, quedas de árvores ou outras que podem sobrecarregar ou afetar a longo prazo o desempenho dos tubos geotêxteis expostos (LAWSON, 2006).

O vandalismo também pode afetar o desempenho dos tubos geotêxteis. Para tanto, a aplicação de camada de cobertura com solo, por exemplo, eliminando a exposição dos tubos, permite o isolamento e evita vandalismos. A depender do tipo de aplicação dos tubos geotêxteis, a camada de solo de cobertura pode ser seguida de revegetação por gramíneas, o que contribui para a integração visual com o ambiente no qual está inserido.

3.5 Ensaios para avaliação da qualidade do desaguamento

Para a aplicabilidade de tubos geotêxteis no desaguamento de polpas são considerados critérios para estimar a concentração de sólidos finais após o desaguamento; tempo necessário para alcançar esta concentração; perda inicial de sólidos e tempo para interrupção após início do desaguamento e, se necessário, níveis máximos de contaminantes no efluente (YEE e LAWSON, 2012). Os ensaios para estes critérios incluem análises em laboratório e campo, como os ensaios de Cone Geotêxtil, bolsa suspensa e bolsa fechada que permitem uma análise da qualidade do desaguamento e dosagem de polímeros floculantes sem a necessidade de caracterizar individualmente o geotêxtil ou mistura a ser desaguada. Para estimar as fases de enchimento e tempo de desaguamento necessários para atingir o desempenho vislumbrado

para os tubos, é necessária a realização de ensaios de protótipos em grande escala. As características específicas de cada um destes ensaios é apresentada a seguir.

3.5.1 Ensaio de Cone Geotêxtil

O ensaio de cone geotêxtil permite uma análise preliminar da eficiência do geotêxtil na retenção de partículas sólidas da mistura, turbidez do efluente filtrado, velocidade de desaguamento e concentração final de sólidos (MIRATCH, 2005 apud MARTINS 2006 e LAWSON, 2006). É ainda por meio do ensaio de cone que é avaliada a conveniência, o tipo e a dosagem de polímeros, geralmente flocculantes, para aumento da eficiência do desaguamento. Estes polímeros auxiliam na transformação de partículas suspensas, colóides, em partículas de maior diâmetro e mais pesadas favorecendo a velocidade de decantação e conseqüentemente a melhoria do processo de filtração.

Para a realização do ensaio de cone é necessário uma amostra de geotêxtil de 30 cm de diâmetro dobrado na forma de um cone; prendedor para tecido, funil para suporte do geotêxtil, recipiente para coleta do efluente, aproximadamente 500 mL da mistura a ser desaguada, cronômetro e polímero, se a influência deste vier a ser estudada. O procedimento deste ensaio consiste em verter a mistura sob o filtro de cone de geotêxtil e registrar o tempo para a água livre fluir através do filtro, que é determinado a partir do início do vertimento até cessado o gotejamento do sistema. A montagem do ensaio e o vertimento da mistura são apresentados na Figura 3.31.



Figura 3.31: Montagem e vertimento da mistura no ensaio de Cone de Geotêxtil (LAWSON, 2006)

Quando se deseja avaliar a influência do floculante no desaguamento, Torres e Timpson (2011) sugerem diluir o polímero em uma solução com água, determinando a concentração do soluto (polímero) em PPM (partes por milhão). Essa diluição inicial deve ser homogênea com a mistura a ser desaguada e em seguida executado o procedimento padrão do ensaio de cone de geotêxtil. Este procedimento deve ser repetido para cada tipo e concentração de polímero a ser testada uma vez que segundo Satyamurthy e Bhatia (2009), o tipo e a quantidade de alguns polímeros pode até mesmo aumentar o tempo de desaguamento. Ressalta-se que o tipo de polímero mais adequado é determinado em função do tempo de desidratação, turbidez do efluente e volume de sólidos retidos.

Pela facilidade em adquirir e transportar os materiais necessários e facilidade de execução do ensaio de cone geotêxtil, este é um teste que geralmente é empregado para análises preliminares tanto em laboratório quanto em campo.

3.5.2 Ensaio de Bolsa Suspensa de Geotêxtil (HBT)

Também conhecido por HBT devido à expressão em inglês “*Hanging Bag Test*”, este ensaio, segundo a ASTM D7701 (2011), serve para determinar o fluxo de água e sólidos suspensos filtrados por um sistema geotêxtil em um determinado tempo. Por meio do controle do volume de entrada, vazão, tempo de desaguamento e turbidez do efluente, é avaliada a eficiência de filtração do geotêxtil.

Para a execução deste ensaio a ASTM propõe 2 diferentes procedimentos, sendo o procedimento B a ação de uma bolsa de geotêxtil com 0,92 m de altura e diâmetro de 1,52 m, com alças que permitam a suspensão da bolsa em um apoio fixo. Sob este conjunto deve ser colocado um recipiente plástico para receber o efluente. Além destes materiais são necessários 19 L de mistura a ser desaguada (aproximadamente 5 baldes de 4L), cronômetro, ao menos 6 recipientes transparentes e graduados de 1L para a coleta do efluente e realização de ensaio, misturador e balança.

Na Figura 3.32 é apresentada a montagem do ensaio pelo procedimento B da norma.

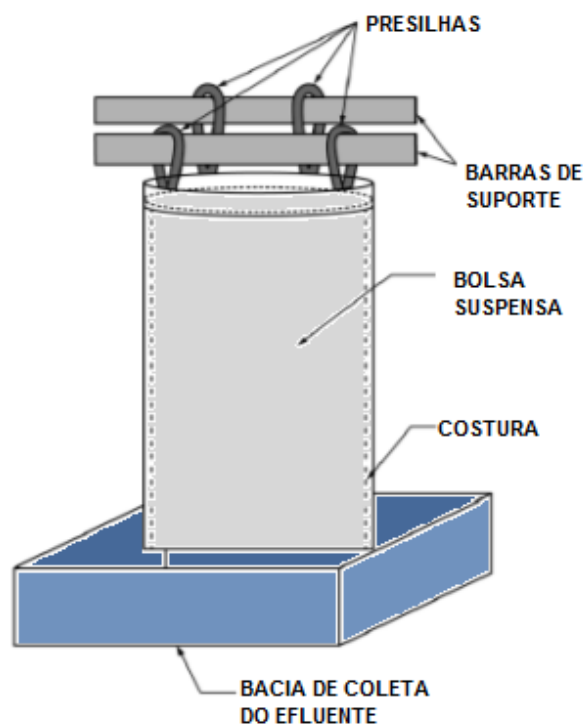


Figura 3.32: Montagem do procedimento B (adaptado de ASTM D7701, 2011).

A contagem do tempo de ensaio do procedimento B tem início após o vertimento dos 19 L de rejeito no interior da bolsa. A norma recomenda que em intervalos de tempo de 2, 5, 10, 15, 30, 45 e 60 minutos o recipiente de coleta do efluente sobre a bolsa suspensa seja substituído por um recipiente limpo e vazio, e amostras do efluente coletadas sejam encaminhadas para análises físicas e químicas com a finalidade de estimar a eficiência ao desaguamento e filtração do sistema. Após os primeiros 60 minutos de ensaio, as medidas devem ser realizadas em intervalos mais longos, de 24 horas até atingir o máximo de 48 horas. Ao final do ensaio, a amostra do material retido na bolsa pode ser coletada para a determinação da porcentagem final de sólidos retida e teor de umidade.

Para Torres e Timpson (2011), o ensaio de Bolsa Suspensa difere dos demais por permitir a análise do fluxo na direção vertical e simular as tensões principais de desaguamento considerando a altura típica de um tubo geotêxtil preenchido. No entanto, além de não ser preciso quanto à determinação do volume de sólidos retidos, as tensões aplicadas pelo vertimento do afluente são baixas e oscilam enquanto as tensões de campo são altas e contínuas. Koerner e Koerner (2006), Martins (2006) e Tominaga (2010), apontaram ainda a dificuldade de execução do ensaio, dimensão do aparato, dificuldade na obtenção do volume de amostra a ser ensaiada e influência das condições climáticas.



Figura 3.33: Montagem e execução do ensaio de Bolsa Suspensa de Geotêxtil (MARTINS, 2006).

3.5.3 Ensaio de Bolsa Fechada de Geotêxtil

Também conhecido por Ensaio de Bolsa de Pequena Dimensão (TOMINAGA, 2010), este ensaio foi inicialmente proposto por Lawson (2006), e em seguida adaptado pela *Geosynthetic Research Institute GRI* por meio do projeto de norma GT15 (GRI, 2009). Em 2013 a *ASTM International* publicou a norma D7880/D7880M (2013), que aborda ensaios para determinação do fluxo de água e sólidos suspensos retidos em bolsa fechada de geotêxtil. Este ensaio utiliza bolsa de geotêxtil de pequena dimensão (53 cm x 53cm não preenchido) para compreensão do processo de desaguamento e avaliação da qualidade do efluente e do percentual de material sólido retido na bolsa.

Além da dimensão especificada na norma, a bolsa deve ter todos os lados cortados e com o mesmo padrão de costura ao longo de toda a borda. Na porção central superior da bolsa deve ser instalado uma flange adaptada roscável de 50mm de diâmetro, na qual será conectada um tubo plástico transparente de 50 mm de diâmetro e 1,10 m de altura. Esta 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. Um esquema da montagem deste

ensaio de desaguamento em bolsa fechada, segundo procedimento da ASTM, é apresentado na Figura 3.34.

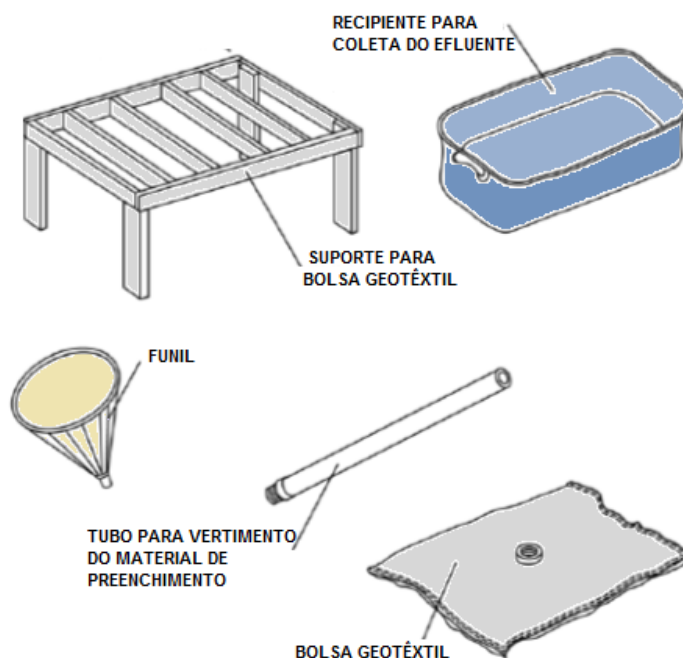


Figura 3.34: Montagem do ensaio de Bolsa Fechada de Geotêxtil (adaptado de ASTM 7880, 2013).

Além do suporte e bolsa geotêxtil, deve ser reservado um volume de 55 L a 95 L de mistura a ser desaguada, um recipiente para a coleta do filtrado com dimensões próximas a da base de apoio (61 cm x 71 cm) e capacidade de reservação de 75 L, recipientes de 0,5 L para amostragem do efluente coletado e cronômetro para contagem do tempo.

O procedimento de norma indica que, após montagem do ensaio, o geotêxtil deve ser molhado com água filtrada. Em seguida a mistura deve ser vertida no topo do tubo, que por sua vez deve ser ligeiramente levantado do fundo da bolsa para evitar o retorno da mistura para o interior do tubo. A bolsa geotêxtil deve ser completamente preenchida no menor tempo possível. É recomendável que em intervalos de tempo sejam recolhidas amostras para análises físicas e químicas do efluente. O ensaio chega ao fim após 7 dias de ensaio ou até que a drenagem atinja uma altura de 2,54 cm no interior do recipiente, em um período de 24 horas.

Segundo Tominaga (2010), tendo em vista a semelhança dos objetivos e resultados obtidos com o ensaio de bolsa fechada em geotêxtil, este ensaio pode substituir o de Bolsa Suspensa, devido à vantagem de demandar menor volume de material e permitir ainda medir a carga hidráulica no tempo. Um exemplo do resultado deste ensaio quando monitorada a carga hidráulica é apresentado graficamente na Figura 3.35.

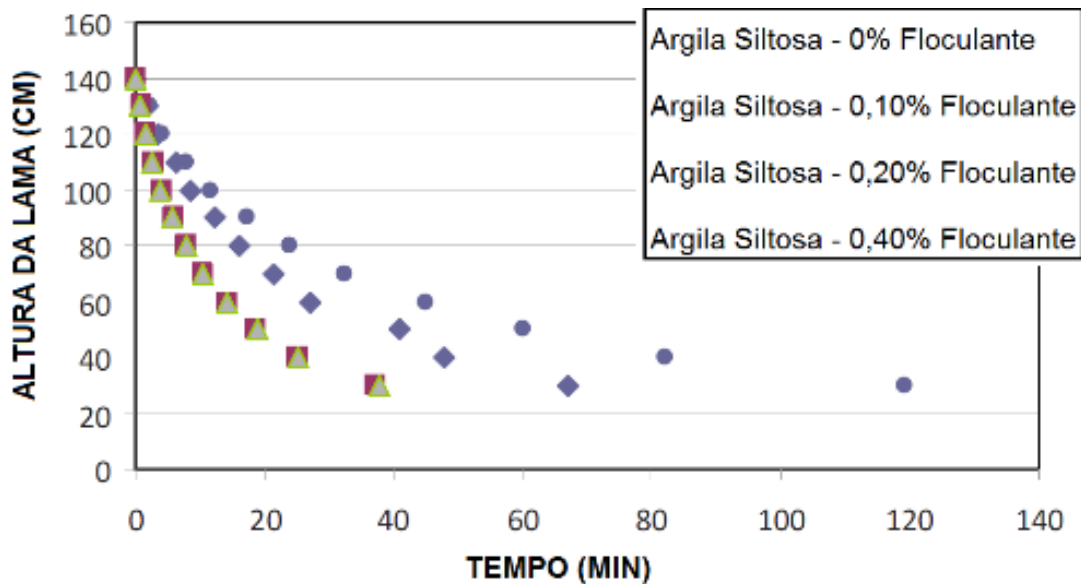


Figura 3.35: Exemplo de resultado do ensaio de pequena dimensão GT15 (TOMINAGA, 2010).

3.5.4 Ensaio de Protótipo em grande dimensão

Para novos projetos, Lawson (2006) propõe ainda a realização de ensaios de protótipo em grande dimensão ou dimensão real para confirmar ou modificar as premissas assumidas a partir dos ensaios de menor escala, como Bolsa Suspensa de Geotêxtil e Ensaio de Bolsa Fechada de Geotêxtil. Estes ensaios de menor escala permitem avaliar a qualidade do desaguamento, mas são de pouca utilidade para a estimativa do tempo de desaguamento necessário para a estabilização dos tubos em grande escala. Para Yee e Lawson (2012), o ensaio de protótipo em grande dimensão é a melhor forma de avaliar o desaguamento e reproduzir com precisão as fases de enchimento do tubo.

Fowler, Larkins e Duke (2005), realizaram testes em protótipos em grande dimensão para avaliar o desaguamento de esgoto e lodo de alumínio na estação de tratamento de esgoto (ETE) da cidade de Vicksburg no estado do Mississippi. O uso de tubos para este desaguamento teve como objetivo avaliar a redução da quantidade de água intersticial e, conseqüentemente, a redução do peso, custo de transporte e de disposição dos resíduos de ETE. O protótipo utilizado por Fowler, Larkins e Duke (2005), tinha 4,5 m de diâmetro e 6 m de comprimento (

(a). Após 24 horas de desaguamento e consolidação, foi removida a porção superior do tubo geotêxtil (

(b)), e constatada uma concentração de sólidos em torno de 30% a 45%.



Figura 3.36: (a) Ensaio de protótipo em grandes dimensões; (b) consistência da polpa de ETE 24 horas após desaguamento e remoção do tubo geotêxtil (adaptado de FOWLER, LARKINS E DUKE, 2005).

Na fase de projeto foram testados tubos de dimensões maiores, sendo 13,5 m de diâmetro, 27 m de comprimento e 2 m de altura, permitindo um armazenando de aproximadamente 10,5 m³/m, conforme pode ser observado na Figura 3.37. O desaguamento do efluente ocorreu simultaneamente ao enchimento dos tubos, o que demorou cerca de 3 a 4 dias.

Shin e Oh (2003) realizaram ensaios em protótipos de 25 m de comprimento por 1,2 m de altura, sendo um tubo preenchido com areia e outro com material fino. Neste teste observaram que o tubo de areia teve seu desaguamento estabilizado após um dia, enquanto o tubo com material fino demorou mais de uma semana. O ensaio de campo permitiu ainda à Shin e Oh (2003) avaliar as modificações geométricas do tubo, associadas ao aumento da largura devido ao espalhamento do material no interior do tubo e condições de fundação.



Figura 3.37: Enchimento de tubo em grande escala (adaptado de FOWLER, LARKINS E DUKE, 2005).

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

No início da pesquisa foi realizada visita a uma instalação de tubos geotêxteis, preenchidos com rejeito de mineração de ferro. Essa visita foi realizada após 6 anos do enchimento dos tubos, sendo possível observar tanto a adaptação dos tubos ao meio no qual foram inseridos quanto as solicitações externas ocorridas no enchimento. Após análises visuais, procedeu-se a exumação de um dos tubos geotêxteis desta obra, na qual foram observados aspectos qualitativos do rejeito confinado e variação da distribuição granulométrica do material ao longo da profundidade e comprimento do tubo. Todas as informações obtidas durante a visita permitiram formular hipóteses e procedimentos que embasaram a metodologia aplicada nesta pesquisa.

Após a visita de campo foram iniciados os ensaios de laboratório e campo para análise de materiais e procedimentos para o desaguamento do rejeito de ouro, rejeito efetivamente estudado nessa pesquisa. Essas análises contemplaram, principalmente, as etapas de estudo necessárias para a avaliação do desaguamento, entendimento do comportamento do rejeito durante o enchimento e desaguamento e, a variação da forma do tubo.

Em laboratório foram realizados ensaios de caracterização da amostra de rejeito de ouro para melhor compreensão do comportamento deste material no interior do tubo. Na ocasião foram realizados ensaios de teor de sólidos da polpa de rejeito, granulometria por sedimentação, massa específica e ensaio de adensamento hidráulico, pelo método da bomba de fluxo.

Foram realizados ensaios para determinação da massa por unidade de área conforme ISO 9864 (ABNT, 2013), e espessura nominal de acordo com ISO 9863 (ABNT, 1992).

Para testar a capacidade de filtração do sistema rejeito/geotêxtil e dosar as concentrações de floculante adequadas para a melhoria da eficiência do desaguamento, foram realizados ensaios de cone geotêxtil, conforme procedimentos recomendados por Lawson (2006), Satyamurthy e Bhatia (2009) e Torres e Timpson (2011). Para avaliar o processo de desaguamento a partir das concentrações de floculante, foram realizados os ensaios de bolsa de geotêxtil de pequena dimensão, conforme a norma D7880/D7880M (ASTM, 2013).

Para confirmar as premissas assumidas nas etapas de testes de laboratório realizadas, e ainda estimar o tempo de desaguamento necessário até a completa estabilização de tubos geotêxtil em tamanho real, foram realizados ensaios de protótipo em grande dimensão. Este ensaio de

grande escala permitiu avaliar as condições de enchimento e prescrever procedimentos técnicos para enchimento de tubos geotêxtil com rejeito fino de mineração.

4.1 Exumação de tubos geotêxteis em disposição de rejeito de mineração

Em uma mineradora de ferro em Minas Gerais foram utilizados tubos de 25 e 50 m de comprimento fabricados com geotêxteis não-tecidos, para a disposição de rejeito fino. O objetivo era aumentar a vida útil do reservatório da barragem de rejeito devido à dificuldade em alteá-la rapidamente, e por falta de novas áreas para disposição. Diante da situação, no ano de 2011, o rejeito contido no interior do reservatório da barragem foi dragado (Figura 4.1 (a)) e bombeado na consistência de lama (Figura 4.1 (b)) para o interior de tubos (Figura 4.1 (c)) posicionados e empilhados ao longo do próprio reservatório.

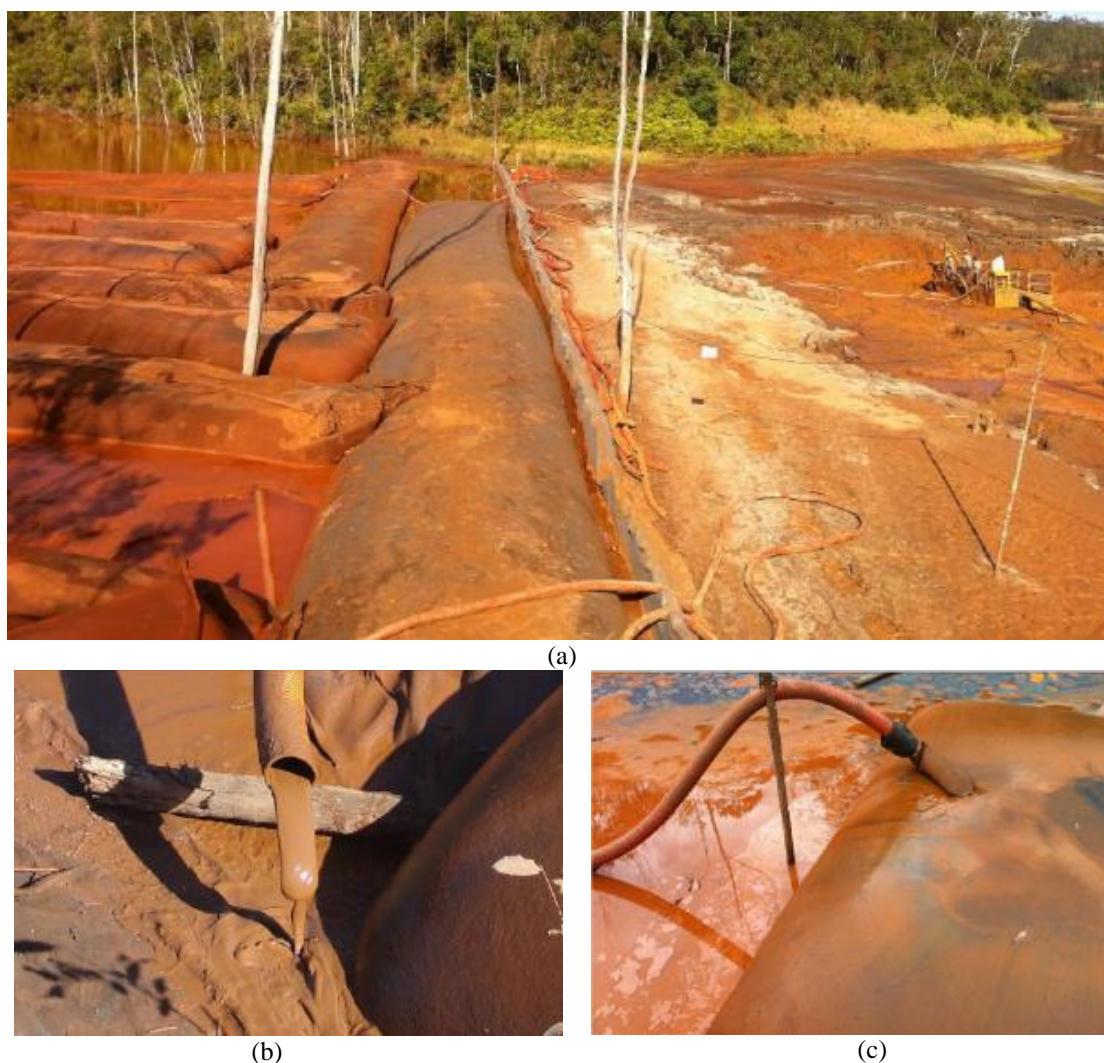


Figura 4.1: Em (a) dragagem do rejeito de minério de ferro do reservatório da barragem; (b) consistência do rejeito para bombeamento para o interior do tubo de geotêxtil;(c) conexão do mangote da bomba ao tubo. durante o enchimento (OBER GEOSINTÉTICOS, 2013).

O processo foi justificado pela redução do volume ocupado pelo rejeito, devido à utilização do método de desagamento e confinamento, além da possibilidade de empilhamento vertical e conseqüente aumento de área e volume disponível no reservatório. Neste procedimento, foram utilizados tubos fabricados em geotêxtil não-tecido, com gramatura de 600 g/cm², não sendo utilizados floculantes no processo de desagamento. O aspecto do empilhamento dos tubos imediatamente após seu enchimento pode ser visualizado na Figura 4.2.



Figura 4.2: Empilhamento de tubos de geotêxteis não tecidos logo após enchimento (OBER GEOSINTÉTICOS, 2013).

Aproximadamente 6 anos após a realização deste procedimento, foi feita uma visita ao reservatório da barragem de rejeito onde foram instalados estes tubos. Com as modificações do processo e do planejamento de utilização das áreas do reservatório, parte dos tubos empilhados receberam uma camada de revestimento e passaram a exercer função de acesso no interior do reservatório, conforme pode ser observado na Figura 4.3. A utilização como acesso, permite estimar não só a diversidade de aplicação para os tubos geotêxteis, mas ainda a estabilidade do empilhamento realizado, uma vez que suportou o tráfego de equipamentos e veículos para a aplicação da camada de cobertura e ainda condição visualmente estável durante a visita de campo, mesmo sob uma carga hidráulica a montante do empilhamento.

