

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**QUANTIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS
EM GEOMEMBRANAS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES**

SONNY ALBERT AMORIM DA SILVA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-394/2023

BRASÍLIA / DF: JULHO / 2023

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**QUANTIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS
EM GEOMEMBRANAS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES**

SONNY ALBERT AMORIM DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**GREGÓRIO L. SILVA ARAÚJO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIRA, D.Sc. (UFMG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 26 DE JULHO DE 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, SONNY ALBERT AMORIM DA.

Quantificação de vazamentos através de danos em geomembranas sob diferentes condições. [Distrito Federal] 2023

xxii, 100 p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2023)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Geomembranas | 2. Geossintéticos em Obras Hidráulicas |
| 3. Danos em Geomembranas | 4. Barreiras hidráulicas |

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, S.A.A. (2023). **Quantificação de vazamentos Através de Danos em Geomembranas sob Diferentes Condições**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-394/2023, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Sonny Albert Amorim da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Quantificação de vazamentos através de danos em geomembranas sob diferentes condições**.

GRAU / ANO: Mestre / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Sonny Albert Amorim da Silva

AR 05 Conj. 08 Casa 09, Sobradinho II

73060-508 – Brasília/DF - Brasil

Correio Eletrônico: sonnyalbertamorim@gmail.com

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à
memória de minha mãe.

“Ninguém te impõe limites,
barreiras são criadas por você
mesmo, supere-as e supere-se.”

Marcos Antonio
Soares

AGRADECIMENTOS

À minha amada mãe, Rosângela Amorim, pelas conversas e incentivo desde a infância para lutar e nunca desistir dos objetivos e dos sonhos.

À minha querida tia-avó Maria das Graças, que sempre me apoiou em todas as decisões da vida.

À minha família, que me incentivou durante todo o mestrado.

À minha esposa, Fabiana, por estar presente em todos os momentos desafiadores pelos quais passei até a reta final da dissertação.

Ao meu orientador, Ennio Marques Palmeira, por dedicar seu tempo e compartilhar todo o conhecimento adquirido. Ele é realmente uma pessoa carismática. Seus conselhos muito contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

À minha querida amiga Camila Mura, pela amizade e apoio.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.

Aos meus amigos da UnB, em especial Ígor, Monique, Leandro, Gabriel e Matheus.

Ao pessoal do laboratório do programa, Rogério e Simon.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

RESUMO

O vazamento por danos mecânicos é uma preocupação crítica em sistemas geossintéticos, particularmente com o uso de geomembranas de PVC (policloreto de vinila) e PEAD (polietileno de alta densidade). Danos mecânicos podem ocorrer durante a instalação, operação ou como resultado de fatores externos, como perfurações, cortes ou abrasões. Esta dissertação teve como objetivo avaliar a infiltração de água por danos mecânicos em geomembranas lisas de PVC e PEAD com espessura de 1 mm. Cortes longitudinais de 5 mm, 20 mm e 50 mm foram feitos com lâmina de estilete e furos de 2,2 mm e 5 mm foram feitos com vazador de couro para simular danos nas geomembranas durante a instalação. Os testes de vazamento foram realizados com equipamentos desenvolvidos no Laboratório Geotécnico da Universidade de Brasília, aplicando pressões hidrostáticas de 20 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa, equivalentes a pressões de 2 m a 80 m de água coluna. O estudo tem aplicações em projetos de engenharia geotécnica, como barragens, canais e áreas de disposição de rejeitos, onde podem ocorrer vazamentos sob altas pressões. O objetivo foi entender os fatores que influenciam os vazamentos e desenvolver metodologias para mitigar riscos potenciais. Os resultados mostraram que a intensidade do vazamento depende de vários fatores, incluindo pressão hidrostática, temperatura da água e características geométricas do dano (tamanho e forma do dano mecânico), que afetam significativamente a taxa de vazamento. Danos maiores tendem a resultar em maior vazamento em comparação com os menores, e os danos por furos parecem ser mais críticos do que os cortes lineares. A presença de bordas vivas ou irregularidades na área danificada também pode influenciar no vazamento. Barreiras de geomembrana de PVC apresentaram menor vazamento em comparação com geomembranas de PEAD. Para mitigar o vazamento, observou-se que a aplicação de bentonita em pó sob a geomembrana e em contato direto com o dano ajudou a cicatrizar o vazamento (usando barreira hidráulica GM/GCL-D-F5). Portanto, entender o comportamento das geomembranas de PVC e PEAD quando submetidas a danos mecânicos é crucial para o projeto e desempenho de sistemas geossintéticos de revestimento. Estudos contínuos para minimizar as taxas de vazamento por meio de práticas de instalação apropriadas, seleção de materiais e reparos oportunos são importantes para garantir a eficácia e confiabilidade a longo prazo dessas geomembranas em várias aplicações geotécnicas.

ABSTRACT

Leakage through mechanical damages is a critical concern in geosynthetic systems, particularly with the use of PVC (polyvinyl chloride) and HDPE (high-density polyethylene) geomembranes. Mechanical damages can occur during installation, operation, or as a result of external factors causing punctures, cuts, or abrasions. This study aimed to evaluate water leakage through mechanical damages in smooth PVC and HDPE geomembranes with a thickness of 1 mm. Longitudinal cuts of 5 mm, 20 mm, and 50 mm were made using a blade, and holes of 2.2 mm and 5 mm were created to simulate damages in the geomembranes during installation and soil cover placement. Leakage tests were conducted using equipment developed at the Geotechnical Laboratory of the University of Brasília, applying hydrostatic pressures of 20 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, and 800 kPa, equivalent to water heads ranging from 2 m to 80 m of water. The study has applications in geotechnical engineering projects such as dams, channels, and waste disposal areas, where leakage may occur under high pressures. The objective was to understand the factors that influence leakage rates and to develop methodologies to mitigate potential risks. The results showed that leakage intensity depends on various factors, including hydrostatic pressure, water temperature, and geometric characteristics of the damage (size and shape of the mechanical damage), which significantly affect the leakage rate. Larger damages tend to result in higher leakage compared to smaller ones, and hole damages appear to be more critical than linear cuts. The presence of sharp edges or irregularities in the damaged area can also influence leakage. PVC geomembrane barriers showed lower leakage compared with HDPE geomembranes. To mitigate leakage, it was observed that applying powdered bentonite under the geomembrane and in direct contact with the damage helped seal the leakage (using hydraulic barrier GM/GCL-D-F5). Therefore, understanding the behavior of PVC and HDPE geomembranes when subjected to mechanical damages is crucial for the design and performance of geosynthetic liner systems. Continued studies to minimize leakage rates through appropriate installation practices, material selection, and timely repairs are important to ensure the long-term effectiveness and reliability of geomembranes in various geotechnical applications.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
SUMÁRIO.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURAS E ABREVIACÕES.....	xviii
<u>1 INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.2.1 Objetivo geral.....	1
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
<u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>3</u>
2.1 SUSTENTABILIDADE.....	3
2.2 GEOSSINTÉTICOS.....	4
2.2.1 Geomembranas.....	4
2.2.2 Geotêxteis.....	7
2.2.3 Geocompostos argilosos.....	11
2.3 GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS HIDRÁULICAS E DE PROTEÇÃO AMBIENTAL....	14
2.3.1 A utilização de geomembranas em barragens.....	17
2.3.2 A utilização de geomembranas em aterros sanitários.....	27
2.4 DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS.....	30
2.5 RUGAS EM GEOMEMBRANAS.....	32
2.6 ESTIMATIVA DAS TAXAS DE VAZAMENTO DE LÍQUIDO DEVIDO A DANOS EM GEOMEMBRANA.....	33
2.7 A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO VAZAMENTO ATRAVÉS DO DANO MECÂNICO EM GEOMEMBRANAS.....	43

3	<u>MATERIAIS E METODOLOGIA</u>	46
3.1	MATERIAIS ESTUDADOS	46
3.1.1	Geomembranas - GM	46
3.1.2	Tipos de danos mecânicos provocados nas geomembranas	46
3.1.3	Geotêxteis - GT	51
3.1.4	Geocomposto bentonítico – GCL	53
3.2	EQUIPAMENTOS	56
3.2.1	Sistema de ensaio	56
3.2.1.1	Sistema de ar-água	58
3.2.1.2	Célula de ensaio	59
3.2.1.3	Outros equipamentos	60
3.2.2	Instrumentação	61
3.2.2.1	Calibração da célula de carga	61
3.2.2.2	Calibração dos transdutores de pressão	62
3.2.2.3	Calibração dos termômetros	63
3.3	PROGRAMA DE ENSAIOS	64
3.3.1	Preparação das amostras	68
3.3.1.1	Geomembrana – GM	68
3.3.1.2	Ensaio sem aplicação de silicone na borda do GCL	70
3.3.1.3	Geocomposto bentonítico – GCL	71
3.3.2	Montagem do ensaio	72
3.3.3	Vazamento em geomembranas	73
3.3.4	Medição da vazão	74
3.3.5	Correção da temperatura	74
3.3.6	Influência da temperatura (teste na GM sem dano)	75
3.3.7	Influência da temperatura no ensaio com dano mecânico na geomembrana	76
4	<u>RESULTADOS E ANÁLISES</u>	78
4.1	VAZAMENTO ATRAVÉS DE DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS DE PVC	79
4.2	VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS DE PEAD	80
4.3	VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS EM GEOMEMBRANAS DE PVC SOBRE OUTROS MATERIAIS	81

4.4	VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS EM GEOMEMBRANAS DE PEAD SOBRE OUTROS MATERIAIS.....	86
4.5	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO FLUXO DE ÁGUA ATRAVÉS DO DANO EM GEOMEMBRANA DE PVC E PEAD	92
<u>5</u>	<u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</u>	<u>95</u>
5.1	CONCLUSÕES	95
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
<u>6</u>	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>98</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - O uso de geossintéticos na redução dos impactos ambientais.....	3
Figura 2.2 - Geomembranas: a) lisa; b) texturizada (Palmeira, 2018).	5
Figura 2.3 - Geotêxteis: a) tecido; b) não tecido (Palmeira, 2018).	7
Figura 2.4 - Imagens microscópicas dos geotêxteis: a) estrutura do tecido; b) estrutura não tecido (Ingold, 1994).	8
Figura 2.5 – Seleção do geotêxtil não tecido para a proteção da GM PEAD (Werner et al. 1990 apud Palmeira, 2018).	10
Figura 2.6 - Processo de fabricação do geocomposto argiloso (Shukla, 2016).	11
Figura 2.7 - Exemplos de GCLs disponíveis no mercado (Mendes, 2010).	12
Figura 2.8 - Comparação entre emissões de CO ₂ para um GCL (à esquerda) e uma CCL (à direita) (Von Maubeuge et al., 2021).	13
Figura 2.9 - Aplicações de geomembrana em obras: a) barragens (Palmeira, 2018); b) aterros sanitários (Bosco, 2008 apud Maccaferri 2021); c) canais lineares (Shukla, 2016); d) túneis (Shukla, 2016).	17
Figura 2.10 - Seções típicas de barragens (Assis et al., 2014).	18
Figura 2.11 - Tipos de arranjos para utilização de geomembrana em barragens (ICOLD, 2010 apud Cardona, 2013).	21
Figura 2.12 - Utilização de geomembrana na face a montante na Barragem de Nérís, na França (ICOLD, 1991 apud Colmanetti, 2006).	22
Figura 2.13 - Utilização de geomembrana no núcleo central na Barragem de Odiel, na Espanha (ICOLD, 1991 apud Colmanetti, 2006).	22
Figura 2.14 - Seções possíveis de instalação da geomembrana no núcleo central de barragens de terra ou enrocamento: a) geomembrana inclinada a montante; b) geomembrana na posição vertical; c) geomembrana em zig-zag; d) geomembrana em zig-zag; e) geomembrana dupla na posição vertical (ICOLD, 2010).	23
Figura 2.15 - Sistema de barreira hidráulica na face de montante de uma barragem de terra ou enrocamento (ICOLD, 2010).	24
Figura 2.16 - Instalação de painéis de geomembranas na face a montante em barragem de concreto (ICOLD, 2010).	25
Figura 2.17 - Reabilitação a seco de barragem no Brasil em 2011 (Carpi, 2023).	26

Figura 2.18 - Reabilitação a seco de barragem nos Estados Unidos da América em 2016 (Carpi, 2023).....	26
Figura 2.19 – Reparo subaquático e reabilitação da barragem: a) antes do reparo (Carpi, 2011); b) após o reparo (Carpi, 2011; c) no momento do reparo subaquático (Carpi, 2023).....	27
Figura 2.20 - Tipos de geometria para aterros sanitários: a) preenchimento de área; b) preenchimento de trincheira; c) preenchimento de vales; d) preenchimento de vales acima e abaixo do terreno natural (Shukla, 2016).	28
Figura 2.21 - Esquema de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos (Shukla, 2016)....	29
Figura 2.22 - Ensaio de vazamento: a) seção transversal do equipamento utilizado para aplicar a pressão na amostra; b) amostra de geomembrana de PEAD após o ensaio (Rowe, 2013). ..	30
Figura 2.23 - Fluxo através de uma barreira devido a um defeito na geomembrana (Giroud, 1997).....	31
Figura 2.24 - Seção transversal de barreira hidráulica com ruga e dano mecânico (Rowe, 2018).	35
Figura 2.25 - Vazamento através de furos em GMs com superfície plana (Nosko & Touze-Foltz, 2000).....	37
Figura 2.26 - Vazamento através de furos em GMs com superfície plana (Nosko & Touze-Foltz, 2000).....	37
Figura 2.27 - Vazamento através de furos em GMs com presença de rugas (Nosko & Touze-Foltz, 2000).	38
Figura 2.28 - GM instalada em contato direto com CCL: a) nublado no início da manhã de novembro, quando a temperatura ambiente foi de 3°C; b) rugas interconectadas, a meio dia de novembro, quando a temperatura ambiente chegou a 17°C (Rowe & Hosney, 2010).	39
Figura 2.29 - CCL sob a GM: a) CCL apresenta fissuras de dessecação; b) superfície classificada como má qualidade para contato (Rowe & Hosney, 2010).....	39
Figura 2.30 - Transmissividade da interface versus condutividade hidráulica do material de base (Mendes, 2010).....	40
Figura 2.31 - Poropressão para a barreira composta por GM/CCL, com coeficiente de permeabilidade (k_s) de 10^{-9} m/s e carga hidráulica (hw) de 10 m (Camargos, 2022).	42
Figura 2.32 – Comparação de vazamento através de danos em GMs com área de 2000 mm ² com rejeitos homogêneos (Rowe & Fan, 2021).....	43
Figura 2.33 - Impacto do vazamento através do furo na emenda da GM/GCL para condições de contato mau e bom (Rowe & Hosney, 2010).	44

Figura 2.34 - Impacto do vazamento através do furo na emenda da GM/CCL para condições de contato mau e bom (Rowe & Hosney, 2010).	45
Figura 3.1 - Espécime de GM PVC com corte de 5 mm: a) face superior da geomembrana; b) face inferior da geomembrana.	47
Figura 3.2 - Espécime de GM PVC com corte de 20 mm: a) face superior do lado esquerdo; b) face superior do lado direito.	47
Figura 3.3 - Espécime de GM PVC com corte de 50 mm: a) face superior e lado esquerdo; b) face superior e lado direito.	48
Figura 3.4 - Espécime de GM PVC com furo de 2,2 mm: a) face superior; b) face inferior. ...	48
Figura 3.5 – Espécime de GM PVC com furo de 5 mm: a) face superior; b) face inferior.	49
Figura 3.6 - Espécime de geomembrana de PEAD com corte de 5 mm: a) face superior do espécime; b) face inferior do espécime, onde pode-se observar um defeito localizado na borda direita, o que pode intensificar o fluxo de água.	49
Figura 3.7 - Espécime de GM PEAD com corte de 20 mm: a) face superior do lado esquerdo; b) face superior do lado direito.	50
Figura 3.8 - Espécime de GM PEAD com corte de 50 mm: a) face superior do lado esquerdo; b) face superior do lado direito.	50
Figura 3.9 - Espécime de geomembrana PEAD com furo de 2,2 mm, onde o extravasor causou uma depressão na borda do dano que pode intensificar o vazamento pelo furo: a) face superior, b) face inferior.	51
Figura 3.10 - Espécime de geomembrana de PEAD com furo de 5 mm apresentando leve depressão na borda do furo: a) face superior da GM; b) face inferior da GM.	51
Figura 3.11 - Geotêxteis: a) geotêxtil de 200 g/m ² ; b) geotêxtil de 900 g/m ²	52
Figura 3.12 - Imagens de espécimes de geotêxteis não tecidos utilizando uma lupa com lente de aumento: a) amostra de GT200 g/m ² ; b) amostra de GT900 g/m ²	53
Figura 3.13 - GCLs: a) Superfície superior de GCL-A com geotêxtil não tecido, b) Superfície inferior de GCL-A com geotêxtil tecido, c) Superfície superior de GCL-B com geotêxtil não tecido e d) Superfície inferior de GCL-B com uso de geotêxtil tecido.	54
Figura 3.14 - Geocomposto GCL-A: a) face superior do geocomposto; b) face inferior do geocomposto.	54
Figura 3.15- Geocomposto GCL-B: a) face superior do geocomposto; b) face inferior do geocomposto.	55
Figura 3.16 - Amostra de bentonitas: a) bentonita sódica em pó (GCL-A); b) bentonita sódica granulada (GCL-B).	55

Figura 3.17 - Área dos equipamentos: a) vista geral; b) croqui do local.	57
Figura 3.18 - Sistema de ensaio: a) seção de corte A-A; b) seção de corte B-B.....	57
Figura 3.19 - Equipamento utilizado na pesquisa: a) Detalhe isométrico; b) aponte a câmera para o QR Code e visualize o equipamento em 3D.....	58
Figura 3.20 - Sistema célula de ensaio: a) vista C; b) detalhe E no interior da célula.	60
Figura 3.21 - Calibração da célula de carga no Laboratório de Engenharia Mecânica da UnB.	61
Figura 3.22 - Gráfico de calibração da célula de carga.	62
Figura 3.23 - Equipamento padrão de controle de pressão e volume GDS para calibração dos transdutores de pressão.....	62
Figura 3.24 - Gráfico de calibração do transdutor inferior.	63
Figura 3.25 - Gráfico de calibração do transdutor superior.	63
Figura 3.26 - Equipamento de banho termostático utilizado para a calibração dos termômetros. O equipamento é composto por: 1) multímetro digital, 2) controlador de temperatura, 3) banho termostático, 4) termômetros digitais e 5) termômetros manuais.	64
Figura 3.27 - Fluxograma geral dos ensaios de vazamentos através do dano em geomembrana.	67
Figura 3.28 - Espécime de geomembrana de PVC: a) corte linear de 50 mm (mensuração do tamanho do dano com paquímetro; b) realização do corte com estilete.	69
Figura 3.29 - Espécime de geomembrana PVC: a) realização do furo na geomembrana utilizando um vazador de aço no centro da amostra; b) amostra de geomembrana após o furo.	69
Figura 3.30 – Vazadores utilizados para provocar danos por furos em geomembranas: a) vazador com furo de \varnothing 2,2 mm; b) vazado com furo de \varnothing 5 mm.	70
Figura 3.31 - Ensaio de vazamento através de dano mecânico em geomembrana: a) ensaio de vazamento através de furo de 5 mm em geomembrana de PEAD; b) ensaio de vazamento através de corte de 50 mm em geomembrana de PEAD; c) amostra de GCL após o ensaio; d) coleta de água após o ensaio.	71
Figura 3.32 - Preparação dos corpos de prova de GCLs: a) corte da amostra em forma de disco com diâmetro de 16 cm; b) aplicação de silicone no contorno da amostra; c) aguardo da cura do silicone por pelo menos 12 horas.	72
Figura 3.33 - Amostras instaladas no equipamento: a) geocomposto (GCL-C); b) geocomposto (GCL-D); c) geocomposto (GCL-E).	72

Figura 3.34 - Processo de montagem: a) instalação do prato e cilindro vazado; b) cilindro inferior completo com água; c) instalação da GM; d) instalação do anel, cilindro superior e sensor de pressão; e) fechamento do sistema; f) sistema pronto para ensaio.....	73
Figura 3.35 - Ensaio de leituras de temperaturas do equipamento (GM de PVC).....	76
Figura 3.36 - Leituras de temperaturas do equipamento (GM PEAD).	76
Figura 4.1 - Vazamentos totais de referência através de danos mecânicos em GMs de PVC.	80
Figura 4.2 - Vazamentos totais de referência através de danos em GMs de PEAD.	81
Figura 4.3 - Resultados de vazamento através de danos em GM PVC (corte de 50mm).	83
Figura 4.4 - Resultados dos ensaios de vazamento através de danos em GM de PVC (furo de 2,2 mm).	84
Figura 4.5 - Resultados dos ensaios de vazamentos através de danos em GM de PVC (furo de 5 mm).	84
Figura 4.6 - Ensaio de vazamento através da barreira PVC/GCL-D: a) instalação do GCL-D; b) expansão da bentonita em pó sob a GM de PVC; c) hidratação e expansão da bentonita; d) face inferior da geomembrana após o ensaio.....	85
Figura 4.7 - Resultados dos ensaios de vazamentos através de danos em GM de PEAD (corte de 50 mm).....	87
Figura 4.8 - Teste de vazamento através de corte de 50 mm na barreira PEAD/GCL-A: a) instalação da GM de PEAD sobre o GCL-A; b) amostra GCL-A após a execução dos testes; c) amostra GCL-A indicando o local de ruptura do silicone; d) coleta de água com carreamento de bentonita - a amostra rompeu a uma pressão de 200 kPa.....	87
Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de vazamentos através de danos em GM de PEAD (furo de 2,2 mm).	88
Figura 4.10 - Teste de vazamento através de furo de 2,2 mm na barreira PEAD/GCL-A: a) instalação do PEAD GM sobre o GCL-A; b) amostra GCL-A após a conclusão dos testes; c) coleta de água limpa após aplicação de uma pressão de 400 kPa; d) coleta de água com carreamento de bentonita sob pressão de 800 kPa.	89
Figura 4.11 - Resultados dos ensaios de vazamentos através de danos em GM de PEAD (furo de 5 mm).....	90
Figura 4.12 - Ensaio de vazamento através do furo de 5 mm em barreira de PEAD/GCL-A: a) instalação da GM de PEAD sobre o GCL-A; b) amostra de GCL-A após a realização dos ensaios.	90
Figura 4.13 - Ensaio de vazamento através do furo de 5 mm em barreira de PEAD/GCL-B: a) amostra de GCL-B após o ensaio; b) coleta de água com bentonita após o ensaio.	91

Figura 4.14 - Ensaio de vazamento através do furo de 5 mm em barreira de PEAD/GCL-D: a) instalação do GCL-D sobre o prato metálico; b) PEAD/GCL-D após o ensaio; c) amostra de GCL-D após o ensaio; d) face inferior da geomembrana de PEAD após o ensaio.....	92
Figura 4.15 - Resultados de vazamentos através de danos mecânicos por corte em geomembranas de PVC e PEAD.....	93
Figura 4.16 - Influência da temperatura na vazão dos ensaios com dano em geomembrana de PVC e PEAD.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Algumas propriedades e características das geomembranas (Palmeira, 2018).....	5
Tabela 2.2 - Os principais polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos (Mano, 1991).	5
Tabela 2.3 - Vantagens e desvantagens das geomembranas de PVC e de PEAD (Scheirs, 2009).	7
Tabela 2.4 - Propriedades dos geotêxteis tecidos e não tecidos (Venters, 2021).....	9
Tabela 2.5 – Propriedades hidráulicas (Mendes, 2010).	14
Tabela 2.6 - Principais áreas de aplicação para geossintéticos em obras hidráulicas (Modificado Shukla, 2012 apud Cardona, 2013).	15
Tabela 2.7 - Algumas das primeiras barragens que aplicaram geomembrana (Cardona, 2013; Palmeira, 2018).	16
Tabela 2.8 - Instalação de geomembranas mais antigas por tipo material (ICOLD, 2010).	19
Tabela 2.9 - Sistema de barreira hidráulica na face de montante de uma barragem de terra ou enrocamento (ICOLD, 2010).	24
Tabela 2.10 - Equações empíricas de previsão da transmissividade de interface (Mendes, 2010).	36
Tabela 2.11 - Vazamentos calculados assumindo GM com ruga e dano mecânico (Rowe, 2018).	40
Tabela 3.1 - Especificações das geomembranas de PVC e de PEAD lisa, com 1 mm de espessura.....	46
Tabela 3.2 - As principais características dos GTs (Dados do fabricante).	52
Tabela 3.3 – Características principais dos geocompostos estudados (GCL-A e GCL-B).....	56
Tabela 3.4- Programa de ensaios iniciais de vazamentos em geomembranas.	65
Tabela 3.5 - Ensaios complementares de vazamentos.	66
Tabela 4.1 - Resultados obtidos nos ensaios realizados na pesquisa.	78

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURAS E ABREVIACÕES.

h	Altura de coluna d'água
ASTM	American Society for Testing and Materials
LX	Amostra de geocomposto
C1	Anti-perfuração
S3	Anti-perfuração
a	Área
BEFI	Barragem de enrocamento com face impermeável
G	Barreira hidráulica
n	Camada de atenuação
XCCL	Camada de solo compactada ressecada
ha	Carga do aquífero
hw	Carga hidráulica sob a camada de base
cm/s	Centímetro por segundo
m/m/°C	Coefficiente de dilatação térmica
Cqo	Coefficiente de qualidade de contato de interface
k	Coefficiente de permeabilidade
CB	Coefficiente relacionado a forma das arestas do dano
L	Comprimento perpendicular à secção transversal
kla	Condutividade hidráulica lateral de interface
klb	Condutividade hidráulica do material de base diretamente abaixo da ruga
ks	Condutividade hidráulica de duas ou mais camadas de base
k_n	Condutividade hidráulica da camada de atenuação
k_{CCL}	Condutividade hidráulica da camada de solo compactado
k_{GCL}	Condutividade hidráulica do geocomposto bentonítico
D	Corpo da barragem
C5	Corte de 5 mm
C20	Corte de 20 mm
C50	Corte de 50 mm
CR	Cristalinidade
d	Densidade
CO ₂	Dioxido de carbono
Ø	Diâmetro
S1	Drenagem
S2	Drenagem
ε	Elongação sob tração
D	Espessura
HL	Espessura total da barreira de base
H _n	Espessura da camada de atenuação
HL _{CCL}	Espessura da camada de solo compactado
HL _{GCL}	Espessura do geocomposto bentonítico
EPDM	Etileno-Propileno Monômero Diênico
B1	Filtração

F2,2	Furo de 2,2 mm
F5	Furo de 5 mm
CQA	Garantia de Qualidade da Construção
g/cm ³	Gramas por centímetros cúbicos
g/m ²	Gramas por metro quadrado
°C	Graus celsius
GCE	Geocélula
GCO	Geocomposto
GCL	Geocomposto bentonítico
GGR	Geogrelha
GMA	Geomanta
GM	Geomembrana
GNT	Georrede
GTX	Geotêxtil
GTN	Geotêxtil não tecido
GT200	Geotêxtil não tecido
GT900	Geotêxtil não tecido
GTW	Geotêxtil tricotado
qh	Fluxo lateral de interface
QW	Fluxo lateral de interface
Qd	Fluxo vertical
kPa	Kilo Pascal
kN/m	Kilo Newton por metro
kN/m ²	Kilo Newton por metro quadrado
kN/m ³	Kilo Newton por metro cúbico
Kg/m ²	Kilo grama por metro quadrado
Kg/m ³	Kilo grama por metro cúbico
<i>lf</i>	Limite de vazamento
<i>b</i>	Largura da ruga
ml	Mililitro
ml/s	Mililitro por segundo
mm	Milímetro
mm ²	Milímetro quadrado
MPa	Mega Pascal
m ²	Metro quadrado
m ² /s	Metro quadrado por segundo
m/ha	Metro por hectare
m/s	Metro por segundo
N	Newton
hd	Perda de carga
γ_a	Peso específico da água
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
LLDPE	Polietileno Linear de Baixa Densidade
EPS	Poliestireno expandido

PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila
PVC-P	Policloreto de vinila com plastificante
PET	Poliéster
OS	Poliestireno
PA	Poliamida
PVA	Polivinil álcool
CSPE	Poliétileno Cloro-Sulfonado
CPE	Poliétileno Clorado
PPTA	Poliaramida
%	Porcentagem
C3	Proteção mecânica
u_a	Pressão de ar comprimido
u_i	Pressão inicial da água
u_r	Pressão real de ensaio
r_0	Raio
nv	Relação entre o volume de efluente por volume de vazios
CCL	Solo argiloso compactado
ϵ'	Taxa de deformação
w (%)	Teor de umidade
tl	Tempo da leitura
T	Temperatura
T_T	Temperatura de ensaio
$T_{20^\circ C}$	Temperatura de 20°C
C2	Transição
θ	Transmissividade
QDL	Vazão através do revestimento de base na ausência da GM
$Q_{20^\circ C}$	Vazão na temperatura de 20°C
Q_e	Vazão na temperatura de ensaio
Q_t	Vazão total
QB	Vazão através do dano
η	Viscosidade
η_T	Viscosidade do líquido na temperatura de ensaio
$\eta_{20^\circ C}$	Viscosidade do líquido na temperatura de 20°C
vw	Volume de água
V	Volts
W	Watts

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Desde a antiguidade, a humanidade tem consumido recursos naturais para construir ou reforçar obras geotécnicas. No entanto, a extração e o uso desses materiais, em sua maioria, não são sustentáveis. Na década de 1950, foram introduzidos materiais sintéticos, como os geossintéticos tecidos, na indústria petroquímica, com os holandeses e americanos sendo os primeiros a utilizar essa técnica (Palmeira, 2018). Desde então, o uso de geossintéticos, que são produtos poliméricos, tem sido necessário como alternativa para minimizar os impactos ambientais.

Existem inúmeras variedades de geossintéticos que devem ser utilizados de acordo com sua função na obra. Uma dessas variedades é a geomembrana, que começou a ser utilizada na década de 1950 como uma barreira geossintética de baixa permeabilidade (NBR ISO 10318-1, 2021; ASTM D 4439, 2022). No entanto, devido aos processos construtivos, a geomembrana fica suscetível a danos mecânicos. Por isso, o uso de uma camada de proteção de argila compactada (CCL) ou Geocomposto Bentonítico (GCL) subjacente a ela tem sido empregado devido às vantagens que oferecem, como baixa permeabilidade, proteção contra rasgos e perfurações (Koerner, 2005). Com o tempo, os fabricantes aprimoraram as técnicas de produção para aumentar a resistência à tração, rigidez à tração, reduzir a permeabilidade, aumentar a resistência a danos mecânicos e aumentar a durabilidade da geomembrana.

O uso de geossintéticos reduziu o tempo de execução das obras e melhorou os métodos executivos. Além disso, os geossintéticos proporcionam soluções de engenharia sustentáveis, causando menores impactos ambientais (Palmeira, 2018). Obras geotécnicas, como barragens, canais, lagoas de contenção, áreas de disposição de resíduos e túneis, são exemplos de construções onde os geossintéticos podem ser empregados de maneira sustentável.

No caso de geomembranas, é importante salientar que é necessário ter muito cuidado durante a instalação e cobertura, pois elas são suscetíveis a danos mecânicos que, se ocorrerem, podem comprometer os requisitos de projeto e os fatores de segurança (Rowe & Hosney, 2010).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do estudo é analisar o fluxo de água através de danos mecânicos (como corte ou furo) em geomembranas de PVC e PEAD sob diferentes pressões hidrostáticas. Para isso, será

utilizado um equipamento desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a taxa de vazamento através de danos por furos (de 2,2 mm e 5 mm) e cortes lineares (de 5 mm, 20 mm e 50 mm) em geomembranas;
- Analisar a influência do tipo de dano em pressões hidrostáticas crescentes de 20 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa aplicadas na geomembrana;
- Verificar a influência da utilização de geossintéticos subjacente à geomembrana (por meio de geocomposto, geotêxtil de 200 g/m² ou de 900 g/m²);
- Avaliar a taxa de vazamento variando a temperatura da água (entre a temperatura ambiente e 46 °C).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em seis capítulos e um apêndice.

O Capítulo 1 apresenta o tema da pesquisa, a motivação, os objetivos gerais e específicos e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos e contribuições anteriores relacionadas ao tema de estudo. Os principais tópicos abordados incluem geossintéticos e suas aplicações em obras geotécnicas, bem como o comportamento do fluxo de água por danos mecânicos em uma barreira ativa sob diferentes níveis de pressões sobrejacentes.

O Capítulo 3 discute os equipamentos e materiais usados para a pesquisa, bem como a preparação da amostra, configuração do equipamento e os desafios encontrados durante o processo de pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, juntamente com análises relevantes, comparações e discussões sobre a pesquisa.

O Capítulo 5 resume as conclusões retiradas da dissertação e apresenta sugestões para investigação futura.

O Capítulo 6 contém as referências citadas na pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SUSTENTABILIDADE

A construção civil é fundamental para o desenvolvimento da sociedade, sendo um setor importante para a economia e para a melhoria da qualidade de vida das pessoas. No entanto, é necessário que as atividades de construção sejam feitas de forma responsável e sustentável, considerando os limites do Planeta Terra quanto à exploração de recursos naturais. A utilização de geossintéticos é crucial nesse aspecto, pois oferece soluções eficientes e duradouras para diversas aplicações na engenharia, como controle de erosão, estabilização e reforço de solos, drenagem, construção de barragens, aterros sanitários, canais e túneis. Tendo isso em vista, os geossintéticos estão se tornando cada vez mais populares no Brasil e no mundo, pois reduzem significativamente o consumo de agregados naturais, são resistentes às condições climáticas e fáceis de instalar. Estas características fazem com que os geossintéticos se tornem escolha ideal para o setor da construção civil.

De acordo com Kraus (2022), o uso de geossintéticos é fundamental para o crescimento da sociedade, ao mesmo tempo em que minimiza os impactos ambientais e contribui para a restauração do equilíbrio natural do planeta (Figura 2.1).

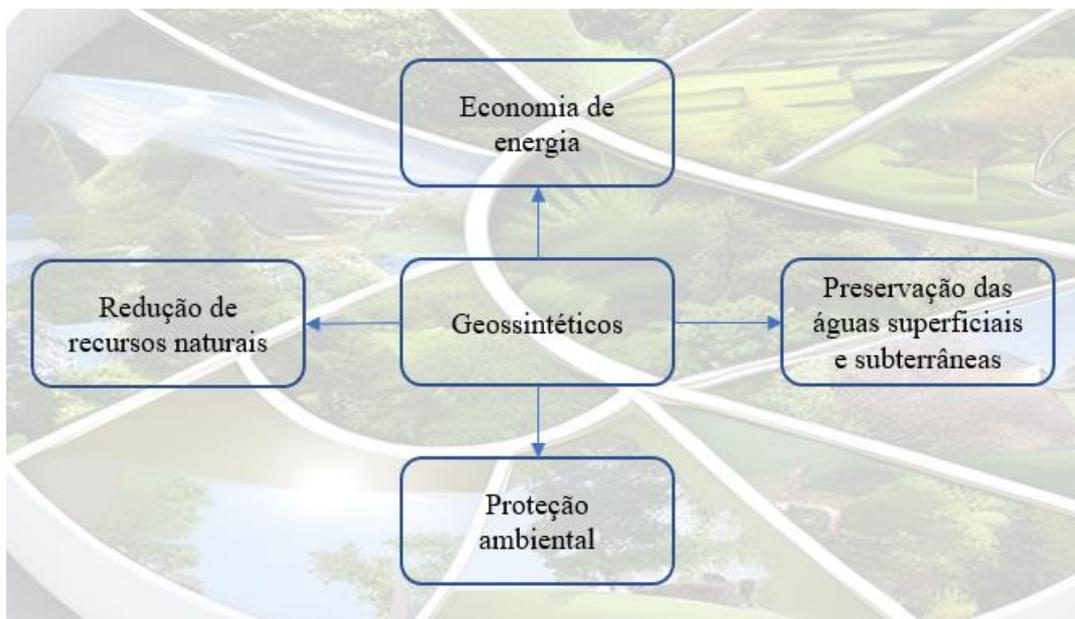


Figura 2.1 - O uso de geossintéticos na redução dos impactos ambientais.

2.2 GEOSSINTÉTICOS

Geossintéticos são materiais sintéticos utilizados em obras de engenharia civil com diversas finalidades. Eles são fabricados a partir de uma variedade de polímeros, sendo os principais incluindo polietileno (PE), polipropileno (PP), poliéster (PET), policloreto de vinila (PVC) e outros materiais sintéticos.

As principais funções dos geossintéticos são disciplinar ou barrar o fluxo de líquidos e gases, proteger, estabilizar e reforçar solos. Eles são amplamente utilizados em projetos de construção, como a construção de barragens, muros de contenção e revestimentos de aterros sanitários, por exemplo (NBR ISO 10318-1).

Os tipos de geossintéticos incluem geotêxtil (GTX), geomembrana (GM), geogrelha (GGR), georrede (GNT), geomanta (GMA), geocélula (GCE), geocomposto (GCO), entre outros. Alguns termos relativos às funções (NBR ISO 10318-1, 2021) são:

Reforço: o material tem a função de melhorar a resistência mecânica e reduzir a deformabilidade do solo ou rocha, por exemplo;

Drenagem: coletar e direcionar os líquidos ou gases para locais adequados;

Filtração: atua como filtros em obras geotécnicas e de proteção ambiental;

Barreira: prevenir ou limita a migração de líquidos;

Proteção: prevenir ou limita os danos na camada estruturada.

2.2.1 Geomembranas

Os geossintéticos usados como barreiras são produtos poliméricos manufaturados ou naturais, feitos de materiais sintéticos ou betuminosos, que podem ter várias funções em obras geotécnicas de proteção ambiental ou remediação. As geomembranas (GMs) mais comuns são as de PVC (Policloreto de Vinila) ou PEAD (Polietileno de Alta Densidade), e dependendo do projeto, podem ser colocadas em contato direto com o solo argiloso compactado (CCL) ou sobre um geocomposto bentonítico (GCL) (NBR ISO 10318-1, 2021).

A geomembrana é um elemento laminar com baixíssima permeabilidade (aproximadamente 10^{-13} m/s ou menos), que age como barreira para minimizar a percolação de líquidos na estrutura utilizada, com espessura de 0,25 a 7,5 mm (Shukla, 2016). As GMs podem ser fabricadas lisas ou rugosas (texturizadas) e com cores diferentes, sendo fornecidas em rolos ou painéis (Figura 2.2).

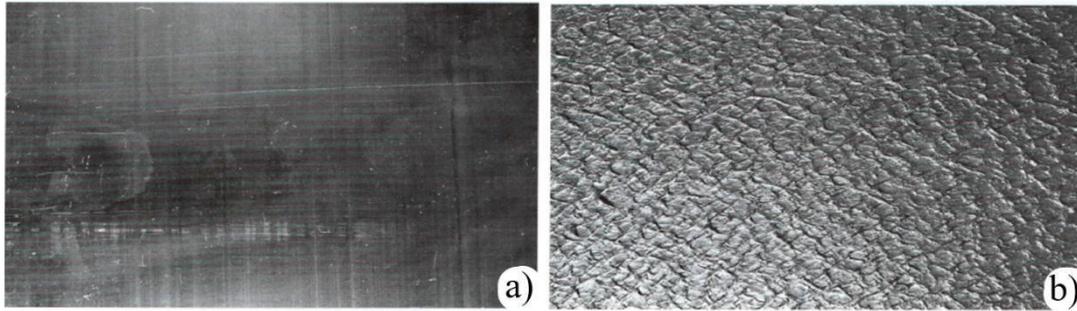


Figura 2.2 - Geomembranas: a) lisa; b) texturizada (Palmeira, 2018).

A Tabela 2.1 mostra algumas propriedades e características de dois tipos de geomembranas, sendo possível observar as variações nas propriedades de acordo com o tipo de GM (PVC ou PEAD) (Palmeira, 2018).

Tabela 2.1 - Algumas propriedades e características das geomembranas (Palmeira, 2018).

Polímero	Densidade (d)	Cristalinidade (CR) (%)	Massa específica (kg/m ³)	Coefficiente de dilatação térmica (m/m/°C)	Resistência à tração (MPa)
PEAD	0,94 a 0,97	até 95	920	130 a 220	10 a 30
PVC	1,2 a 1,4	5 a 15	1400	70	20 a 40

De acordo com Mano (1991), a Tabela 2.2 apresenta os principais polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos e suas respectivas aplicações. É possível observar a relação entre o tipo de polímero e o tipo de aplicação.

Tabela 2.2 - Os principais polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos (Mano, 1991).

Polímero	Sigla	Aplicações
Polietileno	PE	Geotêxteis, barreiras geossintéticas, geogrelhas, tubos drenos geossintéticos, georredes e geocompostos
Poliestireno expandido	EPS	Geoexpandidos
Polipropileno	PP	Geotêxteis, barreiras geossintéticas, geogrelhas e geocompostos
Policloreto de Vinila	PVC	Barreiras geossintéticas, tubos drenos geossintéticos e geocompostos
Poliéster	PET	Geotêxteis e geogrelhas
Poliestireno	OS	Geocompostos e geoexpandidos

Poliamida	PA	Geotêxteis, geogrelhas e geocompostos
Etileno-propileno Monômero diênico	EPDM	Barreiras geossintéticas e geocompostos
Polivinil álcool	PVA	Geotêxteis, geogrelhas e geocompostos
Polietileno clorado	CPE	Barreiras geossintéticas e geocompostos
Poliaramida	PPTA	Geotêxteis, geogrelhas e geocompostos

Scheirs (2009) destaca algumas características e aspectos a serem considerados no momento da escolha das geomembranas termoplásticas, como:

- Escolha do polímero;
- Tipo de reforço;
- Cor da GM para manter temperaturas mais baixas no momento de aplicações expostas ao sol;
- Espessura da GM;
- Textura (caso precise melhorar o ângulo de atrito de interface);
- Tempo de vida útil do material;
- Propriedades mecânicas;
- Resistência à ação química;
- Facilidade de instalação.

A seleção adequada da resina polimérica de base é de extrema importância, visto que influencia na qualidade de fabricação do produto, ou seja, na estrutura química de base da resina, no peso molecular e sua distribuição, e na morfologia do polímero (Scheirs, 2009). Além disso, é importante destacar a necessidade da inclusão de aditivos e estabilizantes antioxidantes durante o processo de fabricação, a fim de promover maior vida útil ao produto e garantir maior estabilidade à exposição ao sol durante sua instalação (Scheirs, 2009).

A Tabela 2.3 apresenta algumas vantagens e desvantagens das geomembranas de PVC e de PEAD (Scheirs, 2009).

Tabela 2.3 - Vantagens e desvantagens das geomembranas de PVC e de PEAD (Scheirs, 2009).

Geomembrana	Vantagens	Desvantagens
PVC	Boa trabalhabilidade	Baixa resistência a UV
	Facilidade de soldagem	Baixa resistência a intempéries
	Pode ser dobrada para facilitar a soldagem	Desempenho ruim a altas e baixas temperaturas
PEAD	Boa resistência à ação química	Potencial de fissuração por estresse
	Boa resistência a soldagem	Alto grau de expansão térmica
	Boas propriedades a baixas temperaturas	Baixa resistência a perfuração

Colmanetti (2006) relata que a escolha da geomembrana mais apropriada para ser utilizada em obras em geral não tem se baseado exclusivamente em normas ou regulamentos, mas também em dados empíricos e na tradição adquirida pelos países na escolha do polímero.

2.2.2 Geotêxteis

De acordo com Palmeira (2018), os geotêxteis são produtos permeáveis que desempenham funções como drenagem, filtragem, reforço, proteção e separação de materiais (Figura 2.3). Eles são materiais manufaturados e possuem duas classificações gerais:

- Geotêxtil não tecido (GTN): é produzido a partir de fios, filamentos ou outros materiais distribuídos aleatoriamente no espaço e pode ser fabricado por meio de processos como agulhamento, termo-ligação ou resinagem (utilizando produtos químicos) e têm uma aparência felpuda.
- Geotêxtil tecido ou tricotado (GTW): é produzido pelo entrelaçamento dos fios, filamentos, lâminas ou outros materiais de forma orientada tanto na trama (sentido transversal) quanto no urdume (sentido longitudinal).

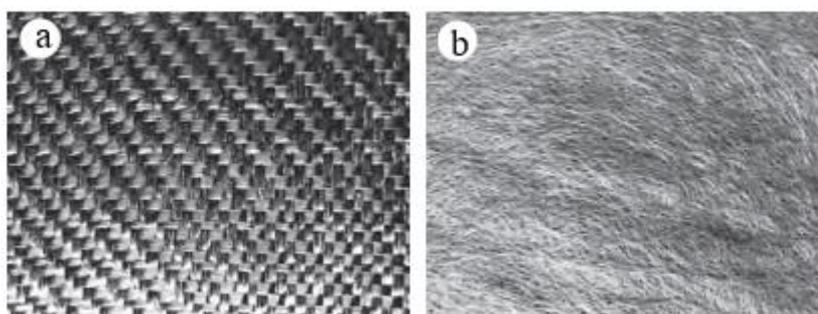


Figura 2.3 - Geotêxteis: a) tecido; b) não tecido (Palmeira, 2018).

A Figura 2.4 exibe dois geotêxteis (tanto tecido quanto não tecido), em escala microscópica. Ela tem como objetivo fornecer uma visão clara da disposição e da estrutura dos fios após a fabricação (Ingold, 1994).

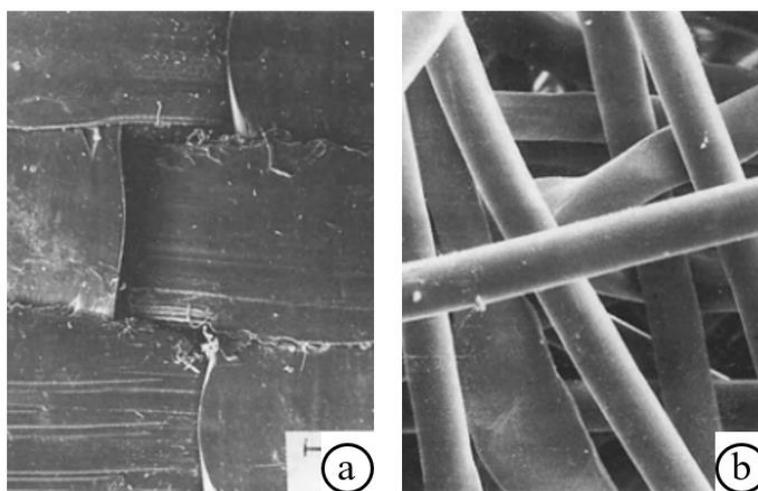


Figura 2.4 - Imagens microscópicas dos geotêxteis: a) estrutura do tecido; b) estrutura não tecido (Ingold, 1994).

O geotêxtil não-tecido é altamente permeável, o que permite que a água drenada flua livremente através dos poros do material. O uso de geotêxtil é ideal como material de proteção, pois é capaz de suportar cargas pesadas, rasgos e perfurações. O material também é muito resistente à decomposição biológica e degradação devido à exposição a condições climáticas adversas. Além disso, é fácil de ser instalado (Vertematti, 2015; Shukla, 2016).

Os geotêxteis tecidos tipicamente têm valores de resistência similares ou maiores que os de geotêxteis não-tecidos, enquanto os geotêxteis não-tecidos possuem taxa de fluxo, permissividade e alongamento mais elevados.

Embora os dois tipos de geotêxteis tenham aplicações semelhantes, haverá exceções em que um tipo de geotêxtil terá desempenho superior ao outro. Por exemplo, os geotêxteis não-tecidos são mais espessos e, por isso, são ideais para instalação como camada de proteção para uma geomembrana, pois as propriedades de perfuração, peso e espessura são importantes para um desempenho satisfatório nesse tipo de função (Venters, 2021). A Tabela 2.4 apresenta algumas das propriedades dos geotêxteis (tecido e não tecido).

Tabela 2.4 - Propriedades dos geotêxteis tecidos e não tecidos (Venters, 2021).

Propriedades mecânicas	Norma	Geotêxtil tecido	Geotêxtil não tecido
		Valores	Valores
Resistência de tração (N)	ASTM D4632	890	912
Alongamento (%)	ASTM D4632	15	50
Resistência ao rasgo (N)	ASTM D4533	334	356
Força de punção CBR (N)	ASTM D6241	3115	2224
Permissividade (sec-1)	ASTM D4491	0,05	1,4
Taxa de fluxo (l/min/m ²)	ASTM D4491	163	3870
Resistência UV* (% força retida)	ASTM D4355	70	70
NOTA: *500 horas de exposição			

De acordo com Mano (1991), o tipo de poliéster mais utilizado na fabricação de geotêxteis é o polietileno tereftalato devido à presença de oxigênio em sua estrutura molecular. Entretanto, a exposição do material a condições ácidas ou alcalinas pode resultar na hidrólise dos trechos da cadeia em éster, prejudicando sua durabilidade. Para minimizar a degradação, são utilizados aditivos.

Vertematti (2015) também destaca a importância do uso de geossintéticos como elemento de reforço. O reforço se dá pela resistência à tração do geossintético, que reduz ou evita deformações em estruturas geotécnicas, como a proteção de geomembranas sobre camadas de solo granulares.

O desempenho da função de reforço depende não apenas do dimensionamento correto, mas também da especificação adequada a cada tipo e escala de obra (Vertematti, 2015). Algumas propriedades a serem consideradas na escolha do reforço incluem:

- Resistência à tração, T (kN/m);
- Elongação sob tração, ϵ (%);
- Taxa de deformação, ϵ' (%/s);
- Comportamento na fluência;
- Resistência a esforços de instalação;
- Resistência à degradação ambiental;
- Interação mecânica com o solo;
- Fatores de redução.

Além da resistência a esforços de instalação do geotêxtil, é importante considerar outros fatores, como manuseio, deslocamento e compactação dos materiais envolventes (Vertematti, 2015).

Outros aspectos relevantes incluem:

- Matéria-prima utilizada;
- Processo de fabricação;
- Gramatura;
- Qualidade de fabricação;
- Tipo de esforços a que o material será submetido (como objetos contundentes); e
- Deformação.

Na função proteção, o geotêxtil não tecido (GTN) é instalado entre a superfície do solo e a geomembrana para aumentar a resistência mecânica e prevenir contra rasgos e furos, prolongando assim a vida útil da geomembrana (Abramento & Pezzolo, 2015). Além disso, os GTNs fornecem uma barreira efetiva contra a penetração de partículas, mantendo assim a integridade da geomembrana (Palmeira, 2018). Palmeira (2018) apresenta estudos sobre como selecionar um geotêxtil para proteção da geomembranas de PEAD. A Figura 2.5 apresenta a relação da gramatura do geotêxtil com a espessura da geomembrana e carga de perfuração aplicada sob o material.

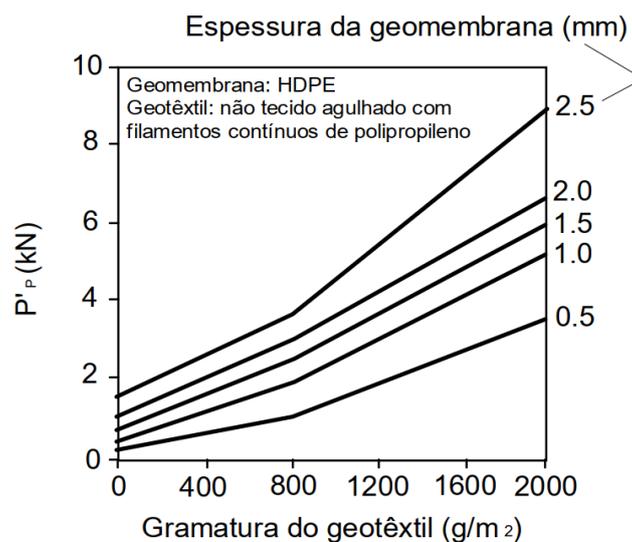


Figura 2.5 – Seleção do geotêxtil não tecido para a proteção da GM PEAD (Werner et al. 1990 apud Palmeira, 2018).

2.2.3 Geocompostos argilosos

A NBR ISO 10318-1 define geocomposto argiloso (GCL) como uma barreira geossintética composta por materiais geossintéticos em forma de lâmina, com a bentonita como principal elemento de barreira de baixa permeabilidade. O uso de GCL tem aumentado devido à preocupação ambiental e à demanda por soluções sustentáveis. Conforme Shukla (2016), o geocomposto argiloso (GCL) é um produto desenvolvido com a principal finalidade de atuar como barreira hidráulica (com uma permeabilidade da ordem de 10^{-11} m/s) contra gases e líquidos. Ele pode ser utilizado como uma alternativa para substituir totalmente ou parcialmente a camada convencional de argila compactada de baixa permeabilidade, que fica abaixo da geomembrana, em diversas aplicações de engenharia geotécnica. O GCL é aplicado em contato com o solo e/ou outros tipos de materiais, conforme especificado no projeto. Outra razão para a utilização do geocomposto sob a geomembrana é prevenir vazamentos causados por danos mecânicos na geomembrana, seja durante a instalação ou operação. A Figura 2.6 esquematiza o processo de fabricação de um dos tipos de geocomposto argiloso disponível no mercado.

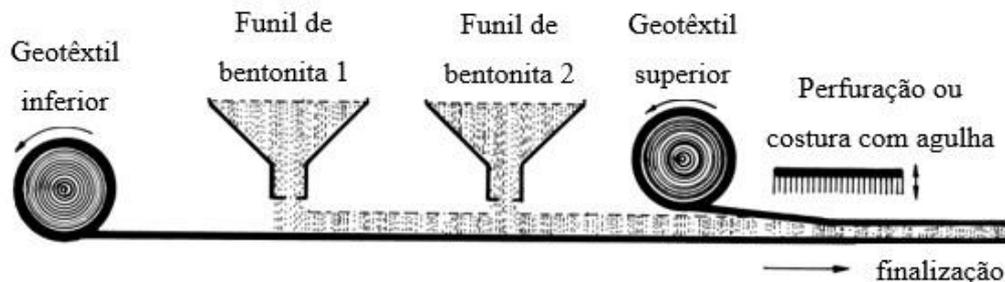


Figura 2.6 - Processo de fabricação do geocomposto argiloso (Shukla, 2016).

O geocomposto argiloso (GCL) é composto por materiais geossintéticos, como geotêxteis tecidos ou não tecidos, intercalados por um núcleo de bentonita sódica ou cálcica, com uma quantidade de aproximadamente 5 kg/m^2 (Shukla, 2016). Existem diversas combinações de geocompostos disponíveis no mercado, tais como:

- Geotêxteis não tecidos nas faces superior e inferior com núcleo de bentonita;
- Geotêxtil não tecido na face superior e geotêxtil tecido na face inferior, com núcleo de bentonita;
- Geomembrana sob a camada de bentonita.

Ademais, existem três tipos de fabricação ou união dos componentes do GCL, como:

- Geocompostos agulhados;
- Geocompostos costurados com fibras sintéticas;
- Geocompostos ligados por adesivo.

A Figura 2.7 apresenta alguns desses modelos de geocompostos disponíveis no mercado (Mendes, 2010).

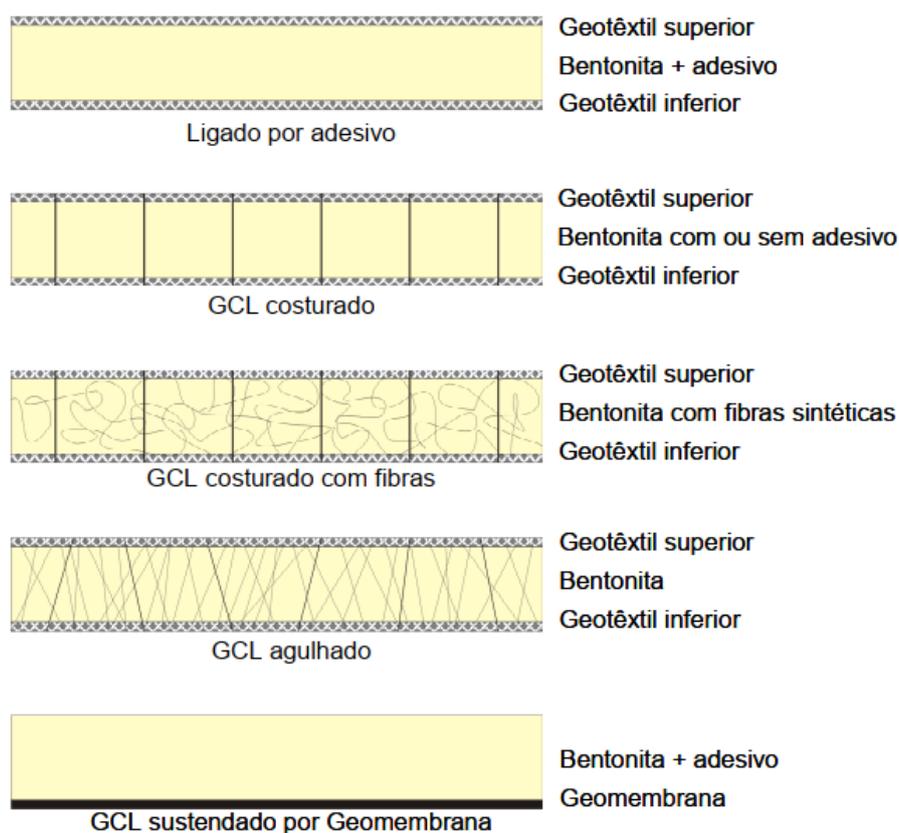


Figura 2.7 - Exemplos de GCLs disponíveis no mercado (Mendes, 2010).

O uso de geocompostos bentoníticos (GCL) oferece vantagens econômicas e ambientais em relação ao uso de camadas de argila compactada (CCL). O GCL pode reduzir a demanda por material escavado e a emissão de CO₂ (Von Maubeuge et al., 2021). De acordo com von Maubeuge et al. (2021), a utilização de um GCL pode resultar em uma emissão de 4 kg/m² de CO₂, enquanto a utilização de uma camada de CCL pode resultar em 9,9 kg/m² de CO₂ para uma área de instalação de 36.000 m². Portanto, o uso de GCL pode reduzir a emissão de CO₂ em cerca de 60% em comparação com o uso de CCL (Figura 2.8). Outros benefícios incluem:

- Redução no consumo de energia na produção dos materiais;

- Redução nas emissões de CO₂ ao longo do processo de produção e entrega;
- Mesmo com emissões de CO₂ na produção de geossintéticos, o impacto ainda é menor do que o uso de CCL;
- Aceleração do processo de construção.

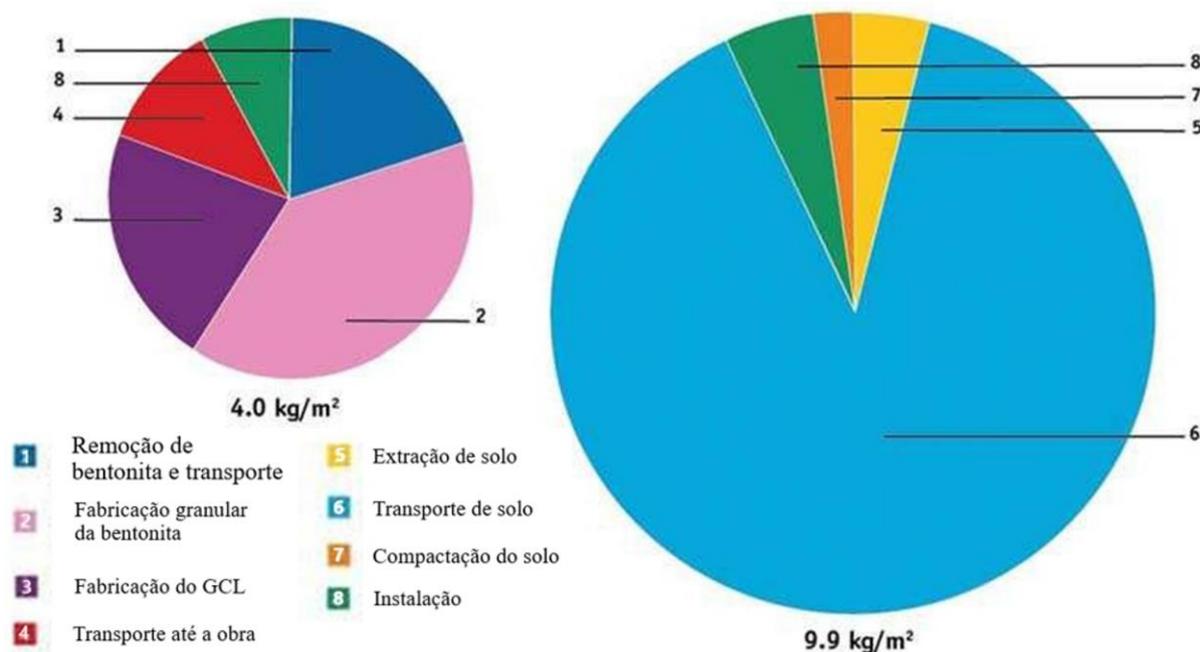


Figura 2.8 - Comparação entre emissões de CO₂ para um GCL (à esquerda) e uma CCL (à direita) (Von Maubeuge et al., 2021).

De acordo com Bouazza (2002, apud Mendes 2010), bentonitas sódicas podem expandir entre 10 e 15 vezes o seu volume inicial quando são hidratadas, enquanto as bentonitas cálcicas expandem de 2 a 4 vezes (isto ocorre devido a diferenças nas estruturas da bentonita sódica e cálcica). As bentonitas podem ser granulares ou em pó.

Guyonnet et al. (2009) relatam que a bentonita sódica natural apresenta condutividades hidráulicas mais baixas do que as bentonitas cálcicas, indicando que é mais eficiente na retenção de líquidos. Além disso, a bentonita cálcica ativada apresenta menor condutividade hidráulica em comparação com a bentonita cálcica natural, sugerindo que o processo de ativação melhora a eficiência da barreira hidráulica formada.

A qualidade da bentonita utilizada afeta diretamente a eficiência da barreira hidráulica formada pelo GCL, uma vez que é responsável pela retenção de líquidos e pela integridade da barreira ao longo do tempo. É importante, portanto, que sejam utilizadas bentonitas de alta qualidade,

que apresentem as propriedades desejadas, para garantir o desempenho adequado da barreira hidráulica (Mendes, 2010).

Mendes (2010) realizou estudos de condutividades hidráulicas e foram ensaiadas no oedopermeâmetro sob pressão de 100 kPa e foram realizadas para três tipos de líquidos: água destilada, chorume sintético e chorume real (ver resultados de ensaios na Tabela 2.5) .

Tabela 2.5 – Propriedades hidráulicas (Mendes, 2010).

GCL	Natureza da bentonita	Água destilada			Chorume sintético			Chorume real		
		k (m/s)	Duração*	nv	k (m/s)	Duração*	nv	k (m/s)	Duração*	nv
LX1	sódica natural	$2,4 \times 10^{-11}$	14/148	3,4	$2,5 \times 10^{-11}$	19/97	1,8	1×10^{-11}	11/122	3,2
LX2	sódica natural	$1,2 \times 10^{-11}$	8/158	2,1	1×10^{-10}	28/126	6,6	$1,7 \times 10^{-11}$	13/141	4,1
LX3	sódica natural	$1,4 \times 10^{-11}$	29/136	1	$3,3 \times 10^{-11}$	18/97	1,6	1×10^{-11}	10/108	1,9
LX4	cálcica ativada	$3,5 \times 10^{-11}$	19/91	2,4	$1,1 \times 10^{-10}$	18/165	9,1	$4,4 \times 10^{-11}$	19/112	10,8
LX5	cálcica ativada	$1,8 \times 10^{-11}$	24/160	3,5	$3,7 \times 10^{-11}$	18/80	3	1×10^{-11}	11/112	3,9
LX6	cálcica natural	$4,5 \times 10^{-9}$	27/41	1,3	2×10^{-10}	15/81	14,2	$1,1 \times 10^{-11}$	11/111	9,7
LX7	cálcica ativada	$1,1 \times 10^{-11}$	8/145	2,4	$4,5 \times 10^{-11}$	28/171	13,2	1×10^{-11}	22/87	2,6
LX8	cálcica natural	$4,7 \times 10^{-10}$	12/70	15,1	$1,8 \times 10^{-9}$	34/147	37,2	6×10^{-10}	31/144	21,2

NOTA: * o primeiro numero refere-se a fase de saturação sob 10 kPa
 nv é a relação entre o volume de efluente dividido pelo volume de vazios na amostra
 LX é o número da amostra.

Desse forma, as bentonitas granulares têm uma tendência a expandir-se mais lentamente devido à sua forma de grumos, já que um grumo coberto por uma película de água dificulta a hidratação do seu núcleo (Vagpaisal & Bouazza, 2004 apud Mendes, 2010).