Os tubos geotêxteis empilhados e que não receberam a camada de cobertura, permitiram a observação de diferentes aspectos físicos, principalmente evidências de solicitações externas durante o processo de enchimento e empilhamento dos tubos. Os tubos preenchidos com rejeito encontravam-se bastante consolidados, sendo possível caminhar sobre eles sem ser observada qualquer movimentação ou deformação (Figura 4.4).



Figura 4.3: Tubos geotêxteis revestidos com camada de cobertura para permitir o acesso de pessoas e veículos.



Figura 4.4: Aspecto geral da consolidação da superfície dos tubos geotêxteis após 6 anos do enchimento.

O preenchimento dos tubos geotêxteis foi realizado pelo bombeamento de rejeito por meio dos bocais de enchimento instalados na extremidade de cada. Os tubos de aproximadamente 25 m de comprimento apresentava apenas um bocal, de cerca 0,90 m de comprimento e diâmetro de 0,30, conforme pode ser observado na Figura 4.5. As relações geométricas de instalação destes bocais atendem às recomendações da GT10 (2012). Observou-se ainda que, apesar de os bocais não estarem fechados com grampos ou anéis para isolamento do tubo, não

foi observada migração do material de preenchimento para o exterior, possivelmente justificado pelo alto grau de confinamento deste material.



Figura 4.5: Bocal de enchimento dos tubos geotêxteis.

Foi observada também a torção da costura de algumas unidades de tubos geotêxteis, como é mostrado na Figura 4.6. Essa torção permite constatar que ocorreu deslocamentos rotacionais dos tubos durante o processo de enchimento ou mesmo desagendamento dos mesmos. Esse processo de torção pode estar associado à sobreposição de tubos antes que cessado o fluxo de desagendamento dos elementos inferiores. Deste modo, o fluxo ascendente, proveniente do desagendamento dos tubos inferiores, pode ter minimizado as tensões de contato entre os tubos favorecendo a rotação em torno do seu próprio eixo.



Figura 4.6: Escorregamento entre tubos podendo ser evidenciado pelo deslocamento da costura lateral.

Essa rotação em torno do próprio eixo implica em uma movimentação dos elementos do empilhamento, que pode corroborar para escorregamentos e deformações ao longo do empilhamento. Essa condição de solicitação externa foi descrita por Lawson (2006), e observada em campo através das deformações apresentadas pelo tubo geotêxtil, conforme ilustrado na Figura 4.7.



Figura 4.7: Deformações ao longo de tubo geotêxtil.

As condições da fundação, que nesta instalação é constituída por material inconsolidado e saturado no próprio reservatório da barragem, pode contribuir para a ocorrência de deformações e recalques diferenciais. As observações de campo indicaram ainda que, os tubos da base apresentam maior deformação quando comparadas as do tubo superpostos, conforme mostrado na Figura 4.8Figura 4.7, o que confirma a influência da fundação nas solicitações externas atuantes em tubos geotêxteis.



Figura 4.8: Deformação na região de contato e superposição de tubos geotêxteis.

Apesar de não ter sido realizado nenhum tipo de plantio de sementes ou revegetação, observou-se o desenvolvimento de vegetação ao longo do contato entre os tubos, com a presença de gramíneas, leguminosas, samambaias e pequenos arbustos de até 1,5 m de altura (Figura 4.9). Apesar de ser uma instalação composta pelo empilhamento de elementos sintéticos, o desenvolvimento autônomo de espécie vegetal induz a percepção da viabilidade de aplicação de cobertura vegetal e seu desenvolvimento associado à trama do próprio geotêxtil dos tubos. Esta disponibilidade é relevante quando considerada a condição de fechamento de uma estrutura geotécnica em empreendimentos de mineração e a reabilitação da área impactada.



Figura 4.9: Desenvolvimento de vegetação 6 anos após realizado o empilhamento.

Para compreensão das condições do rejeito confinado, foi realizada a abertura de um dos tubos do empilhamento para exumação. Ao abrir o tubo, foi observada a formação de uma superfície craquelada do rejeito, conforme pode visto na Figura 4.10. Essa superfície craquelada indica a textura fina do material retido no interior do tubo, e pode indicar a perda da resistência por tração da superfície do material confinado. No entanto, estudos específicos podem ser requeridos para verificar a influência deste efeito na região de contato entre tubos ou estabilidade de um empilhamento considerando a existência desta camada.



Figura 4.10: Superfície craquelada de rejeito no interior do tubo de geotêxtil.

As condições de confinamento do rejeito possibilitaram ainda a moldagem de amostras indeformadas retiradas na linha de centro do tubo, como pode ser notado na Figura 4.11 (a). Na moldagem da amostra foi possível constatar o comportamento variável da deposição do rejeito no interior do tubo, com bandagens exibindo textura ora mais argilosas, ora mais arenosas e cores variegadas (Figura 4.11 (b)), marrom avermelhado, cinza a amarelo esbranquiçado, resultado do processo de segregação de partículas durante o enchimento dos tubos.



(a)



(b)

Figura 4.11: (a) Amostra indeformada de rejeito durante a moldagem e extração; (b) segregação das partículas de rejeito dentro do tubo.

Outros pontos de investigação foram abertos longitudinalmente ao tubo exumado, sendo possível constatar que a variação de textura dos sedimentos confinados é tanto vertical, devido à deposição, quanto longitudinal, possivelmente associado ao processo de bombeamento da lama e do peso específico do grão de rejeito no interior do tubo. Foram coletados ainda em cada local de retirada das amostras de rejeito, faixas dos geotêxteis do tubo para posterior análises.

A exumação dos tubos e a retirada das amostras de rejeito e de geotêxtil coletadas não puderam ter prosseguimento devido à ocorrência do acidente na área da mineradora, o que impossibilitou a continuidade da pesquisa.

4.2 Estudo de campo em grande escala

Para subsidiar a aplicação dos estudos de disposição de rejeito de ouro em tubos geotêxteis, foi considerado o rejeito gerado em uma importante província aurífera localizada no nordeste da Bahia, a cerca de 200 km da capital Salvador. A extração do ouro ocorre por meio de lavra subterrânea e está em operação desde a década de 1980. Na Figura 4.12 são apresentados diversos sistemas de disposição de rejeito na área estudada.



Figura 4.12: Sistema de disposição de rejeito da área de estudo (SANTOS, 2014).

O rejeito da área de estudo é oriundo do processo de beneficiamento do ouro constituído pelas etapas de preparação (britagem, moagem, peneiramento, classificação), e concentração centrífuga, cujos detalhes de cada uma destas etapas são esquematizados no fluxograma de

processo de beneficiamento apresentado na Figura 4.13. Todo o rejeito gerado no beneficiamento é lançado no sistema de disposição de rejeitos da mina, que é composto por um conjunto de barramentos ao longo do vale, com a formação de lagos, conforme ilustrado na Figura 4.12. Por conter rejeito contaminado, todos os reservatórios formados por estes conjunto de barramentos são impermeabilizados com geomembrana de PVC de 0,80 mm de espessura, ou polietileno de alta densidade (HPDE) de 1,5 mm, texturizada em uma das faces.

Atualmente o transporte e disposição de rejeito nos reservatórios são operados por ciclones. A polpa que sai do último tanque de beneficiamento é bombeada, estando posicionados 12 ciclones de 4” ao longo do sistema de disposição, sendo 10 destes ciclones operados constantemente e 2 reservados para operação em eventuais manutenções no sistema ou em situações atípicas. Estes ciclones operam individualmente em suportes móveis, que permitem reposicioná-los conforme necessidade para disposição do volume total de rejeito gerado diariamente.

Considerado os objetivos desta pesquisa, foram coletadas amostras para a caracterização do rejeito e realização de ensaios para a avaliação das condições de desaguamento por meio de tubos geotêxteis. A coleta das amostras foi realizada após a peneira de carvão fino e antes do lançamento por ciclonagem na barragem de rejeitos, conforme círculo vermelho assinalado na Figura 4.13. Este local foi definido visando a realização dos ensaio de protótipo de escala real, que será realizado próximo ao ponto de lançamento do rejeito na barragem.

Deste modo, apesar da variabilidade do processo de beneficiamento do minério, buscou-se a semelhança das características físicas e químicas do rejeito gerado no processo no momento do ensaio de protótipo, e também dos ensaios de laboratório. A utilização de tubos geotêxteis no processo de disposição de rejeito da área de estudo objetiva não somente o incremento de segurança pelo desaguamento e separação física natural entre a fração sólida e líquida do rejeito, mas ainda permitir que no futuro sejam feitos testes quanto a possíveis contribuições deste sistema no processo de fechamento da barragem.

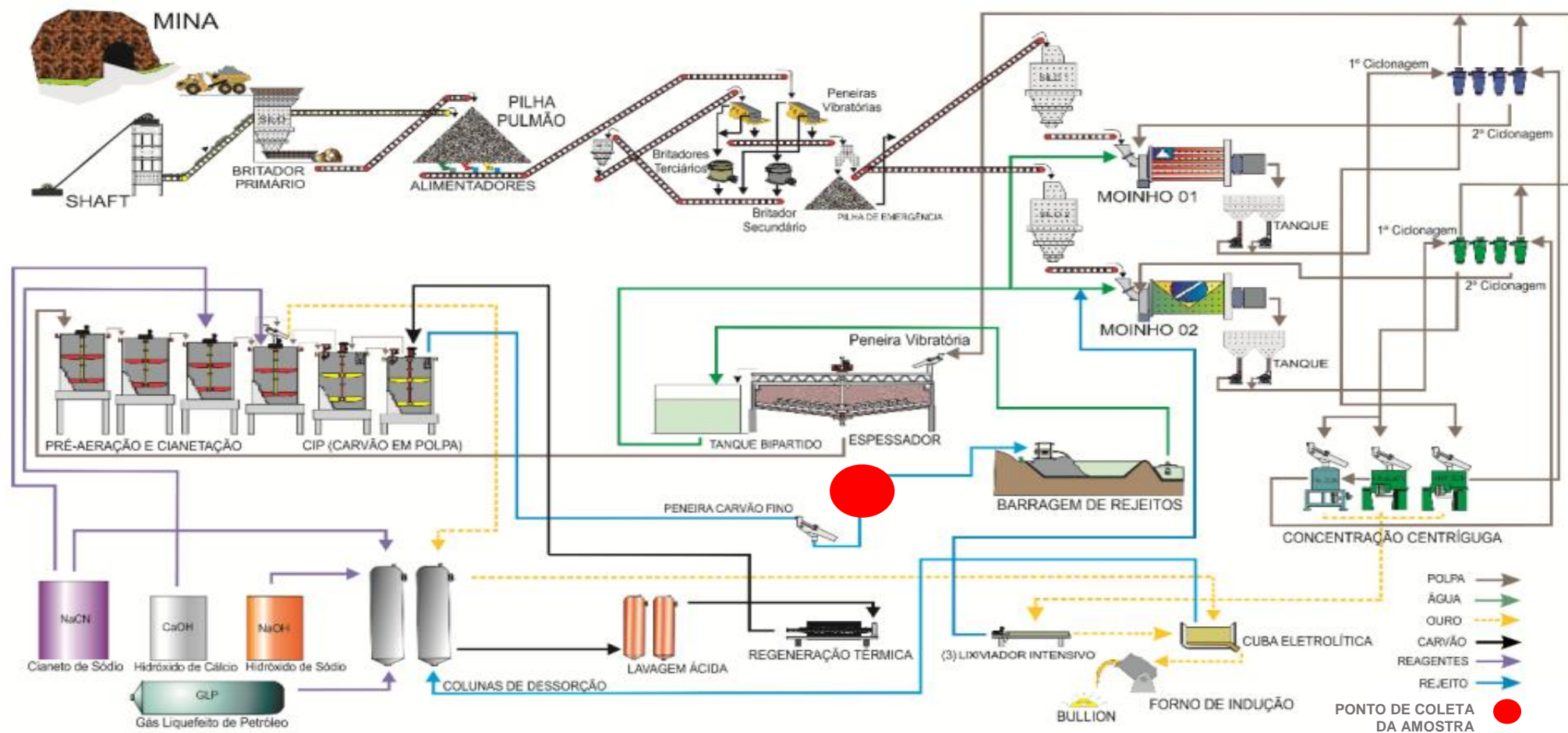


Figura 4.13: Fluxograma de Processo de beneficiamento do minério da área de estudo (BRIO GOLD, 2016).

4.3 Ensaios de caracterização geotécnica do rejeito

A caracterização de um rejeito de mineração está relacionada à origem mineral da rocha e ao processo de beneficiamento ao qual é submetido para a separação entre o minério e o resíduo a ser descartado. Cada tipo de rejeito e cada área minerada tem uma característica particularizada, que pode ainda apresentar pequenas alterações ao longo da vida útil do empreendimento minerário, a depender das variabilidades do minério explorado e das condições de beneficiamento ao qual é submetido, o que justifica a necessidade da realização de ensaios para a determinação da curva granulométrica do rejeito estudado.

Os ensaios de caracterização geotécnica do rejeito foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UFMG (LabGeo). As amostras de rejeito total coletadas na área da mineradora foram secas ao ar livre até que fosse alcançada a umidade natural dos grãos, e em seguida blendadas, formando uma amostra única, a qual foi submetida ao procedimento de quarteamento. A partir desta amostra blendada e quarteada, foi retirado um volume de amostra suficiente para a realização dos ensaios de caracterização completa do rejeito, que compreenderam ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, teor de umidade, massa específica, Limites de Atterberg, permeabilidade e adensamento hidráulico. Os procedimentos específicos utilizados para cada um destes ensaios são apresentados a seguir.

4.3.1 Teor de umidade, massa específica dos grãos e teor de umidade

Assim que foram abertos os recipientes contendo as amostras de rejeito total estudado foi feita a homogeneização da amostra total por meio de agitadores, visando evitar uma segregação entre as frações sólidas e líquidas devido ao processo da sedimentação dos sólidos entre o período de coleta, transporte e análise da amostra. A partir da amostra homogeneizada foram retiradas quantidades representativas de material para a realização do ensaio de teor de umidade, que é determinado em função da razão entre a massa seca e a massa total do rejeito.

A massa específica dos grãos, ou massa específica dos sólidos, é um valor médio da massa específica de cada um dos grãos minerais que constituem a fase sólida de um solo. A partir de uma amostra de 500 g de material passante na peneira # 4,8 mm, conforme NBR 6457 (ABNT, 2016), foi realizado o ensaio para determinação da massa específica dos grãos.

Para a determinação do teor de sólidos, foram utilizados (30 a 50) g de rejeito seco, colocados em capsulas e secas em estufa até constância de massa. O valor do teor de umidade foi determinado a partir da relação entre a massa de água e massa de sólidos existentes em um mesmo volume de solo.

4.3.2 Distribuição granulométrica do rejeito

Os ensaios para a obtenção da curva granulométrica completa, ou seja, peneiramento do material que passa pela peneira # 40, e sedimentação no material passante pela peneira # 200, foram realizados conforme norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Para verificar as diferenças no comportamento da curva granulométrica do rejeito quanto à agregação ou não da fração fina, foram executados dois tipos de ensaio de sedimentação, o primeiro fazendo uso apenas da água destilada e o segundo fazendo o uso de hexametáfosfato de sódio, na concentração de 45,7 g do sal por 1000 cm³ de água destilada. Para representatividade das condições de campo e verificação da influência do fluido do rejeito no processo de sedimentação, foram realizados ainda ensaios de sedimentação com fluido em detrimento à água destilada, também com e sem a adição de defloculante, o hexametáfosfato de sódio.

4.3.3 Ensaio de Adensamento Hidráulico com bomba de fluxo

Após o bombeamento do rejeito para o interior dos tubos geotêxteis irá ocorrer o processo de sedimentação e adensamento por peso próprio do rejeito. As etapas de bombeamento do rejeito e sedimentação ocorrem relativamente rápidas, o que torna o adensamento uma etapa relevante no processo de confinamento de rejeito em tubos geotêxteis.

O rejeito de ouro em estudo possui granulometria fina e seu comportamento no adensamento pode ser melhor representado pelo ensaio de Adensamento Hidráulico, também conhecido por HCT (*hydraulic consolidation test*). Este ensaio permite a determinação experimental das leis de compressibilidade e de adensamento dos solos, para baixas tensões, a partir da relação de “índice de vazios x permeabilidade” (curva de permeabilidade), e “índice de vazios x tensões efetivas” (curva de compressibilidade), (MENEZES, 2010). Para a determinação destas propriedades foi aplicada uma carga descendente ao longo de uma amostra de solo que, em

associação aos efeitos de peso próprio, induz o adensamento da amostra por gradientes de percolação.

O ensaio de adensamento hidráulico foi conduzido em quatro fases distintas, sendo: Fase 1 - determinação do índice de vazios para a tensão efetiva zero (e_{00}), também conhecida como fase de sedimentação; Fase 2 - ensaio de adensamento induzido por forças de percolação; Fase 3 - ensaio de carregamento em etapas; e Fase 4 - ensaio de permeabilidade com bomba de fluxo para cada carregamento utilizado. Este ensaio HCT foi realizado no Laboratório de Rejeitos de Mineração pertencente ao Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, e uma visão geral do equipamento utilizado, composto por célula triaxial modificada, bomba de fluxo, painel de controle de pressão, transdutor diferencial de pressão, sistema de carregamento e sistema de aquisição de dados, é apresentada na Figura 4.14.

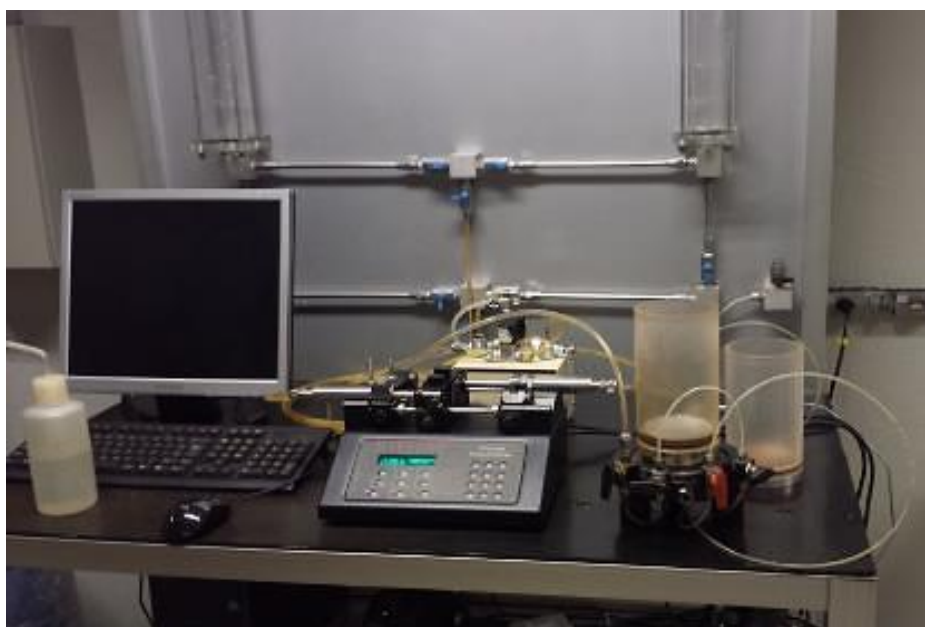


Figura 4.14: Equipamento de ensaio HCT com bomba de fluxo.

Para a preparação do corpo de prova, foi feita uma mistura da fração sólida do rejeito com água até a obtenção de uma lama com teor de sólidos aproximado de 50%, similar ao teor de sólido da disposição em campo. Ao todo, foram preparados dois corpos de prova para a realização do ensaio HCT por bomba de fluxo. Na Figura 4.15 são mostrados os corpos de prova.

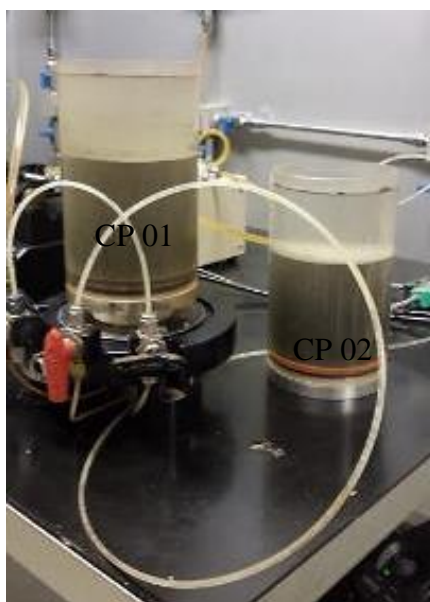


Figura 4.15: Corpos de prova, CP-01 e CP-02, moldados para o ensaio HCT com bomba de fluxo.

- **Fase 1 – Fase de Sedimentação**

Na disposição inicial, o rejeito apresenta aspecto fluido e seu índice de vazios por vezes é muito superior ao do material efetivamente decantado no interior do tubo geotêxtil. Deste modo, é importante entender o índice de vazios inicial da amostra de rejeito com teor de sólidos de 50%.

Durante o processo de homogeneização da amostra de lama de rejeito, foi retirada uma amostra para a determinação do índice de vazios inicial (e_{00}). A amostra retirada para a fase de sedimentação foi colocada dentro da célula de ensaio forrada em sua base com papel filtro, com o auxílio de um funil. O aspecto final do corpo de prova utilizado da fase de sedimentação, logo após sua preparação, é apresentado na Figura 4.16 (a).

A amostra preparada foi deixada em repouso por 18 horas e o aspecto do corpo de prova após este período pode ser observado na (Figura 4.16). Após este período foi verificado que a altura da camada de sólidos era de 8,4 cm.

Concluída a Fase 1, o líquido sobrenadante formado devido à sedimentação foi retirado por sifonamento. Os sólidos sedimentados foram então transferidos para um recipiente para a determinação do teor de umidade e conseqüentemente a densidade real dos grãos. Esse teor de umidade e densidade real dos grãos, permitem a determinação do índice de vazios para a

tensão efetiva nula (e_{00}), para o teor de sólidos de aproximadamente 50% da amostra preparada.



Figura 4.16: (a) Corpo de prova para a fase de sedimentação (Fase 1) após sua preparação; (b) corpo de prova após 18 horas em repouso para sedimentação.

- **Fase 2 – Adensamento induzido por percolação**

O corpo de prova CP-01 foi efetivamente submetido à fase de adensamento. Após 18 horas de repouso, o líquido sobrenadante foi retirado por sifonamento e, cuidadosamente, colocado sobre o topo da amostra um papel filtro e pistão de acrílico da câmara triaxial. A partir deste momento, a câmara triaxial foi acoplada ao sistema e preenchida com água destilada. Esta célula triaxial possui um suspiro que permite que a pressão no interior da célula de pressão se iguale à externa a medida que a água é bombeada pela bomba de fluxo. Na Figura 4.17 é apresentado esquema simplificado de execução da fase de adensamento por bomba de fluxo.

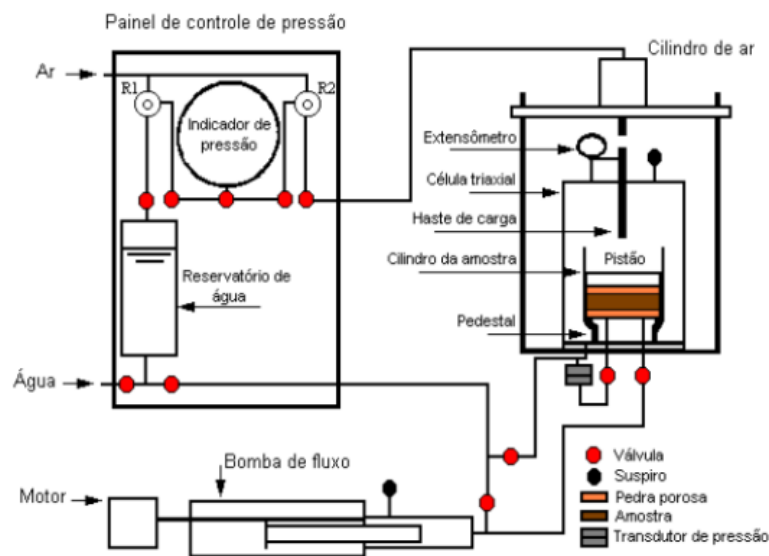


Figura 4.17: Esquema da fase de adensamento induzido por percolação com bomba de fluxo (BOTELHO, 2001).

Esta fase de ensaio consiste na aplicação de uma força de percolação descendente imposta pela bomba de fluxo no corpo de prova, o que provocará o adensamento por percolação. É importante ainda observar que a haste de carga não fica apoiada sob o pistão durante essa fase do ensaio, de modo a garantir que nenhuma outra sobrecarga, se não o fluxo descendente condicionado pela bomba de fluxo, foi responsável pelo adensamento. Apenas ao término do adensamento a haste é apoiada ao pistão, o que leva ao acionamento do extensômetro para a determinação da altura do corpo de prova.