2.3 GEOSINTÉTICOS EM OBRAS HIDRÁULICAS E DE PROTEÇÃO AMBIENTAL

Geossintéticos são fundamentais para garantir a estanqueidade de obras geotécnicas, como túneis, sistemas anti-erosão, canais, barragens, reservatórios de resíduos líquidos e sólidos, entre outras (Figura 2.9). Alguns desses materiais são utilizados para garantir a contenção, proteção ou barreira de líquidos e gases que possam contaminar o solo e a água subterrânea,

além de evitar a erosão e o deslocamento de materiais. Assim, as barreiras geossintéticas contribuem para a preservação do meio ambiente, para o desenvolvimento e segurança das populações próximas a essas obras.

No entanto, a eficácia dos geossintéticos pode ser comprometida por diversos fatores, como a qualidade dos materiais utilizados, instalação inadequada, falta de manutenção e exposição a condições ambientais adversas. Alguns dos principais problemas que podem afetar a estanqueidade desses materiais incluem a erosão causada pela ação do líquido, o rompimento de emendas, a deterioração dos materiais por exposição a raios UV, além da ação de animais e plantas. Por isso, é fundamental que as barreiras geossintéticas sejam projetadas, instaladas e mantidas de forma adequada, seguindo normas técnicas específicas e contando com a supervisão de profissionais qualificados.

No Brasil, os geossintéticos passaram a ser empregados no início dos anos 70, e seu consumo cresceu substancialmente com o passar do tempo. As geomembranas, geotêxteis e geocompostos argilosos, por exemplo, podem ser empregados em diversas partes de uma obra geotécnica, seja de concreto ou terra, desempenhando o papel de evitar a perda e migração de líquidos e/ou gases, que devem ser evitados, pois podem contribuir para a geração de manifestações patológicas e antecipar manutenções periódicas na estrutura, reduzindo a sua vida útil. A Tabela 2.6 apresenta algumas áreas de aplicação dos geossintéticos em obras geotécnicas (Cardona, 2013).

Tabela 2.6 - Principais áreas de aplicação para geossintéticos em obras hidráulicas (Modificado Shukla, 2012 apud Cardona, 2013).

Área	Propósito	Funções principais	Geossintéticos principais	Considerações especiais
Barragens	Reduzir a infiltração através do aterro, Prevenir a erosão interna (piping), Drenagem, Proteção do talude	Barreira hidráulica, Drenagem, Filtração	Geomembranas, Geotêxteis, Georredes, Geogrelhas, Geocompostos	Colmatação, Esforços durante a construção
Aterros sanitários	Extrair o chorume e reter os desperdícios	Barreira hidráulica, Drenagem, Filtração, Reforço	Geomembranas, Geotêxteis, Geogrelhas, Geocompostos	Características do chorume, Esforços durante a construção e Alongamento

Lagoas de contenção, reservatório e canais	Reduzir a infiltração de água para dentro do solo	Barreira hidráulica	Geomembrana, Geocomposto	Esforços durante a construção
Túneis e estruturas subterrâneas	Prevenir a infiltração, Promover drenagem da água de infiltração	Barreira hidráulica, Proteção, Drenagem	Geomembranas, Geotêxteis, Geocompostos	Colmatação, Esforços durante a construção

A Tabela 2.7 lista algumas das primeiras obras que utilizaram geossintéticos, seja como elemento de barreira ou como elemento de reparo/reforço (Cardona, 2013). A Figura 2.9 exemplifica seções de obras hidráulicas e de proteção ambiental com a aplicação de geossintéticos (GMs, GTs e GCLs).

Tabela 2.7 - Algumas das primeiras barragens que aplicaram geomembrana (Cardona, 2013; Palmeira, 2018).

Barragem	Ano	Altura (m)	Comprimento (m)	Tipo de geomembrana	Condições
Twrdosin (Eslováquia)	1977	16	307	PVC, 0,9 mm	Coberta
Obecnice (República Checa)	1971	16	370	PVC, 0,9 mm	Coberta
Wenholthausen (Alemanha)	1971	17	100	PVC	Coberta
Gorghiglio (Itália)	1979	12	125	PVC, 2,0 mm	Exposta nas encostas, coberta no fundo
Landstein (República Checa)	1973	26,5	376	PVC, 1,1 mm	Coberta
Bitburg (Alemanha)	1972	13	95	PVC	Coberta

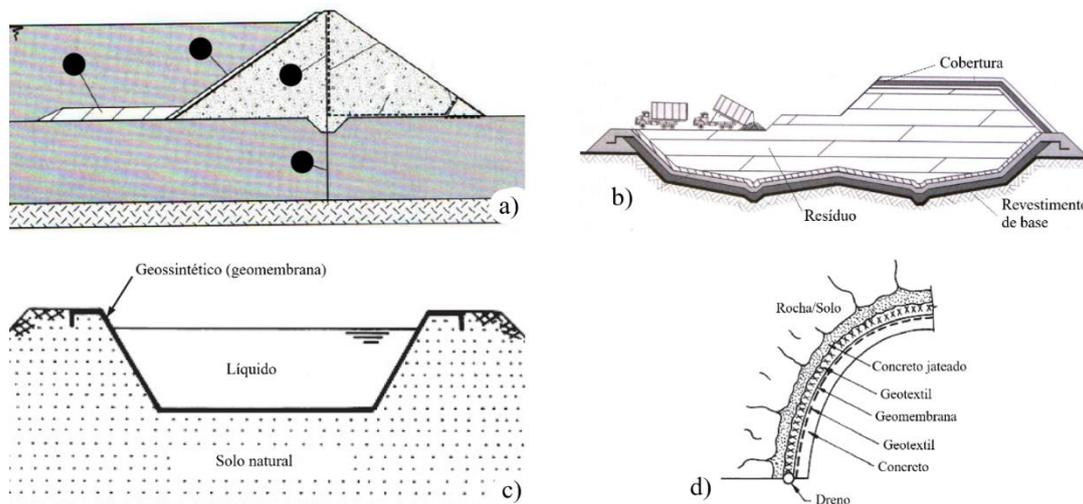


Figura 2.9 - Aplicações de geomembrana em obras: a) barragens (Palmeira, 2018); b) aterros sanitários (Boscov, 2008 apud Maccaferri 2021); c) canais lineares (Shukla, 2016); d) túneis (Shukla, 2016).

Vertematti (2015) reporta que amostras retiradas de obras com mais de 20 anos de idade mostram que os geossintéticos apresentaram uma degradação ambiental insignificante, sendo que em alguns casos, a expectativa de vida pode ser de algumas centenas de anos.

A seguir, serão apresentados mais detalhes sobre a utilização das geomembranas (GMs) como barreira hidráulica em obras geotécnicas, bem como outros componentes que podem auxiliar na sua proteção. Além disso, serão discutidos os principais problemas que podem comprometer a estanqueidade da geomembrana durante a instalação e ao longo da vida útil na obra geotécnica a fim de auxiliar nas decisões necessárias para garantir a eficiência da barreira hidráulica e a segurança da obra como um todo.

2.3.1 A utilização de geomembranas em barragens

Assis et al. (2014) apresenta os principais tipos de barragens que podem ser construídas, como as Barragens de Terra, de Enrocamento, de Concreto, Mistas, entre outras (ver Figura 2.10). A escolha do tipo de barragem é determinada por diversos fatores, como a disponibilidade de materiais qualificados para a construção do barramento, as características geológicas e geotécnicas do local, a topografia da região e as condições climáticas. São também aspectos relevantes a serem considerados:

- Em relação à demanda de material, é verificada a disponibilidade de solo ou rocha proveniente das escavações, tanto em quantidade como em qualidade do material;

- Em relação aos aspectos geológicos e geotécnicos, é analisada a natureza das fundações, já que as barragens de enrocamento e de concreto são executadas sobre fundações em rocha, enquanto as barragens de terra podem ser empregadas em solo;
- No que diz respeito aos aspectos climáticos, são analisados os períodos prolongados de chuva ou excessiva umidade que podem onerar a construção de aterros de solo compactado, a execução do núcleo de argila ou o avanço na construção de enrocamento devido ao avanço na construção do núcleo de argila. Nesses casos, a solução mais viável seria a execução da face de concreto.

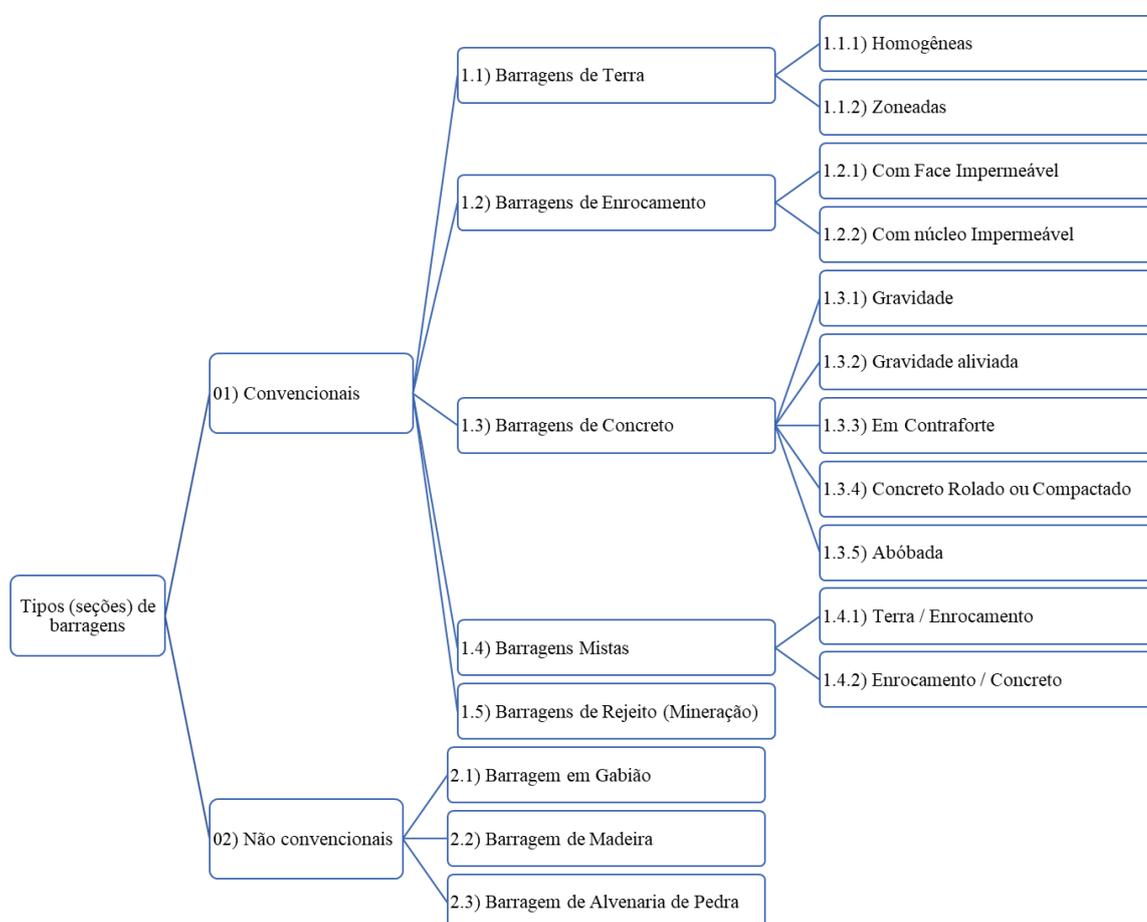


Figura 2.10 - Seções típicas de barragens (Assis et al., 2014).

De acordo com Colmanetti (2006), a história das barragens com faces de baixa permeabilidade está intimamente relacionada às barragens de enrocamento, que necessitam de um elemento de baixa permeabilidade para torná-las estanques. As barragens de enrocamento começaram a ser

desenvolvidas no século XIX e, ao longo do tempo, houve grandes melhorias nas técnicas de construção de Barragens de Enrocamento com Face Impermeável (BEFI). Em alguns tipos específicos de barragens, a retenção de líquidos não é feita pelo maciço, mas sim por um material de baixa permeabilidade instalado na face montante da barragem. O material que forma o maciço apenas garante a estabilidade e a compatibilidade das deformações.

Existem dois tipos de barragens de enrocamento: aquelas com face impermeável (que possuem uma membrana externa impermeável de geomembrana, concreto, asfalto, entre outros) e aquelas com núcleo impermeável, que garantem a barreira hidráulica.

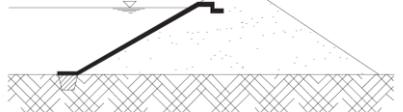
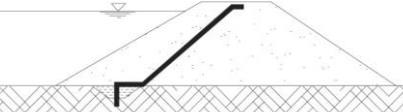
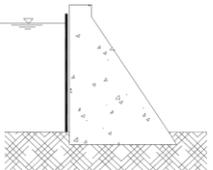
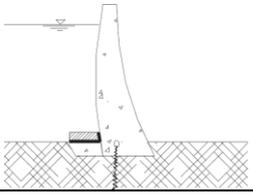
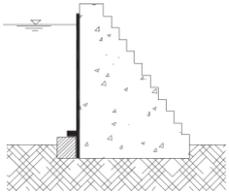
A primeira utilização de geomembrana em barragem ocorreu em 1959, na Barragem de Enrocamento de Contrada Sabetta, na Itália. Desde então, as geomembranas têm sido usadas tanto na fase de construção de novas barragens quanto na restauração da estanqueidade de barragens já existentes (ICOLD, 2010).

A durabilidade de qualquer material componente de uma barragem é muito importante, em vista da elevada vida útil esperada para este tipo de obra. No caso de geomembranas, o envelhecimento/degradação é mais intenso nas áreas expostas ao ambiente, acima do nível máximo da água (zona de flutuação). A Tabela 2.8 apresenta exemplos de instalações antigas de geomembranas, divididas por tipo de material. Cerca de 63% das geomembranas fabricadas no mundo foram feitas com PVC-P, 6% com HDPE, outros materiais poliméricos representam 22% e 8% foram produzidos com materiais betuminosos (ICOLD, 2010).

Tabela 2.8 - Instalação de geomembranas mais antigas por tipo material (ICOLD, 2010).

Tipo	Abreviação	Total exposto	Total coberto	Mais antigo exposto	Mais antigo coberto
Policloreto de Vinila com Plastificante	PVC-P	80	73	1974	1960
Elastômero de Dieno-Propileno-Etileno	EPDM	5	4	1982	1959
Polietileno de Alta Densidade	HDPE	3	12	1994	1978
Polipropileno	PP	3	3	1995	2000
Polietileno Cloro-Sulfonado	CSPE	3	5	1981	1986
Polietileno Clorado	CPE	0	3	-	1970
Polietileno Linear de Baixa Densidade	LLDPE	0	29	-	1970
Betumes		7	13		

A utilização de geomembranas é uma prática comum em obras geotécnicas que requerem estanqueidade. Na construção de barragens, a geomembrana pode ser instalada em diferentes arranjos (Figura 2.11), podendo ser exposta ou coberta na face a montante ou instalada no núcleo central, conforme apresentado por ICOLD (2010).

Figura	Total	Tipo de Aplicação Alguns exemplos típicos
	47	Geomembrana exposta a montante em barragem de terra ou enrocamento: Arcizans (França), Cracow (Austrália), Regulating Reservoir (EUA)
	106	Geomembrana coberta a montante em barragem de terra ou enrocamento: Contrada Sabetta (Itália), Jibiya (Nigéria), Middle Creek (EUA), Rouchain (França)
	20	Geomembrana central em barragem de terra e enrocamento: Atbashinsk (CSI), Fencheng (China), Hongya (China), Zushou (China), Goose Lake (EUA)
	42	Geomembrana exposta a montante em barragem de concreto/alvenaria: Brändbach (Alemanha), Illsee (Suíça), Kadamparai (Índia), Lago Nero (Itália), Pracana (Portugal)
	5	Geomembrana coberta a montante em barragem de concreto: Dashicun (China), Katse (Lesoto), Zillergründl (Áustria)
	17	Geomembrana a montante exposta em barragem de CCR: Balambano (Indonésia), Concepción (Honduras), Miel I (Colômbia), Mujib (Jordânia), Olivenhain (EUA), Riou (França)

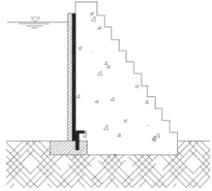
	17	Geomembrana a montante coberta em barragem de CCR: Buckhorn (EUA), Burnett River (Austrália), Hunting Run (EUA), North Fork Hughes River (EUA), Penn Forest (EUA)
---	----	---

Figura 2.11 - Tipos de arranjos para utilização de geomembrana em barragens (ICOLD, 2010 apud Cardona, 2013).

As geomembranas são amplamente utilizadas em barragens para garantir a estanqueidade das estruturas. As geomembranas mais comumente utilizadas são de PVC e PEAD, que possuem alta resistência química e mecânica, baixa permeabilidade e alta estabilidade térmica. É importante ressaltar que a instalação da geomembrana deve seguir as especificações técnicas e ser realizada por profissionais qualificados e experientes, com equipamentos adequados e seguindo as normas estabelecidas pelos órgãos reguladores. Qualquer falha na instalação pode comprometer a eficácia da geomembrana como barreira hidráulica e colocar em risco a segurança da barragem (Colmanetti, 2006).

A Figura 2.12 apresenta a Barragem de Nérís, na França, onde se utilizou a geomembrana de PVC-P na face de montante. Observa-se que a geomembrana é ancorada nas extremidades, sobre uma camada de concreto betuminoso e sob a geomembrana foi instalada uma camada de proteção de fibra de vidro e pré-fabricados de concreto. Outra configuração de seção pode ser observada na barragem de enrocamento de Odiel, na Espanha, no qual a geomembrana foi instalada no núcleo do barramento e inclinada a montante (ICOLD, 1991, apud Colmanetti, 2006).

A construção de novas barragens pode oferecer possibilidades para a instalação de geomembrana em diferentes configurações, como as apresentadas nas Figuras 2.13 e 2.14. No entanto, é necessário atentar para as tensões que podem ocorrer nas dobras (no zig-zag) das geomembranas em certos arranjos (casos c e d).

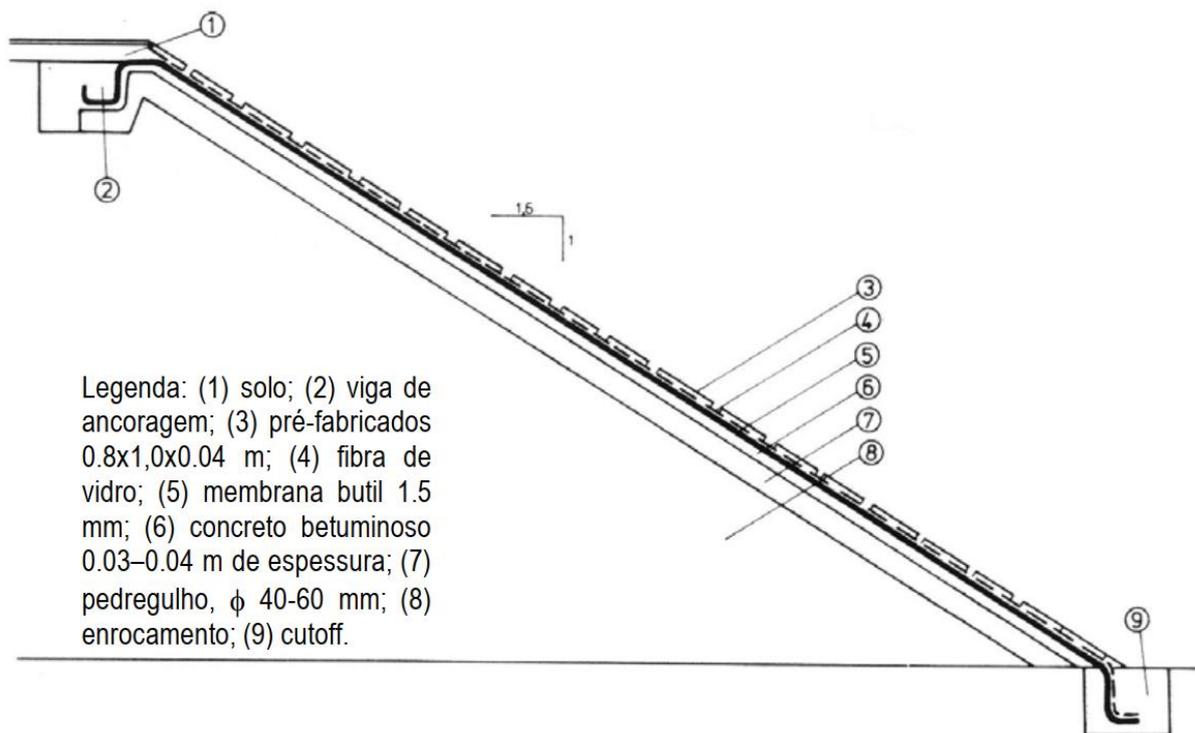


Figura 2.12 - Utilização de geomembrana na face a montante na Barragem de Néris, na França (ICOLD, 1991 apud Colmanetti, 2006).

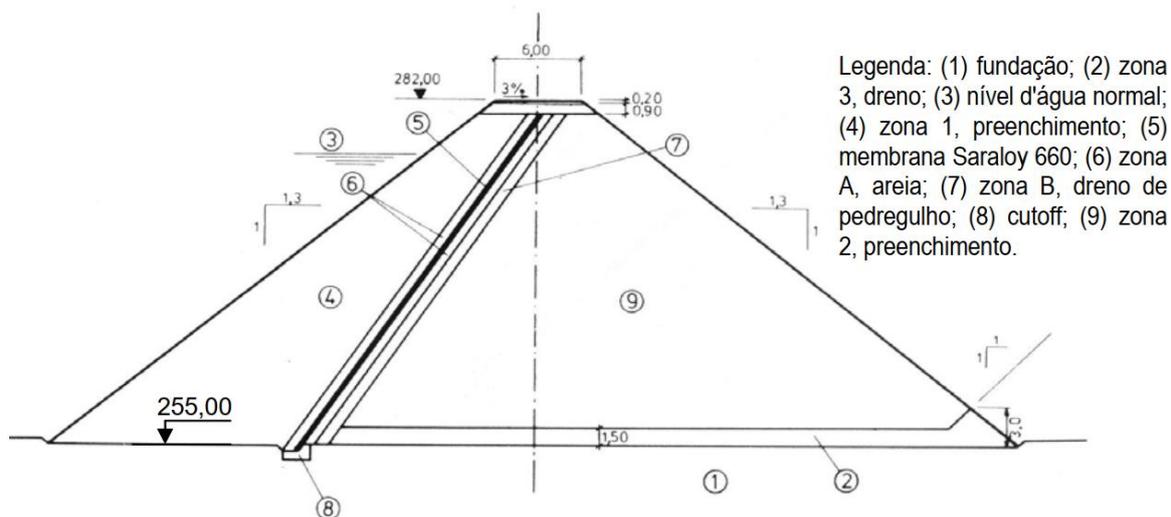


Figura 2.13 - Utilização de geomembrana no núcleo central na Barragem de Odiel, na Espanha (ICOLD, 1991 apud Colmanetti, 2006).

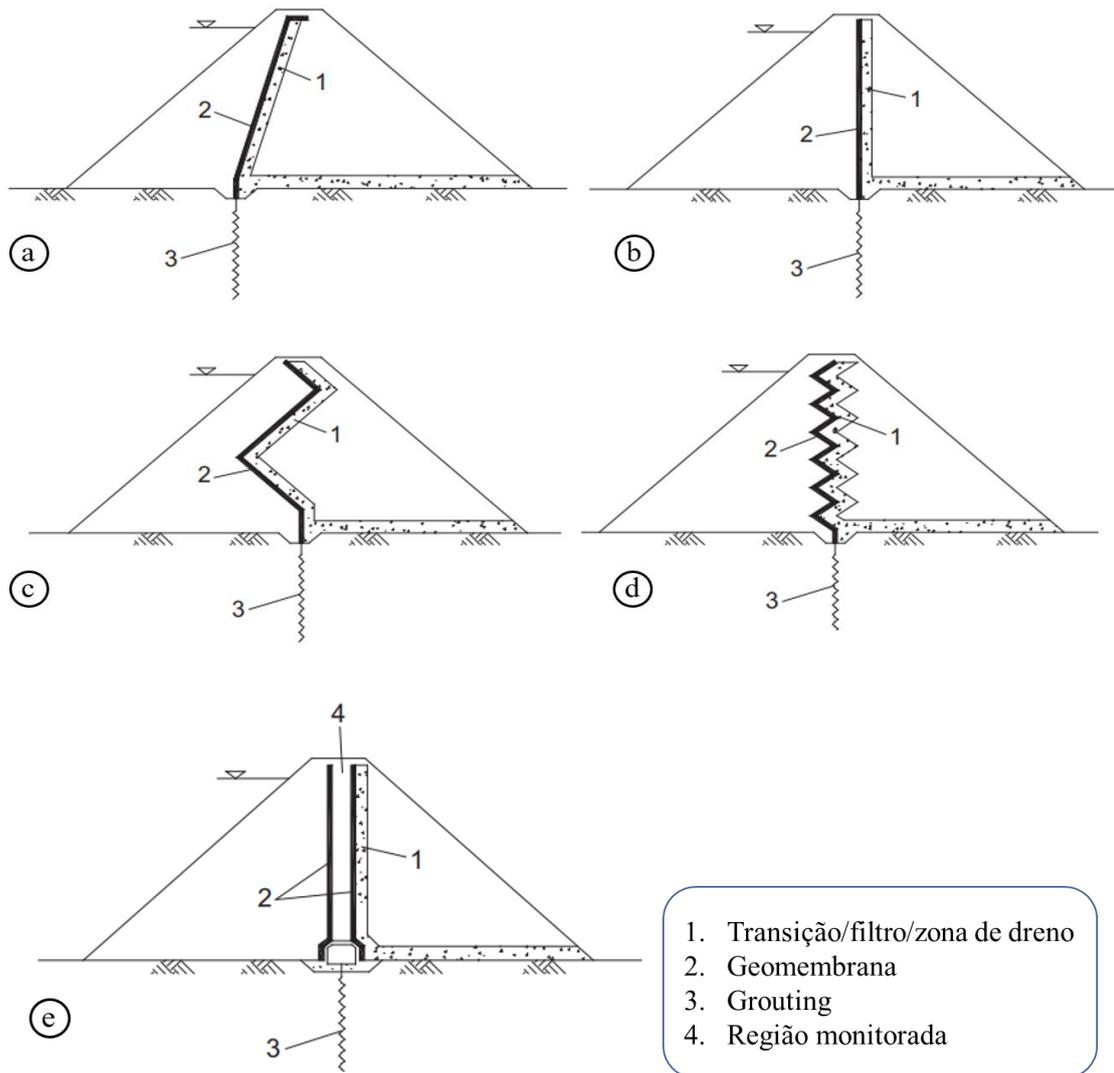


Figura 2.14 - Seções possíveis de instalação da geomembrana no núcleo central de barragens de terra ou enrocamento: a) geomembrana inclinada a montante; b) geomembrana na posição vertical; c) geomembrana em zig-zag; d) geomembrana em zig-zag; e) geomembrana dupla na posição vertical (ICOLD, 2010).

Colmanetti (2006) ressalta que o uso da geomembrana no núcleo central da barragem é aplicado quando os solos finos não atendem aos critérios de baixa permeabilidade para redução dos filtros no corpo do barramento, ou em casos de alteamento da barragem por etapa de construção.

A seguir, é apresentada uma proposta de seção tipo de barreira hidráulica com ou sem proteção mecânica (opcional) na face de montante de barragens de terra ou enrocamento (Figura 2.15). Neste caso, os itens C2 e C3 podem ser substituídos por um revestimento de concreto e os itens S1 e S2 são opcionais, conforme especificado pelo projetista (ver Tabela 2.9).

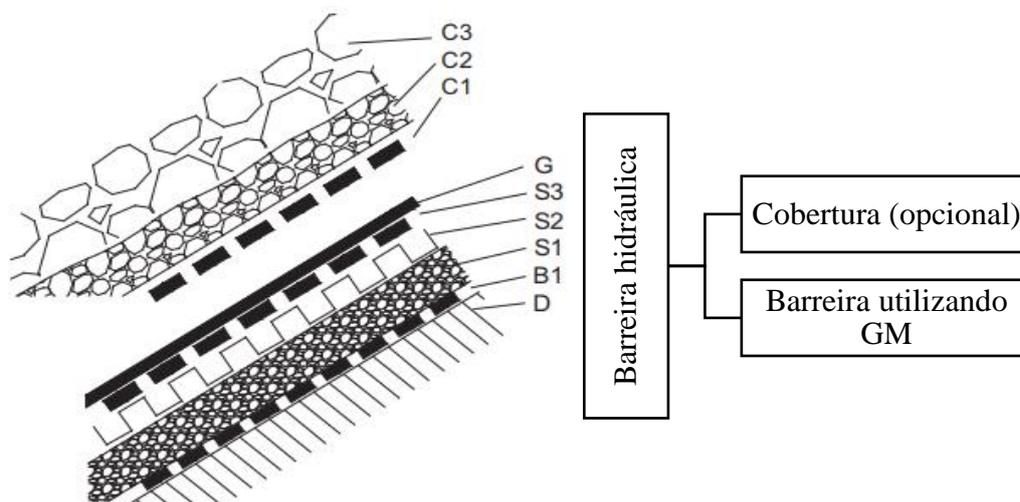


Figura 2.15 - Sistema de barreira hidráulica na face de montante de uma barragem de terra ou enrocamento (ICOLD, 2010).

Tabela 2.9 - Sistema de barreira hidráulica na face de montante de uma barragem de terra ou enrocamento (ICOLD, 2010).

Item	Função	Aplicação
C3	Proteção mecânica	Rip-rap, concreto
C2	Transição	Material granular (0/25 mm)
C1	Anti-perfuração	Geotêxtil espesso
G	Barreira hidráulica	Geomembrana
S3	Anti-perfuração	Geotêxtil espesso
S2	Drenagem	Solo drenante ou Geoespaçador
S1	Drenagem, suporte	Material granular (0/25 mm)
B1	Filtração	Geotêxtil
D	Corpo da barragem	-

Colmanetti (2006) e ICOLD (2010) relatam que o uso de geomembranas expostas ou cobertas é excelente para a reabilitação de barragens de concreto, concreto compactado a rolo ou alvenaria que tiveram as operações interrompidas devido ao risco de infiltração de água no corpo da barragem, seja pelo surgimento de fissuras, trincas, mau desempenho das juntas monolíticas, entre outros. O reparo consiste na instalação de painéis de geomembrana como elemento de barreira hidráulica na face a montante da barragem. A Figura 2.16 apresenta uma das técnicas disponíveis no mercado para a instalação de geomembrana na face a montante em barragens que se encontram em fase de construção ou em barragens que serão reabilitadas. Nos dois casos, a geomembrana pode ser exposta ou coberta. As Figuras 2.17 e 2.18 apresentam duas construções que foram reabilitadas a seco, usando painéis de GMs como barreira hidráulica.

Carpi (2023) relata que o esvaziamento do reservatório nem sempre é viável devido a restrições de projeto, pois o processo de rebaixamento e reabastecimento do reservatório poderia comprometer a estabilidade da estrutura. Nesse caso, a melhor opção seria a instalação subaquática (Figura 2.19).

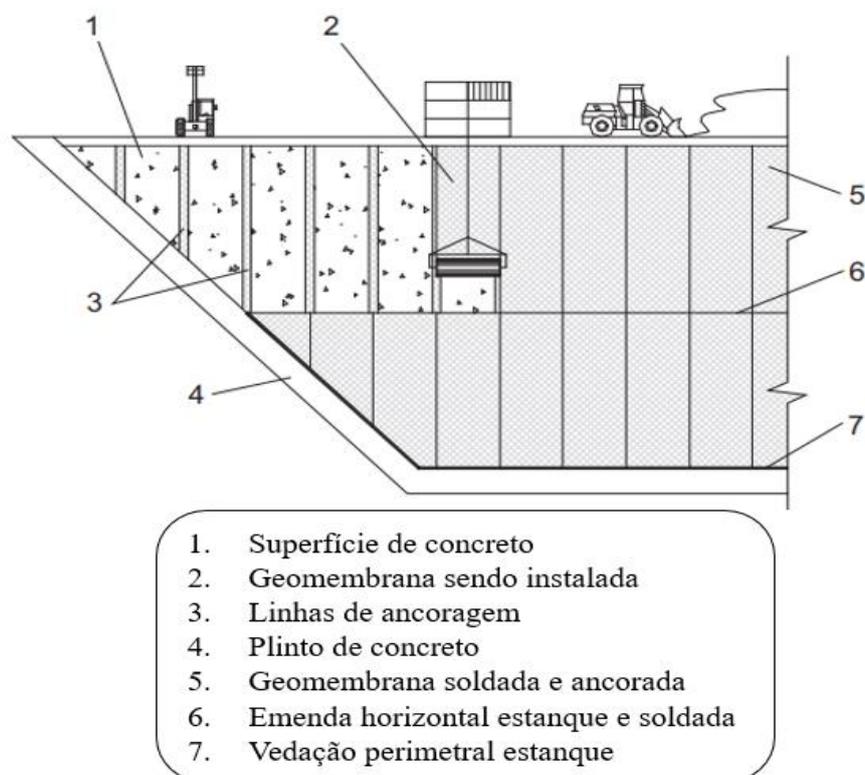


Figura 2.16 - Instalação de painéis de geomembranas na face a montante em barragem de concreto (ICOLD, 2010).