Antes de iniciar a fase de adensamento foi verificado o nível de poropressão na base do corpo de prova e a altura inicial amostra. De acordo com Botelho (2001), a velocidade inicial para o funcionamento da bomba de fluxo não possui critérios bem definidos, sendo recomendado iniciar com valores baixos até ser atingido um valor de poropressão aproximado entre 2 kPa e 5 kPa. É recomendável ainda que os valores da poropressão não sejam inferiores a 0,3 kPa ou superiores a 10 kPa. Se o valor da vazão selecionada resultar numa poropressão muito pequena, o ensaio deve ser repetido com uma vazão maior, se a vazão escolhida incorrer numa poropressão superior a 10 kPa o corpo de prova deve ser descartado e outro ensaio preparado. É importante destacar ainda que a vazão da bomba de fluxo deve ser crescente, não sendo recomendável reduzi-la, pois o corpo de prova já estaria pré-adensado, o que levaria a resultados incorretos .

Diante das considerações, o ensaio foi iniciado com uma velocidade de fluxo baixa de 0,05 mm/min e aumentada gradativamente até uma velocidade de 0,8 mm/min, para a qual foi obtida uma variação de poropressão de aproximadamente 2,0 kPa. Para cada velocidade testada foi medida a variação de poropressão ocorrida durante um intervalo de tempo de 30 minutos.

Quando a variação de poropressão se estabilizou em 2,0 kPa para um fluxo constante, deu-se por concluída a fase de adensamento por fluxo. Concluído o adensamento, a haste de carregamento pôde, então, ser movimentada para medir o deslocamento.

- **Fase 3 – Adensamento por carregamento**

Para obter dados de adensamento em uma faixa de tensão efetiva mais elevada, é realizado o ensaio de carregamento em etapas. O carregamento foi feito por etapas, começando com carga de 1 kg até ser atingido 50 kg, conforme mostrado na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Etapas do ensaio de carregamento.

Tempo (min)	Carga Adicionada (kg)
0	1
8	1
15	4
20	4
25	5
30	5
35	10
Total	50 kg

Esta fase de adensamento por carregamento teve duração de 17 horas, e a cada 5 segundos eram registrados os valores de poropressão e a variação da altura do corpo de prova, a partir do deslocamento da haste de carregamento apontado no extensômetro.

- **Fase 4 – Permeabilidade**

Para a determinação da permeabilidade um fluxo descendente é imposto ao corpo de prova com a bomba de fluxo. O valor da poropressão gerada na condição de equilíbrio é medida, e a permeabilidade correspondente pode ser calculada. De acordo com Botelho (2001), a velocidade de fluxo imposta pela bomba é geralmente 10 vezes menor que a velocidade utilizada no ensaio de adensamento induzido por percolação.

Para o corpo de prova ensaiado, a velocidade adotada na fase de adensamento induzido por percolação foi de 0,8 mm/min, o que permitiu a adoção de uma velocidade de fluxo de 0,1 mm/min no ensaio de permeabilidade. A velocidade de poropressão estabilizou em 0,54 kPa após 4 horas de ensaio.

Obtidos os dados de ensaio, foi realizada a análise dos resultados por meio do programa SICTA (*Seepage Induced Consolidation Analysis*), que por meio de interações fornece os parâmetros para as leis de compressibilidade (índice de vazios x tensão efetiva), e de permeabilidade (índice de vazios x permeabilidade).

4.4 Amostragem e caracterização do geotêxtil

A partir das características dos rejeitos obtidas por meio dos ensaios de caracterização e avaliados os produtos disponíveis pelo fabricante considerado, foi selecionado o geotêxtil tecido de polipropileno, de resistência nominal igual ou superior a 77kN/m.

Apesar do controle tecnológico ao longo do processo de fabricação de produtos geossintéticos, podem ocorrer variabilidades nas características do material. Tanto pelo processo de fabricação em si, quanto por possíveis falhas envolvidas. Deste modo, foram realizados ensaios para a verificação da espessura nominal, gramatura, abertura de filtração e razão de gradiente. Estes ensaios foram realizados no LabGeo – UFMG, seguindo normas e procedimentos específicos para cada grandeza avaliada.

4.4.1 Amostragem aleatória estratificada

Com o objetivo de selecionar amostras representativas e analisar a variação da distribuição espacial das propriedades do geotêxtil, foi utilizada a metodologia proposta por Gardoni (2000) e a NBR ISO 9862 (ABNT, 2013), que propõe procedimento estatístico de amostragem aleatória estratificada para ensaios com geossintéticos.

A partir de um rolo contendo 10m de comprimento de geotêxtil foram feitas divisões de 1,0 m², e efetuadas escolhas aleatórias de locais para a retirada de amostras. Em seguida, as amostras foram pesadas para a obtenção da gramatura e submetidas ao processo de medida da espessura. Na Figura 4.18 é exemplificado o processo de amostragem aleatória estratificada em geossintéticos e utilizada para o geotêxtil tecido em estudo.



Figura 4.18: Exemplo de amostragem aleatória estratificada para a obtenção das amostras.

4.4.2 Determinação da espessura nominal (t_{GT})

A espessura nominal de geotêxtil geralmente é determinada conforme norma NBR 12.569 (ABNT, 2003). Após a seleção aleatória das unidades de geotêxtil extraídas, foi determinada a espessura nominal de cada amostra usando equipamento para obtenção direta da espessura. Na Figura 4.19 é possível observar o aparato utilizado para as medidas a partir da base de madeira com peso de 2 kPa apoiada sob o geotêxtil.



Figura 4.19: Obtenção da espessura nominal do geotêxtil a partir da base de peso equivalente a 2 kPa apoiada sob o geotêxtil.

4.4.3 Determinação da gramatura

A determinação da gramatura, ou massa por unidade de área do geotêxtil foi realizada conforme normatização da NBR 12.568 (ABNT, 2003). A gramatura foi determinada em laboratório a partir da pesagem de amostras de geotêxtil com dimensões de 10cm x 10cm (100cm²). Deste modo, foram selecionadas 10 unidades aleatórias de amostras de geotêxtil retiradas, as quais foram individualmente pesadas em uma balança digital, com precisão de 0,01 g. As razões dos valores de massa por unidade de área foram expressas nas unidades de g/cm².

4.5 Avaliação do desaguamento

Para a realização dos ensaios de desaguamento foram utilizadas amostras coletadas antes do ponto de lançamento na barragem. Inicialmente foram utilizadas amostras de duas bombonas,

totalizando 80 litros de rejeito. As bombonas foram abertas e o rejeito homogeneizado com misturador durante 30 minutos, conforme mostrado na Figura 4.20. Foi observada uma camada de material bastante consolidado no fundo do recipiente devido à elevada consistência apresentada pelo material, o que impossibilitou a perfeita homogeneização do rejeito. A formação dessa camada de material consolidado pode ser justificada pelo tempo de transporte e abertura das bombonas para a realização dos ensaios.



Figura 4.20: Abertura da bombona e homogeneização do rejeito com misturador.

Essa consolidação do rejeito prejudicou a completa homogeneização da amostra e influenciou no valor do teor de sólidos obtidos. Imediatamente após as homogeneizações realizadas, foram obtidos teores de sólido de aproximadamente 50%, valores próximos aos 48% de teor de sólidos obtido no Laboratório de Geotecnia da UFMG. Apesar das diferenças entre os teores de sólido obtidos, os ensaios foram conduzidos visando a observação do comportamento químico do rejeito total frente ao uso de flocculantes e comportamento físico das partículas sólidas frente ao geotêxtil utilizado na fabricação dos tubos geotêxteis considerados.

De modo a subsidiar as análises da qualidade do desaguamento do rejeito por meio de tubos geotêxteis, foram realizados os ensaios para dosagens ótimas de polímero, Cone Geotêxtil, Bolsa Fechada de Geotêxtil e Protótipo em Grande Escala, conforme apresentado a seguir. Os ensaios de bancada foram realizados no laboratório da empresa Allonda Ambiental.

4.5.1 Ensaio de cone geotêxtil com rejeito de ouro

Para a realização deste ensaio, foram utilizados corpos de prova de geotêxtil tecido GT 500 de 30 cm de diâmetro, dobrado na forma de um cone, suporte tipo funil para apoiar o cone, recipientes para a coleta do efluente, amostra de rejeito na consistência de polpa, cronômetro, e polímero.

A primeira rodada de testes teve como objetivo testar a qualidade do desaguamento para o geotêxtil disponível, com o rejeito na forma natural como é lançado na barragem, ou seja, sem a adição de flocculantes. Deste modo, 200 mL do rejeito total foram vertidos no recipiente com o cone de geotêxtil e medido o tempo para desaguar até início do gotejamento. Esta primeira etapa de análise serviu como base de referências para as etapas seguintes de ensaio.

Na próxima etapa foi testada a adição dos polímeros na concentração de 0,1% na polpa de rejeito. Na ocasião foram avaliados os polímeros aniônicos Kemira A110, axfloc AP 1110 e Magnafloc LT27 e os polímeros catiônicos 934 SH e 8566 a 0,1% na polpa de rejeito. O tempo para desaguar, taxa de desaguamento, cor e turbidez do efluente final obtidos nestes testes foram comparados entre eles e com o ensaio com a amostra bruta. O teste de cone com melhor desempenho foi selecionado para a execução do ensaio de desaguamento em bolsa fechada (GDT).

4.5.2 Desaguamento por meio de Bolsa Fechada de Geotêxtil (GDT)

O ensaio de bolsa fechada de geotêxtil (GDT), assim como o de bolsa suspensa (item 3.5.2), tem como objetivo avaliar a qualidade do desaguamento do rejeito. Devido à proximidade entre os resultados, dificuldade de montagem e enchimento das bolsas além da quantidade de material requerido para sua realização, o ensaio de bolsa fechada foi utilizado em detrimento ao de bolsa suspensa.

O GDT foi realizado com bolsa fechada na dimensão 1,0m x 1,0m, em geotêxtil tecido GT 500 de abertura de filtração (AOS) de 0,425 mm. Na porção superior desta bolsa foi instalada uma flange roscável de 50 mm de diâmetro, a qual foi conectado um tubo plástico associado à um funil para vertimento da lama de geotêxtil no interior do tubo. Um esquema da montagem deste ensaio é apresentado na Figura 4.21.



Figura 4.21: Montagem do ensaio de bolsa fechada de geotêxtil.

Após essa montagem, foram conduzidos os ensaios de GDT com a amostra selecionada no ensaio de cone geotêxtil e ainda, como experiência e observações qualitativas, realizado o ensaio de GDT também com rejeito bruto. As amostras de rejeito foram arbitrariamente distribuídas para cada ensaio, sendo utilizado: O floculante foi dosado a 0,1% para cada 10 L de material vertido para o interior da bolsa.

A cada três baldes de material vertido para o interior de um tubo, foram coletadas amostras do afluente para a determinação do teor de sólidos, pH, cor e turbidez. As características físicas como cor e turbidez foram determinadas através de um comparador visual digital (Figura 4.22 (a)), e o teor de sólidos e pH a partir de um sensor digital (Figura 4.22 (b)). Estes mesmos parâmetros foram determinados também para amostra de efluente coletada do recipiente coletor após 1 hora do início do ensaio de desaguamento. Os resultados foram comparados de modo a fomentar as conclusões da eficiência de filtração do geotêxtil.



(a)



(b)

Figura 4.22: Comparador visual digital utilizado para determinação de cor e turbidez das amostras e sensor para determinação de pH e teor de sólidos.

Concluído o vertimento do volume de rejeito programado para cada bolsa, foram coletadas amostras para a determinação do teor de sólidos do rejeito retido no interior do tubo. As amostras foram coletadas a partir da abertura da flange roscável existente na porção superior do tubo. Essas coletas foram realizadas ao concluir o vertimento, após 24 horas, 48 horas, 72 horas, 7 dias, 14 dias, 21 dias e 28 dias. Imediatamente após a coleta das amostras, a flange era fechada por meio de uma tampa roscável de modo a evitar interferência direta do meio externo no dessecamento do sólido retido no interior do tubo.

O controle do volume vertido e desaguado foi feito a partir da contagem do volume inserido no sistema e do volume de efluente coletado no recipiente sobreposto.

4.5.3 Desaguamento em protótipo de grande dimensão realizado em área teste na mineradora

Visando a aplicação de tubos geotêxteis para desaguamento de rejeito de mineração, em particular o de ouro, foram realizados ensaios em tubos geotêxteis de grande dimensão para confirmar ou resultados obtidos em laboratório ou ajustar conforme necessidades de campo os procedimentos de enchimento e desaguamento. Considerando ainda a importância de utilização de áreas para disposição de rejeito, foi proposto que o enchimento dos tubos

geotêxteis fosse realizado seguindo um empilhamento e superposição de tubos. Para tanto, foi elaborado um projeto civil executado em campo, o qual dispunha de empilhamento de 9 tubos geotêxteis na base, 4 na porção central e 1 único tubo na porção superior, conforme pode ser observado na Figura 4.23. Cada protótipo utilizado possui aproximadamente 2,0 m de largura e 6,0 m de comprimento.

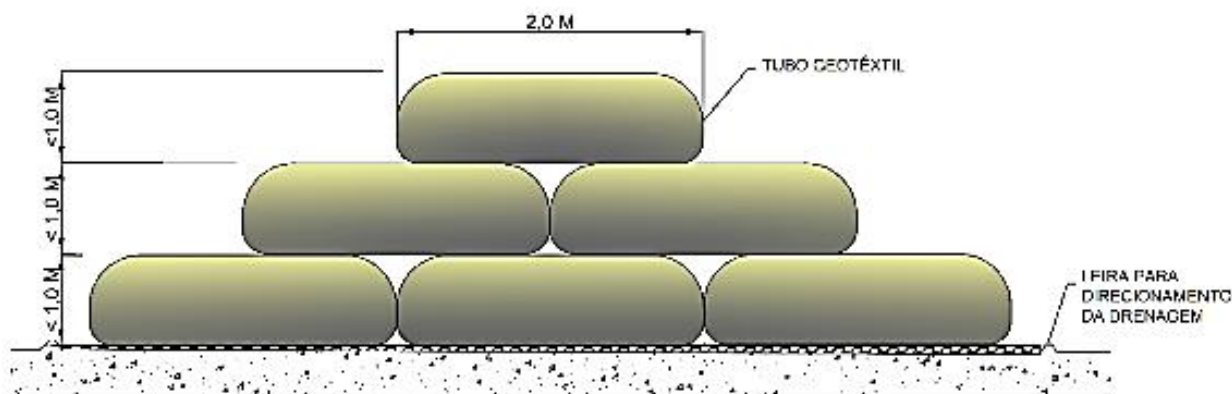


Figura 4.23: Esquema de empilhamento de tubos geotêxteis proposto para estudo.

Considerado espaço e volume de rejeito necessário para enchimento do protótipo, este empilhamento foi realizado sob pilha de rejeito *underflow*, já consolidado, na área da mineradora. A escolha do local do empilhamento visou ainda o uso de área já licenciada e que não gerasse impactos ao meio ambiente; além de proximidade dos ciclones de lançamento de rejeito na barragem, que permitirão a derivação de ramais de alimentação para os tubos; espaço para tráfego de equipamentos e veículos para transporte e montagem da área de estudo; fundação com capacidade de suporte que não sofresse grandes deformações que impactassem no comportamento do empilhamento.

Atualmente não é utilizado floculante no processo de disposição de rejeitos gerados na área da mineradora. No entanto, no ensaio de desaguamento por meio de bolsa fechada de geotêxtil, foi observado que a filtração do rejeito por meio do geotêxtil GT500 não é plenamente eficiente, havendo considerável passagem de sólidos e turbidez do percolado. Para a melhoria do processo de desaguamento foi necessária a adição de floculante, com a montagem de uma central de dosagem de polímeros em paralelo ao ramal de bombeamento do rejeito. À jusante da central de dosagem de polímeros foi planejado um sistema de chincanas para proporcionar a homogeneização do rejeito e do polímero adicionado. Um esquema do *layout* geral de implantação do protótipo em campo é apresentada na Figura 4.24.

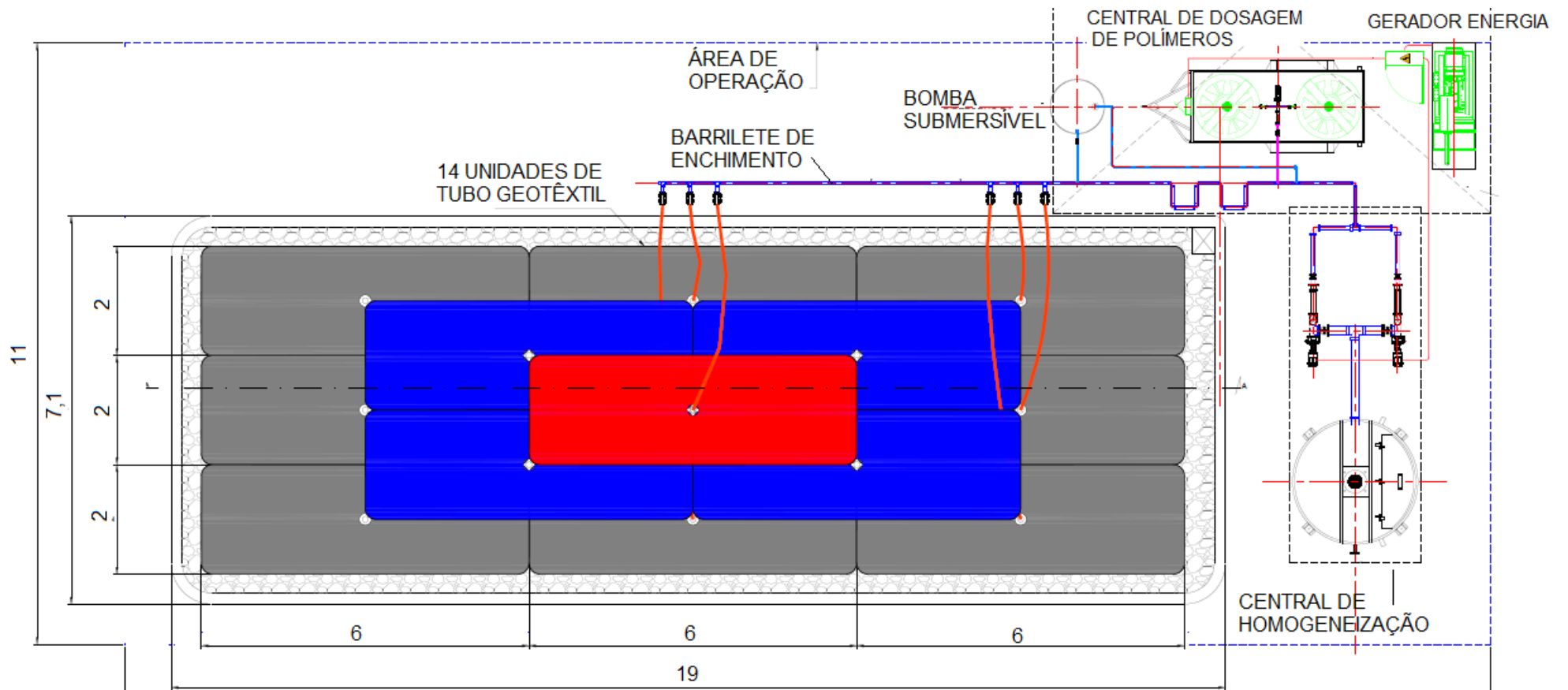


Figura 4.24: Layout do empilhamento de protótipos em grandes dimensões executado em campo.

Para permitir o direcionamento do efluente da área de desaguamento dos tubos, foi feita a preparação do terreno com declividade de 0,3%. Para evitar a infiltração do efluente diretamente no terreno, foi instalada uma geomembrana de PEAD de 1,0 mm e uma camada drenante de aproximadamente 10 cm composta por brita N° 2. Para evitar danos à geomembrana por puncionamento, foi aplicada uma camada de areia fina de separação entre a geomembrana e a camada drenante. Na Figura 4.25 é apresentado um esquema do preparo da fundação.

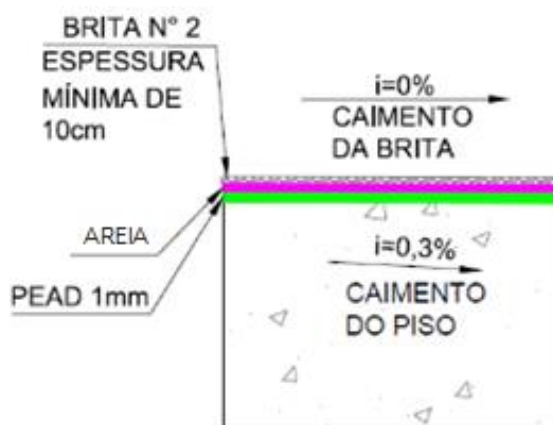


Figura 4.25: Representação esquemática de preparação do terreno para recebimento do empilhamento.

Para compreender as variações de forma e deformações que ocorrem no tubo durante o enchimento e desaguamento, foram propostos elementos de monitoramento como controle topográfico a laser, régua em pórtico com escala vertical e horizontal para a obtenção de medidas diretas, uso da mira-laser, captura de imagens sequenciais do enchimento. As informações de variação da forma foram correlacionadas com as equações propostas para a análise de forma apresentadas no capítulo 3.4.

Ainda correlacionando forma e tensões atuantes, foi estabelecida a altura máxima admissível para o tubo durante o enchimento, de modo a evitar que ocorra uma ruptura do geotêxtil devido às solicitações de tração, críticas durante esta fase. O geotêxtil utilizado na fabricação do tubo é o GT 500, que de acordo com a especificação técnica do fabricante, possui uma resistência a tração 78 kN/m no sentido longitudinal e 109 kN/m no sentido transversal.

O fabricante calculou por meio do programa computacional *Geotube Simulator*, versão 13.1 Americas, comercializado pela empresa *Tem Cate Geotube*, as máximas tensões atuantes no tubo geotêxtil em função da altura. No cenário de análise foi considerado o tubo completamente submerso, a seção transversal de comprimento de circunferência de 4,3 m e

densidade relativa do material de preenchimento de 27 kN/m³. As propriedades do geotêxtil GT500 já são automaticamente consideradas nos cálculos realizados pelo programa. Foi obtido como resultado de análise a seção transversal e valores de análise apresentados na Figura 4.26.

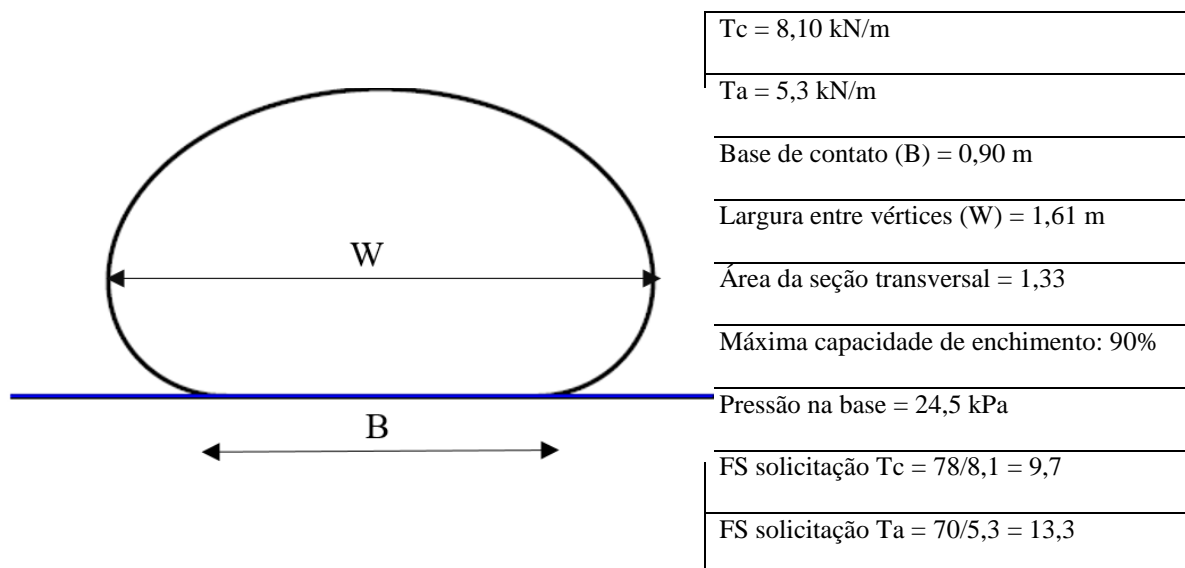


Figura 4.26: Resultado do cálculo das solicações circunferenciais e axiais máximas atuantes no tubo geotêxtil, de acordo com análise realizada pelo Geotube Simulator.

A régua em portíco utilizada para o monitoramento possui 8,0 m de comprimento e 3,0 m de altura, cujas dimensões permitem o monitoramento da estrutura até a condição mais crítica do último tubo a ser empilhado, conforme pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Este elemento de monitoramento é composto pela régua horizontal e pelos portícos verticais, ambos graduados com precisão milimétrica. A régua horizontal é móvel e pode ser movimentada à medida que a altura dos tubos aumenta.

Para permitir o acoplamento de imagens ao longo do tempo para as diferentes linhas de tubos geotêxteis e três diferentes níveis de empilhamento, o tripé da câmera foi posicionado em um ponto fixo demarcado por piquete topográfico para referência.

As informações obtidas pelos três elementos de monitoramento foram cruzadas e utilizadas para compreensão da variação de forma do tubo ao longo do tempo e estimativa das solicações atuantes no geotêxtil.



Figura 4.27: Monitoramento dos deslocamentos verticais do tubo geotêxtil a partir da mira-laser.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaios geotécnicos com o rejeito

Para a compreensão das características do rejeito foram realizados os ensaios de caracterização geotécnica cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resumo dos ensaios de caracterização do rejeito.

Teor sólidos %	Gs (g/cm ³)	W _{Médio} (%)	Curva Granulométrica			Limites de Consistência	
			% argila	% silte	% areia	LL	LP
48,65 %	2,85	1,267	< 5	60% a 90%	35% a 5%	23	-

O ensaio de teor de sólidos indicou que aproximadamente 49% da lama de rejeito é composta por sólidos. Assim é possível estimar que cerca de 50% do volume do rejeito pode ser separado por meio do desaguamento em tubos geotêxteis.

No ensaio de massa específica dos grãos, foi obtido um valor de 2,85 g/cm³ para o rejeito de ouro e um teor de umidade médio de 1,267%. Sampaio (2013) caracterizou o *underflow* do rejeito de ouro de outra mina da mesma mineradora obtendo um peso específico variável entre 26,85 kN/m³ e 27,03 kN/m³.

A análise granulométrica do rejeito foi realizada por peneiramento e sedimentação, sendo ainda realizada granulometria a laser. A fase de sedimentação foi realizada utilizando água destilada, conforme padronização de norma e ainda com o fluido da barragem. Para cada ensaio de sedimentação foram feitos testes com e sem o uso de flocculantes. As curvas granulométricas obtidas são apresentadas na Figura 5.1.

Baseado nos resultados obtidos nos ensaios de granulometria (Figura 5.1), é possível dizer que no mínimo 75% das partículas sólidas passam pela peneira de #200. Pela classificação textural, o rejeito é do tipo silto arenoso. Resultado similar foi obtido por Sampaio (2013) em amostras de rejeito de ouro de outra mina da mesma mineradora.

A partir das formas das curvas granulométricas obtidas nos diferentes ensaios, é possível observar que há relativa influência do defloculante nos resultados da fase de sedimentação. Nota-se ainda que as amostras sedimentadas no fluido apresentaram um comportamento descontínuo no início da sedimentação.

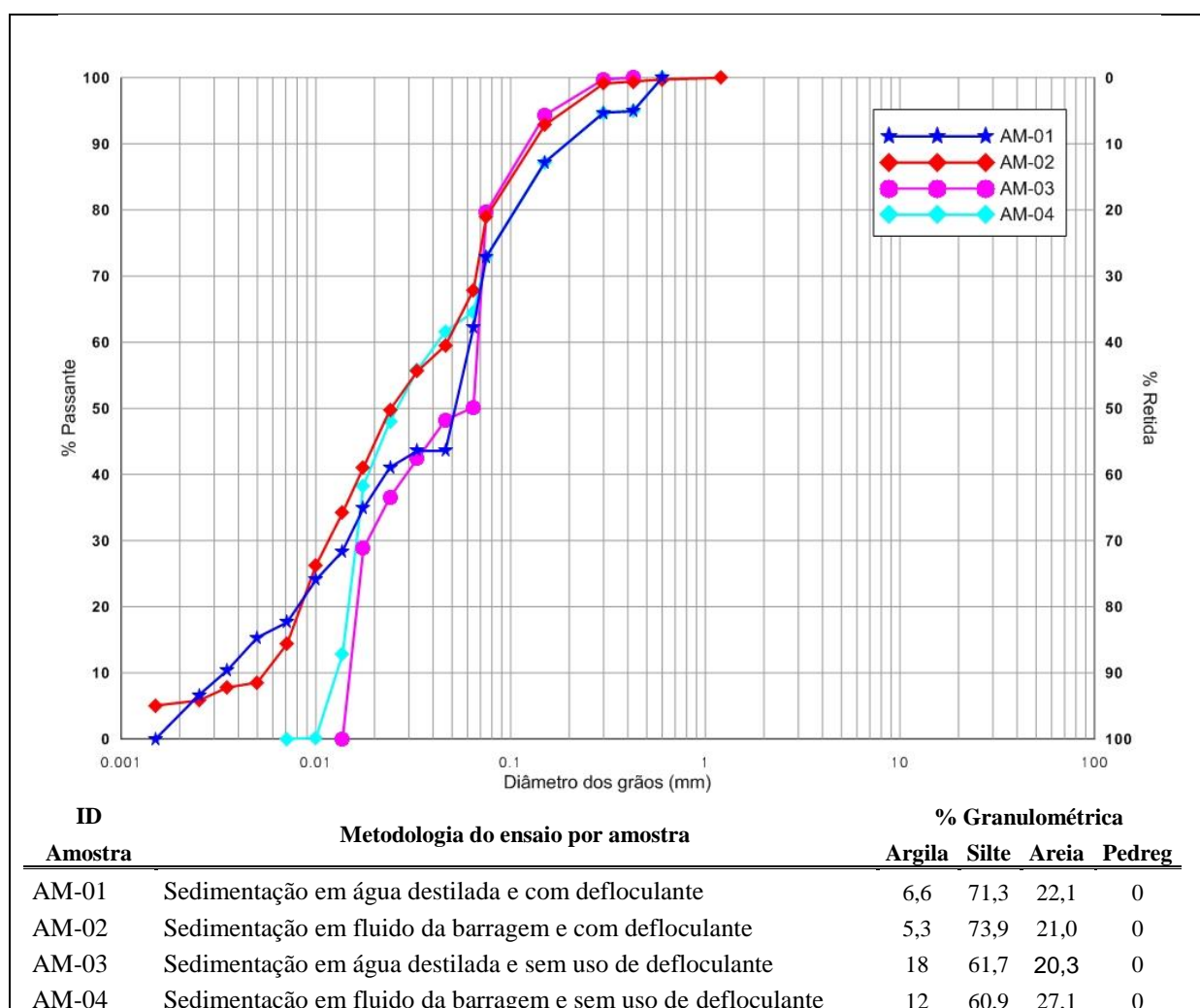


Figura 5.1: Curvas granulométricas obtidas para as amostras de rejeito de ouro ensaiadas.

Com o objetivo de caracterizar a fração fina do rejeito por meio dos limites de consistência, foram realizados ensaios de limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL). Os resultados obtidos indicaram que o rejeito estudado não apresenta plasticidade e que seu limite de liquidez está em torno de 23.

Para compreensão do comportamento hidráulico do rejeito no adensamento, foram preparados corpos de prova para a realização do ensaio HCT com bomba de fluxo modificada, conforme procedimentos citados no Capítulo 4. As características do corpo de prova moldado e resultados experimentais desta etapa do ensaio estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resumo das características do corpo de prova CP-02.

Teor de Sólidos (%)		Índice de Vazios			Altura do Corpo de Prova (cm)			
Inicial	Final	e _{inicial}	e ₀₀ (sed/adensa)	e _f (pós carreg)	H _{inicial}	H _{f sed/adens}	H _{f aden/percola}	H _{f (carreg)}
49,63	75,19	2,89	1,34	0,94	14	8,26	7,72	6,78

Os parâmetros de saída do ensaio HCT, foram analisados por meio da ferramenta computacional SICTA (*Seepage Induced Consolidation Test Analysis*), a qual utiliza algoritmos numéricos para determinar as relações constitutivas entre índice de vazios x permeabilidade, e índice de vazios x tensão efetiva por meio de parâmetros constitutivos (A, B, C, D, Z), das funções de permeabilidade ($k = Ce^D$) e compressibilidade ($e = A(\sigma' + Z)^B$). Os parâmetros A, C e Z são calculados através do índice de vazios para tensão efetiva nula (e_{00}), dados de carregamento em etapas e ensaios de permeabilidade sendo:

$$Z = \frac{\sigma}{\left(\frac{e}{e_{00}}\right)^{\frac{1}{B}-1}} \quad \text{Equação 5.1}$$

$$A = \frac{e_{00}}{Z^B} \quad \text{Equação 5.2}$$

$$C = \frac{K}{e^D} \quad \text{Equação 5.3}$$

Estas são as principais relações constitutivas realizadas pelo SICTA, sendo obtido como dados de saída da análise os parâmetros apresentados na Tabela 5.3:

Tabela 5.3: Parâmetros Constitutivos obtidos diretamente pelo SICTA.

Parâmetro	Valor
A	1,20022
B	-0,06330
C	0,42491E-06
D	3,47512
Z	0,17547

A partir destes parâmetros foram obtidas as curvas de compressibilidade, apresentada na Figura 5.2, e de permeabilidade, Figura 5.3. Na curva de compressibilidade (Figura 5.2), é possível observar que o índice de vazios diminui com o aumento da tensão efetiva, apresentando maior redução a partir de uma tensão efetiva de 0,08 kPa.

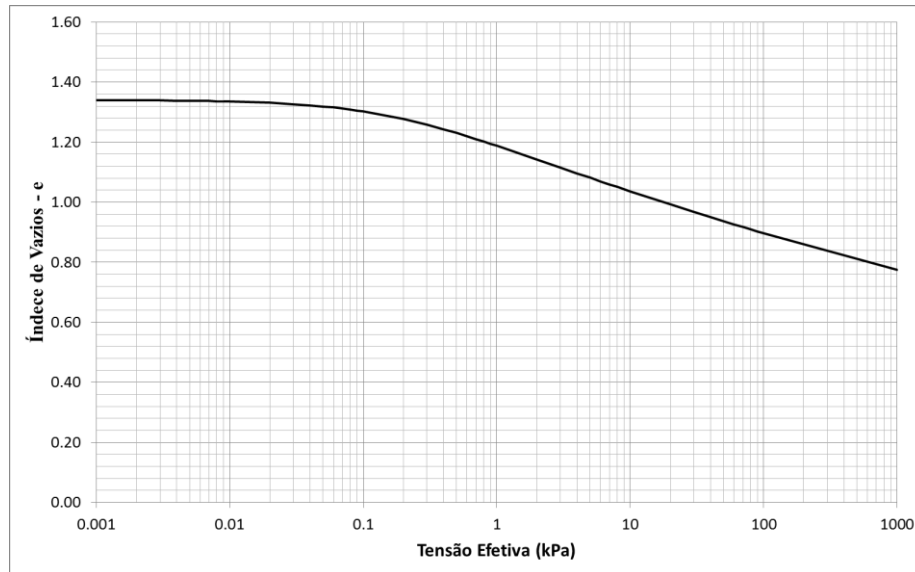


Figura 5.2: Curva de compressibilidade do rejeito de ouro obtida no ensaio HCT com bomba de fluxo modificada.

A permeabilidade diminui com a redução do índice de vazios, (Figura 5.3), sendo que para um índice de vazios da ordem 0,78 a permeabilidade é 2×10^{-7} m/s, e para um índice de vazios de 1,28 a permeabilidade é da ordem de 1×10^{-6} m/s. A partir desta relação é possível dizer que apesar de uma variação de quase 60% do valor do índice de vazios, a permeabilidade variou menos de 20%. O que determina este comportamento é o diâmetro dos grãos.

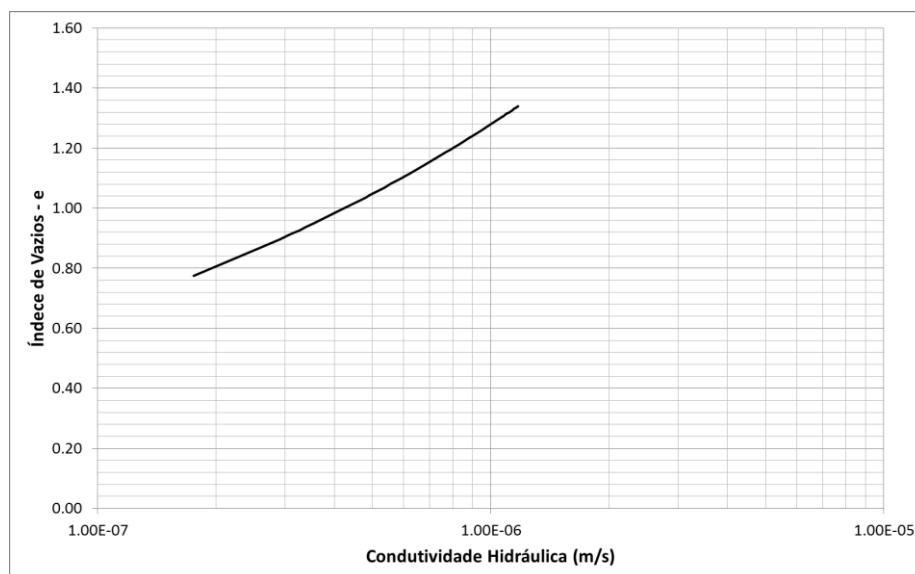


Figura 5.3: Curva de permeabilidade do rejeito de ouro obtida no ensaio HCT com bomba de fluxo modificada.

5.2 Ensaio de caracterização do geotêxtil

O geotêxtil utilizado nos testes de desaguamento foi caracterizado quanto a espessura e gramatura para determinação das suas propriedades físicas. Os dez corpos de prova de geotêxtil, retirados aleatoriamente da amostra disponibilizada pelo fabricante, foram examinados e suas propriedades e variação das medidas apresentados nas Tabela 5.4.

Baseado no exposto na Tabela 5.4 e Tabela 5.5, é possível dizer que o geotêxtil tecido tem espessura de 1,77 mm e gramatura de 554 g/m². Os coeficientes de variação obtidos tanto na determinação da espessura quanto na gramatura foram inferiores a 1%.

Tabela 5.4: Resultado do ensaio de espessura do geotêxtil.

Corpo de Prova	Espessura T_{gi} (mm)	Corpo de Prova	Espessura T_{gi} (mm)
1	1,80	6	1,78
2	1,83	7	1,70
3	1,77	8	1,80
4	1,76	9	1,79
5	1,76	10	1,75

$T_g = 1,77$ mm

$CV (\%) = 0,71\%$

Tabela 5.5: Resultado do ensaio de gramatura do geotêxtil.

Corpo de Prova	Peso (g)	Área CP (m ²)	M_{Ai} (g/m ²)	Corpo de Prova	Peso (g)	Área CP (m ²)	M_{Ai} (g/m ²)
1	5,54	0,01	554	6	5,55	0,01	555
2	5,52	0,01	552	7	5,56	0,01	556
3	5,54	0,01	554	8	5,56	0,01	556
4	5,52	0,01	552	9	5,55	0,01	555
5	5,57	0,01	557	10	5,53	0,01	553

$M_A = 554$ g/m²

5.3 Ensaio de desaguamento com o geotêxtil

5.3.1 Ensaio de cone geotêxtil

A partir da metodologia e dos procedimentos apresentados no Capítulo 3, foram realizados os ensaios com cone de geotêxtil com camada simples do geotêxtil tecido GT500, rejeito de ouro estudado e os polímeros floculantes A110, 934 SH, Axfloc AP 1110, LT 26 AG e 8566, que se mostraram mais estáveis após 24 horas do preparo da solução dosada.

Os processos realizados no ensaio são apresentados na Figura 5.4. A primeira etapa deste ensaio consistiu em homogeneizar uma amostra de 200 mL de rejeito bruto (Figura 5.4 (a)) em um béquer graduado. Em seguida adiciona-se o polímero (Figura 5.4 (b)) e verte-se o conteúdo para o interior do cone geotêxtil (Figura 5.4 (c)). A partir de então o sistema deve ser deixado em repouso (Figura 5.4 (d) e contabilizado o tempo do desaguamento até o início do gotejamento e o volume final do efluente obtido (Figura 5.4 (e)). O ensaio com o rejeito sem adição de polímero não possui a etapa 2, Figura 5.4 (b).

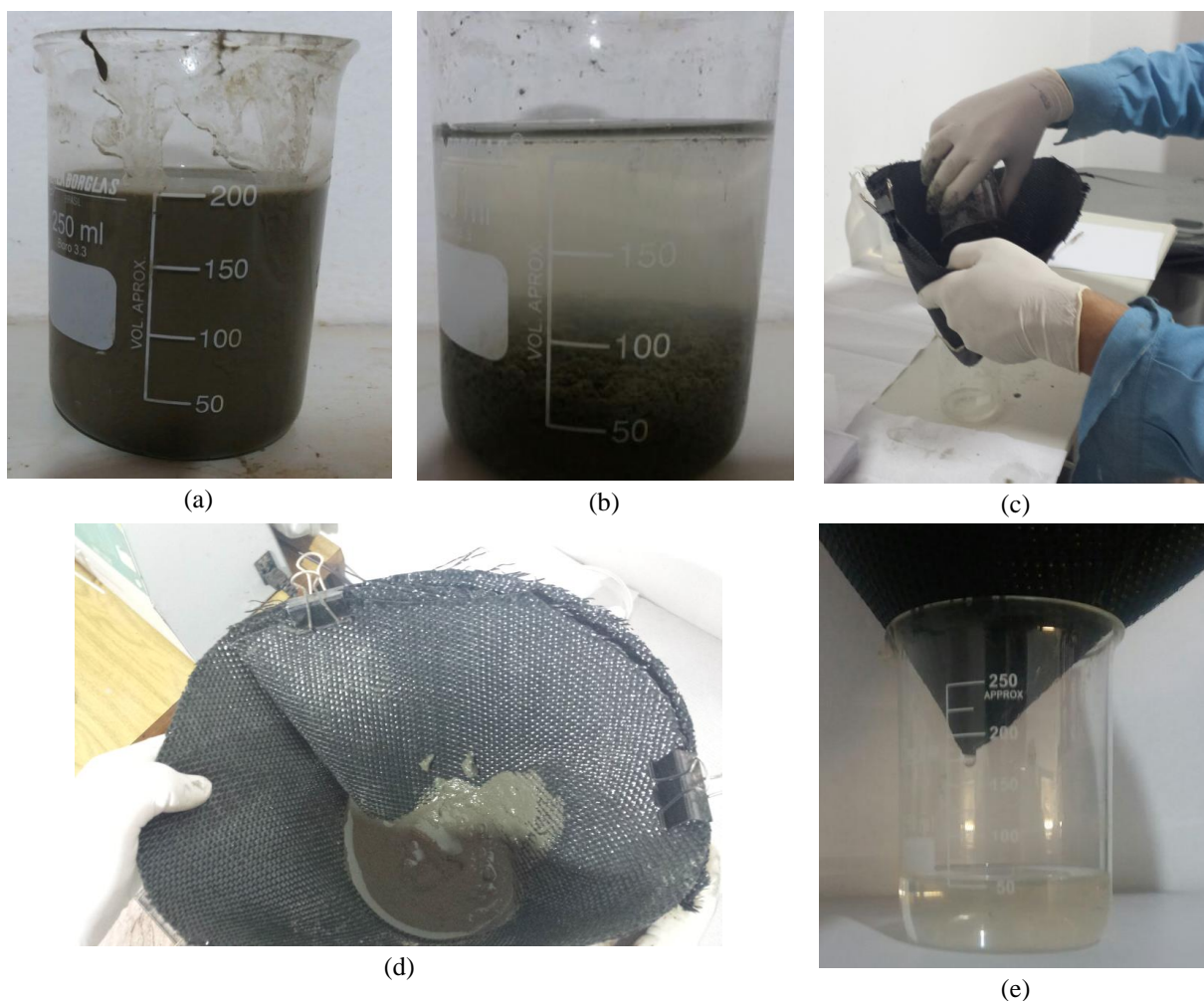


Figura 5.4: Em (a) amostra de rejeito bruto homogeneizada; em (b) aspecto da amostra após adição do polímero LT27 AG; em (c) vertimento da amostra de rejeito no interior do cone; em (d) rejeito retido no geotêxtil; e em (e) fase de gotejamento do ensaio de cone geotêxtil e obtenção do volume final do percolado.

O ensaio apresentado na Figura 5.4 foi realizado para a amostra com adição do polímero LT 27 AG. Neste ensaio foi obtido um volume de percolado de 50 mL em 7 s de escoamento, o que proporciona uma taxa de desaguamento de 7,14 mL/s.

O mesmo procedimento foi realizado para os outros polímeros, também dosados a 0,1%. A cada 200 mL de amostra de rejeito foram acrescentados 1 mL de polímero. Os resultados das

etapas de ensaio são apresentadas na Figura 5.5 para a amostra de polímero A110, o ensaio com 934 SH na Figura 5.6, na Figura 5.7 o ensaio com Axifloc AP 1110 e na Figura 5.8 o ensaio com o polímero 8566.

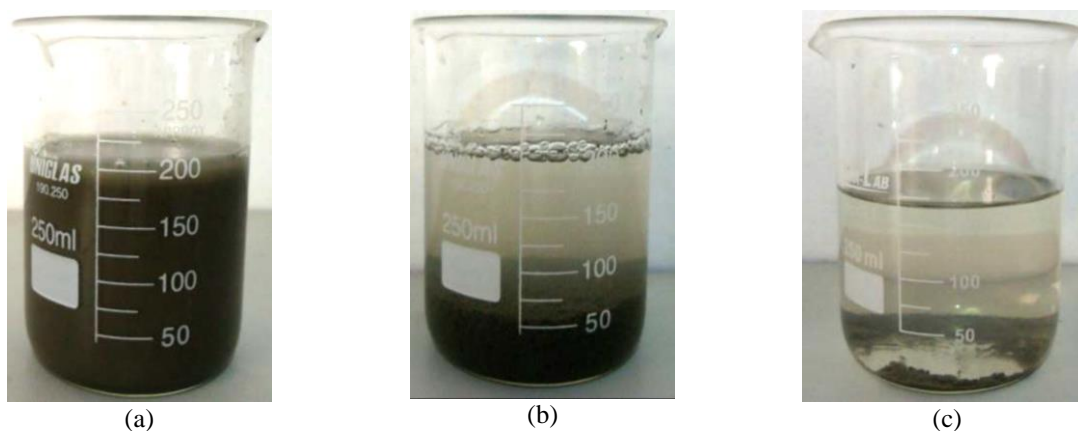


Figura 5.5: Amostra com adição do polímero aniônico A110 a 0,1%. Em (a) recipiente com amostra bruta, em (b) amostra com formação de floculado após a adição do polímero e em (c) aspecto final do efluente percolado.

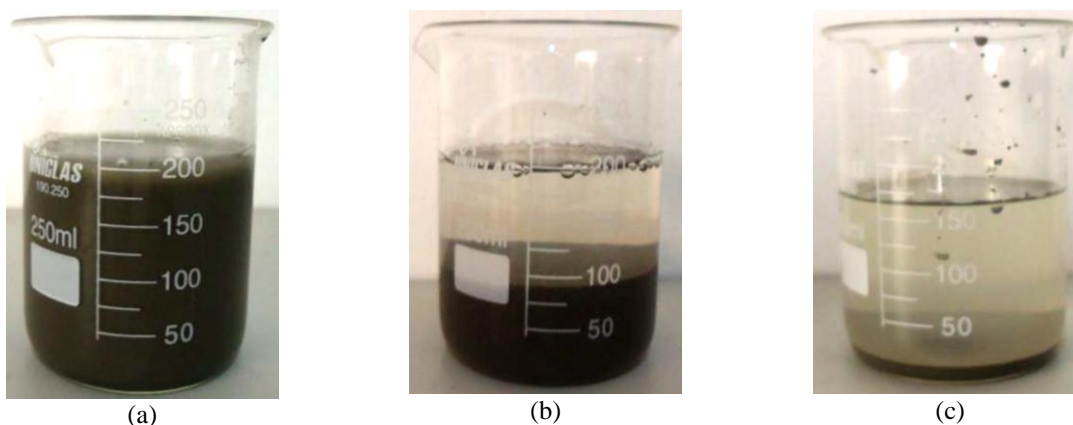


Figura 5.6: Amostra com adição do polímero catiônico 934 SH a 0,1%. Em (a) recipiente com amostra bruta, em (b) amostra com formação de floculado após a adição do polímero e em (c) aspecto final do efluente percolado.

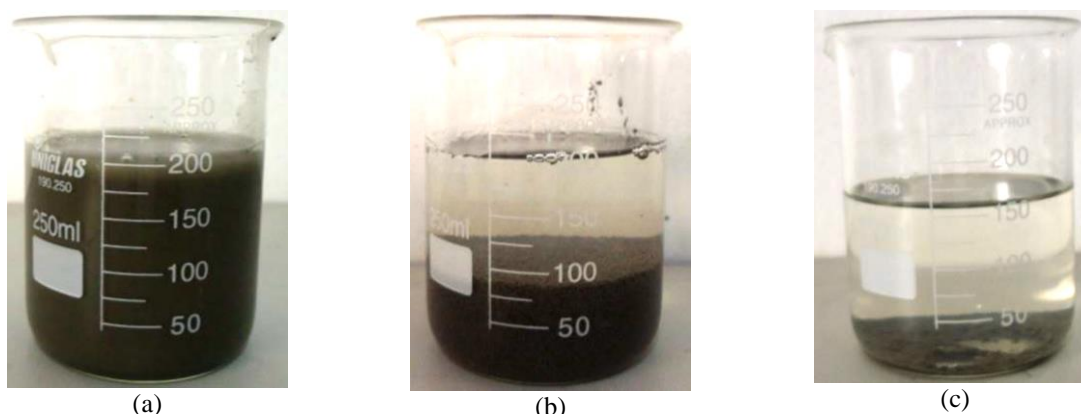


Figura 5.7: Amostra com adição do polímero aniônico Axifloc AP 1110 a 0,1%. Em (a) recipiente com amostra bruta, em (b) amostra com formação de floculado após a adição do polímero e em (c) aspecto final do efluente percolado.