Figura 2.17 - Reabilitação a seco de barragem no Brasil em 2011 (Carpi, 2023).

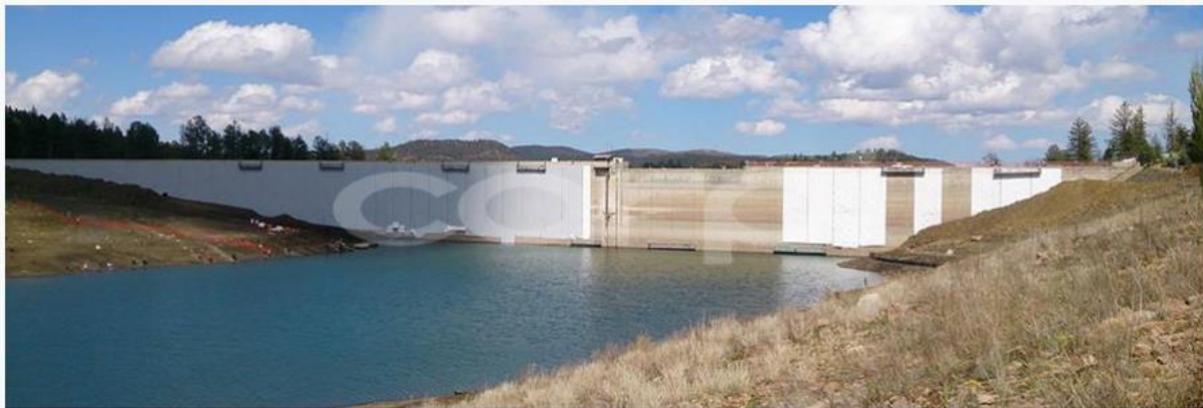


Figura 2.18 - Reabilitação a seco de barragem nos Estados Unidos da América em 2016 (Carpi, 2023).

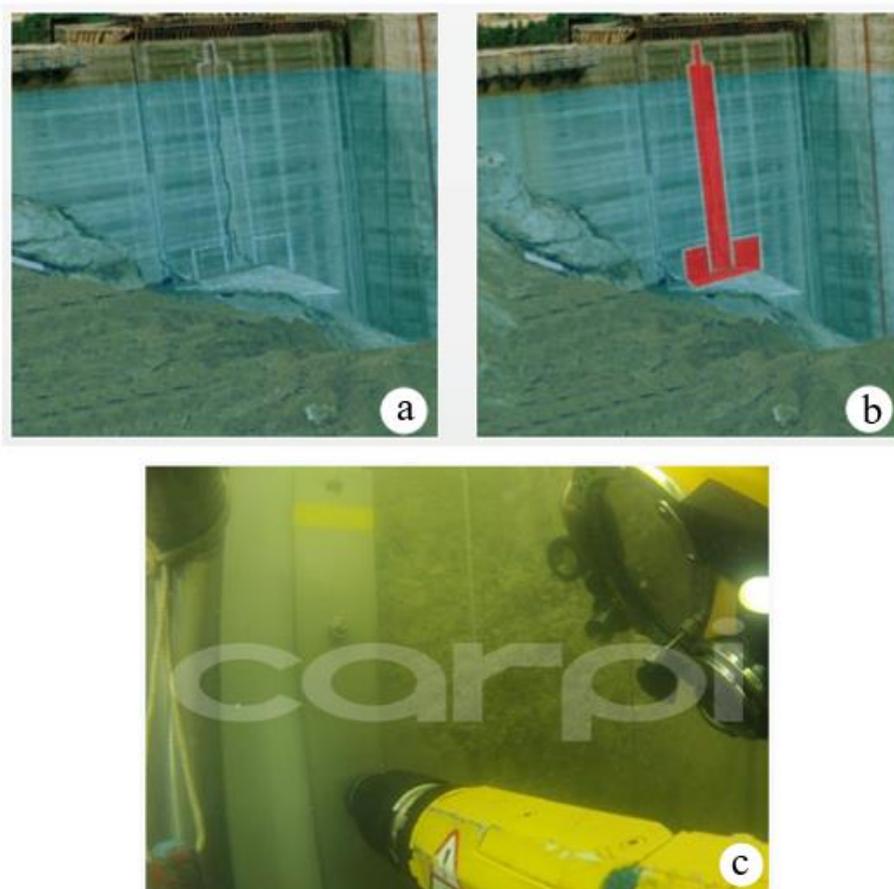


Figura 2.19 – Reparo subaquático e reabilitação da barragem: a) antes do reparo (Carpi, 2011); b) após o reparo (Carpi, 2011); c) no momento do reparo subaquático (Carpi, 2023).

2.3.2 A utilização de geomembranas em aterros sanitários

Neste subitem é apresentada uma visão geral do uso de geossintéticos como barreira hidráulica no fundo ou cobertura de aterros sanitários. Os principais geossintéticos que podem desempenhar essa função são a geomembrana, o geocomposto bentonítico e o geotêxtil. São descritos os principais problemas que podem comprometer o sistema de barreira em campo, relatados por vários pesquisadores, e suas respectivas soluções..

A NBR 8419 (1996) define o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos como uma área técnica de disposição de resíduos domésticos, comerciais, industriais e de construção civil no solo, sem causar danos à saúde pública e à segurança coletiva, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza os princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo a área com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou em intervalos menores, se necessário.

O objetivo do aterro sanitário é tratar a decomposição final dos resíduos de forma mais ambientalmente adequada. A base do aterro é constituída por um sistema de coleta e tratamento dos líquidos de chorume, e deve ser isolada por uma camada de barreira impermeável sobre uma camada de solo compactado para evitar que o chorume infiltre no solo. Dessa forma, evita-se a contaminação do solo e do lençol freático (Vertown, 2022).

No interior do aterro, é realizado um sistema de drenagem de gases, que possibilita a coleta do biogás (constituído por metano, CO₂ e vapor de água). Posteriormente, os resíduos são cobertos diariamente por camadas de solo e também é constituído por um sistema de drenagem de águas pluviais, para proteger o interior do aterro sanitário contra a água da chuva (Vertown, 2022).

Os geossintéticos são comumente utilizados na construção de aterros sanitários devido à sua facilidade de instalação e capacidade de desempenhar várias funções, incluindo barreira de fluidos, drenagem, infiltração, separação, proteção e reforço. Existem basicamente quatro configurações geométricas para os aterros sanitários: preenchimento de área, preenchimento de valas, preenchimento de vales e preenchimento de vales acima e abaixo do terreno natural, conforme mostrado na Figura 2.20 (Shukla, 2016).

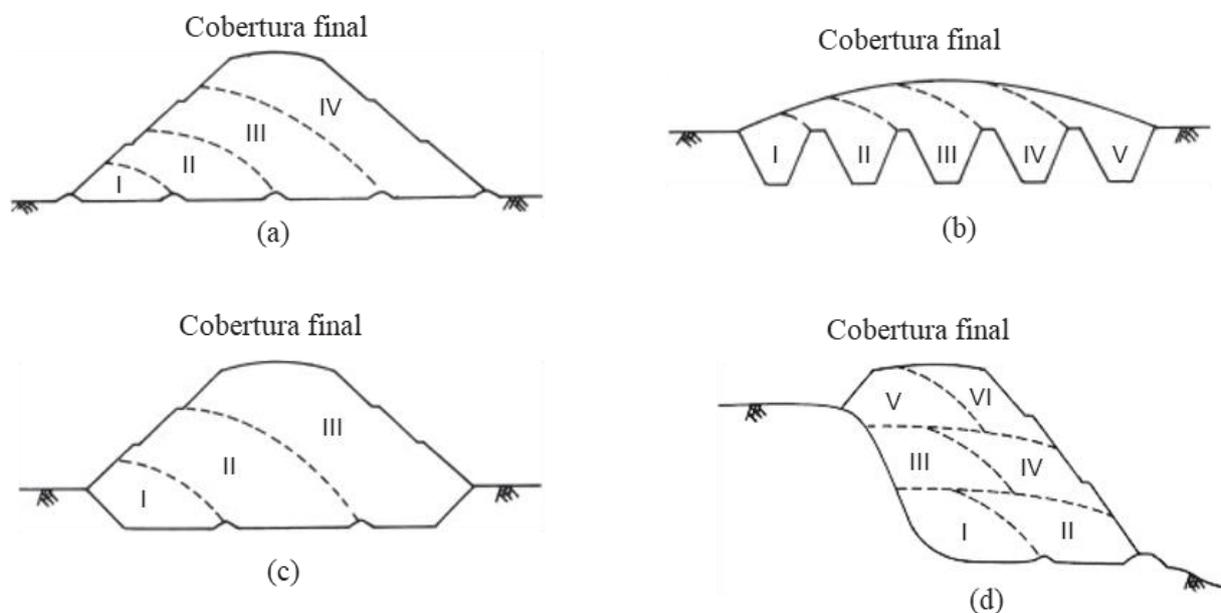


Figura 2.20 - Tipos de geometria para aterros sanitários: a) preenchimento de área; b) preenchimento de trincheira; c) preenchimento de vales; d) preenchimento de vales acima e abaixo do terreno natural (Shukla, 2016).

No momento da escolha das áreas para destinação dos aterros sanitários, é preciso considerar diversos fatores, como: a distância de transporte, restrições de localização, acesso ao local para despejo do material, condições do solo, topografia, superfície hidrológica, condições geológicas, condições ambientais do local e clima.

O aterro sanitário é composto por uma barreira de múltiplas camada, constituída por um revestimento de base e cobertura final, além de um sistema de drenagem no fundo, interior e laterais do aterro, para barrar e direcionar os líquidos (águas pluviais e chorume) de forma apropriada, evitando a contaminação do solo e das águas subterrâneas no fundo do aterro sanitário (Figura 2.21), conforme mencionado por Shukla (2016).

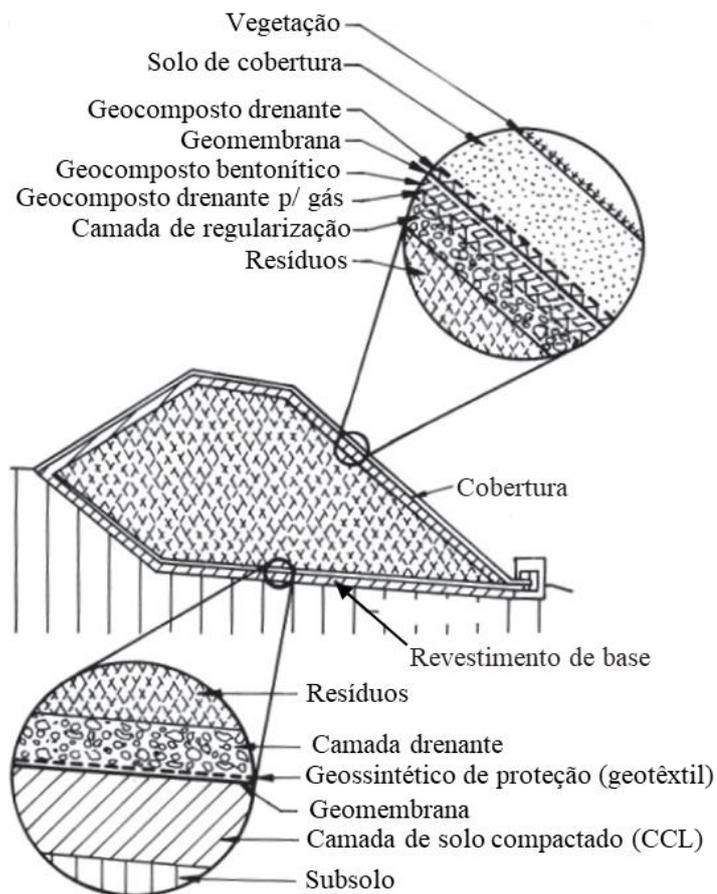


Figura 2.21 - Esquema de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos (Shukla, 2016).

Rowe et al. (2013) conduziram um estudo de 92 projetos de lixiviação em pilha em 15 países para analisar o desenvolvimento de tensões na geomembrana. Eles usaram um equipamento mostrado na Figura 2.22a para aplicar pressões verticais de até 3100 kPa. Foram realizados 19

ensaios a 22°C sob pressão de 2000 kPa. Com base nos resultados, eles concluíram que as camadas de base de brita e areia causam perfurações e deformações excessivas na geomembrana. A areia com cascalho bem graduada com presença de silte apresentou melhores desempenhos, mas ainda gerou tensões acima do recomendado para um bom desempenho a longo prazo. Revestimentos compostos por GCLs e revestimentos de argila compactada apresentaram indentações e deformações significativas nas geomembranas. Não houve diferença significativa no desempenho das geomembranas LLDPE e HDPE testadas. A camada de proteção geotêxtil não tecido de 540 g/m² foi utilizada sobre a geomembrana e também não evitou deformações significativas na geomembrana. A Figura 2.22b mostra um dos ensaios realizados pelos autores. Observa-se que a geomembrana ficou toda danificada.

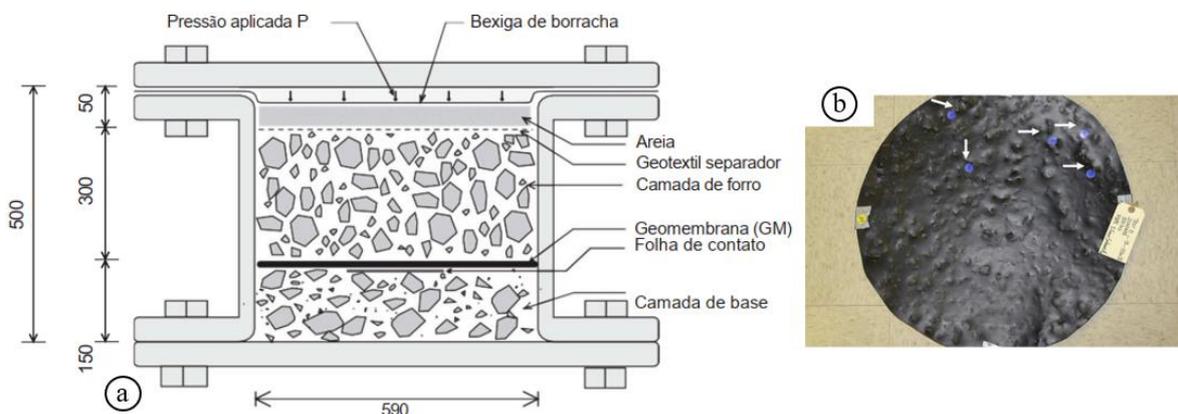


Figura 2.22 - Ensaio de vazamento: a) seção transversal do equipamento utilizado para aplicar a pressão na amostra; b) amostra de geomembrana de PEAD após o ensaio (Rowe, 2013).

2.4 DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS

De acordo com Rowe (2018), durante a instalação de geomembranas em uma obra, é importante prestar atenção à qualidade do contato entre os componentes, como a geomembrana e o material subjacente. Se houver um defeito na geomembrana, a qualidade do contato influencia na fuga de líquido. O autor sugere realizar inspeções visuais durante a construção da cobertura.

Giroud (1997) define a qualidade do contato entre os componentes da seguinte forma:

- Boas condições de contato: correspondem a uma geomembrana instalada com o menor número de rugas possíveis, sobrejacente a uma camada de solo de baixa permeabilidade bem compactada e que tenha uma superfície lisa;

- Más condições de contato: correspondem a uma geomembrana que foi instalada com certo número de rugas, sobrejacente a uma camada de solo de baixa permeabilidade que não foi bem compactada e cuja superfície não parece lisa.

Giroud (1997) relata que uma geomembrana sem defeitos tem permeabilidade muito baixa e que a maior parte do líquido que migra através dela passa pelos danos na geomembrana. Assim, o líquido passa primeiro pelo dano, depois percola lateralmente até certa distância (raio molhado) entre a geomembrana e o material subjacente e depois infiltra-se. O escoamento no espaço entre a geomembrana e o material subjacente é chamado de escoamento de interface e a área coberta pelo escoamento de interface é chamada de área molhada (Figura 2.23).

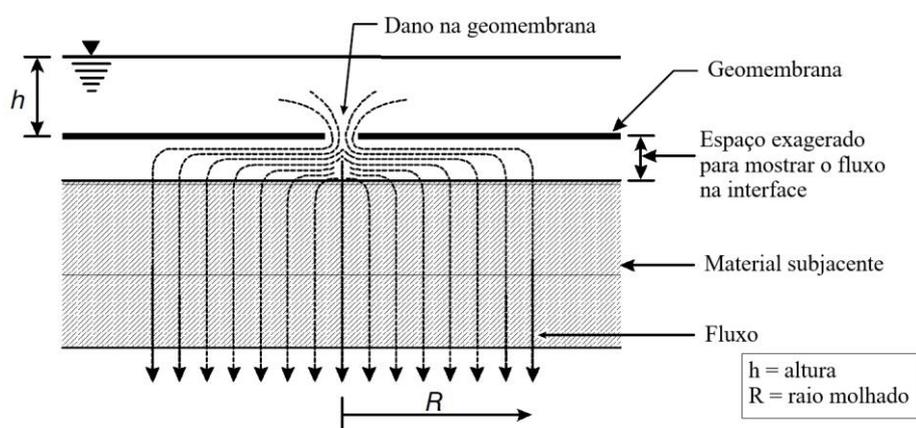


Figura 2.23 - Fluxo através de uma barreira devido a um defeito na geomembrana (Giroud, 1997).

Nosko & Touze-Foltz (2000) reuniram dados estatísticos de vários projetos em 16 países para entender de onde vêm os danos mecânicos às geomembranas. Os autores relatam que quase 71% dos danos são causados por perfurações por materiais granulares, 16% por equipamentos pesados, 6% por falhas durante a soldagem do material, 1% por cortes e 6% por trabalho direto dos trabalhadores.

Koerner (2005) afirma que a barreira impermeável torna-se vulnerável a danos mecânicos como rasgos e furos durante o manuseio, transporte, instalação, quedas de ferramentas, vandalismo e tráfego de veículos sobre o material. Por esses motivos, deve-se ter cuidado com a espessura mínima da geomembrana no canteiro de obras, no intuito de minimizar o surgimento desses problemas.

Fox et al. (2012) analisaram GMs de PEAD de 1,5 mm sobrepostos com GCL e/ou CCL (cascalho argiloso) e descobriram que a GM é muito vulnerável a danos sob altas tensões normais (entre 72 - 1658 kPa) e deslocamentos de cisalhamento na superfície com tensões normais de até 4145 kPa. Portanto, deve-se atentar para as dimensões dos materiais utilizados na obra. Eles também observaram a presença de danos menores em GMs com tensões normais abaixo de 348 kPa e danos maiores com tensões acima de 693 kPa, resultando em danos próximos a 25 mm de diâmetro. Esses autores concluíram que os danos causados por deslocamentos devido ao cisalhamento na superfície podem oferecer maiores riscos à barreira do que os causados pela pressão hidrostática. Por este motivo, os autores aconselham a instalação do GCL entre o GM e o CCL para reduzir o surgimento de danos futuros.

Cardona (2013) investigou o escoamento por danos mecânicos entre 5 e 50 mm em GMs de PVC lisa de 1,00 mm aplicando pressões hidrostáticas de até 800 kPa sobre elas. A autora observou que a temperatura ambiente influencia o comportamento do escoamento devido à influência sobre a viscosidade do líquido. Ela também observou a ocorrência de expansão lateral da geomembrana, seja por temperatura, pressão hidrostática e/ou ancoragem da GM.

Foose et al. (2001) estudaram modelos numéricos e analíticos para verificar a eficiência de equações para quantificar vazamentos em danos circulares e defeitos longos (juntas defeituosas) em revestimentos de aterros sanitários usando GM, GCL e/ou CCL. Os autores observaram que o contato entre a GM e a superfície subjacente deve ser avaliado qualitativamente, ou seja, se está em contato perfeito ou ruim, pois isso também influenciará a vazão. O mau contato ocorre devido a partículas de solo, ondulações durante a compactação do aterro e presença de rugas nas geomembranas.

2.5 RUGAS EM GEOMEMBRANAS

As rugas em geomembranas podem ter um grande impacto na qualidade do contato entre a geomembrana e a camada de base. Essas rugas podem ser causadas por um espalhamento inadequado de material sobre a GM ou pela expansão térmica da geomembrana em dias com altas temperaturas. A presença de rugas pode dificultar a soldagem de painéis e a instalação adequada de solos de cobertura ou camadas de drenagem sobre a GM. Além disso, as rugas podem criar regiões de elevadas tensões nas dobras, o que pode dificultar o fluxo de líquidos nas camadas drenantes e até mesmo favorecer o fissuramento nas GMs. As rugas também criam um vazio entre a GM e o material de base, diminuindo a qualidade do contato da barreira composta.

Rowe (2012) relata que as rugas surgem a partir da expansão térmica quando as GMs são aquecidas pela ação da luz solar. Elas podem surgir no momento da soldagem por fusão de ar quente ou podem ocorrer pela sobreposição de painéis de GCL, por exemplo. De acordo com estudos realizados no Canadá, a instalação de painéis de geomembranas antes das 08:00 da manhã ou depois das 04:00 da tarde pode levar à formação de até seis rugas interconectadas por hectare, com comprimento máximo de 200 metros cada. No entanto, ao redor das 13:00 da tarde, as rugas podem atingir comprimentos de até 2.000 metros por hectare. As rugas provocadas pela expansão térmica em geomembranas de PEAD podem ter altura de 0,06 a 0,2 metros e largura de 0,2 a 0,3 metros.

Segundo Joshi et al. (2017), as rugas em geomembranas são uma grande preocupação, pois um furo que ocorra na ruga pode levar a um vazamento significativo ao longo das rugas interconectadas. No entanto, se forem conhecidos a pressão, a espessura e a condutividade hidráulica do material subjacente à GM, bem como a transmissividade de interface entre a geomembrana e o material de base, o comprimento e a largura da ruga, e o tamanho do furo na ruga, é possível estimar o potencial de vazamento.

2.6 ESTIMATIVA DAS TAXAS DE VAZAMENTO DE LÍQUIDO DEVIDO A DANOS EM GEOMEMBRANA

Nosko & Touze-Foltz (2000) realizaram uma estimativa das taxas de fluxo de líquido devido a furos na geomembrana de diversos aterros sanitários. Eles coletaram dados de uma área equivalente a 3.250.000 m² de aterro sanitário em 16 países e utilizaram o equipamento Sensor DDS Technology® para identificar os locais das rugas isoladas ou interconectadas e dos furos mecânicos (≤ 10 cm²) em GMs.

Giroud & Bonaparte (1989) classificaram a barreira hidráulica (por exemplo, GM/CCL) em dois tipos de contato: bom e mau. Com base no cálculo de condutividade hidráulica do revestimento de base ($k = 10^{-9}$ m/s), a qualidade do contato foi classificada utilizando as transmissividades de interface GM/CCL, que foram de $1,6 \times 10^{-8}$ m²/s para bom contato e 1×10^{-7} m²/s para mau contato.

Harpur et al. (1993) relatam valores de transmissividade de interface GM/GCL entre $1-2 \times 10^{-12}$ m²/s para uma pressão hidráulica de 70 kPa (bom contato) e 2×10^{-10} m²/s para 7 kPa (mau contato).

A perda de carga através da barreira hidráulica pode ser expressa pela Equação 1 (Giroud, 1997; Rowe & Hosney, 2010):

$$h_d = D - h_a + h_w \quad (1)$$

A Equação 1 define a perda de carga (h_d) através da camada, onde D (m) representa a espessura da camada de base composta por GCL + subsolo, CCL + subsolo ou GCL + CCL + ... + material de atenuação n ; h_a (m) é a carga do aquífero (se houver) e h_w (m) é a carga hidráulica sob a camada de base.

A partir da Equação 1, o gradiente hidráulico na ausência da GM pode ser obtido pela Equação 2:

$$i = h_d / D \quad (2)$$

D ou HL (m) é a espessura total da barreira de base da GM e k_s (m/s) é a condutividade hidráulica de duas ou mais camadas de base GCL/CCL/subsolo (Equações 3 e 4).

$$D = HL_{GCL} + HL_{CCL} + \dots + HL_n \quad (3)$$

$$k_s = D / \left(\frac{HL_{GCL}}{k_{GCL}} + \frac{HL_{CCL}}{k_{CCL}} + \dots + \frac{HL_n}{k_n} \right) \quad (4)$$

As siglas HL_{GCL} (m), HL_{CCL} (m), HL_n (m), k_{GCL} (m/s), k_{CCL} (m/s) e k_n (m/s) correspondem a: a espessura do geocomposto bentonítico, a espessura da camada compactada de solo, a espessura de outras camadas (camada de atenuação) caso sejam consideradas, a condutividade hidráulica do geocomposto, a condutividade hidráulica da camada compactada de solo e a condutividade hidráulica de outros materiais caso sejam considerados, respectivamente.

Com base no gradiente da Equação 2 e na condutividade hidráulica das camadas compostas GCL/subsolo ou CCL/subsolo (Equação 4), é possível estabelecer um limite para o vazamento que poderia ocorrer através da barreira hidráulica sem a presença de GM, conforme definido pela Equação 5 (Rowe & Hosney, 2010).

$$lf = (k_s \times h_d) / D \quad (5)$$

Onde: lf (m^3/s) é o limite de vazamento através de uma camada de base sem GM.

Assim, a Equação 6 determina a vazão total (Q_t) em m^3/s através de uma barreira hidráulica com presença de rugas. A vazão total (Q_t) que passa pela camada composta é a soma do fluxo lateral de interface pela direita e esquerda (q_h ou Q_w) em m^3/s mais o fluxo vertical (Q_d) em

m³/s abaixo da região enrugada (limite do vazamento imposto pela Lei de Darcy), conforme utilizado em casos complexos de interação por Nosko & Touze-Foltz (2000), Rowe & Hosney (2010) e Rowe (2018) (Equações 6 a 8).

$$Q_t = q_h + Q_d \quad (6)$$

$$q_h = L [2b k_{lb} + (2(k_{la}D \theta))^{0,5}] h_d / D \quad (7)$$

$$Q_d = C_{qo} [1 + 0,1(h_w/D)^{0,95}] a^{0,1} h_w^{0,9} k_{lb}^{0,74} \quad (8)$$

Na equação 7, L (m/ha) é o comprimento perpendicular à secção transversal, a ruga tem largura 2b (m), com interface de transmissividade θ (m²/s) entre a GM e o material de interface (Figura 2.24); k_{lb} (m/s) é a condutividade hidráulica do material de base diretamente abaixo da ruga (compressão zero) e vazamento com mais intensidade; k_{la} (m/s) é a condutividade hidráulica lateral de interface (longe da ruga) onde a compressão sobrejacente ao material é aplicada e a intensidade do vazamento é menor conforme se distancia da ruga com o dano, C_{qo} é o coeficiente de qualidade de contato de interface adimensional (usar 0,096, 0,21 ou 1,15 para excelente, bom e mau contato); $a = \pi r_o^2$ (m²) é a área do dano mecânico (Montoro et al., 2015; Rowe, 2018), D (m) representa a espessura do material subjacente (HL_{GCL}, HL_{CCL} ou HL_n caso seja considerado mais de um material de Base), θ (m²/s) é a transmissividade de interface entre a GM e o material de base.

A Tabela 2.10 apresenta algumas equações empíricas para previsão da transmissividade mencionadas no trabalho de Mendes (2010), considerando diferentes níveis de qualidade de contato entre a GM e o material de base, como pobre, boa ou excelente, e condição de contato GM/GCL.

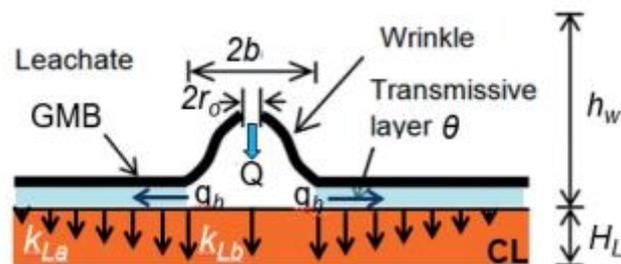


Figura 2.24 - Seção transversal de barreira hidráulica com ruga e dano mecânico (Rowe, 2018).

Tabela 2.10 - Equações empíricas de previsão da transmissividade de interface (Mendes, 2010).

Qualidade de contato	Equações empíricas	Autores
Pobre	$\log \theta = -0,5618 + 0,7155 \times \log ks$	Touze-Foltz & Giroud (2003, apud Mendes 2010)
Bom	$\log \theta = -1,3564 + 0,7155 \times \log ks$	
Excelente	$\log \theta = -1,7476 + 0,7155 \times \log ks$	
GM/GCL	$\log \theta = -2,2322 + 0,7155 \times \log ks$	Touze-Foltz & Barroso (2006, apud Mendes (2010))
Nota: usar θ em (m ² /s) e ks em (m/s)		

Considerando que a vazão não pode exceder o limite imposto pelo tamanho do dano (furo semi-circular ou circular) presente na GM com ou sem ruga, duas condições devem ser satisfeitas (Equações 9 e 10). Primeira condição: a vazão total (Q_t) deve ser menor ou igual a vazão através de uma base muito permeável (Equação 11). Segunda condição: a vazão total “ Q_t ” deve ser menor ou igual ao vazamento através do material de base sem GM presente conforme a Equação 12 (Rowe, 2018).

$$Q_t \leq Q_B \quad (9)$$

$$Q_t \leq Q_{DL} \quad (10)$$

$$Q_B = \pi C B r_o^2 \sqrt{2 g h_w} \quad (11)$$

$$Q_{DL} = 10.000 \times ks \times h_d / D \quad (12)$$

Onde: Q_B (m³/s) é a vazão através de um dano usando uma base muito permeável sob a GM; CB é um coeficiente relacionado com a forma das arestas do dano (usar 0,6 para arestas vivas, Giroud & Bonaparte, 1989); r_o (m) é o raio do dano (círculo ou semi-círculo); g (m/s²) é a aceleração devido à gravidade, Q_{DL} (m³/s) representa a vazão de água através do revestimento de base na ausência da GM, e é calculada usando as Equações 10 e 11 apresentadas por Rowe (2018). Para simular um material de base muito permeável, pode-se utilizar a permeabilidade de areia de 10⁻² m/s, como descrito por Yasodian et al. (2011).

Nosko & Touze-Foltz (2000) relatam que a dimensão do furo não teve um impacto significativo nas taxas de fluxo para uma mesma transmissividade hidráulica adotada (Figura 2.25). No entanto, a carga hidráulica foi um parâmetro muito importante a ser considerado. Eles observaram um aumento de 2,5 vezes na taxa de vazamento de líquido para o dano circular em relação à ruga danificada presente na GM (Figuras 2.26 e 2.27).

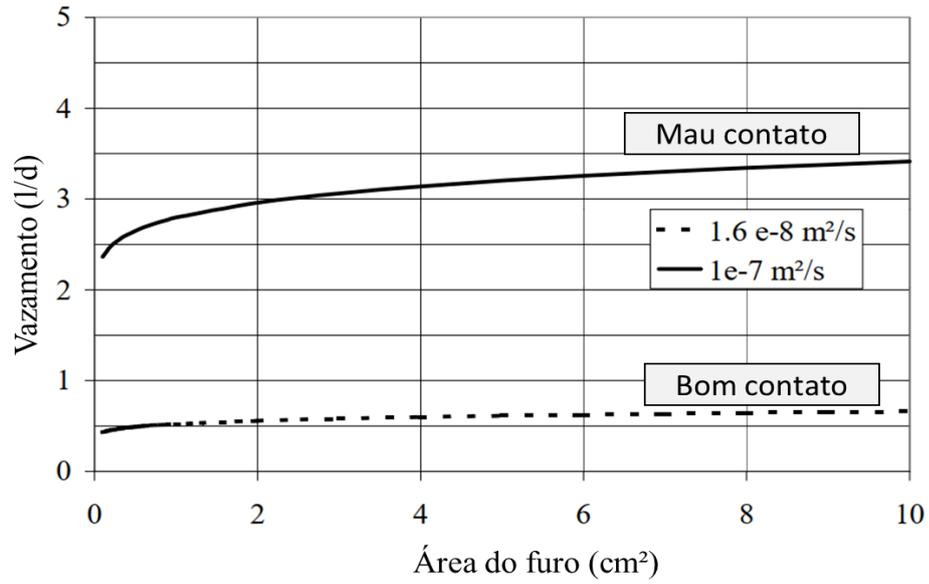


Figura 2.25 - Vazamento através de furos em GMs com superfície plana (de acordo com a área do furo) (Nosko & Touze-Foltz, 2000).

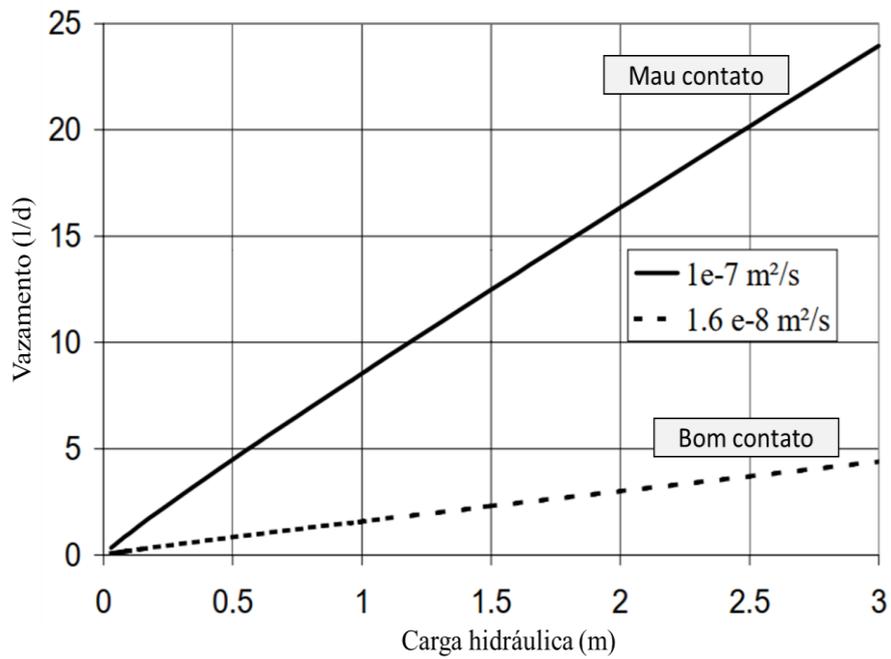


Figura 2.26 - Vazamento através de furos em GMs com superfície plana (de acordo com a altura manométrica) (Nosko & Touze-Foltz, 2000).

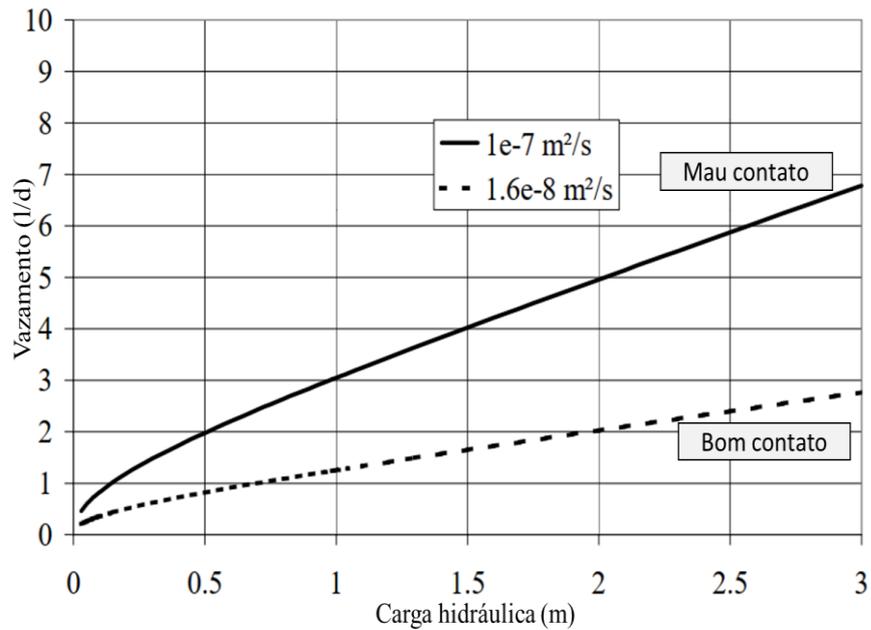


Figura 2.27 - Vazamento através de furos em GMs com presença de rugas (Nosko & Touze-Foltz, 2000).

Os resultados apresentados nas Figuras 2.25 a 2.27 podem ser relacionados à qualidade do contato na instalação das GMs. A Figura 2.28a mostra uma cobertura com bom contato entre a GM/CCL e sem rugas significativas em uma temperatura ambiente de 3°C. Por outro lado, a Figura 2.28b mostra a mesma superfície com mau contato entre a GM/CCL e presença de rugas interconectadas na GM ao meio-dia em uma temperatura ambiente de 17°C. A Figura 2.29 exhibe alguns defeitos que contribuem para um contato de baixa qualidade na barreira hidráulica (GM/CCL) e que podem gerar vazamentos expressivos por baixo da GM. Tais defeitos incluem irregularidades e defeitos como fissuras, trincas e dessecação da CCL (Rowe & Hosney, 2010).



Figura 2.28 - GM instalada em contato direto com CCL: a) nublado no início da manhã de novembro, quando a temperatura ambiente foi de 3°C; b) rugas interconectadas, a meio dia de novembro, quando a temperatura ambiente chegou a 17°C (Rowe & Hosney, 2010).



Figura 2.29 - CCL sob a GM: a) CCL apresenta fissuras de dessecação; b) superfície classificada como má qualidade para contato (Rowe & Hosney, 2010).

Conforme mencionado por Mendes (2010), o vazamento através de um dano mecânico em uma geomembrana instalada em uma barreira hidráulica depende da transmissividade da interface e da qualidade de contato entre os materiais da barreira hidráulica (GM/material de base). A Figura 2.30 apresenta um modelo dos resultados em função da transmissividade da interface versus a condutividade hidráulica do material de base para qualidade de interface ruim, boa, excelente e uso de GCL.

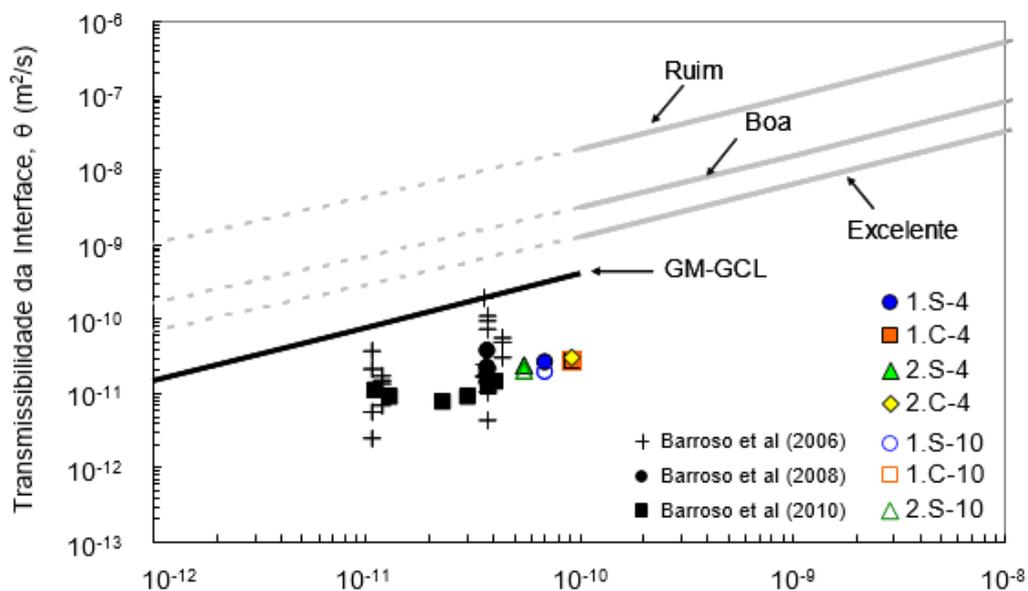


Figura 2.30 - Transmissividade da interface versus condutividade hidráulica do material de base (Mendes, 2010).

Na Tabela 2.11 são apresentados alguns efeitos de vazamentos calculados de forma simples, assumindo a presença de rugas e danos mecânicos em geomembranas, em uma cobertura primária de um duplo sistema de barreira hidráulica que utiliza GCL e/ou CCL, de acordo com Rowe (2018).

Tabela 2.11 - Vazamentos calculados assumindo GM com ruga e dano mecânico (Rowe, 2018).

Caso	Barreira	θ (m ² /s)	kla (m/s)	klb (ms/)	2b (m)	L = 200	L = 1000
						Q (lphd)	Q (lphd)
2a	GCL	2×10^{-11}	5×10^{-11}	2×10^{-10}	0,2	25	124
4a	GCL	3×10^{-11}	5×10^{-11}	5×10^{-11}	0,2	9	47
5	CCL bom	$1,6 \times 10^{-8}$	5×10^{-11}	5×10^{-11}	0,2	16	80
8	CCL mau	1×10^{-7}	1×10^{-9}	1×10^{-9}	0,2	405	1300+
17a	GM/GCL	3×10^{-11}	5×10^{-10}	5×10^{-10}	0,2	10	50
17b	GCL/CCL	0	1×10^{-9}	1×10^{-9}	0,2	10	50
19a	GM/GCL	3×10^{-11}	5×10^{-11}	5×10^{-11}	0,2	18	90
19b	GCL/XCCL	$1,9 \times 10^{-5}$	1×10^{-9}	1×10^{-9}	0,2	18	90

Nota: XCCL = camada de solo compactada ressecada na parte superior; altura hw = 0,3 metros.

Para o GCL, no caso 2a com o caso 4a (ver Tabela 2.11), é evidente que a largura da ruga assume uma importância bem maior para $klb \gg kla$. Para um CCL, a Garantia da Qualidade da Construção (CQA) é crítica em termos de qualidade de contato, como definido por Giroud (1997). Para uma CCL aceitável em obra, a condutividade hidráulica do material pode ser assumida como tal que $klb = kla$, em que $2b/HL \leq 0,3$. Valores aceitáveis podem variar entre 1×10^{-9} (mau contato) $\leq kla \leq 5 \times 10^{-11}$ m/s (bom contato), dependendo da argila utilizada e da tensão vertical, como nos casos 5 e 8 (Rowe, 2018).

No estudo de Camargos (2022), foram realizadas modelagens numéricas axi-simétricas e um ensaio laboratorial para avaliar os vazamentos através de danos em geomembranas de PVC de 1 mm de espessura. O autor investigou a influência da espessura da camada de solo subjacente (com dimensões de 4 x 1 m, 20 x 5 m e 100 x 50 m), do tipo de solo (argiloso ou arenoso) e das condições de barreira hidráulica, que foram GM/CCL, GM/GTX/CCL (GTX com densidade de 200 g/cm³) e GM/GCL/CCL (GCL com permeabilidade de 5×10^{-11} m/s e espessura de 6 mm). O autor comparou as metodologias empírica, numérica, analítica e ensaio experimental. Foram aplicadas diferentes cargas hidráulicas (2, 10, 20, 40 e 80 m) sobre a GM danificada com furos de 5, 10, 20, 50 e 100 mm (sendo que o furo de 20 mm foi utilizado no ensaio experimental). A condição de contato da barreira hidráulica foi avaliada considerando a espessura da interface, que por sua vez foi determinada em função do coeficiente de permeabilidade do solo de base, sendo que a espessura de 0,08 mm foi utilizada para $k_s = 10^{-7}$ m/s e a espessura de 0,02 mm para $k_s = 10^{-9}$ ou 10^{-11} m/s, conforme Giroud & Bonaparte (1989). Foram utilizados coeficientes de permeabilidade de 10^{-7} , 10^{-9} e 10^{-11} m/s para o solo argiloso e 10^{-3} m/s para o solo arenoso. A Figura 2.31 apresenta um resultado de modelagem numérica da poropressão para a combinação de GM/CCL. É possível observar a predominância do escoamento horizontal na interface GM/CCL, uma vez que as setas pretas representam os vetores de velocidade do fluxo, indicando o escoamento horizontal que se infiltra no solo (as linhas verdes representam o caminho percorrido no escoamento).

Camargos (2022) concluiu que a carga hidráulica sobre a GM exerce influência na distribuição das poropressões no solo, sendo que as maiores poropressões foram observadas nas regiões próximas ao dano mecânico. A condição de contato ruim gerou as maiores poropressões ao longo da profundidade da camada devido à maior intensidade de fluxo de interface. Os valores de permeabilidade ao longo do plano da interface GM/CCL diminuíram com o aumento da carga hidráulica sobre a GM (Camargos, 2022).

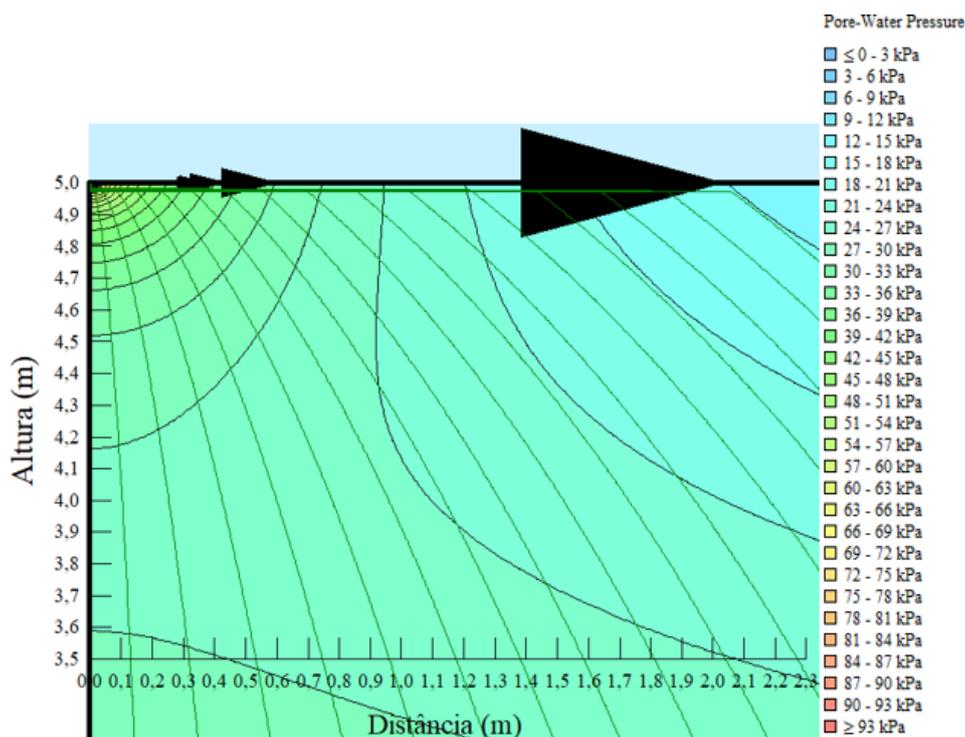


Figura 2.31 - Poropressão para a barreira composta por GM/CCL, com coeficiente de permeabilidade (k_s) de 10^{-9} m/s e carga hidráulica (h_w) de 10 m (Camargos, 2022).

Rowe & Fan (2021) estudaram o efeito da geometria dos furos em geomembranas no vazamento sob rejeitos saturados. Os rejeitos continham 30% de finos e eram compostos por um cascalho bem graduado. Equações analíticas e empíricas foram utilizadas para analisar os dados obtidos. Foi observado que mudar a forma do dano de circular (C) para não circular aumenta o vazamento. Vazamentos através de danos triangulares (T), diamantados (D) e quadrados (S) de 2000 mm^2 são todos 15% maiores do que através de furos circulares de 2000 mm^2 . Um aumento de 33% foi observado para um dano retangular (ver Figura 2.32). Os estudos numéricos mostraram que a localização da concentração de perda de pressão está na região dos furos. A condutividade hidráulica aumenta com a distância do furo, de tal forma que cerca de 80% das perdas de carga ocorrem dentro do furo e a uma distância de um diâmetro de furo. Outros 95% da perda de carga ocorreram dentro de uma pequena região de $10x$ o raio no centro do furo.

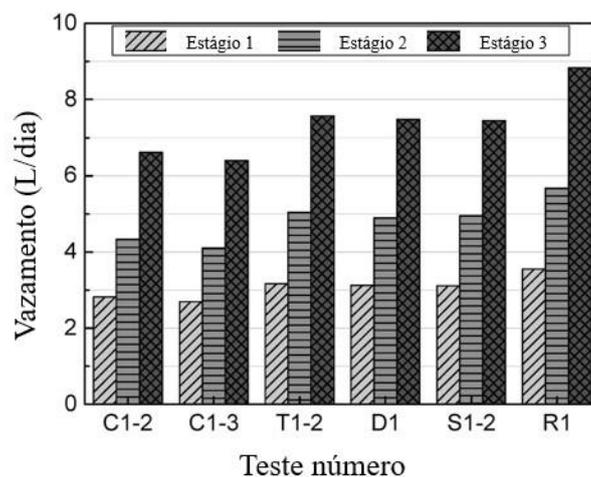


Figura 2.32 – Comparação de vazamento através de danos em GMs com área de 2000 mm² com rejeitos homogêneos (Rowe & Fan, 2021).

2.7 A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO VAZAMENTO ATRAVÉS DO DANO MECÂNICO EM GEOMEMBRANAS

A temperatura pode ter uma influência significativa no vazamento através do dano mecânico em geomembranas. Isso ocorre porque as reações biológicas ou químicas dentro do aterro sanitário podem elevar a temperatura, reduzindo assim a viscosidade do líquido e aumentando o fluxo de líquido na base (Rowe & Hosney, 2010).

A temperatura é um fator importante no funcionamento do aterro sanitário, pois pode influenciar na decomposição dos resíduos e na produção de gases. Em condições normais, a temperatura dentro do aterro aumenta gradualmente devido à atividade biológica ou química dos micro-organismos que degradam a matéria orgânica presente nos resíduos. Esse aumento de temperatura pode favorecer o processo de decomposição, reduzindo o volume dos resíduos e aumentando a produção de biogás, que é uma fonte de energia renovável (Rowe & Hosney, 2010).

No entanto, temperaturas muito elevadas podem prejudicar o funcionamento do aterro sanitário. Se a temperatura ultrapassar um determinado limite (entre 70 – 80°C), os micro-organismos podem ser prejudicados, reduzindo a eficiência do processo de decomposição. Além disso, temperaturas muito elevadas podem acelerar a degradação do revestimento (geomembrana) do aterro sanitário, aumentando o risco de contaminação do solo e dos recursos hídricos próximos ao aterro. Por isso, é importante monitorar a temperatura no interior do aterro e tomar medidas para evitar temperaturas extremas.

As Figuras 2.33 e 2.34 (Rowe & Hosney, 2010) apresentam como o vazamento através de um dano mecânico em uma ruga interconectada com comprimento de 125 m/ha é afetado pela variação de temperatura na barreira hidráulica (GM/GCL ou GM/CCL). Na condição de boa interface GM/GCL (ver Figura 2.31), o vazamento foi de 6 a 8 lphd para temperatura entre 10 – 20°C. O vazamento duplicou para 17 lphd a 60°C e chegou a 22 lphd para a temperatura de 80°C (Rowe & Hosney, 2010). Já na barreira hidráulica de GM/CCL com boa interface (Figura 2.33), o vazamento variou de 47 - 62 lphd para temperatura entre 10 – 20°C, mas observou-se que para a temperatura de 60°C o vazamento através do furo duplicou (130 lphd) e chegou a 170 lphd para a temperatura de 80°C. Para condições de interface ruins, os valores de vazamentos foram de 150, 210, 320 e 420 lphd para as temperaturas de 20, 35, 60 e 80°C, respectivamente.

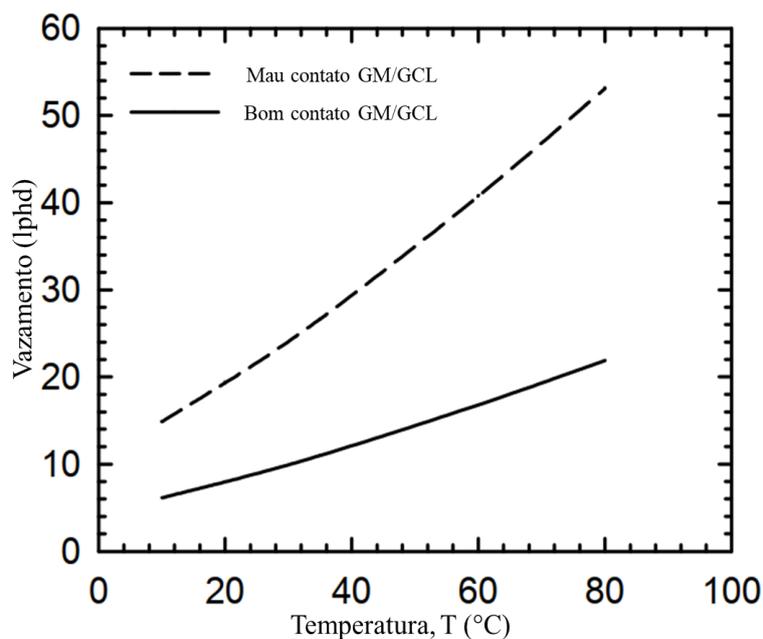


Figura 2.33 - Impacto do vazamento através do furo na emenda da GM/GCL para condições de contato mau e bom (Rowe & Hosney, 2010).

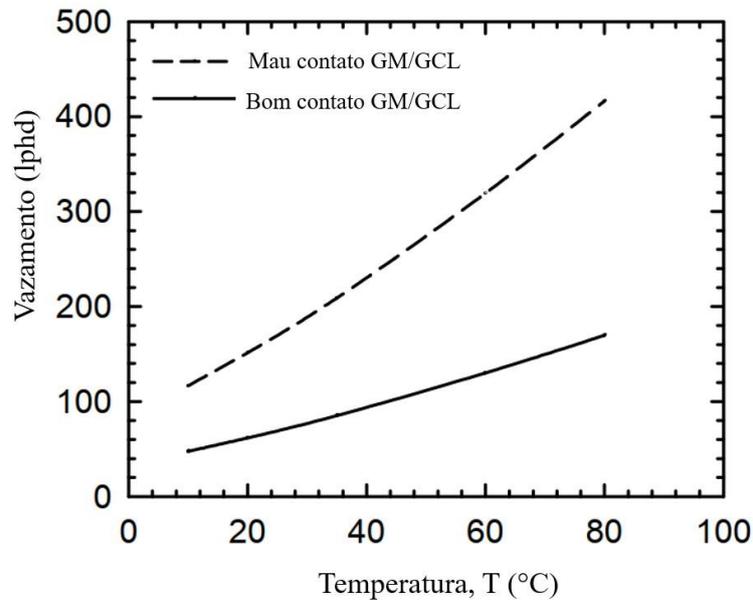


Figura 2.34 - Impacto do vazamento através do furo na emenda da GM/CCL para condições de contato mau e bom (Rowe & Hosney, 2010).

Vertematti (2015) menciona que as variações de temperatura podem causar expansão ou contração das geomembranas, gerando tensões de tração. Portanto, em projetos de engenharia, é importante considerar folgas de instalação para compensar essas possíveis deformações. Durante os testes desta pesquisa, verificou-se que a temperatura pode influenciar o fluxo de água. Por esse motivo, foram realizados alguns testes com aquecimento gradual da água para analisar a vazão em diferentes temperaturas, conforme será abordado posteriormente.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais, os equipamentos utilizados no trabalho e a metodologia aplicada para a realização dos ensaios.

3.1 MATERIAIS ESTUDADOS

3.1.1 Geomembranas - GM

Foram selecionados dois tipos de geomembranas (PVC e PEAD), vindos de fabricantes diferentes, para medir o vazamento através do dano mecânico. As características dos produtos ensaiados estão apresentadas na Tabela 3.1. A geomembrana de PVC foi utilizada anteriormente nos ensaios de Fernandes (2012) e Cardona (2013).

Tabela 3.1 - Especificações das geomembranas de PVC e de PEAD lisa, com 1 mm de espessura.

Propriedades	Unidades	Geomembranas	
		PVC lisa1	PEAD lisa2
Espessura	(mm)	1	1
Densidade (mínima)	(g/cm ³)	1,2	0,94
Tensão de escoamento	(kN/m)	-	15
Tensão na ruptura	(kN/m)	14	27
Alongamento no escoamento	(%)	-	12
Alongamento na ruptura	(%)	350	700
Cristalinidade	(%)	5 a 15 *	< 95 *
Coefficiente linear de expansão térmica - μ	(°C-1)	7 e 25x10-5 *	11 e 13x10-5 *
Resistência ao puncionamento	(N)	±266 *	320

3.1.2 Tipos de danos mecânicos provocados nas geomembranas

Após a realização dos danos mecânicos as suas imagens foram capturadas utilizando uma lupa com lente de aumento para facilitar a visualização das superfícies no centro do dano (ver Figuras 3.1 a 3.10). Como os danos mecânicos de 20 mm e 50 mm foram significativamente maiores em comparação com os danos de 5 mm, as Figuras 3.2 e 3.3 mostram principalmente o corte das extremidades desses danos.

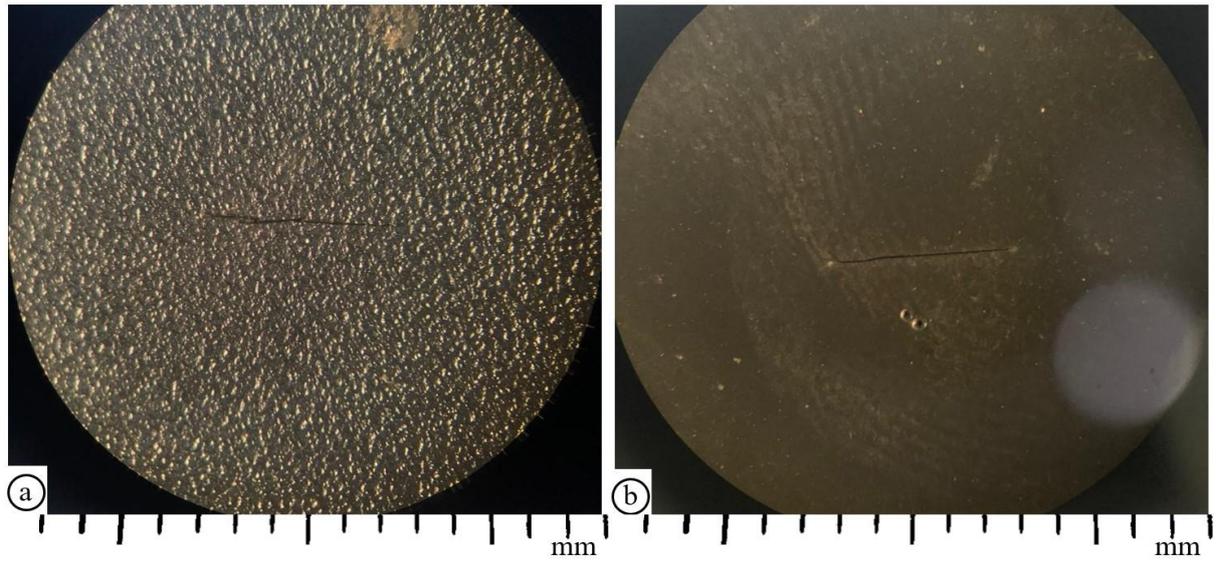


Figura 3.1 - Espécime de GM PVC com corte de 5 mm: a) face superior da geomembrana; b) face inferior da geomembrana (extremidades do dano).

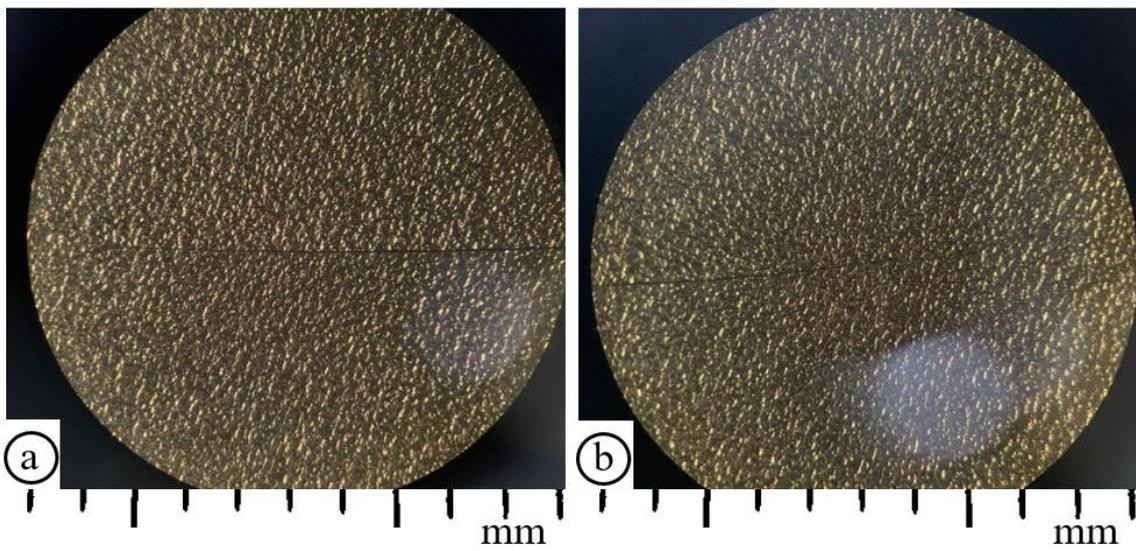


Figura 3.2 - Espécime de GM PVC com corte de 20 mm: a) face superior do lado esquerdo; b) face superior do lado direito (extremidades do dano).

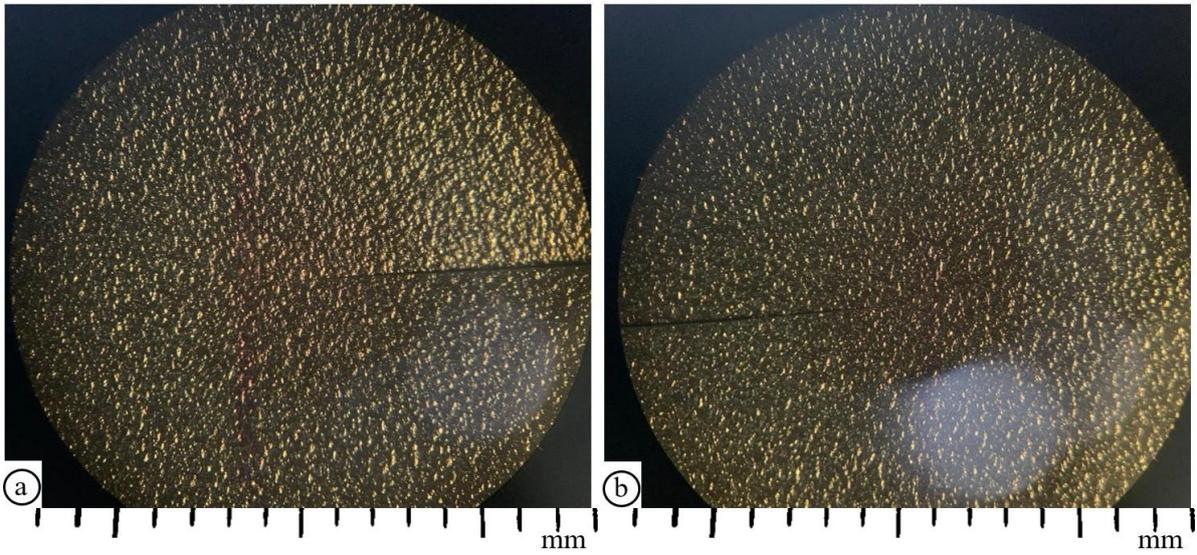


Figura 3.3 - Espécime de GM PVC com corte de 50 mm: a) face superior e lado esquerdo; b) face superior e lado direito (extremidades do dano).