Figura 5.8: Amostra com adição do polímero aniônico Axflor AP 1110 a 0,1%. Em (a) recipiente com amostra bruta, em (b) amostra com formação de floculado após a adição do polímero e em (c) aspecto final do efluente percolado.

O ensaio de cone foi realizado também para a amostra bruta de rejeito, objetivando avaliar a influência do uso de polímeros no desaguamento do rejeito por meio de geotêxtil. Neste ensaio foi obtido um tempo de escorrimento de aproximadamente 40 s e um percolado de de aproximadamente 160 mL, conforme pode ser observado na Figura 5.9 (b).



Figura 5.9: Em (a) amostra de rejeito bruto a ser ensaiada e em (b) amostra final do percolado.

O tempo de escorrimento até o gotejamento e o volume final de percolado, assim como as características físicas do percolado foram observados e os resultados compilados na Tabela 5.6.

De modo geral pode-se dizer que a adição dos polímeros aumentou no mínimo 40% a taxa de desaguamento (A110), podendo atingir uma taxa 75% superior a do rejeito bruto a partir da utilização do polímero que de maior eficiência, o LT 27 AG. Além da performance quanto à taxa de desaguamento, é importante que o polímero proporcione um percolado com reduzida

presença de partículas sólidas. Nesta condição as amostras com polímero A110, AP 110 e LT 27 AG apresentaram menor turbidez que as demais, ou seja, tiveram maior eficiência na filtração e retenção de partículas sólidas no geotêxtil. O ensaio com o polímero LT 27 AG foi o de menor índice de turbidez, apenas 17 NTU.

Tabela 5.6: Resultados do ensaio de cone têxtil com rejeito de ouro e diferentes polímeros ensaiados para auxílio do desague.

Amostra		Amostra Bruta	Amostra com A110	Amostra com 934 SH	Amostra com AP 1110	Amostra com 8566	Amostra com LT 27 AG
Tempo de escoamento (s)		40	29	23	23	26	7
Volume Final Percolado (mL)		163	167	156	157	167	50
Taxa de desaguamento		4,07	5,76	6,78	6,82	6,42	7,14
Características do Percolado	pH	9,05	9,08	9,07	9,03	9,07	9,5
	Cor (Pt-Co) (homogeneizado)	Estouro de escala	Estouro de escala	Estouro de escala	Estouro de escala	Estouro de escala	
	Turbidez (NTU) (homogeneizado)	Estouro de escala	90	Estouro de escala	185	Estouro de escala	17

OBS: onde ms é o tempo é milésimo de segundos; mg Pt/L é a escala de absorção de luz; Pt-Co é a escala de cor Platina-Cobalto (escala APHA-Hazen) e; NTU é a escala de medida de turbidez americana.

As características físicas do percolado corroboram para o entendimento de que o polímero manteve o pH da mistura estável e foi eficiente no processo de filtração. O estouro de escala para a cor e turbidez do percolado da amostra de rejeito bruto indicam a passagem de partículas sólidas através do geotêxtil, enquanto a turbidez de apenas 17 NTU para o percolado do ensaio de polímero indica que o floculante atuou na formação de flóculos de maior dimensão e permitiu maior retenção de sólidos.

Considerado os resultados é possível dizer que adição do polímero LT 27 AG ao rejeito proporciona maior taxa de desaguamento e maior retenção das partículas sólidas em relação aos demais polímeros testados. Deste modo, o polímero LT 27 AG, na concentração de 0,1%, é aquele que proporciona maior eficiência ao desaguamento do rejeito estudado.

Ainda em relação ao ensaio com o LT 27 AG é possível dizer que o percolado atende aos parâmetros físicos estabelecidos na resolução N 357 do CONAMA (2005), uma vez que a turbidez obtida é inferior a 40 NTU. Essa resolução dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

5.3.2 Ensaio de bolsa fechada de geotêxtil (GDT)

Baseado nos resultados obtidos no ensaio de cone geotêxtil foram conduzidos os ensaios em GDT, utilizando uma bolsa de 1,0 m x 1,0 m em geotêxtil tecido GT500 com abertura de filtração de 0,45 mm, rejeito de ouro o qual 75% de sólidos passa na peneira N° 200, e o polímero floculante aniônico Magnafloc LT27.

Apesar do ensaio de cone geotêxtil indicar que o desaguamento do rejeito bruto por meio do geotêxtil possui baixa taxa de desaguamento e eficiência de filtração, foi realizado o ensaio GDT também para o rejeito total. O objetivo deste teste com a amostra de rejeito bruto foi ter uma base de comparação, qualitativa, com o ensaio do LT 26 AG.

Foram vertidos baldes contendo 10 L de rejeito para o interior do tubo (Figura 5.10 (b).), sendo observada uma considerável passagem de sólidos através do GDT, conforme pode ser observado na Figura 5.10 (c). Esse sólidos passantes estão possivelmente associados à dimensão das partículas de rejeito em relação à abertura de filtração do geotêxtil, que é de 0,45 mm.

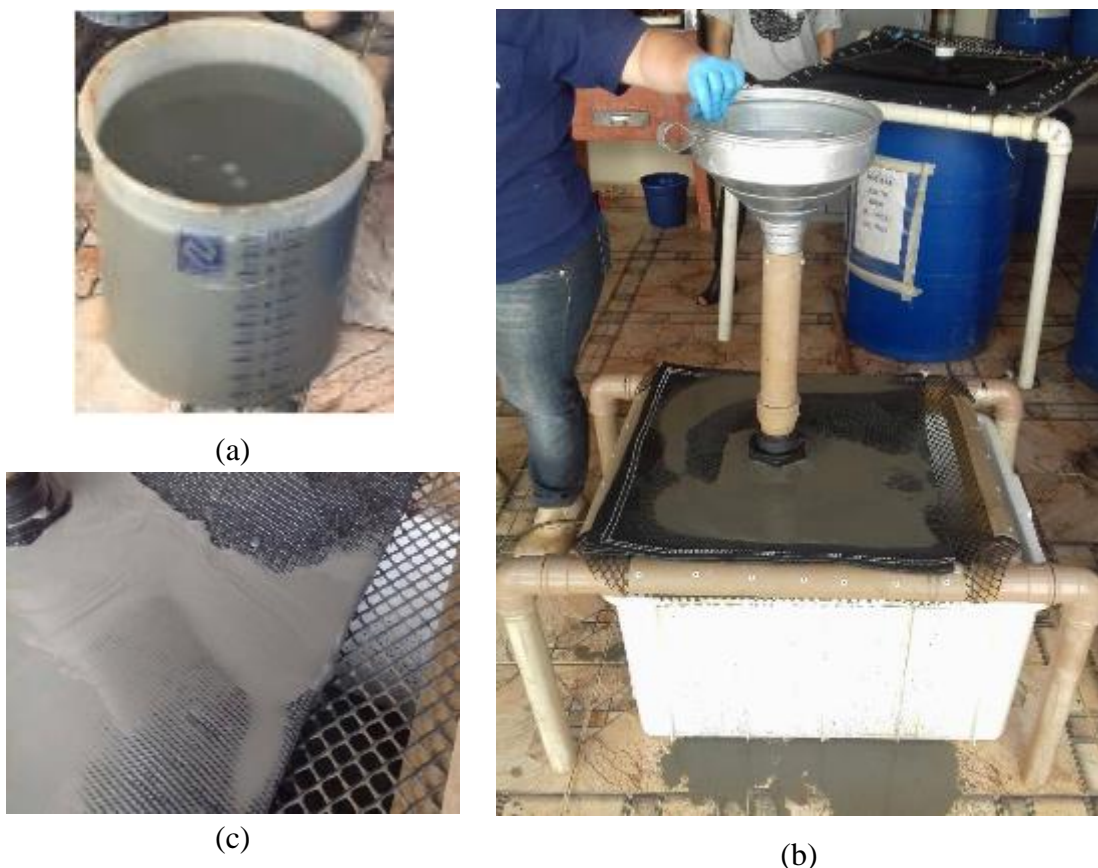


Figura 5.10: Desaguamento por GDT utilizando amostra de rejeito sem adição de polímero. Em (a) aspecto geral do rejeito da bombona I, em (b) realização do ensaio e (c) detalhe do aspecto do percolado acumulado na superfície do GDT.

Nos dois primeiros baldes vertidos o desaguamento foi rápido, apesar da intensa passagem de finos. A partir do terceiro balde, observou-se qualitativamente maior tempo de desague, o que pode estar associado ao processo de colmatação do geotêxtil pelos finos do rejeito.

O ensaio de GDT foi realizado até esgotamento do volume de amostra de rejeito disponível. O aspecto final do percolado obtido pode ser visualizado na Figura 5.11. A coloração acinzentada pode ser justificada pela quantidade de sólidos que passou através do geotêxtil, o que é confirmado pelo teor de sólidos de 10,6% determinado a partir da amostra de percolado coletada após 1 hora do início do desaguamento. O ensaio para determinação de parâmetros físicos indicou ainda um pH de 8,59, cor 209.000 Pt-Co e turbidez de 53.800 NTU.



Figura 5.11: Aspecto final do percolado retido no recipiente coletor.

O mesmo procedimento de ensaio foi realizado com a adição do polímero LT 27 AG ao rejeito bruto. Na Figura 5.12 (a) é apresentada a amostra bruta de rejeito homogeneizada e com adição do polímero LT27 AG. Com a adição do polímero, observa-se a rápida formação de flocos maiores e um desaguamento com maior eficiência de filtração, visto os aspectos físicos do percolado na superfície do GDT (Figura 5.12, (b)) e no recipiente coletor (Figura 5.12 (c)).

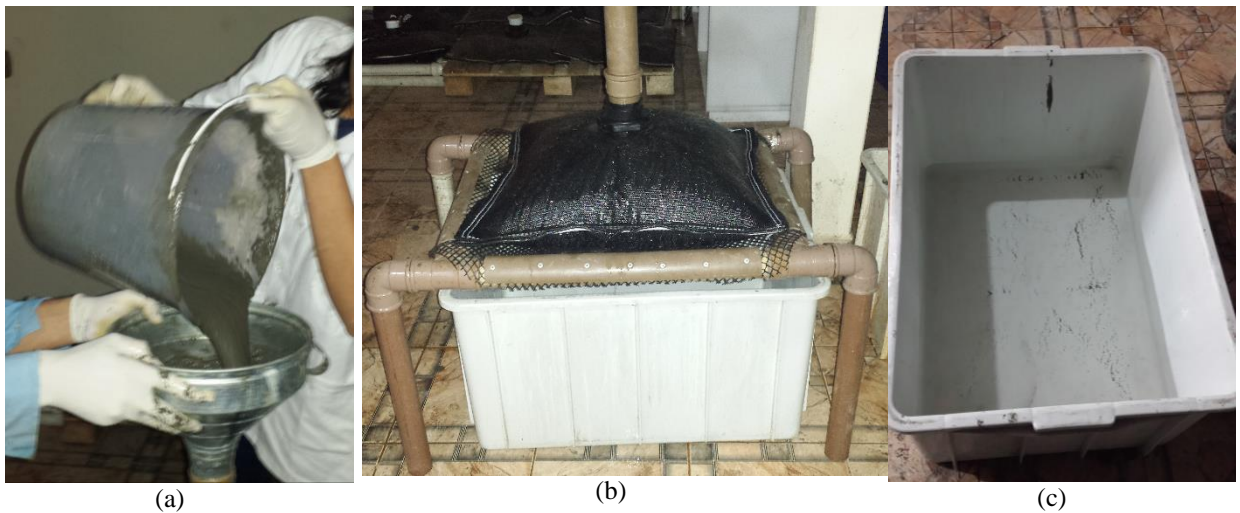


Figura 5.12: Ensaio de desaguamento em GDT utilizando a adição de polímero LT 27 AG. Em (a) aspecto do material vertido; em (b) enchimento da bolsa de geotêxtil; em (c) percolado no recipiente coletor.

De modo comparativo são apresentadas na Figura 5.13 as amostras de percolado do ensaio com o rejeito bruto e com a adição de polímero do LT 27 AG. Observa-se a diferença da turbidez e cor do percolado da amostra bruta e da amostra com LP 27 AG.

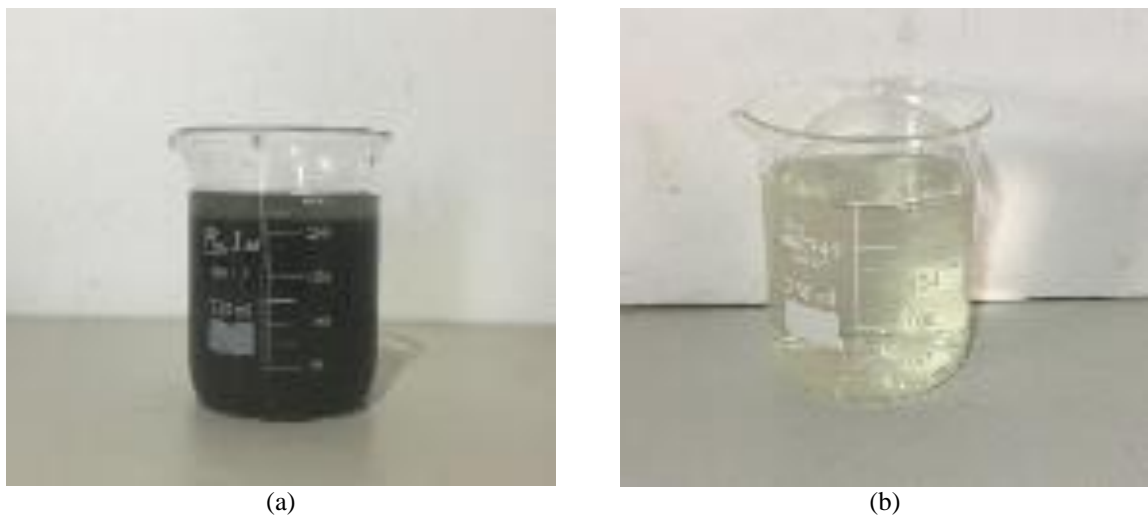


Figura 5.13: Amostra de percolado em (a) do ensaio sem adição de polímero; e em (b) amostra de percolado do ensaio com o polímero LT 27 AG.

A variação do teor de sólidos retidos no tubo em função do tempo pode ser observada na Figura 5.14. Este resultado dá uma perspectiva do dessecamento do rejeito no interior do tubo, ao longo do tempo. Para tanto, são coletadas amostras imediatamente após concluído o vertimento, após 24 horas, 48 horas, 72 horas, 7 dias, 21 dias e 28 dias do . Essas amostras são coletadas no interior do tubo, sob a flange roscável, a partir da abertura da flange roscável.

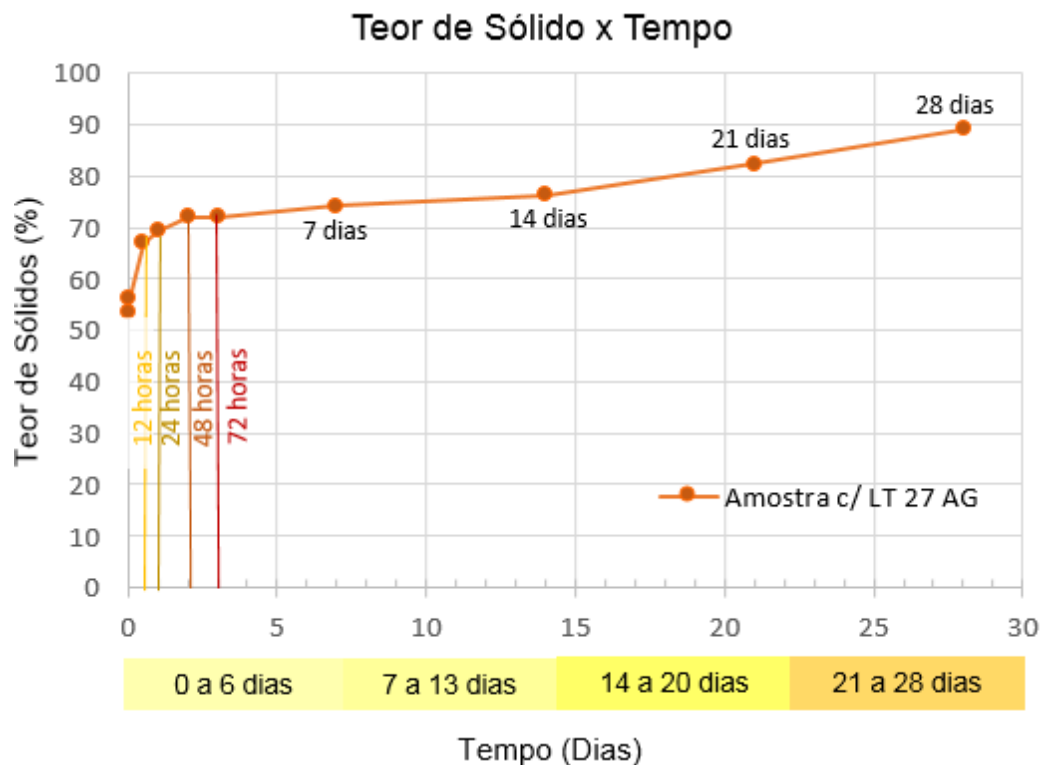


Figura 5.14: Variação do teor de sólidos retido no interior do GDT em função do tempo.

5.4 Protótipo de grande dimensão – Ensaio de Campo

5.4.1 Preparo da área de teste

Assim como proposto na metodologia de pesquisa, foram realizados ensaios com protótipo em grande dimensão para avaliar o desempenho do desaguamento de rejeito de ouro por meio de tubos geotêxteis. Este ensaio foi efetuado no protótipo construído no platô do empilhamento drenado existente na área de mineradora, sendo preparada uma base de aproximadamente 7 m x 19 m, em material drenante (brita N° 2), conforme proposto em Figura 4.24 e apresentado na Figura 5.15.

Para melhor compreensão dos elementos para operacionalização dos tubos é apresentado na Figura 5.16 (a) o tanque de reservação de rejeito, que é abastecido por uma derivação instalada no ramal de alimentação de rejeito que sai da planta de beneficiamento da mineradora, e o sistema de bombeamento do rejeito para o interior dos tubos geotêxteis; na Figura 5.16 (b) o tanque de polímero, na Figura 5.16 (c) o sistema de chincana para a homogeneização e; na Figura 5.16 (d) a rede de alimentação dos tubos geotêxteis.



Figura 5.15: Visão geral da área de teste do protótipo em grande dimensão.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.16: Em (a) tanque de reservação de rejeito e sistema de bombeamento; em (b) tanque de polímero; em (c) sistema de chincana e caixa de verificação da eficiência do polímero e; em (d) rede de alimentação dos tubos geotêxteis.

5.4.2 Aspectos do enchimento de tubos geotêxteis com rejeito de ouro

Para o início do processo de enchimento da primeira linha de tubos geotêxteis foi disposta sob a base de ensaio. Considerando a expectativa de evolução da forma da seção transversal, os tubos geotêxteis foram dispostos superpondo o tubo central em aproximadamente 25 cm sob os externos, conforme pode ser observado na Figura 5.17.



Figura 5.17: Disposição dos tubos geotêxteis sob a base drenante de ensaio. Detalhe para a superposição do tubo central sob os laterais.

Para entendimento do comportamento e desempenho dos tubos geotêxteis durante o preenchimento, foram observados aspectos como, volume de rejeito bombeado em um determinado intervalo de tempo; frequência de rotação da bomba do tanque de rejeito e do tanque de polímero; características finais do material homogeneizado no sistema de chincana; distribuição do rejeito no interior do tubo; aspecto visual do percolado; vazão percolada e, principalmente, variação de forma da seção transversal dos tubos geotêxteis.

No sistema ensaiado não há dispositivo acoplado para o controle automático da vazão que sai do tanque de acumulação de rejeito, para tanto, as medidas do tanque cilíndrico de rejeito foram conferidas em campo, e o volume do rejeito definido em função da altura o volume total de rejeito no início da operação do sistema. Para cada estágio de enchimento dos tubos geotêxteis foi anotada a altura de rejeito no interior do tanque e o tempo decorrido, sendo assim estimada a vazão total de rejeito bombeada para o interior dos tubos geotêxteis.

O sistema não contava com manômetro para controle das pressões de bombeamento, assim, foi anotada a rotação da bomba do tanque de rejeito para controle frente à curva da bomba, o que não confere precisão ao processo. Associado a este sistema, foi definida a rotação da bomba do tanque de polímero, de modo a permitir a dosagem de floculante na concentração de 0,2% no interior do sistema. A checagem da potência e rotação entre as duas bombas é

importante para que o polímero seja inserido no sistema com energia suficiente para se misturar ao rejeito, mas não com uma potência tão grande ao ponto de inserir um volume maior de polímero que o necessário para a floculação, o que levaria a uma condição antieconômica do processo.

Para acompanhamento desta mistura usa-se a caixa de verificação, na qual são retiradas amostras aleatórias para análise qualitativa do processo de floculação. Na Figura 5.18 (a) é possível observar a mistura formada pela bomba do tanque de rejeito na rotação de 130 Hz e de polímero em 0,8 Hz, sendo notável a formação de flocos maiores de rejeito. E ao toque, é observado aspecto viscoso da fração líquida, indicando excesso de polímero. Na Figura 5.18 (b) observa-se que não ocorreu formação de flocos maiores de rejeito, indicando mistura com concentração insuficiente de polímero quando a bomba de alimentação está na frequência 400 Hz e a de polímero em 0,75 Hz. Na Figura 5.18 (c) observa-se a mistura com partes ideais de polímero e rejeito.



Figura 5.18: Aspecto do comportamento do polímero e rejeito. Em (a) excesso de polímero na mistura, em (b) quantidade de polímero insuficiente e em (c) proporção adequada de polímero.

A proporção adequada de polímero e rejeito é importante não só por questões econômicas, mas assim como observado no ensaio de laboratório, o protótipo de campo refletiu que para misturas com concentrações insuficientes de polímero, as frações mais finas de rejeito saem através dos poros do geotêxtil, conforme pode ser visto na Figura 5.19. Quando a proporção de polímero está adequada à superfície do tubo, após o desaguamento, apresenta-se limpa (Figura 5.20 (a)) e o percolado sem turbidez (Figura 5.20 (b)).

Adequada a proporção de rejeito e polímero, passou-se ao enchimento dos tubos geotêxteis. Considerado o objetivo final que é o empilhamento, o enchimento dos tubos da base foi

realizado gradativamente, em estágios alternados de bombeamento em cada tubo, visando assim, obter alturas e larguras intermediárias semelhantes entre os tubos. Este procedimento é importante para o controle do estado limite, último de solicitação externa, como torções, rolamento entre tubos e deslocamentos (verticais e horizontais).

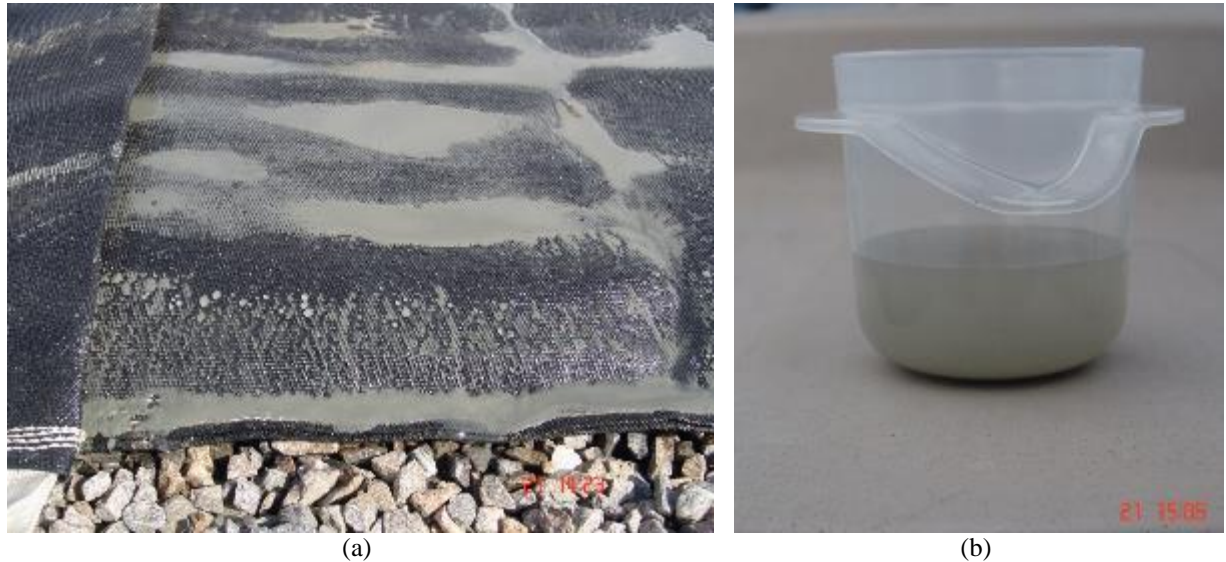


Figura 5.19: Em (a) presença de partículas de rejeito na superfície do tubo geotêxtil e em (b) aspecto do percolado com turbidez refletindo a baixa concentração do polímero na mistura.