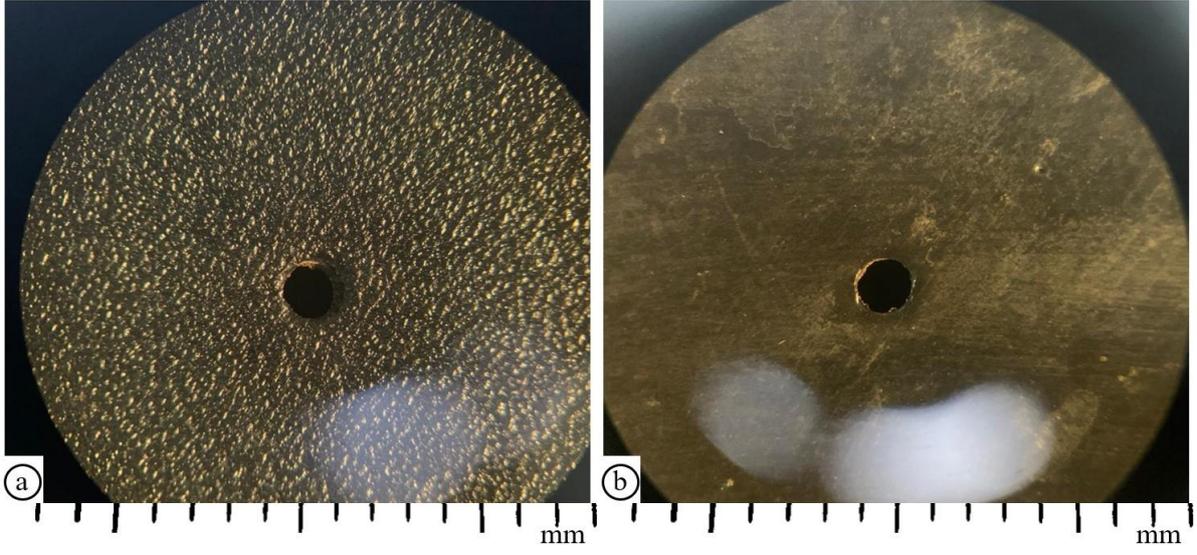


Figura 3.4 - Espécime de GM PVC com furo de 2,2 mm: a) face superior; b) face inferior.

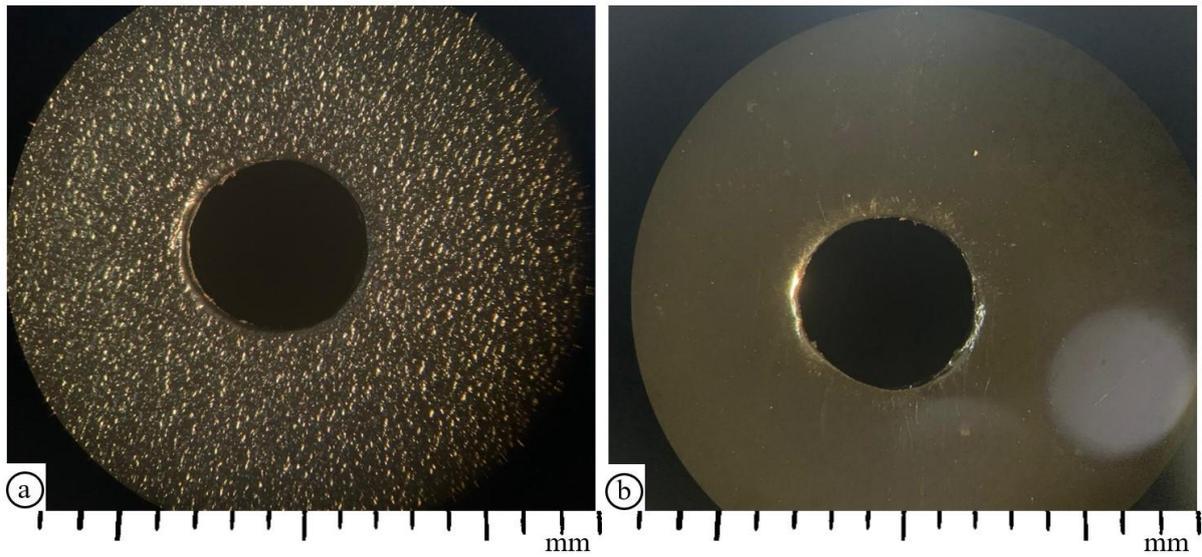


Figura 3.5 – Espécime de GM PVC com furo de 5 mm: a) face superior; b) face inferior.

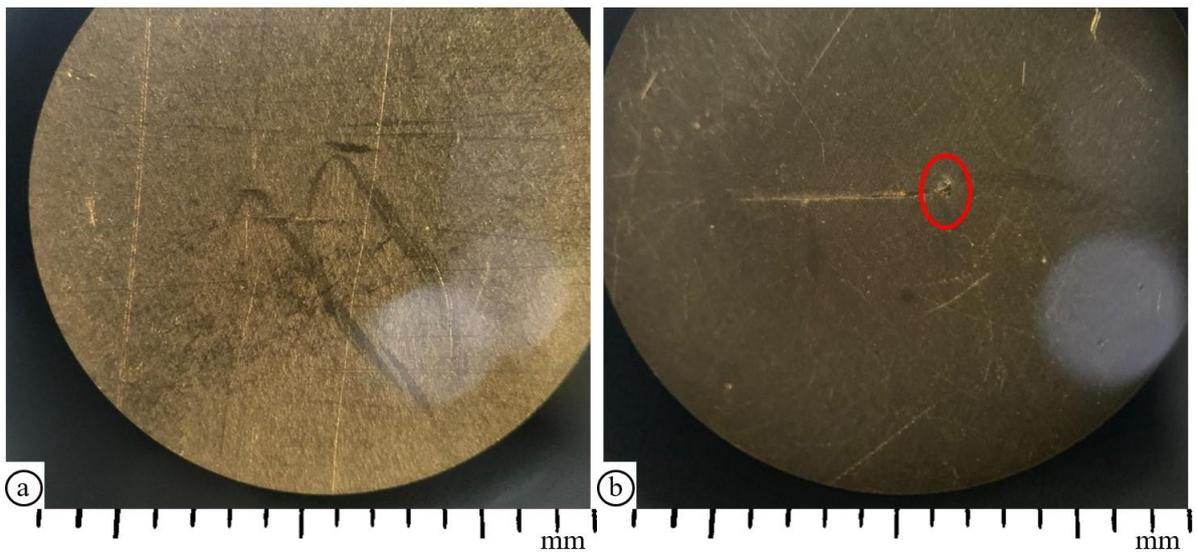


Figura 3.6 - Espécime de geomembrana de PEAD com corte de 5 mm: a) face superior do espécime; b) face inferior do espécime, onde pode-se observar um defeito localizado na borda direita, o que pode intensificar o fluxo de água.

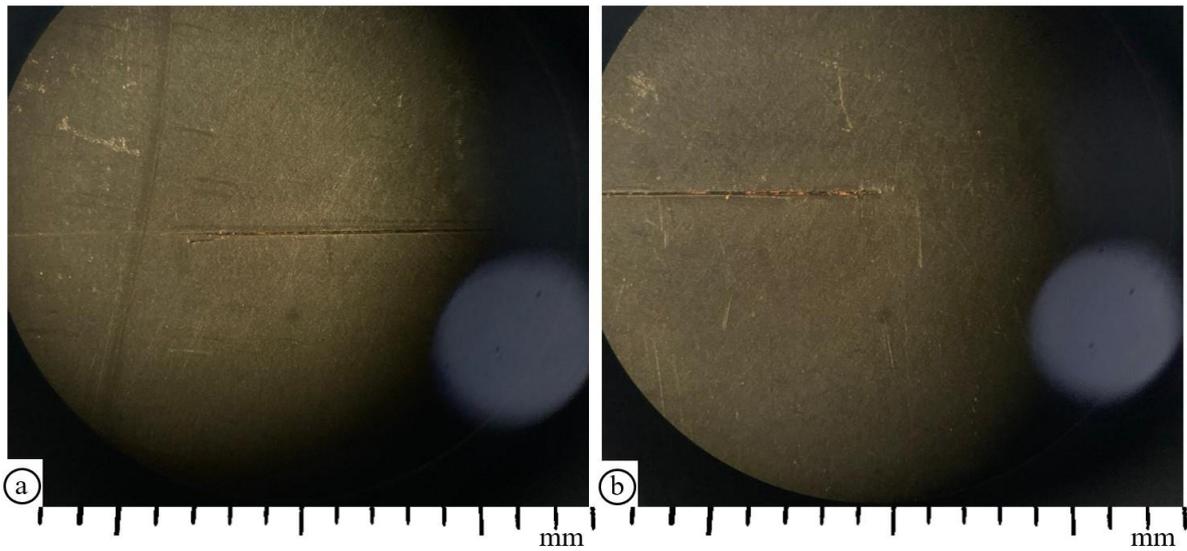


Figura 3.7 - Espécime de GM PEAD com corte de 20 mm: a) face superior do lado esquerdo; b) face superior do lado direito (extremidades do dano).

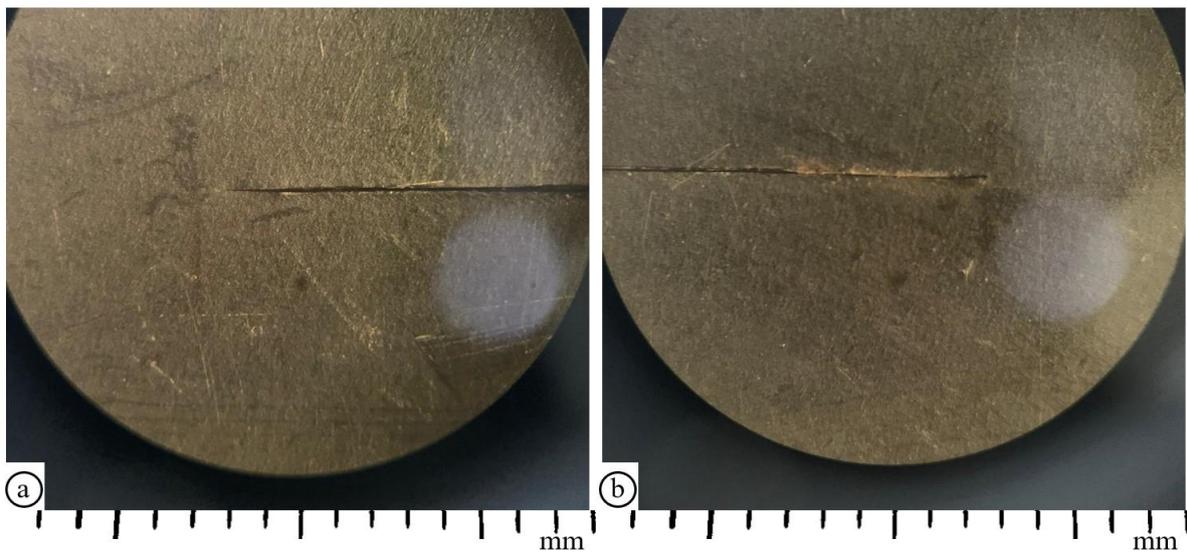


Figura 3.8 - Espécime de GM PEAD com corte de 50 mm: a) face superior do lado esquerdo; b) face superior do lado direito (extremidades do dano).

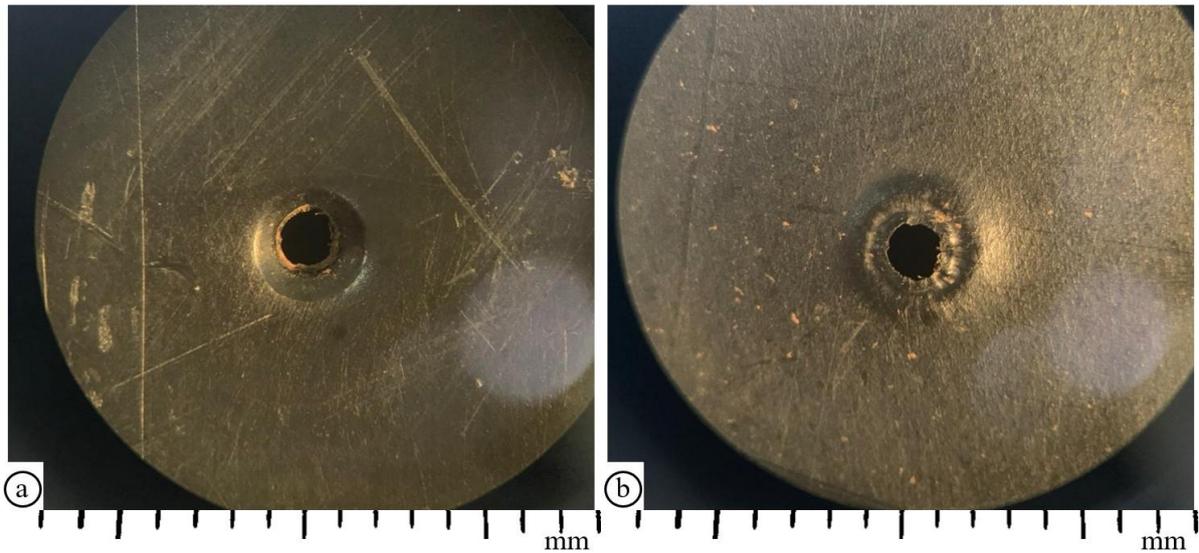


Figura 3.9 - Espécime de geomembrana PEAD com furo de 2,2 mm, onde o extravasor causou uma depressão na borda do dano que pode intensificar o vazamento pelo furo: a) face superior, b) face inferior.

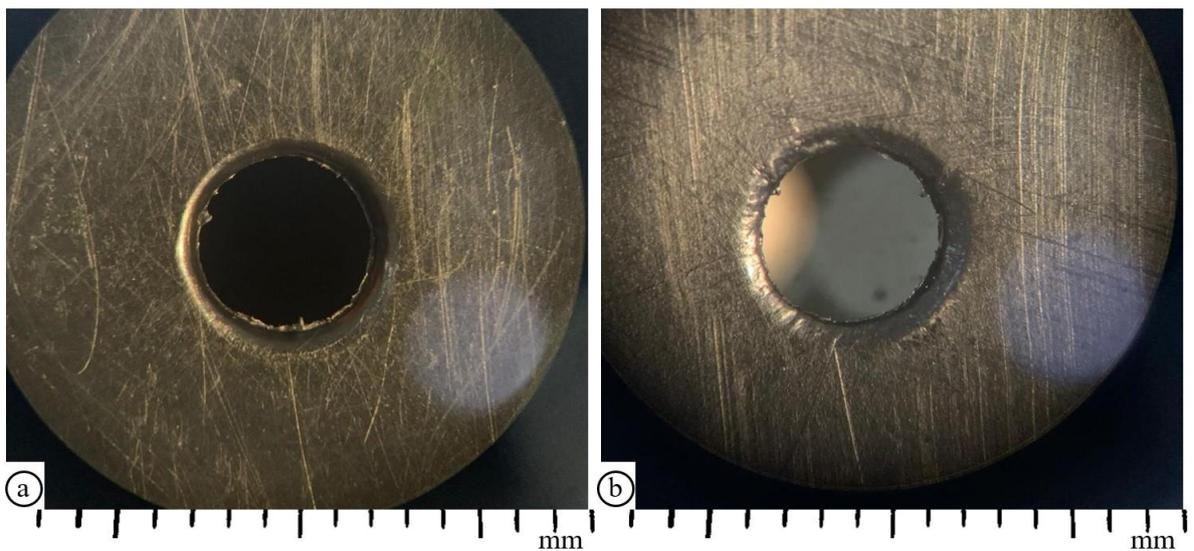


Figura 3.10 - Espécime de geomembrana de PEAD com furo de 5 mm apresentando leve depressão na borda do furo: a) face superior da GM; b) face inferior da GM.

3.1.3 Geotêxteis - GT

Foram escolhidos dois tipos de geotêxteis não tecidos, com diferentes gramaturas, provenientes do mesmo fabricante, para avaliar a influência de suas características quando utilizados como material de proteção sob a geomembrana. Esses materiais podem ser empregados no fundo de canais, lagoas de contenção e áreas de disposição de resíduos em conjunto com argila compactada sob a geomembrana.

A Tabela 3.2 apresenta as principais características dos geotêxteis utilizados na pesquisa. Os geotêxteis com gramaturas de 200 g/m² e 900 g/m² foram fabricados com fibras de alta resistência de poliéster (PET), por meio de extrusão própria. A Figura 3.11 mostra os geotêxteis não tecidos utilizados na pesquisa.

A nomenclatura utilizada para identificação dos geotêxteis não tecidos (GTs) segue o seguinte padrão:

- GT200 indica que foi utilizado um geotêxtil não tecido com gramatura de 200 g/m² (ver Figuras 3.11a e 3.12a);
- GT900 indica que foi utilizado um geotêxtil não tecido com gramatura de 900 g/m² (ver Figuras 3.11b e 3.12b).

Tabela 3.2 - As principais características dos GTs (Dados dos fabricantes).

Propriedades	Material	GT200	GT900
Físicas	Cor	cinza	cinza
	Espessura (mm)	2,4	5,5
	Gramatura (g/m ²)	200	900
Mecânicas	Tração faixa larga - T (kN/m)	10	46
	Alongamento - T (%)	>50	>50
	Puncionamento (N)	345	1200
Hidráulicas	Permeabilidade (cm/s)	0,49	0,29
	Permissividade (s ⁻¹)	2	0,53
Durabilidade	Resistência Raios UV 500h (%)	>70	>70

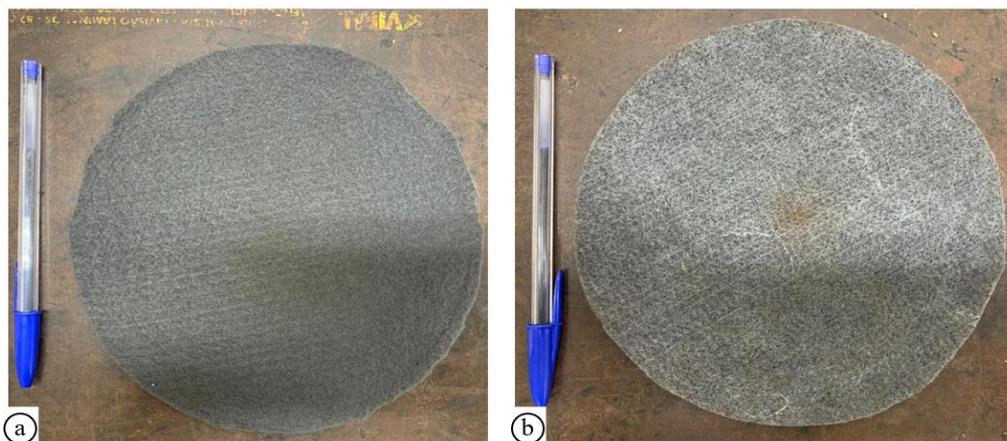


Figura 3.11 - Geotêxteis: a) geotêxtil de 200 g/m²; b) geotêxtil de 900 g/m².

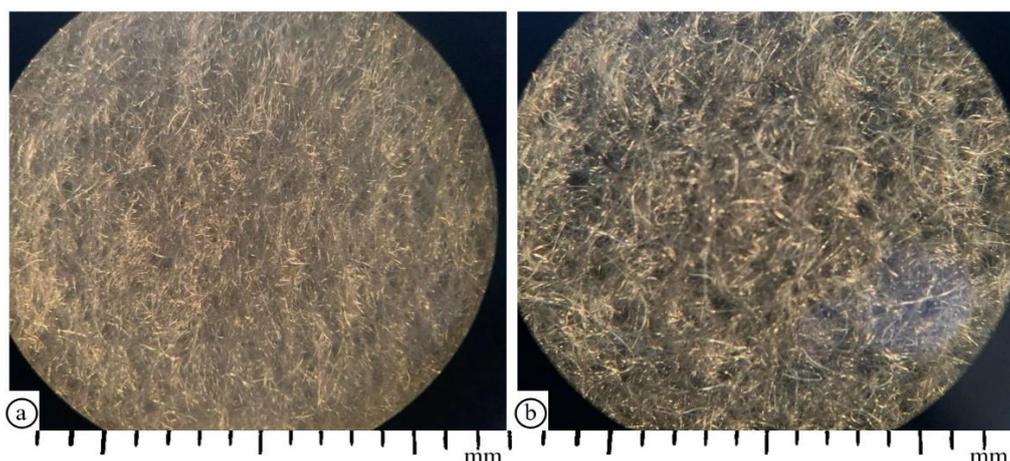


Figura 3.12 - Imagens de espécimes de geotêxteis não tecidos utilizando uma lupa com lente de aumento: a) amostra de GT200 g/m²; b) amostra de GT900 g/m².

3.1.4 Geocomposto bentonítico – GCL

Foram escolhidos dois tipos de geocompostos bentoníticos (GCLs) de alto desempenho e com bentonita sódica em suas composições, de diferentes fabricantes, para verificar a influência de suas características e eficiência na redução de vazamentos através de danos mecânicos na geomembrana. Os geotêxteis (tanto tecidos quanto não tecidos) utilizados na fabricação desses GCLs foram unidos pela técnica de agulhagem.

O GCL-A, do primeiro fabricante, foi produzido com um núcleo de bentonita sódica em pó entre dois geotêxteis. A camada superior possui um geotêxtil não tecido de polipropileno e a camada inferior um geotêxtil tecido. Viana (2007) realizou alguns ensaios com este GCL-A (ver Figuras 3.13a e 3.13b). O GCL-B, do segundo fabricante, é composto por dois geotêxteis (face superior por um geotêxtil não tecido e face inferior por um geotêxtil tecido) e um núcleo composto por bentonita sódica granulada (ver Figuras 3.13c e 3.13d).

Na Figura 3.14, as amostras são examinadas com uma lente de aumento, exibindo as características da superfície. A Figura 3.14a mostra a superfície superior da amostra utilizando geotêxtil não tecido, enquanto a Figura 3.14b mostra a aplicação de geotêxtil tecido como material subjacente do geocomposto. Na Figura 3.15 uma perspectiva mais detalhada da amostra GCL-B é apresentada, representando as superfícies superior e inferior. Além disso, a Figura 3.16 fornece uma visão aprimorada das amostras de bentonita de sódio em pó e bentonita de sódio granulada.

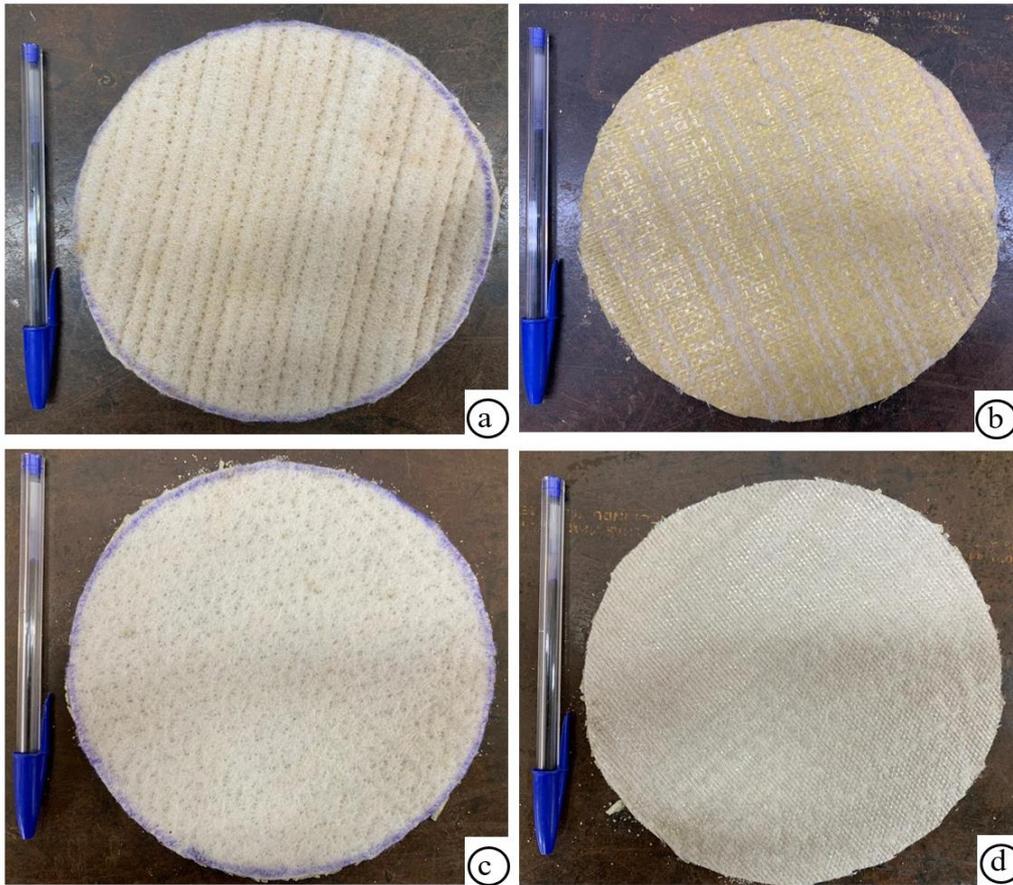


Figura 3.13 - GCLs: a) Superfície superior de GCL-A com geotêxtil não tecido, b) Superfície inferior de GCL-A com geotêxtil tecido, c) Superfície superior de GCL-B com geotêxtil não tecido e d) Superfície inferior de GCL-B com uso de geotêxtil tecido.

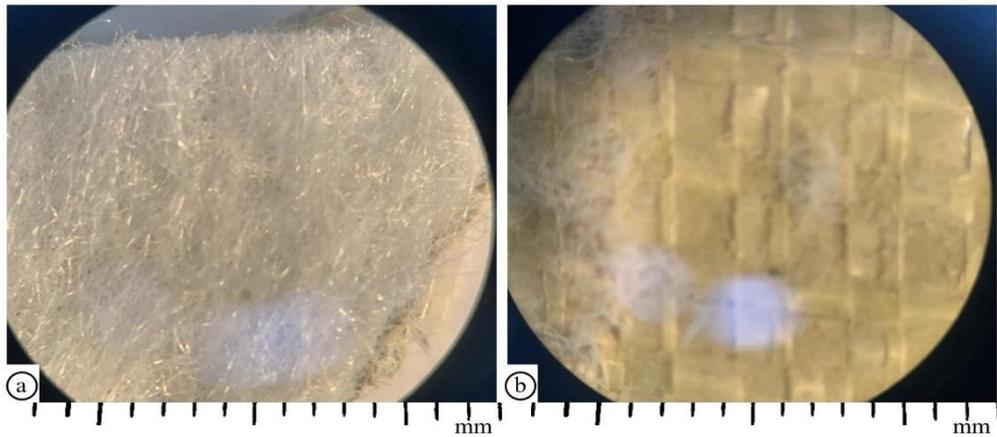


Figura 3.14 - Geocomposto GCL-A: a) face superior do geocomposto; b) face inferior do geocomposto.

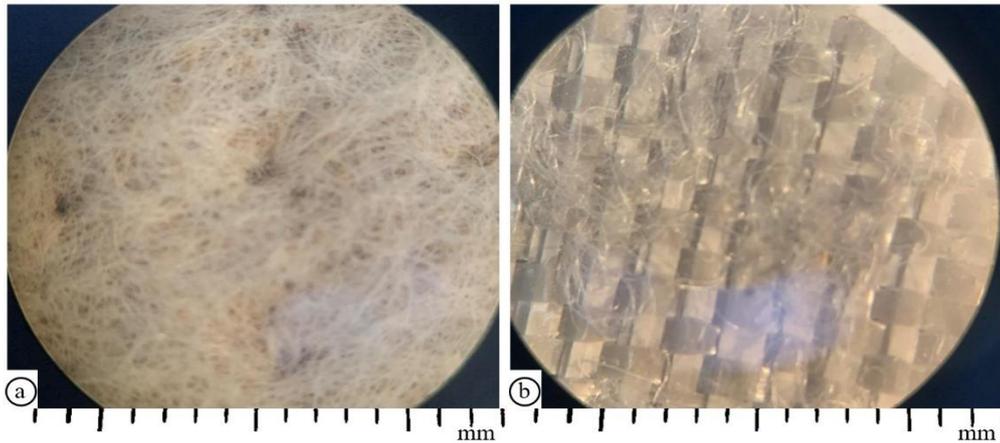


Figura 3.15- Geocomposto GCL-B: a) face superior do geocomposto; b) face inferior do geocomposto.



Figura 3.16 - Amostra de bentonitas: a) bentonita sódica em pó (GCL-A); b) bentonita sódica granulada (GCL-B).

Durante a pesquisa, foram produzidos mais três tipos de geocompostos no laboratório para verificar sua influência na redução do vazamento através do dano mecânico na geomembrana. O GCL-C é composto por duas camadas externas de geotêxtil com gramatura de 200 g/m^2 , com um núcleo de bentonita sódica em pó retirado de uma amostra de GCL-A (primeiro fabricante). No GCL-C não houve união dos materiais de cobertura e base. O GCL-D é composto por uma camada de base utilizando o geotêxtil não tecido de 200 g/m^2 , com um núcleo de bentonita sódica em pó retirado de uma amostra de GCL-A (primeiro fabricante). No GCL-D não houve união entre o material de base e núcleo. Já o GCL-E é composto por uma camada de base empregando o geotêxtil não tecido de 200 g/m^2 , com uma camada superior de bentonita sódica granulada (segundo fabricante) proveniente de uma amostra de GCL-B que foi cortada em

círculo com 16 cm de diâmetro, sem união dos materiais pela técnica de agulhagem. A Tabela 3.3 apresenta as principais características das bentonitas dos geocompostos ensaiados com as geomembranas danificadas.

Tabela 3.3 – Características principais dos geocompostos estudados (GCL-A e GCL-B).

Material	GCL-A	GCL-B
Espessura (mm)	7	10
Processo de manufatura	agulhagem	agulhagem
Massa por superfície (umidade natural) (g/m ²)	5000,00	7000,00
Massa por superfície (umidade seca) (g/m ²)	4335,00	5839,40
Condutividade hidráulica (m/s)	2×10^{-11}	3×10^{-11}
Umidade natural (%)	13,30	16,58

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 Sistema de ensaio

O equipamento utilizado para os ensaios desta pesquisa é composto por três sistemas interconectados: o sistema ar-água, a célula de ensaio e o sistema de aquisição automática de dados. A célula de ensaio (Figura 3.17a) permite quantificar a perda de líquido através do dano na geomembrana sob pressão no líquido (água) de até 800 kPa (\approx 80 m de coluna d'água) (Cardona, 2013).

A Figura 3.17b apresenta um esboço do sistema de ensaio, mostrando as seções em corte (A e B). A Figura 3.18 apresenta detalhes das seções A e B (Figura 3.17b). Pode-se observar nos cortes que há uma conexão entre os sistemas, desde a entrada de ar pressurizado na válvula reguladora de pressão, passando por uma mangueira de alta pressão, até chegar ao reservatório de água. Por fim, a água pressurizada passa por outra mangueira de alta pressão até chegar à célula de ensaio. A Figura 3.19 apresenta os equipamentos utilizados para os ensaios de vazamentos devido a danos em geomembranas no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília - UnB.

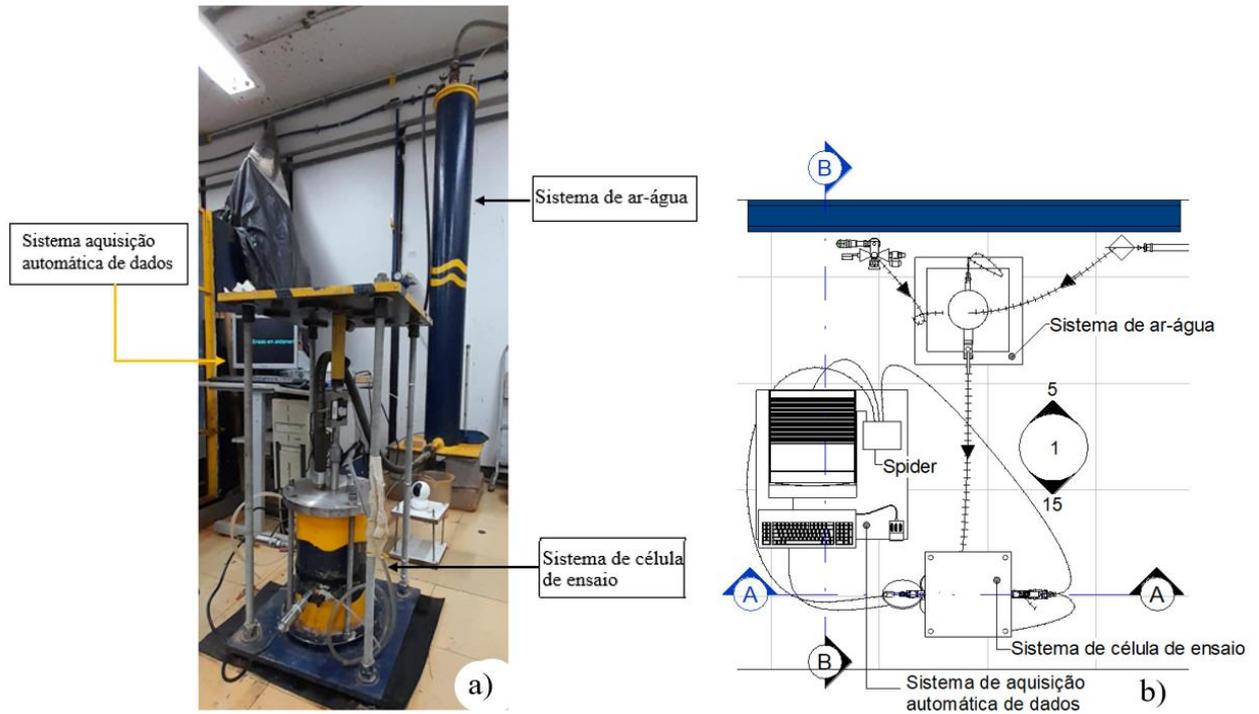


Figura 3.17 - Área dos equipamentos: a) vista geral; b) croqui do local.