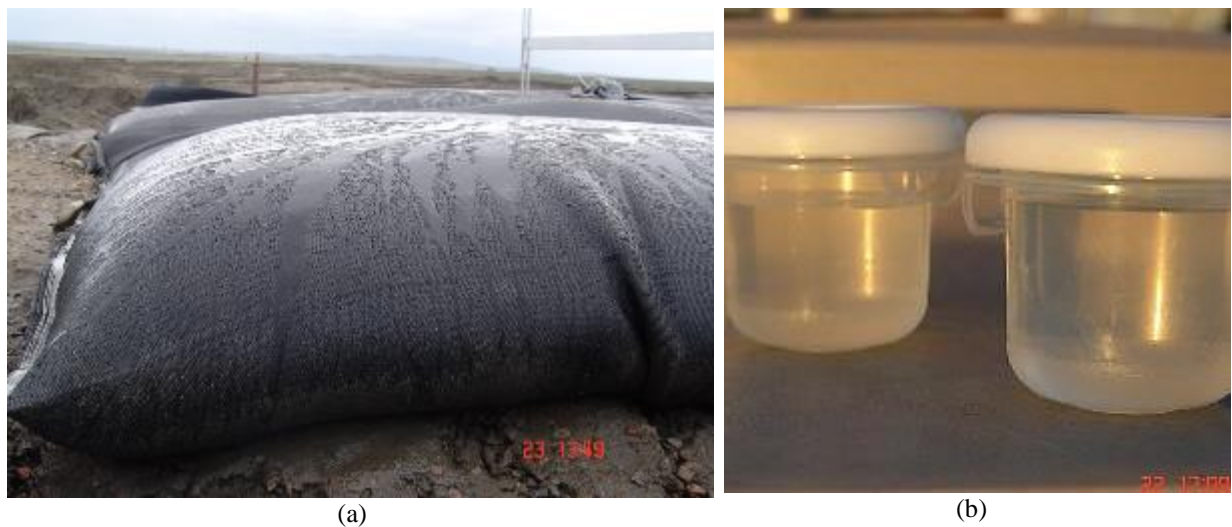


Figura 5.20: Em (a) superfície do tubo geotêxtil durante desaguamento, após verificação da proporção adequada de polímero e em (b) aspecto visual do percolado coletado.

Foi estimado para teste um ciclo intermediário de enchimento com duração de 10 a 15 minutos em cada tubo. Attingido este tempo, o bombeamento deveria ser iniciado no tubo geotêxtil seguinte. Na etapa 1 de enchimento realizado, foi testado este tempo de referência e obtido o resultado esperado de controle da estabilidade externa. Assim, para os demais tubos foi adotado o mesmo tempo máximo de referência.

Conforme pode ser observado no Apêndice A, durante a primeira etapa de enchimento foram bombeados cerca de 6.000 L de rejeito com um ciclo de 10 minutos seguido de 3 ciclos de 5 minutos sucessivos, totalizando 25 minutos de enchimento em cada tubo geotêxtil, e ao todo 75 minutos para os três tubos. Ao final deste tempo foi obtida uma seção transversal de aproximadamente 15 cm de altura, com forma retangular, conforme pode ser observado na Figura 5.22 (a).

A partir dos dados de controle de entrada, pode-se dizer que sob uma vazão de 1,6 L/s de rejeito com teor de sólidos aproximado de 50%, durante um intervalo de tempo de 75 minutos, cada tubo geotêxtil reteve instantaneamente cerca de 1,8 m³ de rejeito, perfazendo um volume total de 5,4 m³ de rejeito confinado. Dado estes números e volume inicial bombeado, é possível dizer que 800 L de rejeito, cerca de 13%, foram instantaneamente desaguados, conforme pode ser observado na Tabela 5.7 e planilha de controle de campo constante no Apêndice A.

As mesmas observações foram realizadas para as etapas subsequentes do enchimento dos tubos geotêxteis e os dados apresentados na Tabela 5.7. Considerada a altura máxima admissível para o geotêxtil, 1,0 m, e em função das solicitações de tração estimadas no limiar das etapas quatro, cinco e seis, foi dada atenção especial às condições físicas de solicitação do tubo, como condição das costuras, indicativo de solicitação excessiva do tecido, entre outras.

Tabela 5.7: Resumo da relação entre volume bombeado e sólido confinado no tubo G1.

Etapa	Volume TQ _{Rejeito} (m ³)	% Sólidos	Duração do Monitoramento (h)	HF ₀ (m)	HF _L (m)	Área (m ²)	ΔV ₀ Confinado (m ³)	ΔV _{efluente} (m ³)	V _{Confinado} (%)	V _{efluente} (%)
1	6,1		01:10	0,00	0,15	0,30	5,4	0,8	89%	13%
			25:15	0,15	0,08	0,16	2,88	3,22	47%	52%
2	9,3		01:22	0,08	0,26	0,36	6,45	2,85	69%	31%
			07:57	0,26	0,25	0,34	6,09	3,21	65%	35%
3	9,3		01:20	0,25	0,50	0,47	8,38	0,92	90%	10%
			03:00	0,50	0,50	0	-	-	-	-
*4	9,3	49,48	02:20	0,5	0,74	0,35	6,379	2,92	69%	31%
			71:45	0,74	0,62	0,18	4,26	5,04	46%	54%
*5	9,3	52,75	01:10	0,62	0,98	0,45	8,19	1,11	88%	12%
			23:35	0,98	0,8	0,24	4,40	4,90	47%	53%
*6	4,3	50,59	00:30	0,8	0,99	0,21	3,81	0,49	89%	5%

*O volume confinado e do efluente foi calculado a partir da área da seção da elipse para as etapas 4, 5 e 6.

Com o objetivo de ilustrar as fases de enchimento e desaguamento apresentadas na Tabela 5.7, foi desenvolvida o gráfico apresentado na Figura 5.21. Graficamente é possível observar que

quanto maior o tempo esperado na fase de desaguamento, maior é a variação da altura do tubo e conseqüentemente maior é o adensamento e consolidação do material confinado.

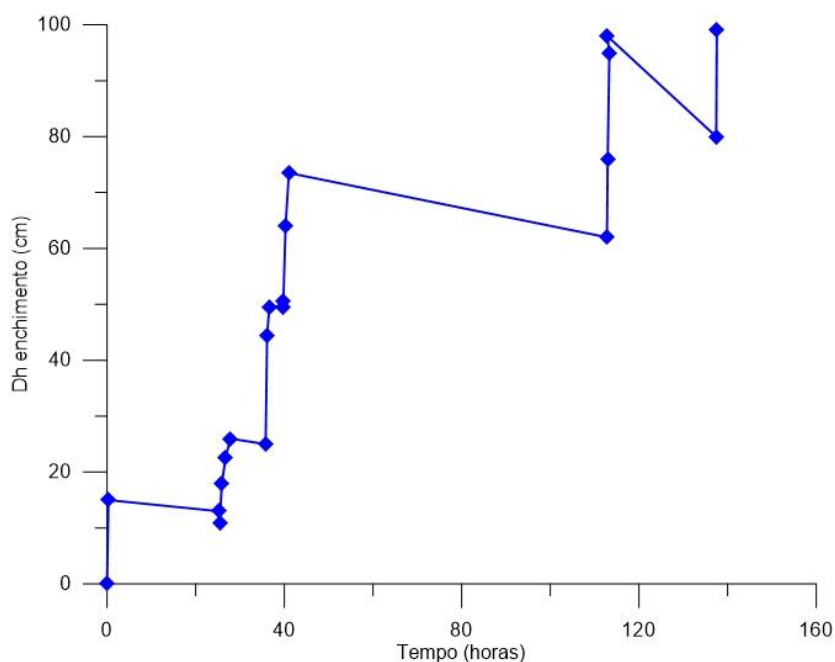


Figura 5.21: Variação da altura do enchimento (Dh) e desaguamento em função do tempo no tubo geotêxtil G1.

Baseado no comportamento geral dos tubos preenchidos com rejeito de ouro, foi observado que os tubos da primeira linha de enchimento (tubos G1, G2 e G3), apresentaram altura final após adensamento da ordem de 0,98 m a 1,0 m, enquanto os tubos das demais linhas da base (tubos G4 a G9), apresentaram altura final entre 0,85 a 0,95 m, provavelmente associado ao maior tempo de enchimento dos tubos 1 a 3 em decorrência da necessidade de ajustes nos processos de campo.

Conforme pode ser observado na Figura 5.22 (a), Figura 5.22 (b) e (c), até ser atingida a metade da altura crítica do tubo, a seção transversal se aproxima da forma retangular ou falsa elipse, conforme denominado por Pilarczik (2000). A partir da etapa 4, Figura 5.22 (d) a Figura 5.22 (f), na qual a altura do tubo passou a ser superior a 50 cm, a mudança da forma da seção transversal foi perceptível, se aproximando de uma elipse.

Durante o processo de enchimento dos tubos, foi observado que por vezes o rejeito se acumula no interior do tubo, próximo ao ponto de lançamento. Este acúmulo de material em um mesmo trecho torna-se perceptível a partir da formação de uma superfície irregular e deformada, conforme pode ser visto na Figura 5.23.

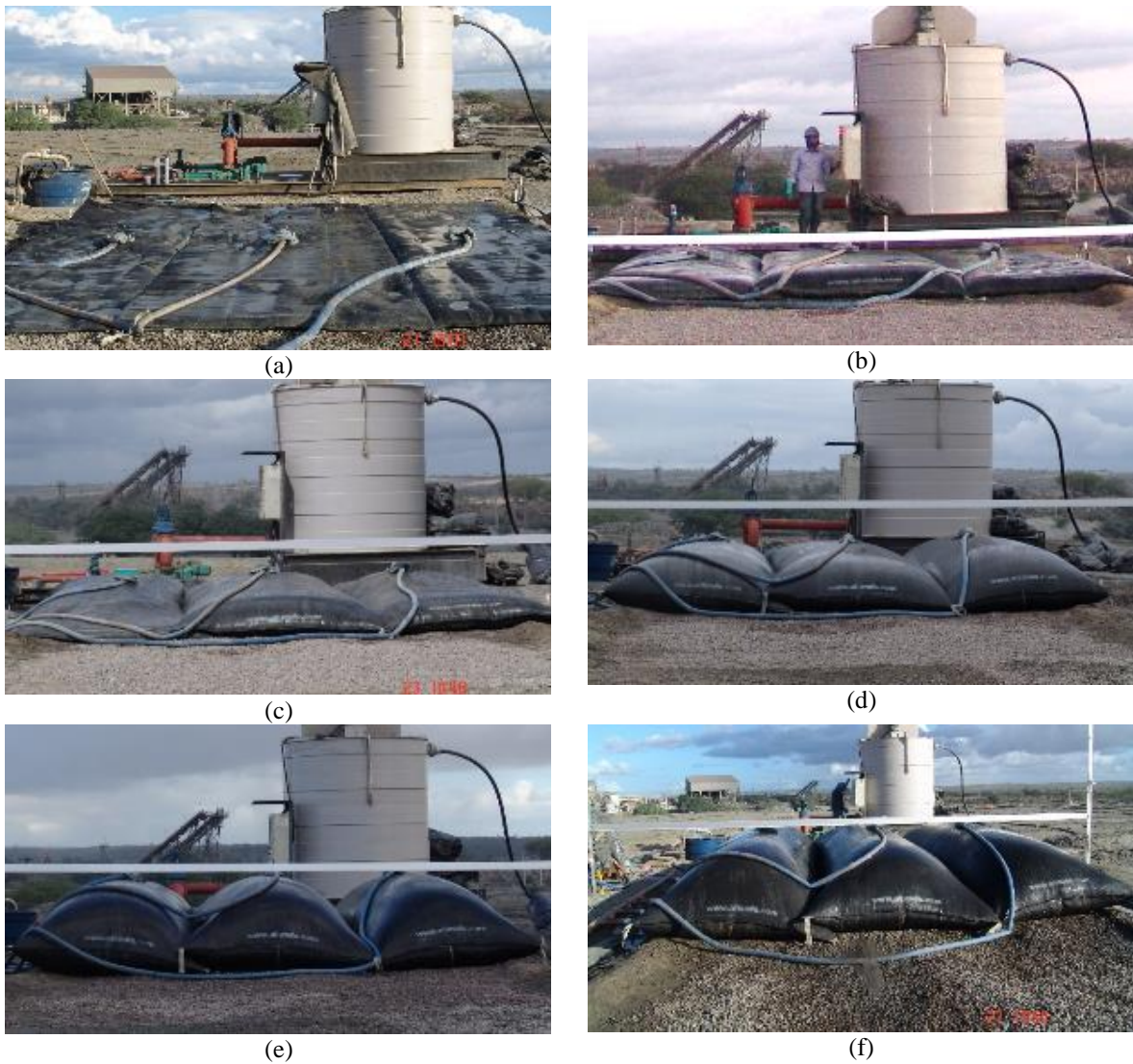


Figura 5.22: Aspecto dos tubos geotêxteis após: (a) a primeira fase de enchimento e tubo com $H \sim 15$ cm; (b) segunda fase de enchimento e tubo com $H \sim 35$ cm; (c) terceira fase de enchimento e tubo com $H \sim 50$ cm; (d) quarta fase de enchimento e tubo com aproximadamente $H \sim 75$ cm; (e) quinta fase de enchimento e $H \sim 98$ cm; e (f) sexto enchimento e $H \sim 100$ cm.



Figura 5.23: Deformação e irregularidade no tubo geotêxtil devido à acumulo de rejeito próximo ao ponto de lançamento.

Mesmo com este acúmulo, o processo de bombeamento teve continuidade e sob condições normais de enchimento e desaguamento, o material se espalhou pelo interior do tubo. Como comparativo da evolução deste processo foi determinado como acúmulo crítico o instante t_0 registrado na Figura 5.24 (a). Após 30 minutos, Figura 5.24 (b), é possível dizer que o rejeito já passou por certa distribuição, pois a superfície do tubo encontra-se menos irregular e indicando tendência a se planificar. Após 45 minutos (Figura 5.24 (c)), a superfície estava ainda menos irregular e após 1 hora e 10 minutos (Figura 5.24 (d)), a irregularidade não era mais visualmente perceptível. A superfície estava quase planificada e a seção transversal ao longo da flange se aproximava da forma retangular.

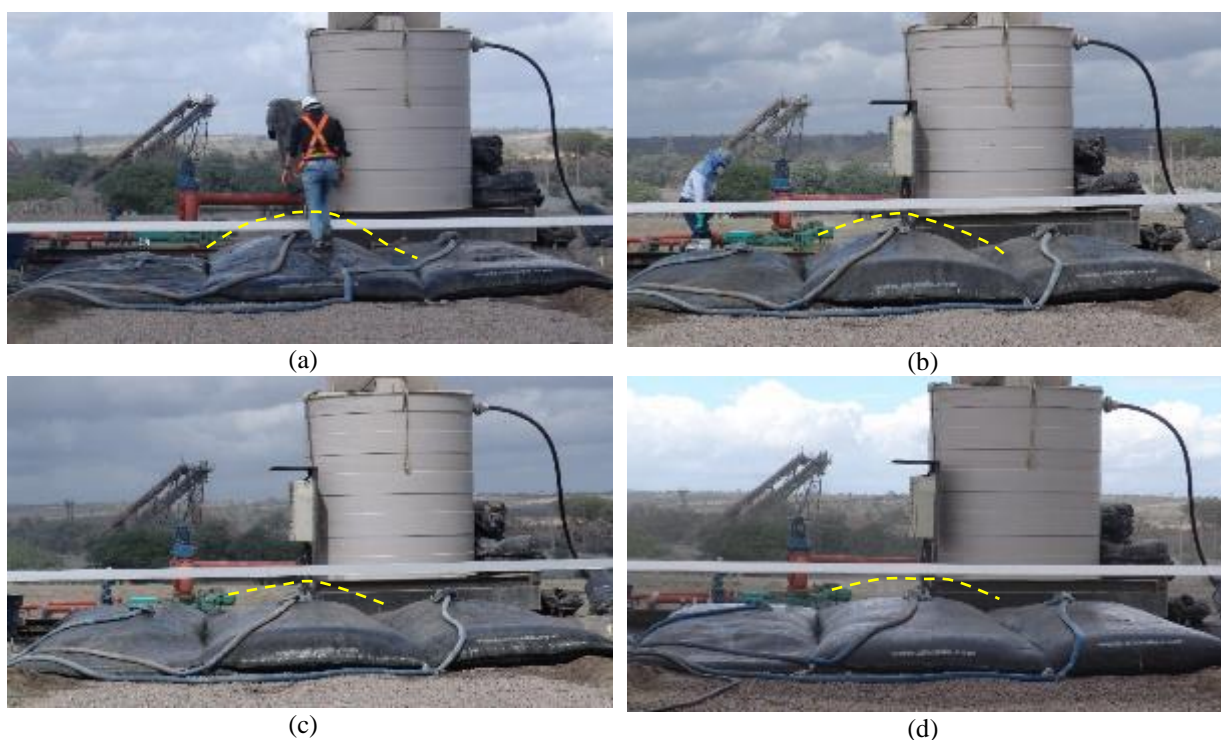


Figura 5.24: Aspecto visual da distribuição irregular do rejeito no interior do tubo em (a) tempo inicial, em (b) após 30 minutos, em (c) após 45 minutos e em (d) após 70 minutos.

Um processo inerente à fase de desaguamento é a aceleração da saída da fração líquida por meio de jateamento de água na porção externa do tubo geotêxtil ou ainda vibração por meio de equipamento. Tanto o jateamento quanto a vibração tem como função remover ou minimizar a camada de sólidos acumulada nos poros do geotêxtil, denominado como fenômeno de cegamento (capítulo 3). Na realização do ensaio de campo foi utilizada a solução de aplicação de jato de água na superfície dos tubos, conforme pode ser visto na Figura 5.25. O hidro-jateamento foi realizado sempre que observada redução da vazão percolada ou no encerramento das etapas de enchimento.



Figura 5.25: Aplicação de hidrojetamento durante o processo de desaguamento.

Considerado o balanço hídrico negativo da área de estudo, o hidrojetamento foi realizado em circuito fechado, a partir do reaproveitamento da água de desaguamento dos tubos geotêxteis. Este procedimento foi realizado após avaliação da constância do pH do efluente, que permaneceu na ordem de 7.

5.4.3 Análise da forma dos tubos geotêxteis

A partir da sobreposição de imagens do início e final do enchimento de cada tubo, foi possível observar a evolução da forma dos tubos geotêxteis durante o enchimento. A partir das medidas efetuadas com a miralaser e régua, foram conferidos principalmente os deslocamentos verticais. Para tal análise foram tratados os dados do enchimento do tubo geotêxtil central, denominado nas fichas de campo (Apêndice A), como G2. Na Figura 5.26 é apresentada a variação da forma do tubo geotêxtil G2 ao longo do bombeamento de rejeito nas etapas 1 a 6.

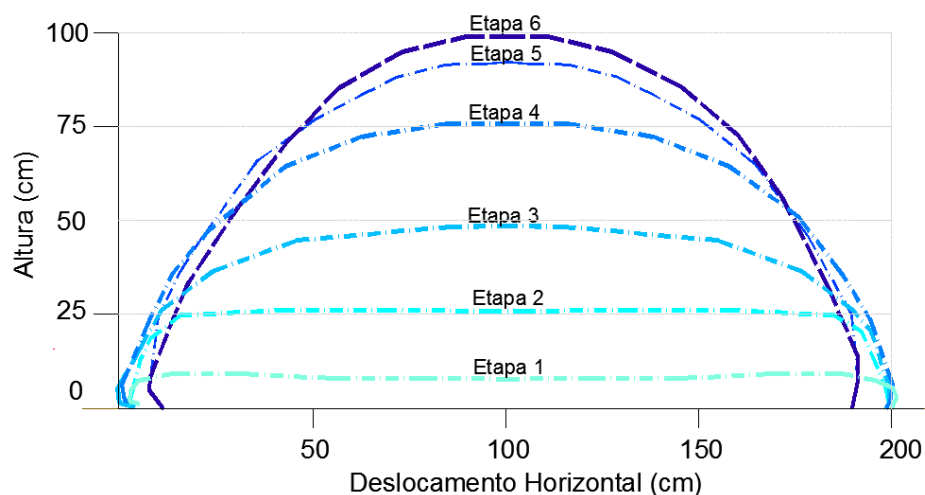


Figura 5.26: Evolução da forma do tubo geotêxtil ao longo das etapas de enchimento.

Baseado nos croquis de forma apresentados na Figura 5.26, é possível concluir que nas etapas 1, 2 e 3 a seção transversal dos tubos geotêxteis se aproxima mais da forma retangular e as etapas 4, 5 e 6 apresentam seção transversal mais similar à de uma elipse. Esse comportamento foi observado nos demais tubos geotêxteis, sendo mais proeminente a mudança de forma quando os tubos atingem altura aproximada de 50 cm, ou seja, metade da altura crítica, condição atingida ao final da etapa 3 de enchimento.

De acordo com Pilarczyk (2000), a variação da forma do tubo é em função das pressões de bombeamento, velocidade de enchimento, material de preenchimento e condição de adensamento. O autor ainda observa que tubos grandes, com baixas taxas de enchimento e material de preenchimento fino, tendem à forma mais retangular e achatada, forma esta observada até metade da seção transversal do tubo.

Ainda segundo Pilarczyk (2000), a deformabilidade do geossintético também interfere na forma da seção transversal. No ensaio de campo foi utilizado geotêxtil tecido e foram observadas poucas deformações dos tubos geotêxteis após pleno preenchimento. Esta condição é bastante distinta da observada na exumação dos tubos fabricados com geotêxteis não-tecidos preenchidos com rejeito de ferro (Capítulo 4, item 4.1). Dadas as diferenças entre os rejeitos, de modo o qual foram feitos os enchimentos, é possível considerar a influência das características do geotêxtil tecido e do geotêxtil não-tecido utilizados nos dois casos. De acordo com Palmeira e Gardoni (2001), geotêxteis não-tecidos são materiais de elevada compressibilidade e deformabilidade, o que corrobora com as observações de campo onde tubos preenchidos com material de textura fina, mas fabricados com geotêxtil não-tecido, apresentam maiores deformações que tubos fabricados em geotêxtil tecido

A forma retangular de tubos geotêxteis no início do processo pode ter ainda influência da costura de fabricação dos tubos. A costura é localizada na porção lateral dos tubos geotêxteis e apresenta maior espessura e resistência que as demais regiões do tubo.

A variação de forma é visualmente mais proeminente na direção vertical (altura), no entanto, também foram observados deslocamentos horizontais. No início do enchimento os tubos foram sobrepostos e perpassavam a largura do tubo adjacente em aproximadamente 20 cm (Figura 5.27 (a)). A medida que vão sendo preenchidos, estes adquirem a forma elíptica e observa-se a redução da largura e a tendência de diminuição do contato lateral com as unidades adjacentes (Figura 5.27 (b)). Ao atingir a seção plena de enchimento, observa-se

espaçamento entre os tubos. O s, o que sugere que o deslocamento horizontal em cada elemento é superior aos 20 cm inicialmente transpassados (Figura 5.27 (c)).



Figura 5.27: Em (a) transpasse de 20 cm na disposição inicial dos tubos; em (b) deslocamento horizontal entre os tubos em etapa intermediária; em (c) tubos já sem contato lateral.

Nesses espaços vazios formados entre os tubos, Figura 5.27 (c), pode ser realizado o preenchimento com a fração sólida do rejeito, estéril ou outro material de textura fina que não provoque danos mecânicos ao geotêxtil ou alterações das condições hidráulicas do tubo, permitindo a livre drenagem. O preenchimento destes vazios proporciona maior aproveitamento da área destinada à disposição do rejeito.

Os deslocamentos horizontais também foram monitorados por meio da régua em pórtico. As medidas obtidas estão apresentadas na Figura 5.28, sendo possível observar que a largura (W) mínimo atingido para o tubo geotêxtil G2 foi de 1,67 m, conferido por um deslocamento

horizontal máximo de 0,33 m. Essa medida quantifica as observações visuais apresentadas na Figura 5.27.

Ainda baseado no gráfico de deslocamento horizontal (Figura 5.28), observa-se que o deslocamento começa a ocorrer no início da etapa 3 (altura $h = 50$ cm), etapa de referência dos maiores deslocamentos verticais e variação de forma da seção transversal do tubo. Considerando que o perímetro do tubo permanece o mesmo, independente da forma assumida, acréscimos verticais na altura podem ser associados à decréscimos da largura. Esta análise pode ser justificada tanto pela variação da largura do tubo geotêxtil em função do tempo (Figura 5.28), quanto pela evolução da forma da seção transversal em função do tempo (Figura 5.26).

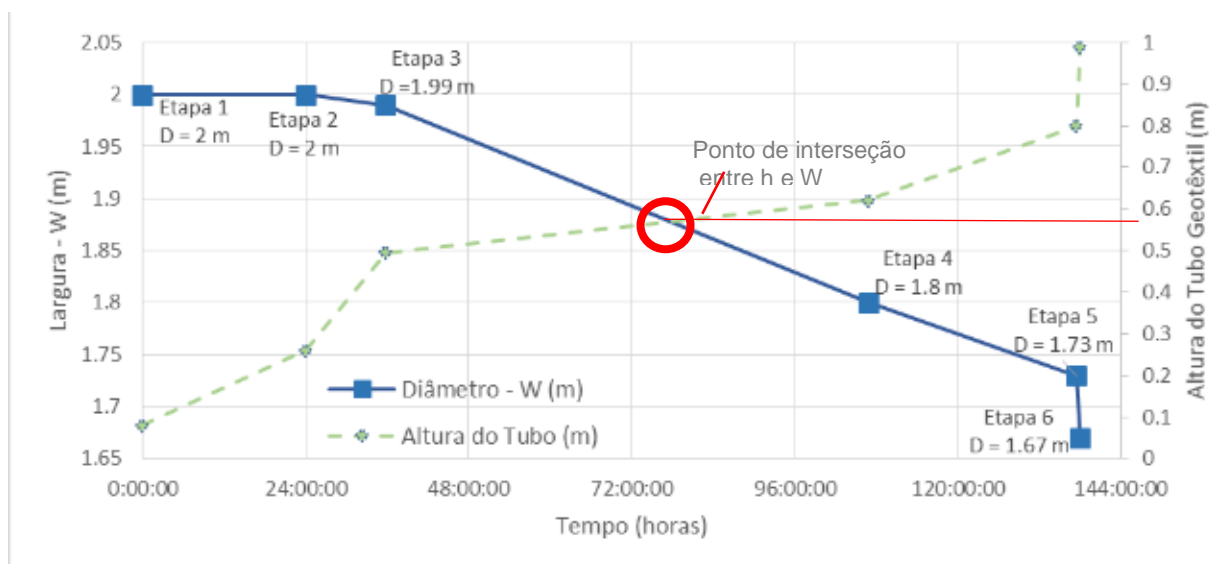


Figura 5.28: Variação da largura/diâmetro (W) e altura (h) do tubo geotêxtil em função do tempo.

A seção transversal do tubo geotêxtil foi ainda avaliada quanto as relações propostas por Pilarzick (2000) para formas de falsa elipse e elipse perfeita. As medidas de altura e largura obtidos no monitoramento de campo foram comparados com as relações de seção transversal na forma de elipse perfeita e falsa elipse, conforme apresentado na Tabela 5.8.

A partir das diferenças obtidas entre as medidas de campo e valores de altura e largura propostos por Pilarzick (2000), é possível dizer que as relações geométricas de elipse perfeita apresentam melhor ajuste matemático, apesar de visualmente a forma dos tubos durante o ensaio de campo indicarem seção transversal mais similar à de uma falsa elipse.

Tabela 5.8: Comparação da evolução da forma do tubo para seção elipse ou falsa elipse propostos por Pilarzick (2000).

Seção Transversal – Elipse Perfeita								
A0 (m ²)	Ae (m ²)	φ (Ae/A0)	H _{Calculado} (m)	H _{Medido} (m)	ΔH (m)	W _{Calculado} (m)	W _{Medido} (m)	ΔW (m)
1,47	0,00	0,00	0,00	0	0,00	1,94	2	0,06
	0,13	0,08	0,08	0,08	0,00	1,93	2	0,07
	0,41	0,27	0,26	0,26	0,00	1,92	2	0,02
	0,77	0,49	0,49	0,495	0,01	1,87	1,99	0,12
	1,04	0,70	0,73	0,735	0,00	1,79	1,8	0,01
	1,33	0,87	0,97	0,98	0,01	1,67	1,73	0,06
	1,30	0,88	0,99	0,99	0,00	1,66	1,67	0,01
Seção Transversal - Falsa Elipse								
A0 (m ²)	Ae (m ²)	φ (Ae/A0)	H _{Calculado} (m)	H _{Medido} (m)	ΔH (m)	W _{Calculado} (m)	W _{Medido} (m)	ΔW (m)
1,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,15	0,15
	0,16	0,11	0,08	0,08	0,00	2,00	2,10	0,10
	0,51	0,34	0,26	0,26	0,00	2,00	2,00	0,00
	0,93	0,63	0,54	0,50	0,04	1,99	1,87	0,12
	1,21	0,82	0,68	0,74	0,05	1,8	1,73	0,07
	1,49	1,01	1,37	0,98	0,39	1,73	1,59	0,14
	1,44	0,98	1,23	0,99	0,24	1,67	1,58	0,09

As medidas obtidas em campo foram ainda comparadas com as relações simplificadas dos parâmetros geométricos principais dos tubos geotêxteis, conforme formulação apresentada por Lawson (2006). O resultado comparativo obtido é apresentado na Tabela 5.9, sendo possível observar que as formulações propostas por Lawson (2006) apresentam maior divergências em relação as medidas de campo que a formulação proposta por Pilarzick (2000).

Tabela 5.9: Comparação dos resultados da formulação de Lawson (2006) com os resultados medidos em campo.

Parâmetros Geométricos	Em função do diâmetro teórico		Em função da circunferência		Medida campo (m)	Diferença Campo e cálculo em função de D (m)	Diferença Campo e cálculo em função de S (m)
	Formulação	Resultado	Formulação	Resultado			
Altura _{Máx}	H=0,6D	0,82	H=0,19S	0,82	0,99	0,17	0,17
Largura _{Mín}	W=1,4D	1,92	W=0,45S	1,94	1,67	0,25	0,27
Base	B=0,9D	1,23	B=0,29S	1,25	(*)	(*)	(*)

(*) Não foi medido diretamente em campo a largura da base em contato com a fundação.

Os parâmetros geométricos dos tubos geotêxteis foram ainda correlacionados a partir de Palmerton (2002) por Lawson (2006), com as tensões máximas atuantes nos tubos determinado a partir do programa computacional *Geotube Simulator*, no qual foi determinado

que a tensão máxima circunferencial deveria ser na ordem de 8,1 kN/m. Lawson (2006) expressa estas relações em função de material com peso específico de 20 kN/m³ e diâmetros teóricos de $D = 3,0$ m, $D = 4,0$ m e $D = 5,0$ m, enquanto o ensaio de campo foi realizado com rejeito com peso específico da ordem de 28 kN/m³ e tubo geotêxtil de perímetro 4,3 m e $D = 1,4$ m ($W \sim 2,0$ m). Apesar das diferenças, foi plotada a curva para o diâmetro $D = 1,4$ m, e conforme pode ser observado na Figura 5.29, a curva obtida apresenta comportamento semelhante ao estudado por Lawson (2006), o que indica que apesar de grandezas e materiais de características distintas, a relação entre H/D e tensão circunferencial tende a ser a mesma.

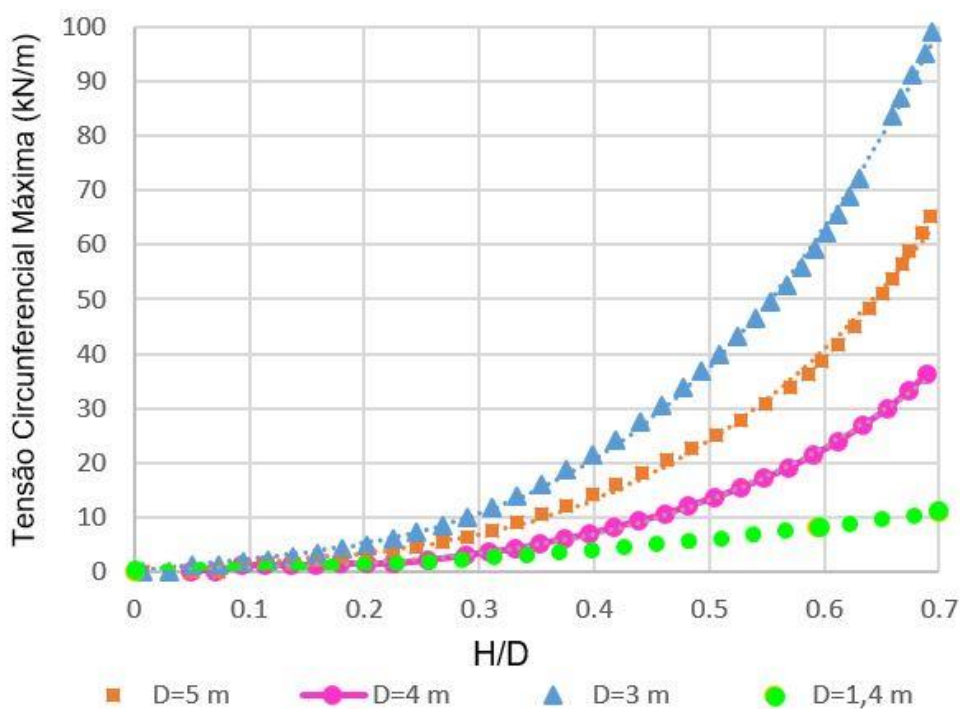


Figura 5.29: Relação da Tensão Circunferencial e razão H/D .

Lawson (2006) e Kazimierowicz (1994) propõe ainda formas de estimar as tensões atuantes na base dos tubos geotêxteis. Considerado o cenário final de enchimento, no qual as tensões atuantes são apenas o peso do material de preenchimento, uma vez que a massa do tubo geotêxtil é definida como desprezível, tem-se por Kazimierowicz (1994) que a tensão atuante na base do tubo é de 6,5 kN/m, enquanto pela relação de Lawson (2006), a tensão é de 6,4 kN/m e pelo programa *Geotube Simulator*, da ordem de 5,3 kN/m. Considerados os resultados obtidos, é possível dizer que apesar de formulações distintas, os valores obtidos são semelhantes. Entende-se como necessário porém a validação desta grandeza por meio de instrumentação de controle da pressão na base do tubo.

5.4.4 Dessecamento do rejeito em tubo de grandes dimensões

Assim como no ensaio de bolsa fechada (GDT), foi avaliado o dessecamento do rejeito contido no interior do tubo geotêxtil ao longo do tempo. Para essa avaliação foram coletadas amostras no interior do tubo, imediatamente abaixo do bocal de enchimento, conforme mostrado na Figura 5.30.



Figura 5.30: Coleta de amostra de rejeito contido no interior do tubo geotêxtil.

Essas amostras de rejeito foram coletadas quando cessado o bombeamento. Após 24 horas, 48 horas, 72 horas, 7 dias, 14 dias e 21 dias, visando estabelecer escala de análise semelhantes ao ensaio de laboratório. As amostras coletadas foram submetidas à ensaio para a determinação do teor de sólidos do rejeito confinado. Os resultados obtidos foram plotados no gráfico da Figura 5.31.

Baseado nos resultados obtidos (Figura 5.31), é possível dizer que o dessecamento do rejeito no interior do tubo geotêxtil tem comportamento bastante semelhante, principalmente nos primeiros 14 dias após cessado o lançamento de rejeito para o interior do tubo. O maior incremento do teor de sólidos ocorre nas primeiras 24 horas, sendo observada uma variação de aproximadamente 20% no teor de sólidos, que passa de 53% para 70% a 75%.

Após as primeiras 24 horas a taxa de dessecamento reduz e o incremento no teor de sólidos é cerca de 10% em 13 dias. Observa-se no entanto, que o ensaio de campo apresenta tendência a estabilizar com valores de teor de sólidos mais baixos que o ensaio de laboratório. Essa

condição pode ser justificada tanto pelos ciclos de enchimento e desaguamento aplicados no ensaio de campo, quanto pela escala do tubo.



Figura 5.31: Variação do teor de sólidos do rejeito em função do tempo (dessecamento), em amostras coletadas no ensaio de grande escala (ensaio de campo) e ensaio de laboratório (GDT).

Apesar dessa tendência de redução da taxa de dessecamento do rejeito nos tubos de grande escala, é possível dizer que após as primeiras 24 horas há uma tendência de estabilização do sistema. Assim, são esperadas pequenas deformações e a formação de um sistema estável e capaz de suportar um empilhamento de tubos.

5.4.5 Empilhamento de tubos geotêxteis

Considerada a possibilidade de otimização da área de disposição, foi avaliado o comportamento dos tubos geotêxteis quando empilhados. Para entendimento do processo realizado é apresentada na Figura 5.32 uma perspectiva geral dos tubos da base do empilhamento, 3 linhas compostas por 3 tubos geotêxteis cada.



Figura 5.32: Primeira fase de enchimento e base do empilhamento com tubos geotêxteis.

Na Figura 5.33 é mostrado o primeiro empilhamento dos tubos, que pode também ser caracterizado como a segunda fase de enchimento. Nesta fase foram executadas 2 linhas compostas por 2 tubos geotêxteis cada.



Figura 5.33: Primeira fase de empilhamento dos tubos geotêxteis.

A segunda fase do empilhamento e também a finalização do protótipo de campo proposto, foi concluída com apenas 1 tubo geotêxtil, conforme pode ser observado na Figura 5.34. O aspecto final do empilhamento se assemelha à um processo de montagem do tipo piramidal.

Nesta fase de estudo foram observadas também as solicitações internas e externas sob os tubos geotêxteis, mas principalmente, a interação entre os tubos adjacentes na conformação final do empilhamento. A análise das solicitações internas seguiu os mesmos padrões dos tubos da base, sendo acompanhada a variação da forma e altura máxima a ser atingida pelo tubo. Para as solicitações externas foi necessário considerar ainda a influência da superfície dos tubos da base (tubos geotêxteis identificados de 1 a 9), na estabilidade dos tubos empilhados.



Figura 5.34: Segunda fase de empilhamento dos tubos geotêxteis e finalização do protótipo de campo.

Para controle de solicitações externas os tubos foram empilhados considerando o intertravamento longitudinal e transversal, conforme mostrado na Figura 5.35.



(a)



(b)

Figura 5.35: Intertravamento dos tubos geotêxteis no empilhamento.

Durante o empilhamento foi observado que os tubos se encaixam nos espaços vazios dos tubos na base da fundação, sendo observado deste modo, distorções na seção transversal elíptica do tubo em função destes encaixes. Essa situação é ilustrada na Figura 5.36, onde ocorrem deformações tanto pelos espaços vazios entre os tubos inferiores, quanto pela altura de enchimento do tubo adjacente.



Figura 5.36: Deformações no tubo geotêxtil durante enchimento no empilhamento.

Diante das observações de campo é ainda possível dizer que quanto maior o espaçamento entre as laterais e extremidades dos tubos, maior a deformação do empilhamento. A utilização de materiais como rejeito e estéril no preenchimento destes vazios pode contribuir para a redução destas deformações e obtenção de um empilhamento mais uniforme e com menores solicitações externas. Para evitar a colmatação dos tubos e decréscimo da vazão de desaguamento, é importante que este material utilizado no preenchimento dos vazios tenha permeabilidade superior a do geotêxtil.

Ainda durante o empilhamento, foi observada a iminência de rolamento na última linha de enchimento dos tubos geotêxteis (tubo geotêxtil G14). Conforme pode ser observado na Figura 5.37, o tubo começou a apresentar superfície retorcida, com leve decaimento para a lateral, se aproximando do limite externo da base de tubos inferiores à medida que ia sendo realizado o bombeamento de rejeito para o seu interior.

Para evitar a ocorrência do rolamento, foi paralisado o bombeamento aguardando o desaguamento. Em seguida foram feitos ajustes na superfície do tubo com o objetivo de endireitá-lo de modo a cessar os esforços laterais de torção. No entanto, ações como utilização de amarrações entre os tubos, estacas ou escoras, Figura 5.38, podem apresentar maior eficiência no combate ao rolamento de tubos durante o enchimento.



Figura 5.37: Tubo indicando iminência de rolamento.

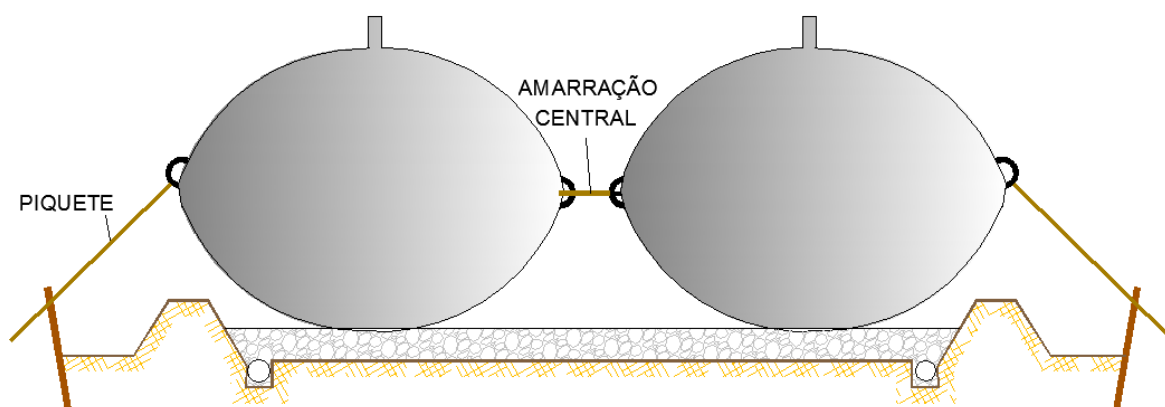


Figura 5.38: Ações para controle externo ao rolamento (adaptado de VETERMATTI, 2015).

O objetivo do ensaio de campo realizado foi a avaliação do comportamento dos tubos geotêxteis no empilhamento. No entanto, é importante a complementação do estudo com a determinação da estabilidade global e local do empilhamento, visando ainda o pré-dimensionamento dos tubos da base que receberão maior sobrecarga. Estima-se que quanto maior a altura do empilhamento, maior será a sobrecarga nos tubos da base e, portanto, menor solicitação local deverá ser aplicada a este tubo. É possível adotar como solução a redução do volume de preenchimento, ou até mesmo o reforço das camadas de base com geogrelhas, para aumento da capacidade de empilhamento e otimização da área ocupada.

5.4.6 Procedimento para o enchimento de tubos geotêxteis

Baseado nas observações de campo, são recomendados procedimentos para auxiliar o enchimento de tubos geotêxteis com rejeito de ouro.

- i. A granulometria do rejeito deve ser determinada em laboratório, e a dimensão das partículas sólidas compatibilizadas com a abertura de filtração do geossintético. Rejeitos de mineração apresentam granulometria bastante variável a depender da rocha de origem e do processo de beneficiamento utilizado e, atualmente, os tubos geotêxteis disponíveis no mercado apresentam pouca opção quanto à abertura de filtração, no entanto, a adequação destas dimensões podem propiciar a redução ou até mesmo a eliminação do uso de floculante no processo;
- ii. É importante a realização de ensaios de laboratório (cone geotêxtil e bolsa fechada, por exemplo), para avaliação do desaguamento e determinação da concentração de floculantes em medida de volume. Visa-se assim, facilitar e aumentar a assertividade da operação de campo;
- iii. É necessário que o sistema seja operado com medidor de vazão para controle do volume de rejeito bombeado em um intervalo de tempo;
- iv. É necessário que o tanque de polímero seja operado com medidor de vazão para controle do volume de polímero bombeado em um intervalo de tempo;
- v. É importante quantificar o volume efluente dos tubos geotêxteis, principalmente se o sistema for operado em sistema fechado de circulação de água;
- vi. É recomendável a coleta de amostras afluentes e efluentes para a realização de ensaios de teor de sólidos, turbidez e, para sistemas fechados com aproveitamento da água a análise química para controle do percolado;
- vii. Para enchimento de um único tubo geotêxtil, o bombeamento de rejeito pode ser contínuo. Devendo ser resguardado, no entanto, os ciclos de enchimento e desaguamento e o controle da altura máxima a ser atingida pelo tubo. Este processo é cíclico, e deve ser repetido até que seja atingida a altura máxima definida para o tubo geotêxtil;

- viii. No enchimento de tubos geotêxteis em linha, conforme o ensaio efetuado nesta pesquisa de campo, o bombeamento deve ser realizado em ciclos estabelecendo alturas intermediárias de enchimento dos tubos, de modo a controlar estados limites últimos de solicitação externa, como torções, rolamentos e deslizamentos ocasionados pelas reações de contato entre os tubos adjacentes;
- ix. Durante a fase intermediária de desaguamento dos tubos geotêxteis, é recomendável a execução de hidrojateamento, jato de água na face externa dos tubos; aplicação de vibração por meio de equipamento apropriado ou eletrocinética, e que não provoque ruptura no geotêxtil, com o objetivo de provocar o deslocamento da camada de *filter cake* que está reduzindo a permeabilidade do geotêxtil;
- x. Nos espaços vazios entre os tubos geotêxteis, pode ser lançado material sólido como rejeito, estéril ou outro material disponível no local que apresente maior permeabilidade que o geotêxtil. Este preenchimento permite melhor otimização da área utilizada para disposição, mas não deve interferir nas funções hidráulicas e mecânicas dos tubos geotêxteis;
- xi. Para o empilhamento de tubos geotêxteis é recomendável que os tubos da base, que servem como suporte, atinjam um teor de sólidos de 65%;
- xii. É importante que os tubos de cada camada do empilhamento sejam finalizados com altura aproximadamente equivalente, de modo a não criar uma superfície (base) irregular para os tubos que serão sobrepostos. Recomenda-se que essa inclinação não seja superior a 0,3%;
- xiii. O empilhamento não deve ser iniciado antes de cessar o desaguamento dos tubos base;
- xiv. Durante a realização do empilhamento de tubos geotêxteis, o controle das solicitações externas deve ser redobrado, em especial o rolamento de tubos. Se observada a tendência de rolamento, deve ser executada escora por meio de estacas cravadas no terreno de suporte, ou outro tipo de estrutura de apoio elementar viável de ser implantada em campo;
- xv. É recomendável que o empilhamento seja executado por meio do intertravamento dos tubos geotêxteis. A depender da complexidade e dimensão da estrutura, pode ser

necessário fazer o travamento tridimensional ao invés do bidimensional inicialmente adotado no ensaio de campo desta pesquisa;

- xvi. Concluído o enchimento dos tubos geotêxteis, os mesmos devem ser monitorados quanto ao seu comportamento e deformação. Constatada a estabilidade do sistema, é possível proceder os passos de fechamento da estrutura;
- xvii. Considerado o aumento de vida útil do material geossintético dos tubos geotêxteis, ou ainda a possibilidade de reintegração da área utilizada para a disposição de rejeito, pode-se realizar a cobertura do empilhamento de tubos geotêxteis com camada de solo e vegetação ou ainda biomanta, ou geogrelha para reforço do empilhamento e incorporação como elemento de fundação, entre outros. No caso do rejeito de ouro, deve ser avaliada a camada de cobertura quanto ao controle da drenagem ácida, sendo recomendada a realização de estudos específicos para a otimização da camada de cobertura considerando a capacidade de filtração e contenção de material contaminado.
- xviii. Para aumentar a estabilidade ou ainda executar empilhamentos de maior altura, entende-se como possível encher os tubos geotêxteis da base até no máximo a metade da sua altura crítica, visando assim obter uma superfície final plana. A forma elíptica final dificulta no empilhamento e estabilidade das camadas superiores. Para maior otimização da seção do tubo, há de se avaliar se outras formas de costura para fechamento do tubo geotêxtil que propiciem uma lateral mais retangular e poderiam atender à esta demanda de maior linearidade das bordas do tubo.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 Conclusões

Os resultados de campo e laboratório indicam que os tubos geotêxteis podem ser utilizados em processos de confinamento e desaguamento de rejeito de ouro. As conclusões obtidas nesta pesquisa são:

- Os ensaios de laboratório e de campo indicam que nas primeiras 24 horas após o enchimento dos tubos geotêxteis, o teor de sólidos passa de aproximadamente 50% para cerca de 75%;

- A área utilizada para a disposição do rejeito pode ainda ser otimizada a partir do empilhamento dos tubos. Os ensaios de campo indicam que após 7 dias do final do enchimento os tubos já apresentavam aspecto físico estabilizado e teor de sólidos da ordem de 80%.
- Durante o ensaio de cone geotêxtil e bolsa fechada foi constatado que para a abertura de filtração do geotêxtil e rejeito em questão, a utilização de floculante é necessária para o processo de filtração, e evita a excessiva passagem de partículas através das tramas do geossintético. O ajuste da abertura de filtração do geotêxtil utilizado na fabricação dos tubos pode propiciar otimização da quantidade de polímero requerido, ou até mesmo a sua eliminação.
- A otimização do uso de floculante é ponto importante não só pelos custos associados, mas ainda pela logística, uma vez que o preparo do tanque de polímero é uma etapa à mais na operação do sistema, e necessita de água para o preparo da solução. Considerada a escassez hídrica enfrentada por algumas regiões mineradas, a eliminação da necessidade do polímero é uma melhoria a ser buscada.
- Durante os ensaios de laboratório foi observada a redução da permeabilidade do geotêxtil no desaguamento, devido à formação do “*filter cake*”. Essa redução de permeabilidade é também observada em campo, a partir da diminuição da vazão do percolado. Para a continuidade do processo em campo, vem sendo aplicado jato de água na superfície externa do tubo geotêxtil, o que faz com que película formada na interface geossintético/material se desfaça parcialmente e o sistema volte a apresentar maior permeabilidade.
- A evolução da forma do tubo geotêxtil é visualmente perceptível no ensaio de campo. Até a metade da altura crítica da seção transversal o tubo geotêxtil apresenta forma retangular achatada. Após a metade da altura crítica, o tubo passa a exibir uma forma elíptica, o que é confirmado pelas relações geométricas e de volume propostas por autores como Pilarzick (2000).
- A solicitação externa de rolamento do tubo geotêxtil, observada durante o enchimento do último tubo da última camada do empilhamento, sugere a importância de finalizar as camadas do empilhamento com alturas semelhantes, de modo a não gerar uma inclinação superior ao necessário apenas ao escoamento do efluente filtrado pelos

tubos. Para tanto, sugere-se uma declividade máxima de 0,3%, que permite a drenagem mas limita o rolamento;

- A forma elíptica alcançada pelo tubo geotêxtil após ser atingida metade da altura crítica, sugere maior influência na estabilidade externa de tubos geotêxteis no empilhamento. Deste modo, para aumentar as condições de segurança em um empilhamento, sugere-se encher os tubos da base até no máximo metade da sua altura crítica. Isso irá proporcionar superfícies retangulares e planificadas de maior estabilidade, e ainda uma margem de segurança ao geotêxtil dos tubos base, que estarão aptos à receber maior carga vertical externa devido à menor sollicitação interna;
- Quanto a relação de forma e estabilidade do tubo geotêxtil, é possível ainda alcançar maior estabilidade do empilhamento a partir de avaliação de modos de costura diferenciados, que proporcionem uma superfície lateral mais planificada e uma seção transversal mais retangular ao longo de suas bordas;
- As tensões atuantes no tubo geotêxtil durante e após o enchimento são complexas e as proposições feitas por alguns autores como Plaut e Suherman (1998), requerem rotinas computacionais iguais aquelas utilizadas pelo *Geotube Simulator*. De acordo com o pré-dimensionamento, obtém-se um valor de tensão máxima axial de 7,3 kN/m para a condição final do enchimento. Outros autores como Kazimierowicz (1994) e Lawson (2006) propuseram relações simplificadas entre parâmetros geométricos dos tubos geotêxteis e as tensões atuantes. Os resultados obtidos pelas relações simplificadas foram semelhantes e pouco inferiores ao resultado fornecido pelo programa computacional. Este resultado indica que as relações simplificadas fornecem uma estimativa das tensões máximas atuantes com margem significativa de segurança.