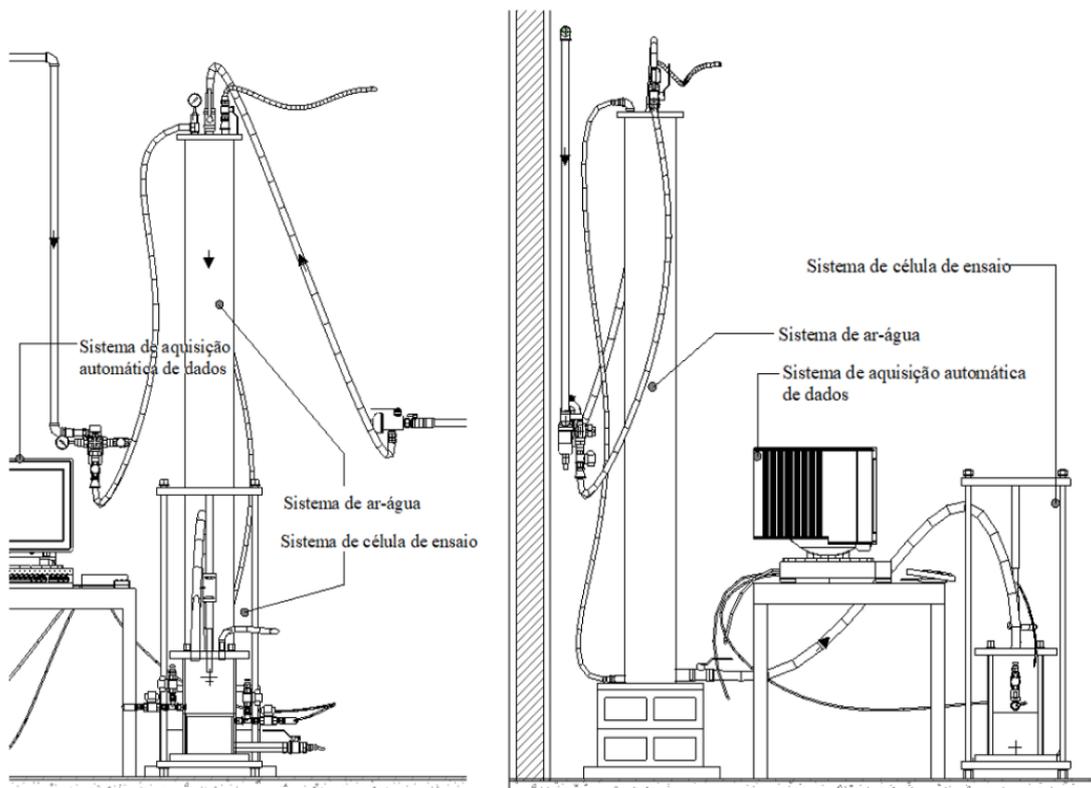


Figura 3.18 - Sistema de ensaio: a) seção de corte A-A; b) seção de corte B-B.

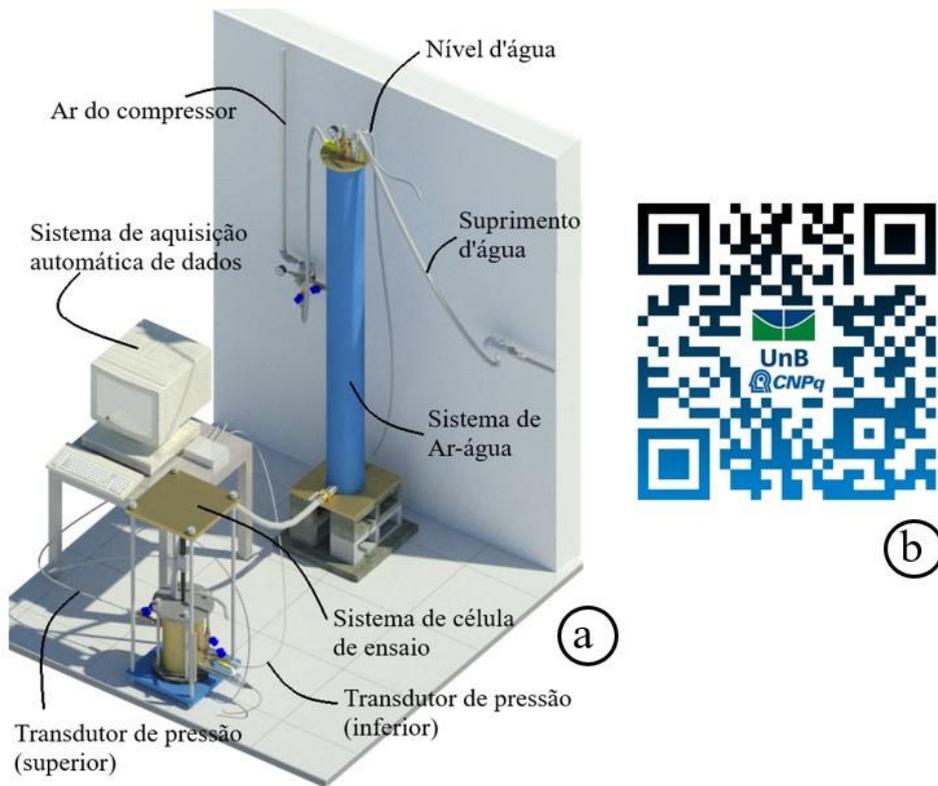


Figura 3.19 - Equipamento utilizado na pesquisa: a) Detalhe isométrico; b) aponte a câmera para o QR Code e visualize o equipamento em 3D.

3.2.1.1 Sistema de ar-água

O sistema ar-água possui um reservatório de água com diâmetro de aproximadamente 22 cm e altura de 2 m, com conexões inferiores para mangueira de saída de água, indicação de nível d'água e conexões superiores para entrada de ar pressurizado, entrada de água filtrada e ladrão para retirada de bolhas de ar e alívio de pressão. A poropressão inicial é de 20 kPa (Equação 13), devido à altura de coluna d'água no sistema ar-água quando cheio, e, para acréscimos de pressão acima desse valor, é realizada a regulagem da válvula de pressão de ar. A pressão real é medida pelo transdutor superior da célula de ensaio (Equação 14).

$$u_i = \gamma_a \times h \quad (13)$$

$$u_r = u_i + u_a \quad (14)$$

onde u_i é a pressão inicial na água, u_a é a pressão de ar a ser ajustada na válvula, u_r é a pressão real de ensaio, γ_a é o peso específico da água e h é a altura de coluna d'água no sistema ar-água.

O ar comprimido é fornecido por um compressor da marca Schulz (com capacidade máxima de 1.200 kPa) e passa por um filtro com dreno de dupla ação e válvula reguladora de pressão da marca Arprex.

3.2.1.2 Célula de ensaio

A célula de ensaio composta por um cilindro bipartido, dividido em cilindros superior e inferior, com diâmetro externo de 20,2 cm, diâmetro interno de 18,5 cm e espessura de 1,7 cm (ver Figura 3.20a). A célula possui quatro barras rosqueadas que promovem o travamento e pressionam os anéis o-rings nas junções do equipamento para evitar vazamentos.

O cilindro superior contém o líquido que escoar através do dano na GM, instalada no meio do equipamento. Já o cilindro inferior possui uma saída de água que direciona o líquido que percola através do dano na geomembrana até o recipiente de coleta, permitindo o cálculo da vazão. As pressões geradas na célula de ensaio são monitoradas pelo sistema de aquisição automática de dados (Figura 3.20).

O detalhe E da Figura 3.20b mostra a seção da GM, o prato, o cilindro vazado e o defeito na GM. Caso seja necessário alterar a configuração dos ensaios, como ensaiar um sistema GM/GCL/CCL ou GM/CCL, é possível trocar o cilindro interior vazado por outro com altura menor para alinhar a GM no meio do equipamento. Para realizar o ensaio GM/GCL, é possível alterar apenas o prato de apoio da GM, pois o equipamento possui dois pratos (com 1 cm e 1,5 cm de altura) para essa finalidade.

A célula de carga no topo da célula de ensaio permite medição de forças, caso se deseje realizar ensaios com aplicação de tensões verticais. As pressões na água são medidas pelos transdutores de pressão (um sobre a geomembrana e outro abaixo da geomembrana). Os transdutores de pressão são da marca Micro Sensores Industrial, modelo MST-2-1-1500 kPa. A fim de permitir a captação de sinais confiáveis, a célula de carga (capacidade máxima de 20 kN) foi calibrada para a compressão no Laboratório de Engenharia Mecânica da UnB. Foi utilizado o aquisitor de dados Spider 8, da marca HBM, cujos sinais em mV/V são transferidos para o software Catman 4.5 e em seguida tratados.

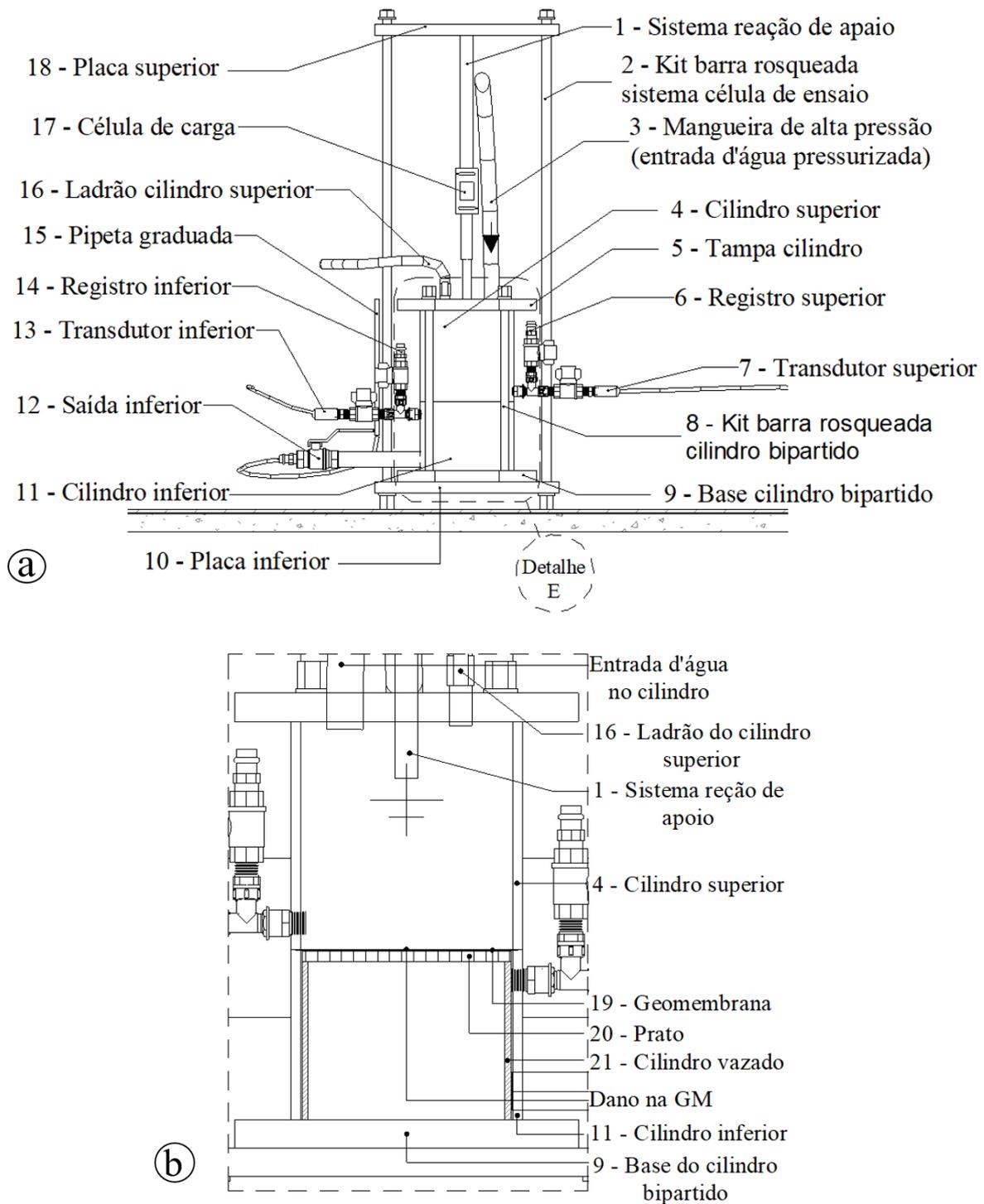


Figura 3.20 - Sistema célula de ensaio: a) vista C; b) detalhe E no interior da célula.

3.2.1.3 Outros equipamentos

Além dos equipamentos descritos anteriormente, outros componentes foram utilizados na pesquisa:

- Câmera de monitoramento 360°, modelo Tapo C200, da marca TP Link;

- Lâmpada LED, para facilitar o monitoramento e quantificação dos volumes efluentes no período noturno, se necessário;
- Termo-higrômetro, modelo AK172, da marca AKSO;
- Software Silicon Laboratories CP210 para registro da temperatura e umidade relativa do ar;
- Balança analítica.

3.2.2 Instrumentação

3.2.2.1 Calibração da célula de carga

Nesta pesquisa, a célula de carga foi usada para monitorar as cargas de reação devido à pressão de água no interior do equipamento e, portanto, foi necessária sua calibração, a fim de garantir que os resultados fossem confiáveis. A Figura 3.21 apresenta o equipamento usado na calibração da célula de carga e a Figura 3.22 mostra o resultado da calibração da célula de carga.



Figura 3.21 - Calibração da célula de carga no Laboratório de Engenharia Mecânica da UnB.

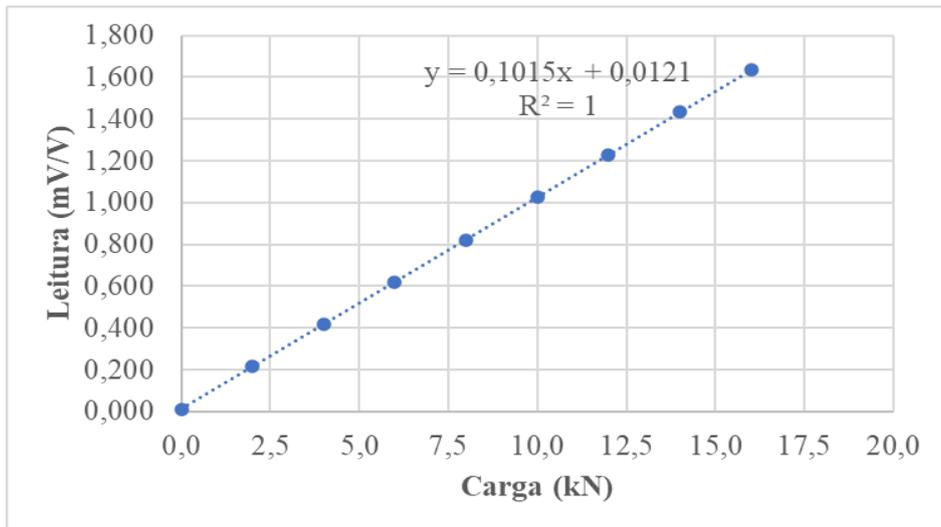


Figura 3.22 - Gráfico de calibração da célula de carga.

3.2.2.2 Calibração dos transdutores de pressão

A calibração dos transdutores de pressão foi realizada no Laboratório de Geotecnia da UnB, utilizando o aquisitor de dados Spider 8 para registrar os dados. O equipamento utilizado para a calibração é apresentado na Figura 3.23. As Figuras 3.24 e 3.25 mostram os resultados da calibração dos transdutores de pressão.



Figura 3.23 - Equipamento padrão de controle de pressão e volume GDS para calibração dos transdutores de pressão.

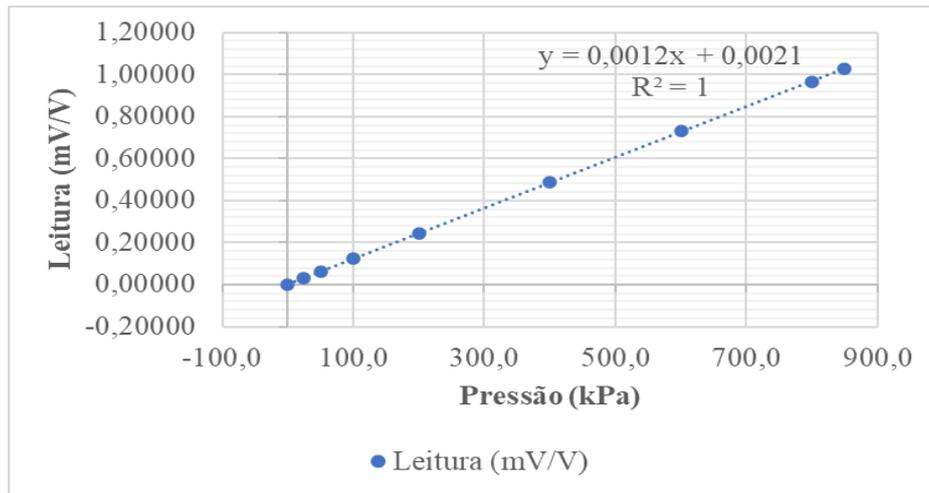


Figura 3.24 - Gráfico de calibração do transdutor inferior.

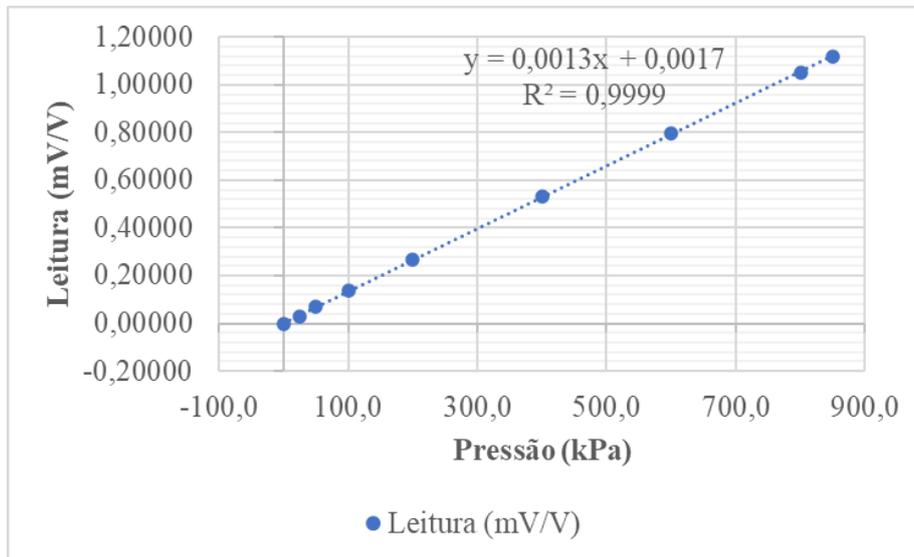


Figura 3.25 - Gráfico de calibração do transdutor superior.

3.2.2.3 Calibração dos termômetros

Foram calibrados quatro termômetros digitais e dois termômetros manuais que foram utilizados nos ensaios com variação de temperatura. A calibração dos termômetros foi realizada utilizando o Banho Termostático Julabo, que permite a aplicação de diversas faixas de temperaturas de trabalho variando entre -28 e +100°C. As leituras foram adquiridas em ohm e transformadas em temperatura (°C) pela correlação da temperatura padrão obtida pela sonda externa TP 100, de aço inoxidável. O controlador de temperatura permite a alteração da temperatura e a leitura obtida em ohm pode ser observada no monitor do multímetro digital (Figura 3.26). O

equipamento utilizado pertence ao laboratório de Termociência e Metrologia Dinâmica da Faculdade de Tecnologia da UnB.



Figura 3.26 - Equipamento de banho termostático utilizado para a calibração dos termômetros. O equipamento é composto por: 1) multímetro digital, 2) controlador de temperatura, 3) banho termostático, 4) termômetros digitais e 5) termômetros manuais.

3.3 PROGRAMA DE ENSAIOS

De forma geral, na pesquisa foram realizados os seguintes ensaios:

- Ensaios de vazamento através de danos mecânicos em geomembranas de PVC e PEAD;
- Ensaios de variação de temperatura com e sem dano mecânico nas geomembranas de PVC e PEAD;
- Ensaios de variação de temperatura em alguns ensaios com dano mecânico, após a aplicação da pressão de 800 kPa. Para isso, foram utilizadas duas lâmpadas refletoras incandescentes de infravermelho para aumentar a temperatura;

Inicialmente, foram realizados 28 ensaios para medir a vazão através de danos em geomembranas de PVC e PEAD. Para isso, utilizou-se um estilete para provocar danos

mecânicos lineares e um vazador de aço para criar danos circulares (furos) nas geomembranas. As características desses ensaios estão descritas na Tabela 3.4. Durante os ensaios, foram monitoradas variações de temperatura com o uso de termômetros elétricos, embora essas variações tenham sido pequenas. As vazões de saída foram corrigidas utilizando a relação entre a viscosidade da água na temperatura do ensaio e a viscosidade da água a 20°C, conforme descrito na metodologia no item 3.3.4. Ensaios de vazamento através de cortes provocados por estilete em geomembranas de PVC também foram realizados por Cardona (2013). Nesses ensaios, não foi utilizada uma camada de solo sob a geomembrana, sendo utilizada uma placa metálica como base.

Tabela 3.4- Programa de ensaios iniciais de vazamentos em geomembranas.

Descrição	Tipo de geomembrana	Material de interface	Ferramenta de mão	Tipo do dano (mm)
PVC-PM-C5	PVC	Prato metálico	estilete	corte de 5
PVC-PM-C20	PVC	Prato metálico	estilete	corte de 20
PVC-PM-C50	PVC	Prato metálico	estilete	corte de 50
PVC-PM-F2,2	PVC	Prato metálico	vazador	furo de 2,2
PVC-PM-F5	PVC	Prato metálico	vazador	furo de 5
PVC-GT200-C50	PVC	GTX200	estilete	corte de 50
PVC-GT200-F2,2	PVC	GTX200	vazador	furo de 2,2
PVC-GT200-F5	PVC	GTX200	vazador	furo de 5
PVC-GT900-C50	PVC	GTX900	estilete	corte de 50
PVC-GT900-F2,2	PVC	GTX900	vazador	furo de 2,2
PVC-GT900-F5	PVC	GTX900	vazador	furo de 5
PVC-GCL-A-C50	PVC	GCL-A	estilete	corte de 50
PVC-GCL-A-F2,2	PVC	GCL-A	vazador	furo de 2,2
PVC-GCL-A-F5	PVC	GCL-A	vazador	furo de 5
PEAD-PM-C5	PEAD	Prato metálico	estilete	corte de 5
PEAD-PM-C20	PEAD	Prato metálico	estilete	corte de 20
PEAD-PM-C50	PEAD	Prato metálico	estilete	corte de 50
PEAD-PM-F2,2	PEAD	Prato metálico	vazador	furo de 2,2
PEAD-PM-F5	PEAD	Prato metálico	vazador	furo de 5
PEAD-GT200-C50	PEAD	GTX200	estilete	corte de 50
PEAD-GT200-F2,2	PEAD	GTX200	vazador	furo de 2,2
PEAD-GT200-F5	PEAD	GTX200	vazador	furo de 5
PEAD-GT900-C50	PEAD	GTX900	estilete	corte de 50
PEAD-GT900-F2,2	PEAD	GTX900	vazador	furo de 2,2
PEAD-GT900-F5	PEAD	GTX900	vazador	furo de 5
PEAD-GCL-A-C50	PEAD	GCL-A	estilete	corte de 50

PEAD-GCL-A-F2,2	PEAD	GCL-A	vazador	furo de 2,2
PEAD-GCL-A-F5	PEAD	GCL-A	vazador	furo de 5

Depois de realizar os testes apresentados anteriormente, observou-se que o dano mecânico mais crítico foi o furo de 5 mm. Realizaram-se alguns ensaios complementares para este padrão de dano, cujas características são apresentadas na Tabela 3.5. Uma visão geral da sequência de realização dos ensaios é apresentada no fluxograma da Figura 3.27.

Tabela 3.5 - Ensaios complementares de vazamentos.

Descrição	Tipo de geomembrana	Material de interface	Ferramenta de mão	Tipo do dano (mm)
PVC-GCL-B-F5	PVC	GCL-B	vazador	furo de 5
PVC-GCL-C-F5	PVC	GCL-C	vazador	furo de 5
PVC-GCL-D-F5	PVC	GCL-D	vazador	furo de 5
PVC-GCL-E-F5	PVC	GCL-E	vazador	furo de 5
PEAD-GCL-B-F5	PEAD	GCL-B	vazador	furo de 5
PEAD-GCL-C-F5	PEAD	GCL-C	vazador	furo de 5
PEAD-GCL-D-F5	PEAD	GCL-D	vazador	furo de 5

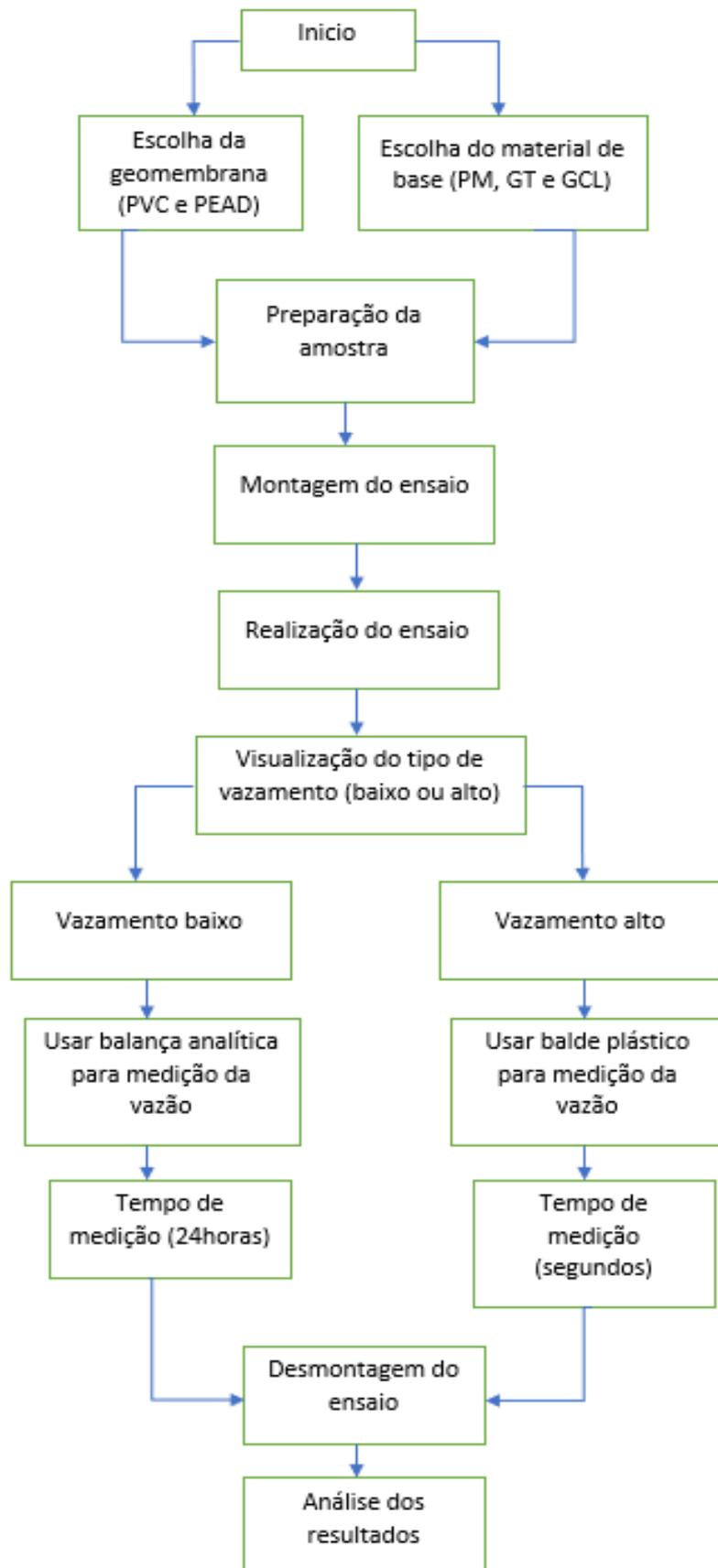


Figura 3.27 - Fluxograma geral dos ensaios de vazamentos através do dano em geomembrana.

3.3.1 Preparação das amostras

3.3.1.1 Geomembrana – GM

As amostras de geomembrana foram cortadas inicialmente em tamanho de 30 x 30 cm para facilitar o corte final em círculos de 20 cm de diâmetro, de acordo com as dimensões internas do equipamento.

Foi utilizado um estilete para produzir danos mecânicos lineares de 5 mm, 20 mm e 50 mm, seguindo o método empregado por Cardona (2013) nos ensaios com geomembranas de PVC. Para fins de comparação de resultados, também foi testada uma geomembrana de PEAD. A Figura 3.28 ilustra como foram feitos os cortes lineares.

Um vazador de aço foi usado para criar danos circulares com diâmetros de 2,2 mm e 5 mm, deixando cair um peso de aço de 1,0 kg de uma altura de 20 cm sobre o vazador. Foi utilizado o mesmo método empregado anteriormente por Cardona (2013) para furar as geomembranas de PVC. As Figuras 3.29 e 3.30 ilustram a metodologia usada para criar os furos nas amostras de geomembrana de PVC e PEAD.

Fox et al. (2012) observaram danos circulares causados por cisalhamento em geomembranas sob a camada de argila compactada que continham porcentagens de cascalho entre 5 e 30 mm de diâmetro. Com base nesses estudos, para fins de comparação entre danos de corte ou por furo, decidiu-se começar os estudos dessa pesquisa com furos a partir de diâmetros de 2,2 e 5 mm.

Ao realizar os ensaios com danos de 2,2 mm e 5 mm, verificou-se que foi difícil medir as elevadas vazões, sendo necessário usar recipientes plásticos para coletar e medir a vazão. Como o sistema ar-água tinha capacidade limitada de armazenamento, não foi possível trabalhar com furos maiores que 5 mm.



Figura 3.28 - Espécime de geomembrana de PVC: a) corte linear de 50 mm (mensuração do tamanho do dano com paquímetro; b) realização do corte com estilete.

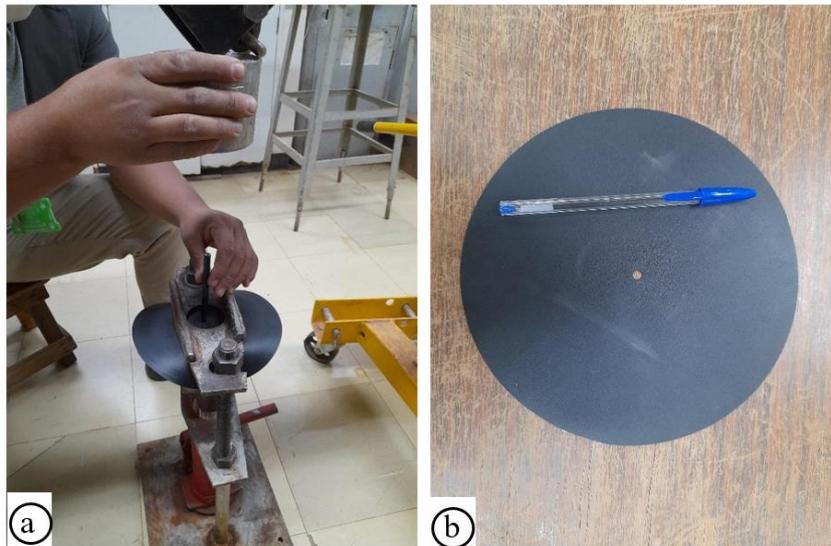


Figura 3.29 - Espécime de geomembrana PVC: a) realização do furo na geomembrana utilizando um vazador de aço no centro da amostra; b) amostra de geomembrana após o furo.