6.2 Sugestões para pesquisas futuras

Para quantificar algumas observações feitas e fortalecer objetivos expostos nesta pesquisa, algumas sugestões para estudos futuros são listados a seguir:

- Avaliar o desaguamento do rejeito de ouro por meio de geotêxteis com diferentes aberturas de filtração, fazendo um comparativo com a concentração de flocculante requerida para a filtração;
- 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;
- 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;
- Exumar os tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de ouro observando características da deposição do rejeito no interior do tubo geotêxtil, segregação do material em relação ao comprimento e profundidade, comparando os resultados obtidos à exumação realizada em tubos geotêxteis não-tecidos preenchidos com rejeito de minério de ferro;
- Exumar o tubo geotêxtil G2, da primeira linha preenchida, avaliando se o acúmulo de rejeito abaixo da flange de bombeamento proporcionou comportamento distinto na deposição de rejeito neste tubo em relação aos demais no qual o fenômeno não foi observado;
- Exumar o tubo geotêxtil coletando amostras indeformadas de rejeito para a realização de ensaios de adensamento oedométrico e resistência ao cisalhamento, visando a obtenção de parâmetros que subsidiem estudos de tensão versus deformação;
- Comparar o índice de vazios do rejeito confinado no interior do tubo geotêxtil, nas diferentes linhas de empilhamento, com o que ocorre ao longo da praia de rejeito;
- 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;
- Avaliar as deformações e a estabilidade do empilhamento do tubo geotêxtil realizado a partir de parâmetros obtidos em ensaios, e de modelagem numérica por meio da ferramenta computacional;

- 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

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. ASTM D 7701. Standard Test Method for Determining the Flow Rate of Water and Suspended Solids from a Geotextile Bag, 2011.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. ASTM D 7880. Standard Test Method for Determining the Flow Rate of Water and Suspended Solids from a Closed Geosynthetic Bag, 2013.

AMORIM, N. R. (2007) Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM). Tede de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.568. Geossintéticos: Determinação da massa por unidade de área. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.569. Geossintéticos: Determinação da espessura nominal. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 7181. Análise granulométrica do solo. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9863. Geossintéticos – Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1 – Camada única. Rio de Janeiro, 2013.

BALTAZAR, P. M. R. Interfaces Solo-Geossintético em corte em Plano Inclinado. 2008. 111 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2008.

BOTELHO, A. P. D. Implementação de metodologias de ensaios para determinação de relações constitutivas de processos de fluxo em solos com a utilização da bomba de fluxo. 2001. 254 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. 2001.

BRIO GOLD. (2016). Fluxograma de processo de beneficiamento do minério da Mina de Fazenda Brasileiro.

CANTRE, S. (2006). Estimating the dewatering time in geosynthetic tube dewatering projects. In: Kuwano, J. Koseki, J. (Hg): Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics. Rotterdam: Milipress, S. 503-506.

CANTRÉ, S.; SAATHOFF, F. (2011). Design method for geotextile tubes considering strain – formulation and verification by laboratory tests using photogrammetry. *Journal Geotextiles and Geomembranes*, 29 (3), p. 201-210.

CARNEIRO, J. R. da.C. Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – A importância da incorporação de aditivos químicos. 2009.602 f. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2009.

CARROL, R. G. (1983). Geotextile filter criteria. *Transportation Research Record. Engineering Fabrics in Transportation Construction*, D. C. 53 pp.

CARVALHO, C. T. Terminal Portuário Emraport. In: 55^o Congresso Brasileiro de Concreto. Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil. Outubro de 2013.

CASTRO. N. P. B de. (2005). Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São Jose dos Campos, São Paulo. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. 2015. Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas. 2015 ano base 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. 2016. Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas. 2016 ano base 2015.

FOWLER, J.; LARKINS, K.; DUKE, M. (2005) Dredging Aerobis Digested Biosolids into Geotextile Tubes for Dewatering, New Orleans East Municipal Sewage Treatment Plant. , LA. New Orlean, LA.

GAFFNEY, D. A; MARTIM, S. M.; MAHER, M. H. BENNERT, T. A. (1999). Dewatering contaminated fine-grained material using geotextiles. SI Geosolutions, 1999.

GARDONI, M. G. A. Avaliação da aplicabilidade de ensaios de laboratório e critérios de filtros para a utilização de geotêxteis em solos do Distrito Federal. 1995. 177 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasília, 1995.

GARDONI, M. G. A. Estudo do comportamento dreno filtrante de geossintéticos sob compressão. 2000. 313 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

GARDONI, M. G. A. Utilização de geossintéticos em obras de meio ambiente - Filtração e Drenagem. Notas de Aula da disciplina Geossintéticos, do Mestrado Acadêmico em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2º semestre de 2015.

GEOSYNTHETIC INSTITUTE. GRI Test Method GT10: Test Methods, Properties and Frequencies for High Strength Geotextile Tubes used as Coastal and Riverine Structures. Folsom, PA, 2012.

GEOSYNTHETIC INSTITUTE. GRI Test Method GT15: Standard test method for the pillow test for field assessment of fabrics/additives used for geotextile bags, containers, and tubes. Folsom, PA, 2009.

GIROUD, J. P. (1996) Granular filters and geotextile filters. Proceedings of Geofilters '96. Montreal, QB, pp 565 – 680.

GONZALES MAMANI, G. L. (2012). Comportamento de um aterro experimental sobre um depósito de rejeito de ouro – Mineração Paracatu. Tese de Doutorado. Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. (2015). Informações sobre a economia mineral brasileira 2015.

KAZIMIEROWICZ, K. (1994). Simple analysis of deformation of sand-sausages. In: 5th International Conference of Geotextile Geomembrane and related products. 1994, Singapore, p. 775-778.

KOERNER, G. R.; KOERNER, R. M. Geotextile tube assessment using a hanging bag test. Geotextiles and Geomembranes. v. 24, p. 129-137, 2006.

LAFLEUR, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. *Geotextile and Geomembranes*. V. 17, p. 299-312, 1999.

LAWSON, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama. Proceeding. Rotterdam: Millpress, 2006.

LESHCHINSKY, D., LESHCHINSKY, O. Geosynthetic Confined Pressurized Slurry (GeoCoPS): Supplemental Notes: technical Report CPAE-GL-96-1. Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, 54 p, 1996

LIU, G. S (1981). Design criteria of sand sausages for beach defences. In: 19th Congress of the International Association for Hydraulic Research. 1981, New Delhi, India. Subject B (b), Paper n° 6, p. 123-131.

LIU, G. S.; SILVESTER, R. (1977). Sand sausages for beach defence work”, Proceedings of the 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (2010). Introdução ao Tratamento de Minérios. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. 5^a Edição. Rio de Janeiro, agosto de 2010.

MARTINS, P. M. (2006). Utilização de tubos de geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração. 2006. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2006.

MARTINS, P. M.; VIDAL, D. M. (2006). Tubos geotêxteis para acondicionamento e desaguamento de rejeitos de mineração. In: 12^o Encontro de Iniciação Científica e Pós Graduação do ITA, XII ENCITA, São José dos Campos, Brasil, 9p.

MENEZES, L. P. (2010). Levantamento das características reológicas de resíduos de minérios para fins de sua destinação final em depósitos. Monografia. Departamento de Engenharia Ambiental. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. MG. 2010.

MOO-YOUNG, H.K.; TUCKER, W.R (2002). Evaluation of vacuum filtration testing for geotextiles tubes. *Geotextiles and Geomembranes*, v.20, p. 191-212.

MORI, H.; MIM, H. E.; TSIINEOKA, N. (2002). The use of geo-tube method to retard the migration of contaminants in dredge soil. *GEOSYNTHETICS 7TH ICG*, 2002, Nice. Anais. 2002. p. 1017-1020.

OBBER GEOSINTÉTICOS, 2013. Geofomas. Geotêxtil não tecido. Catálogo técnico. Ober Geossintéticos Soluções para Engenharia. 2013.

OLIVEIRA, S. L., ABRÃO, P. C. (1998) Capítulo in: Oliveira, A. M. S e Brito, S. N. A (Editores). Geologia de Engenharia – ABGE. Capítulo 26 “Mineração”, p. 432-438. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 1998.

PALMEIRA, E. M. (2003). Fatores Condicionantes do Comportamento de Filtros Geotêxteis. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Volume 1, Porto Alegre, pp 49-67.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. (2001). Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using diferente experimental techniques. In: geotextile and Geomembranes, v. 20 (2001), p. 97-115.

PALMERTON, J. B (2002). Distinct element modeling of geosynthetic fabric containers. Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics. Nice, France. Vol. 3, p. 1021-1024.

PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P.; LINS, F. A. F.; TORE, M, M. L. (2002) 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.

PILARZYCK, K. W. Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering. ISBN-9058093026. 2000. Balkema.

PLAUT, R. H.; SUHERMAN, S. (1998). Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes. Acta Mechanica, n° 3-4, p. 207-218.

SAMARCO, 2016 (a). Samarco intensifica obras em Candonga. Disponível em: <<http://www.samarco.com/wp-content/uploads/2016/11/Samarco-intensifica-obras-em-Candonga.pdf>>. Acesso em 21 de maio de 2017.

SAMARCO, 2016 (b). Germano Geral. Área Externa. UHE Risoleta Neves – Recuperação Reservatório. Plano Executivo da dragagem emergencial do reservatório da UHE Risoleta Neves. Junho de 2016.

SANTOS; L.S. Estudo da durabilidade de geomembranas utilizadas na impermeabilização de reservatórios das barragens de rejeito de ouro. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, MG, 160 p, 2014.

SATYAMURTHY, R.; BHATIA, S. K. Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. *Geosynthetics International*, v. 16, n.º.2, 2009.

SHIN, E.C.; OH, I. Y. Analysis of geotextile tube behavior by large-scale field model tests. *Geosynthetics International*, v. 10, n.º 4, p. 134-141, 2003.

STEPHEN, T.; MELO, L. C. Q. C.; CASTRO, N. P. B.; MARQUES, A. C.M. (2009). Canal do Fundão Contaminated Sediments GDT Analysis Versus Actual Full Scale Project Results. In: *Geo-Frontiers Congress*. March. 2011. Dallas, Texas, United States.

TOMINAGA, Emy. Análise dos procedimentos para avaliação de desempenho de sistemas fechados com geotêxtil para desaguamento. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura Aeroportuária) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

TORRES, M.; TIMPSON, C. Development and evolution of key industry dewatering tests (HBT, Cone, RDT, GDT) and they accuracy in predicting full scale results. In: *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. ASCE, 2011. p. 2194-2202.

TRAINER, E. Disposal of Coal Mine Slurry Waste. In: *Bulletin G2009-02. Ten Cate Geosynthetic North America, Geotube*. Georgia, Estados Unidos das Américas, 2009.

VERTEMATTI, L.C. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Edgard Blucher, 1ª edição, São Paulo, 2004.

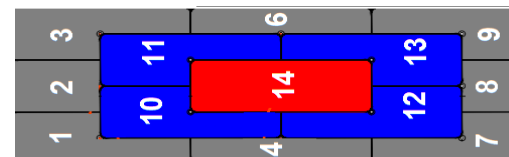
VERTEMATTI, L.C. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Edgard Blucher, 2ª edição, São Paulo, 2015.

VICK, S. G. Planning, design and analysis of tailing dams, New York: John Wiley & Sons, 1983. 369 p.

VIDAL, D. M.; URASHIMA, D. (1999). Dimensionamento de filtros e drenos em geossintéticos, 3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Rio de Janeiro, 20-22 outubro de 1999.

YEE, T.W.; LAWSON, C.R. Modelling the geotextile tube dewatering process. *Geosynthetics International*, v. 19, n° 5, p. 339-353, 2012.

APÉNDICE A



FICHA DE CONTROLE 3 - CONTROLE DO ENCHIMENTO DO GETOTUBE

Controle Volume TQ			Teor de Sólidos do Rejeito			Polímero	Bombeamento			N° Geo	Altura (cm)		Bomba TQ Rejeito (Hz)
Vo (m³)	ΔH (m)	Vf (m³)	R. Alim.	Cx Verificação	Efluente	[C] (%)	Rotação Bomba (Hz)	Hora Início	Hora Término		NT (Ref) (cm)	H. Flange (cm)	
		0				0.2	90 RPM	16:15:00	16:25:00	1	128.00	117.00	50
		0				0.2	100	16:25:00	16:35:00	2	129.50	112.50	45
		0				0.2	100	16:35:00	16:45:00	3	129.50	110.00	45
		0				0.2	120	16:45:00	16:47:00	1	128.00	-	45
		0					1500	16:47:00	16:50:00	1	128.00	101.00	50
		0					130	16:50:00	16:56:00	2	129.50	-	50
		0					120	16:56:00	17:00:00	2	129.50	100.00	50
		0					130	17:00:00	17:10:00	3	129.50	99.00	50
		0						17:10:00	17:15:00	1	128.00	105.50	50
		0						17:15:00	17:20:00	2	129.50		50
		0						17:20:00	17:25:00	3	129.50	105.00	50
		0						17:30:00	17:37:00	1	128.00	102.00	50

Operador: Murilo

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO

INÍCIO	TÉRMINO	OBSERVAÇÕES
16:15		Quando a bomba de polímero trabalhou com rotação de 100 RPM, o rejeito apresentou flocos finos.
16:47	16:50	Excesso de polímero nos tubos 2 e 3 durante o primeiro enchimento. Para rotação da bomba de polímero de 150 RPM - excesso de polímero. Com rotação de 120 RPM o rejeito não floculou bem
	17:15	Acabou o tanque de polímero.
17:30	17:55	Final da lavagem da linha de alimentação.



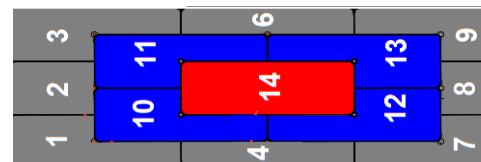
ALLONDA GEOSINTÉTICOS AMBIENTAIS

DATA: 23/06/2017

Projeto Brio Gold

Mineração Fazenda Brasileiro - Pilha de Underflow

Disposição de rejeito de ouro por meio de Geotube



FICHA DE CONTROLE 3 - CONTROLE DO ENCHIMENTO DO GETOTUBE

Controle Volume TQ			Teor de Sólidos do Rejeito			Polímero	Bombeamento			N° Geo	Altura (cm)		Bomba TQ Rejeito (Hz)
Vo (m³)	ΔH (m)	Vf (m³)	R. Alim.	Cx Verificação	Efluente	[C] (%)	Rotação Bomba (Hz)	Hora Início	Hora Término		NT (Ref) (cm)	H. Flange (cm)	
							-	Leitura Inicial		1	125.50	100.00	-
							-	Leitura Inicial		2	126.00	93.50	-
							-	Leitura Inicial		3	126.50	103.50	-
							130	09:45:00	09:55:00	3	126.50	89.50	40
							135	09:55:00	10:05:00	2		84.50	40
							125	10:05:00	10:25:00	1		80.50	40
							125	10:15:00	10:25:00	3	126.00	73.00	
							1000	10:25:00	10:35:00	?	125.50	73.00	
							800	10:35:00	10:45:00	1	126.50	76.00	
							800	10:45:00	10:55:00	3		71.00	
							600	10:55:00	11:05:00	2			
							400	13:45:00	13:55:00	1	76.00	75.00	45
								13:55:00	14:10:00	3	75.00	56.00	
								14:10:00	14:20:00	2	75.00	62.00	
								14:20:00	14:40:00	1	75.00	61.50	30
							300	14:40:00	14:55:00	2	62.00	50.00	45
							1000	14:55:00	15:00:00	3	127.00	49.50	
							600	15:00:00	15:05:00	3	49.50	45.00	
							800	15:05:00	15:20:00	1		52.00	

Operador:

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO

INICIO	TERMINO	OBSERVAÇÕES
	15:10	Geotube 3 - A filtragem começa a diminuir. Necessário jateamento.
	15:20	Fim do tanque de rejeito.

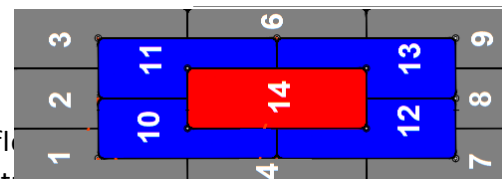


ALLONDA GEOSINTÉTICOS AMBIENTAIS

DATA: **26/06/2017**

Projeto Brio Gold

Mineração Fazenda Brasileiro - Pilha de Underflow
 Disposição de rejeito de ouro por meio de Geotubo



FICHA DE CONTROLE 3 - CONTROLE DO ENCHIMENTO DO GETOTUBE

Data	Pol (%)	Bombeamento Geotube						N° Geo	Altura Flange (cm)		Hora Coleta Cx. Veri.	Volume sólido (ml)	vol tanque (9,000L)
		Bomba Pl. (rpm)	Bomba Rj. (Hz)	^[1] Vazão perc./ Ph	^[2] Vazão (L/s)	Hora Início	Hora Término		H _i (cm)	H _f (cm)			
26/06/2017	[C]												
NT (G1) (cm)	0.2	800	45			15:05:00	15:25:00	1	63.00	49.00	800		-25 cm
125	0.2	800	45	500mL/s		14:55:00	15:05:00	2	62.00	48.00	800		-25 cm
NT (G2) (cm)	0.1	1000	45			14:45:00	14:55:00	3	57.00	41.00	800		-30 cm
	0.1	600	45			15:15:00	15:20:00	3	40.00	35.00	800		
NT (G3) (cm)	0.1	600	45			15:20:00	15:30:00	2	41.00	35.00	600		Metade TQ
		600	45	680mL/s		15:30:00	15:43:00	1	44.00	30.00	600		3/8
		400				15:43:00	15:50:00	3	30.00	27.00	600		1/4
Leitura Inicial		400				15:50:00	15:57:00	2	35.00	26.00	600		
		700				15:57:00	16:05:00	1	30.00	27.00			
G1: 62		1000				16:05:00	16:10:00	2					
G2: 59		1000				16:10:00	16:15:00	3		29.00			
G3: 56													

Operador:

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO

INICIO	FIM	OBSERVAÇÕES -
-	15:55	Final TQ polímero.
-	16:15	(?) bombeamento G - Todos 1,00 metro



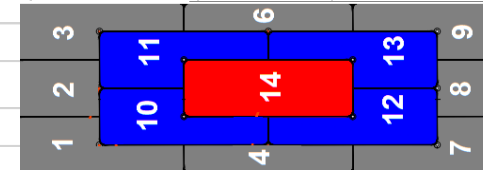
ALLONDA GEOSSINTÉTICOS AMBIENTAIS

DATA: 27/06/2017

Projeto Brio Gold

Mineração Fazenda Brasileiro - Pilha de Underflow

Disposição de rejeito de ouro por meio de Geotube



FICHA DE CONTROLE 3 - CONTROLE DO ENCHIMENTO DO GETOTUBE

Data	Pol	Bombeamento Geotube						Nº Geo	Altura Flange (cm)		Controle de processos				
		Bomba Pol. (rpm)	Bomba Rj. (Hz)	^[1] Vazão perc./ Ph	^[2] Vazão (L/s)	Hora Início	Hora Término		H _i (cm)	H _f (cm)	^[3] Teor sol. Batelada	Hora Coleta Cx. Veri.	Bomba Pol. (Hz)	Volume sólido (ml)	
27/06/2017	[C]														
NT (G?) (cm)	0.1	1200	45			15:41:00	15:50:00	1	43.00	24.00					1/4 tanque
120	0.1	1200	45			15:37:00	15:41:00	2	41.00	29.00					1/4 tanque
NT (G?) (cm)	0.1	1000	45			15:30:00	15:37:00	3	41.00	28.00					1/4 tanque
123	0.1		45	200 mL/s	2	16:00:00									1/4 tanque
NT (G3) (cm)	0.1														
124															

Operador:

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO

INICIO	FIM	OBSERVAÇÕES -



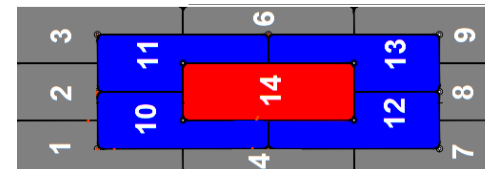
ALLONDA GEOSINTÉTICOS AMBIENTAIS

DATA:

Projeto Brio Gold

Mineração Fazenda Brasileiro - Pilha de Underflow

Disposição de rejeito de ouro por meio de Geotube



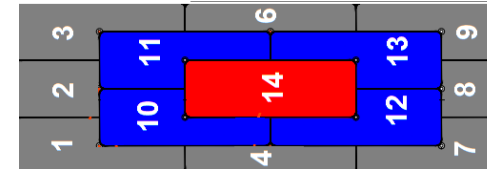
FICHA DE CONTROLE 3 - CONTROLE DO ENCHIMENTO DO GETOTUBE

Data	Pol	Bombeamento Geotube						N° Geo	Altura Flange (cm)		Controle de processos			
		Bomba Pl. (rpm)	Bomba Rj. (Hz)	^[1] Vazão perc./ Ph	^[2] Vazão (L/s)	Hora Início	Hora Término		H _i (cm)	H _f (cm)	^[3] Teor sol. Batelada	Hora Coleta Cx. Veri.	Bomba Pol. (Hz)	Volume sólido (ml)
15/07/2017	[C]	800	45			14:10	14:20	14	127.00	109.00				
	0,1	800	45			14:20	14:25	14	109.00	105.00				
NT (G) (cm)	0,2	800	45			15:00	15:10	14	110.00	95.00				
	0,3	800	45	700 ml/s		15:10	15:20	14	95.00	92.00				
NT (G) (cm)	0,4	800	45			15:20	15:30	14	92.00	93.00				
	0,5	800	45			15:30	15:45	14	93.00	78.50				
	0,6	800	45	800 ml/s		15:45	15:55	14	78.50	69.00				
	0,7	800	45				16:10	14	69.00	61.00				
	0,8	800	45				16:20	14	61.00	60.00				
	0,9	800	45				16:35	14	60.00	60.00				
	0,10	800	45				16:40	14	57.00					

Operador:

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO

INICIO	FIM	OBSERVAÇÕES -
14:25		Enchimento interrompido por instabilidade do tubo geotêxtil
15:40		Fim tanque polímero (800 L)
16:40		Fim 1 Tanque de rejeito - Fim tq polímero
		Momento em que o material começa e se espalhar pelo tubo



FICHA DE CONTROLE 3 - CONTROLE DO ENCHIMENTO DO GETOTUBE

Data	Pol	Bombeamento Geotube						N° Geo	Altura Flange (cm)		Controle de processos			
		Bomba Pl. (rpm)	Bomba Rj. (Hz)	^[1] Vazão perc./ Ph	^[2] Vazão (L/s)	Hora Início	Hora Término		H _i (cm)	H _f (cm)	^[3] Teor sol. Batelada	Hora Coleta Cx. Veri.	Bomba Pol. (Hz)	Volume sólido (ml)
17/07/2017	[C]	800	45			14:35	14:45	14	81.00	69.00				
	0,1	800	45			14:45	14:55	14	69.00	56.50				
NT (G) (cm)	0,1	800	45			14:55	15:10	14	56.50	42.00				
	0,1	800	45	800 ml/s		15:10	15:15	14	42.00	40.00				
NT (G) (cm)	0,1	800	45			15:50	16:10	14	48.00	39.00				
	0,1	800	45			16:30	16:38	14	40.00	36.00				
	0,1	800	45			16:50	17:00	14	36.00	30.00				

Operador:

DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO

INICIO	FIM	OBSERVAÇÕES -
15:15		Bombeamento parou porque a altura da flange atingiu 1,0m
		Foi bombeado 1/2 tq de rejeito e um tq de polímero