Figura 3.30 – Vazadores utilizados para provocar danos por furos em geomembranas: a) vazador com furo de \varnothing 2,2 mm; b) vazado com furo de \varnothing 5 mm.

3.3.1.2 Ensaio sem aplicação de silicone na borda do GCL

Vários testes de vazamento foram conduzidos através de danos em amostras de geomembranas sobre GCL sem a aplicação de silicone ao seu redor para verificar a influência no processo de cicatrização do dano mecânico. Observou-se que há perda de bentonita em pó por vias preferenciais no fluxo de água. Em geral, foram observados vazamentos acima de $10E+1$ ml/s, com um volume total de água passando pelo dano mecânico superior a $10E+3$ ml (ver Figura 3.31).

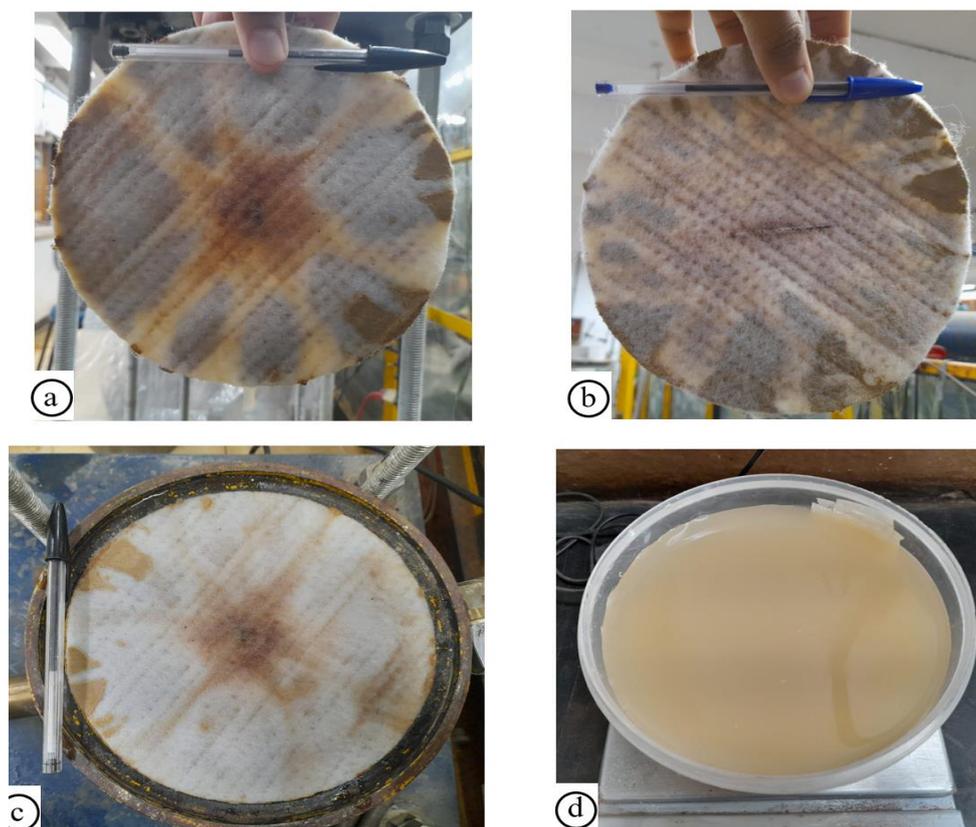


Figura 3.31 - Ensaio de vazamento através de dano mecânico em geomembrana: a) ensaio de vazamento através de furo de 5 mm em geomembrana de PEAD; b) ensaio de vazamento através de corte de 50 mm em geomembrana de PEAD; c) amostra de GCL após o ensaio; d) coleta de água após o ensaio.

3.3.1.3 Geocomposto bentonítico – GCL

A seguir, são descritos o procedimento e preparação dos geocompostos de GCL-A, GCL-B e GCL-C:

- As amostras foram cortadas em formato de disco, com 16,0 cm de diâmetro, para que pudessem ser colocadas sobre o prato metálico;
- Cada amostra foi pesada para registrar a massa por unidade de área;
- O contorno da amostra foi colocado com silicone e deixou-se curar por pelo menos 12 horas para dificultar a perda de bentonita durante o ensaio, conforme sugerido por Mendes (2010) (Figura 3.32).

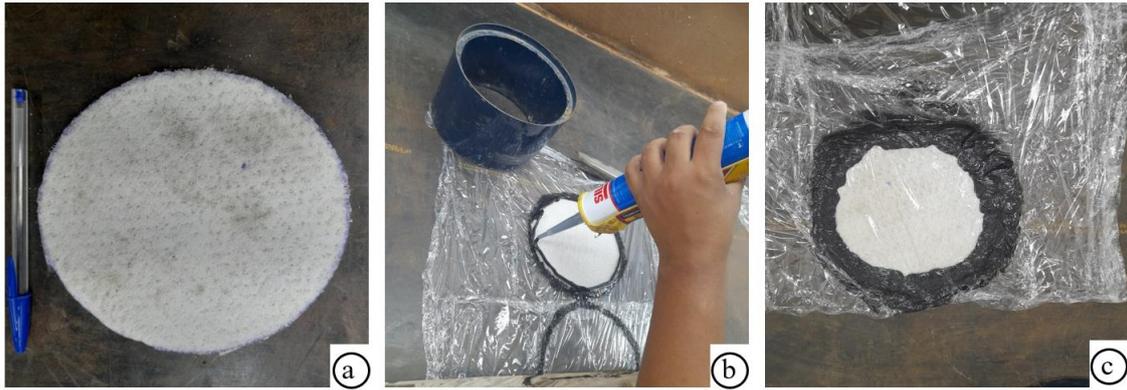


Figura 3.32 - Preparação dos corpos de prova de GCLs: a) corte da amostra em forma de disco com diâmetro de 16 cm; b) aplicação de silicone no contorno da amostra; c) aguardo da cura do silicone por pelo menos 12 horas.

O GCL-D é composto por uma camada inferior de geotêxtil não tecido de 200 g/m² com diâmetro de 16 cm e uma camada superior de bentonita em pó com aproximadamente 1,0 cm de espessura. A bentonita foi retirada de uma amostra de GCL-A em uma bandeja metálica para evitar perda de material e depois colocada sobre o geotêxtil não tecido.

Já o corpo de prova GCL-E foi preparado da mesma forma que o GCL-D, mas utilizando-se a bentonita granulada do GCL-B (do segundo fabricante). A Figura 3.33 apresenta as amostras de GCL no equipamento.



Figura 3.33 - Amostras instaladas no equipamento: a) geocomposto (GCL-C); b) geocomposto (GCL-D); c) geocomposto (GCL-E).

3.3.2 Montagem do ensaio

A montagem do ensaio pode ser descrita pelos seguintes passos (ver Figura 3.34):

- a) Primeiramente, um cilindro vazado é colocado dentro do cilindro inferior, seguido do posicionamento da placa de 1 cm de espessura;
- b) cilindro inferior é preenchido com água desaerada;
- c) A barreira (GM/PM) é posicionada na placa. Segundo Cardona (2013), a finalidade da placa (PM) é evitar que a geomembrana sofra deflexão sob a pressão aplicada no interior do cilindro superior, alterando assim o fluxo pelo defeito no GM.
- d) Instalam-se o anel tipo o-ring de 4 mm, o cilindro e o transdutor de pressão superior;
- e) sistema é vedado com as barras roscadas;
- f) Após a montagem completa do sistema, a célula de carga e o suporte de reação são ajustados;
- g) Por fim, o sistema é abastecido com a água do tanque, sendo o ar retirado do interior pelo ladrão;
- h) Realização do teste.

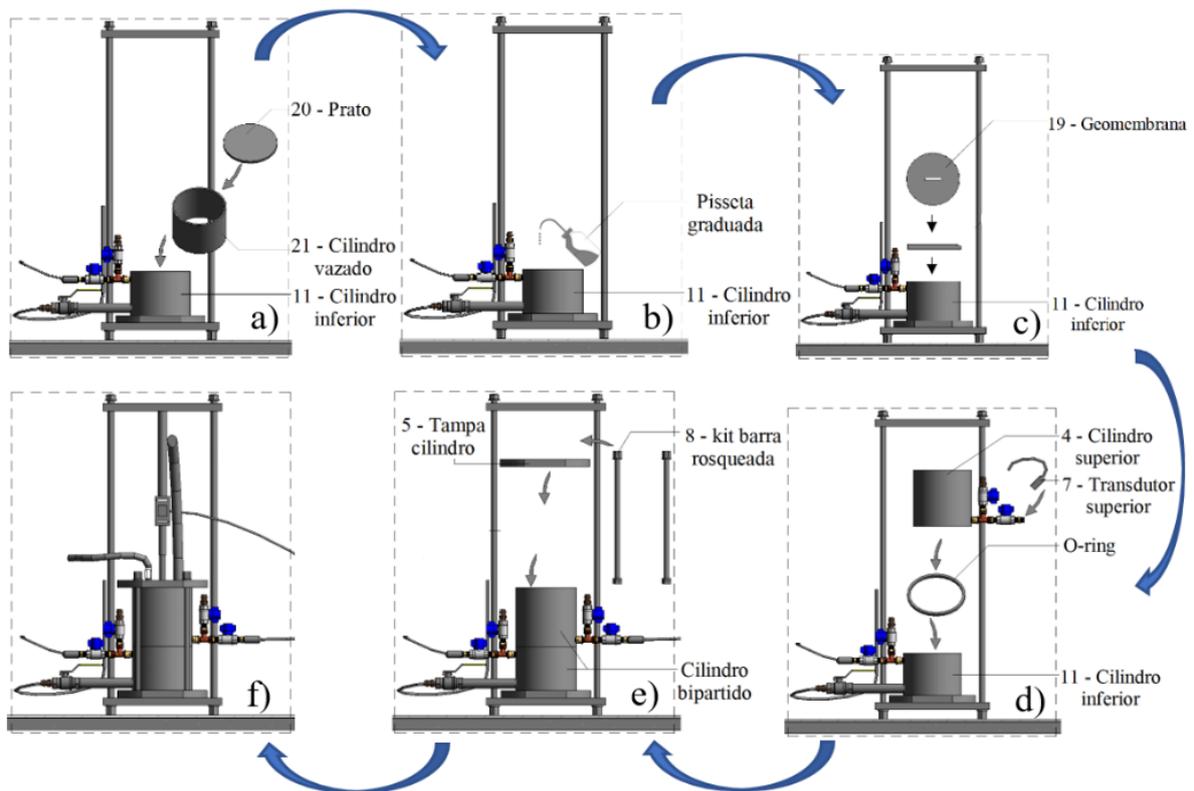


Figura 3.34 - Processo de montagem: a) instalação do prato e cilindro vazado; b) cilindro inferior completo com água; c) instalação da GM; d) instalação do anel, cilindro superior e sensor de pressão; e) fechamento do sistema; f) sistema pronto para ensaio.

3.3.3 Vazamento em geomembranas

Com o objetivo de simular diferentes alturas de coluna d'água sobre a geomembrana, foram aplicadas pressões hidrostáticas na água da célula de ensaio. Foram realizadas 35 séries de

ensaios com pressões crescentes de 20 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa a cada intervalo, representando, respectivamente, aproximadamente 2 m, 10 m, 20 m, 40 m e 80 metros de coluna d'água. Essas mesmas pressões foram utilizadas anteriormente nos ensaios realizados por Cardona (2013).

3.3.4 Medição da vazão

Durante a realização dos ensaios utilizando a geomembrana de PVC ou PEAD danificada por corte ou furo, ao alterar as condições (configurações) de ensaios conforme apresentado nas Tabela 3.4, observou-se na saída que a vazão poderia ser baixa ou elevada. Portanto, foram utilizados dois métodos para mensurar a massa de água na saída do equipamento. O primeiro método consistia em utilizar uma proveta sobre a balança analítica para vazões baixas, enquanto o segundo método envolvia o uso de um balde de plástico para vazões elevadas.

As pressões aplicadas eram aumentadas da seguinte maneira: para vazões baixas, as pressões eram aumentadas a cada 24 horas e a leitura era feita durante 24 horas. Já para vazões elevadas, as pressões eram aumentadas a cada 120 segundos, a carga hidráulica era mantida constante durante certo tempo e a água percolada era colhida durante 20 segundos antes de se passar para o próximo estágio de pressão.

O volume de água era obtido de forma precisa pela divisão da massa dividida pela densidade. As vazões médias foram determinadas calculando-se o volume dividido pelo tempo, utilizando a Equação 15.

$$Q_e = v_w / t_l \quad (15)$$

onde Q_e é a vazão média em ml/s para o intervalo desejado, v_w é o volume de água em mililitros e t_l é o tempo da leitura em segundos.

3.3.5 Correção da temperatura

A temperatura da água afeta a viscosidade e, conseqüentemente, a vazão medida. Portanto, a vazão foi corrigida para a temperatura de 20°C, utilizando as Equações 16 a 18, conforme descrito em trabalhos anteriores de Caputo (1975), Mendes (2010) e Cardona (2013).

$$Q_{20^\circ C} = Q_T \eta_T / \eta_{20^\circ C} \quad (16)$$

$$\eta_{20^\circ C} = 0,0178 / (1 + 0,033T_{20^\circ C} + 0,00022T_{20^\circ C}^2) \quad (17)$$

$$\eta_T = 0,0178 / (1 + 0,033T_T + 0,00022T_T^2) \quad (18)$$

onde $Q_{20^{\circ}\text{C}}$ é a vazão para a temperatura de 20°C , $Q_e = Q_T$ é a vazão na temperatura de ensaio, η_T é a viscosidade da água na temperatura de ensaio, $\eta_{20^{\circ}\text{C}}$ é a viscosidade da água a 20°C , T_T é a temperatura de ensaio e $T_{20^{\circ}\text{C}}$ é a temperatura de 20°C . A viscosidade (η) deve estar em unidades do sistema CGS e a temperatura (T) em graus Celsius.

3.3.6 Influência da temperatura (teste na GM sem dano)

Durante a pesquisa, foram realizados alguns ensaios de vazamento aumentando a temperatura da água. Como não foi possível saber exatamente a temperatura da água no momento do ensaio sob pressão, foi realizada uma correlação simplificada de temperatura do cilindro, água e geomembrana utilizando termômetros digitais (subitem 3.2.2.3) instalados no equipamento de ensaio, conforme abaixo:

- primeiro termopar foi colocado no interior do cilindro em contato direto com a água próximo à geomembrana.
- segundo termopar foi colocado em contato com a face inferior da geomembrana de PVC e PEAD.
- terceiro termopar foi colocado em contato com o cilindro superior no centro do foco da fonte de calor.
- quarto termopar foi usado para medir a temperatura ambiente.

Após a instalação dos termopares, foram usadas duas lâmpadas refletoras de infravermelho de 250W de 220V, da marca Empalux, em três distâncias diferentes (60 cm, 40 cm, 20 cm), para aquecer o equipamento. Para cada distância foram realizadas 6 leituras a cada 20 minutos. Quanto mais próximas às lâmpadas estivessem do cilindro superior, mais rápida seria para aquecer a água (ver leituras obtidas nas Figuras 3.35 e 3.36). O objetivo deste ensaio foi correlacionar a temperatura externa do cilindro com a temperatura interna da água e da geomembrana durante os ensaios, com o intuito de simular o vazamento através do dano mecânico no fundo de um aterro sanitário ou canal, por exemplo.

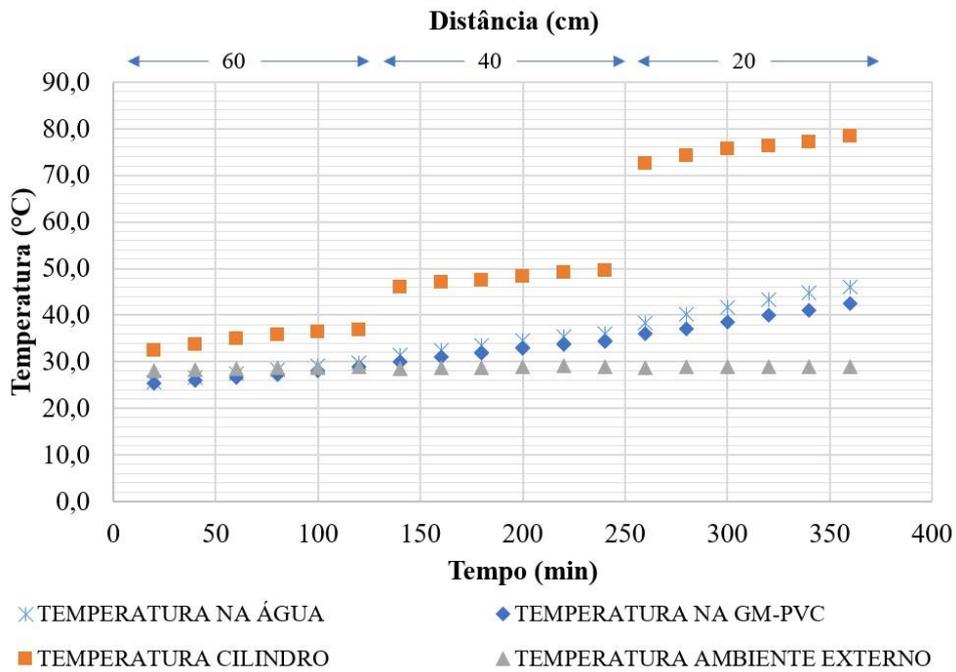


Figura 3.35 - Ensaio de leituras de temperaturas do equipamento (GM de PVC).

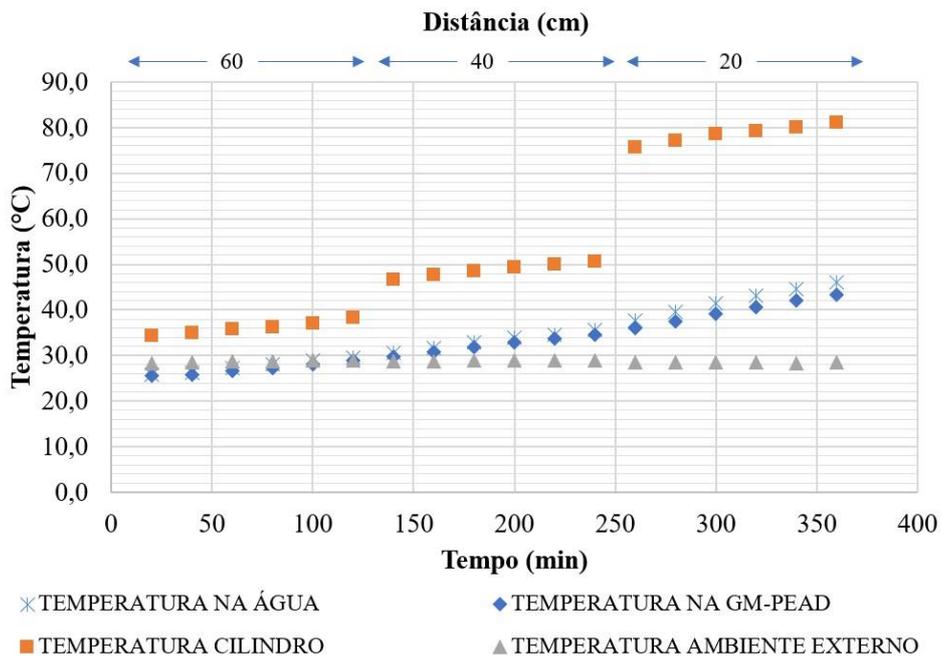


Figura 3.36 - Leituras de temperaturas do equipamento (GM PEAD).

3.3.7 Influência da temperatura no ensaio com dano mecânico na geomembrana

Foram realizados cinco testes de vazamento em geomembranas mantendo a pressão constante em 800 kPa e alterando apenas a temperatura da água usando lâmpadas refletoras para aquecê-

1a. Foram escolhidas as barreiras de PVC/PM e PEAD/PM, pois os vazamentos obtidos nelas foram baixos, e a balança analítica foi usada para fazer as leituras das massas de água efluente. Os termopares foram instalados nas seguintes posições: três na parte externa do cilindro (dois nos focos das lâmpadas e o outro fora do foco) e um no laboratório para medir a temperatura ambiente. A duração desses ensaios foi de 6 horas para que houvesse tempo hábil de promover o aquecimento da água e do cilindro. A massa de água e a vazão foram obtidas da mesma maneira que nos testes realizados em temperatura ambiente.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados para simular condições típicas de barreiras hidráulicas que podem ocorrer em obras geotécnicas, utilizando um sistema de ensaio que permitia monitorar as pressões acima e abaixo da geomembrana. Os estudos permitiram verificar a diferença no vazamento ao alterar o tipo de dano mecânico e a configuração da bentonita sob a barreira hidráulica. Também foram realizados ensaios de mudança de temperatura para analisar a influência no vazamento através do dano mecânico. Os resultados desses estudos são sumariados na Tabela 4.1 e discutidos em mais detalhes nos itens a seguir.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos nos ensaios realizados na pesquisa.

Q20°C (ml/s)							
Estágio de Pressão (kPa)							
Ensaio nº	Descrição	20 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa	800 kPa	Temperatura (°C)
Ensaio 01	PVC/PM-C5	4,70E-05	3,58E-05	2,74E-05	6,04E-05	1,38E-05	22,69
Ensaio 02	PVC/PM-C20	3,14E-05	1,45E-05	1,97E-05	4,25E-05	6,76E-06	25,26
Ensaio 03	PVC/PM-C50	9,32E-05	3,34E-05	5,91E-05	6,51E-05	1,03E-05	23,18
Ensaio 04	PVC/PM-F2,2	1,36E-03	1,14E-01	2,86E-01	2,88E+00	1,38E+01	24,00
Ensaio 05	PVC/PM-F5	1,32E+01	1,39E+00	2,36E-01	5,15E-02	1,49E-02	26,00
Ensaio 06	PVC/GT200-C50	1,24E-03	2,18E-02	4,91E-02	3,57E-02	5,96E-02	26,10
Ensaio 07	PVC/GT200-F2,2	2,95E+00	3,13E+00	2,32E+00	2,42E+00	2,82E+00	26,00
Ensaio 08	PVC/GT200-F5	2,40E+01	1,70E+01	1,37E+01	1,40E+01	1,42E+01	26,80
Ensaio 09	PVC/GT950-C50	4,53E-02	5,11E-02	6,34E+00	1,57E+01	1,58E+01	26,10
Ensaio 10	PVC/GT950-F2,2	4,08E-01	1,02E+00	1,82E+00	6,52E+00	6,47E+00	26,10
Ensaio 11	PVC/GT950-F5	1,11E+01	3,34E+01	4,39E+01	4,99E+01	5,82E+01	26,00
Ensaio 12	PVC/GCL-A-C50	1,40E-06	5,12E-03	4,73E-02	5,39E-02	7,57E-02	27,80
Ensaio 13	PVC/GCL-A-F2,2	3,58E+00	2,76E+00	1,91E+00	1,65E+00	1,29E+00	26,20
Ensaio 14	PVC/GCL-A-F5	1,52E+00	1,90E+00	1,53E+00	3,05E+00	3,86E+00	25,90
Ensaio 15	PEAD/PM-C5	4,22E-06	4,90E-05	1,08E-04	8,27E-05	3,58E-04	23,32
Ensaio 16	PEAD/PM-C20	2,99E-05	5,82E-05	7,72E-05	1,65E-04	4,14E-04	23,80
Ensaio 17	PEAD/PM-C50	3,32E-04	1,50E-03	1,57E-03	1,59E-03	2,37E-03	23,70
Ensaio 18	PEAD/PM-F2,2	1,40E-02	2,56E-02	2,36E-02	1,69E-02	1,61E-02	24,00
Ensaio 19	PEAD/PM-F5	1,30E+00	3,61E+00	3,82E+00	3,71E+00	3,52E+00	26,00
Ensaio 20	PEAD/GT200-C50	4,92E-05	2,20E-04	8,81E-04	3,72E-02	2,27E-01	24,10
Ensaio 21	PEAD/GT200-F2,2	1,51E+00	2,56E+00	2,44E+00	2,70E+00	3,37E+00	26,50
Ensaio 22	PEAD/GT200-F5	2,49E+01	2,02E+01	1,95E+01	1,90E+01	1,88E+01	26,30
Ensaio 23	PEAD/GT950-C50	4,01E-04	9,06E-05	2,83E+01	5,86E+01	8,16E+01	27,00
Ensaio 24	PEAD/GT950-F2,2	7,74E-01	3,17E+00	3,74E+00	4,17E+00	4,79E+00	25,00
Ensaio 25	PEAD/GT950-F5	1,22E+01	3,21E+01	3,55E+01	4,16E+01	4,57E+01	27,00

Ensaio 26	PEAD/GCL-A-C50	1,52E-08	1,52E-08	4,32E+00	9,03E+00	2,71E+01	24,00
Ensaio 27	PEAD/GCL-A-F2,2	3,06E+00	2,47E-01	8,37E-02	6,27E-01	5,92E+00	24,90
Ensaio 28	PEAD/GCL-A-F5	4,68E+00	2,10E+00	1,58E+00	1,59E+01	2,03E+01	25,70
Ensaio 29	PVC/GCL-B-F5	5,39E+00	2,33E+00	1,14E+00	8,65E-01	5,66E-01	25,20
Ensaio 30	PVC/GCL-C-F5	5,19E+00	4,86E+00	4,26E+00	4,16E+00	3,98E+00	25,10
Ensaio 31	PVC/GCL-D-F5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	25,10
Ensaio 32	PVC/GCL-E-F5	1,90E+01	3,10E+01	4,04E+01	4,24E+01	2,99E+01	25,20
Ensaio 33	PEAD/GCL-B-F5	9,23E+00	7,94E+00	1,07E+01	1,27E+01	2,91E+01	25,10
Ensaio 34	PEAD/GCL-C-F5	1,15E+01	1,37E+01	1,59E+01	1,93E+01	1,68E+01	25,00
Ensaio 35	PEAD/GCL-D-F5	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	25,10

4.1 VAZAMENTO ATRAVÉS DE DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS DE PVC

A Figura 4.1 mostra as vazões totais de referência obtidas nos ensaios realizados com GMs de PVC sobre base rígida. É perceptível a influência do dano mecânico nos resultados, sendo que as vazões através dos cortes com diferentes comprimentos foram similares. As vazões de água variaram entre 3,14E-5 e 6,75E-6 ml/s.

A dimensão do corte pode ter certa influência nos resultados de vazamentos. A intensidade de vazamento tende a aumentar com o aumento do dano na GM de PVC. Observa-se que a intensidade de vazamento na GM de PVC diminui à medida que as pressões na água aumentam, devido a uma tendência de fechamento do dano linear (corte) pelo efeito do Poisson (Dávila & Palmeira, 2014).

Em relação ao furo de 5 mm, observa-se que as pressões de 20 kPa e 100 kPa produziram vazamentos de 13,16 ml/s e 1,38 ml/s, respectivamente, que foram maiores que os obtidos para o furo de 2,2 mm (0,0013 ml/s e 0,11 ml/s). Nos demais estágios de pressão (de 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa), os vazamentos foram menos intensos em relação ao furo de 2,2 mm, reduzindo significativamente o vazamento produzido (cerca de 0,14 ml/s) para a pressão de 800 kPa (F5). Isso pode ter ocorrido devido a uma maior selagem da interface geomembrana-placa na região do vazamento em contato com a placa metálica como base em decorrência de uma maior flexibilidade da região ao redor do furo para diâmetros maiores de furo.

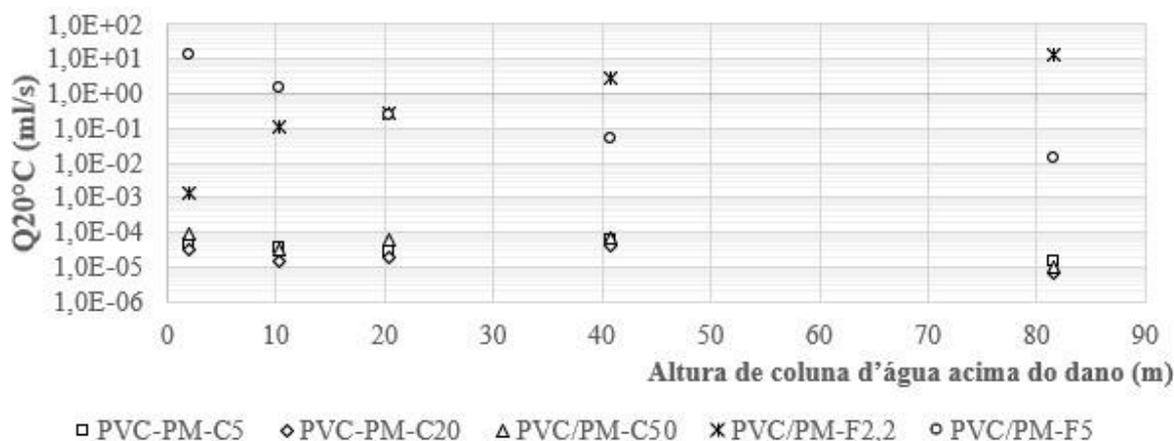


Figura 4.1 - Vazamentos totais de referência através de danos mecânicos em GMs de PVC.

4.2 VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS DE PEAD

Os mesmos padrões de danos mecânicos foram induzidos no GM PEAD. A Figura 4.2 apresenta os resultados das vazões de referência totais para a GM sozinha sobre a placa metálica. Observou-se que o furo de 5 mm produziu os maiores vazamentos através da GM PEAD, sendo que a pressão de 20 kPa apresentou a menor vazão (1,29 ml/s) e a pressão de 200 kPa resultou no maior vazamento, aproximadamente 3,81 ml/s.

É perceptível que a alteração da dimensão e do tipo de dano mecânico realizado na GM PEAD leva a uma tendência crescente nos resultados. Por exemplo, porém o furo de 2,2 mm produziu vazamentos maiores. Isso é consistente com os resultados dos testes de GM PVC, onde os furos foram mais prejudiciais do que os cortes no que se refere a intensidade de vazamento (ver Tabela 4.1).

Com relação ao corte de 5 mm, observou-se que a pressão de 20 kPa resultou na menor vazão de água, que foi de 4,21E-6 ml/s. Isso pode ter ocorrido devido à baixa pressão exercida sobre o GM, que favorece o fluxo d'água ao longo da interface geomembrana-placa de base. O dano localizado presente na borda direita do corte pode ter influenciado os resultados em determinados estágios de pressão (ver Figura 3.6).

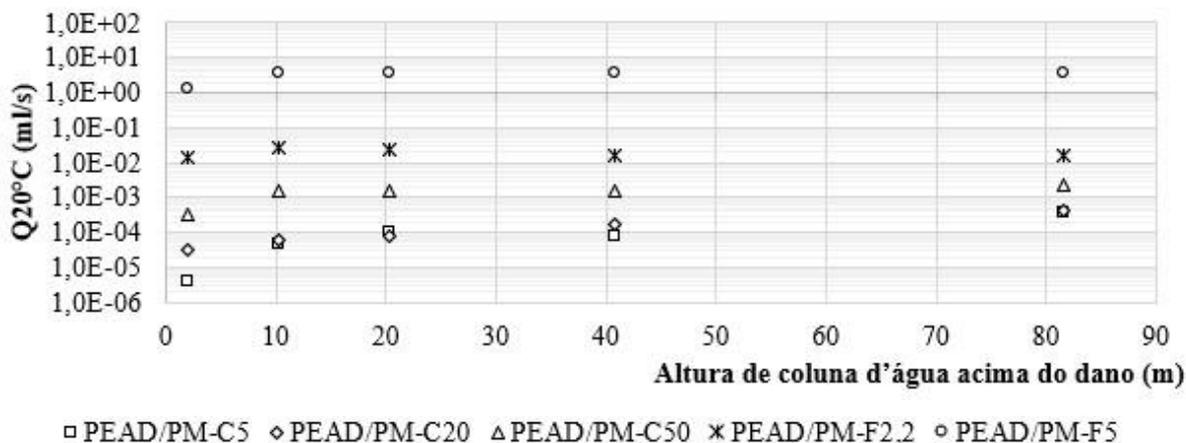


Figura 4.2 - Vazamentos totais de referência através de danos em GMs de PEAD.

Na Figura 3.9 é possível observar que o furo de 2,2 mm apresenta uma leve depressão com bordas levemente salientes para fora. Por outro lado, o furo de 5 mm apresentou um corte mais regular (ver Figura 3.10). Ao inspecionar as ferramentas de perfuração (os vazadores de couro de 2,2 mm e 5 mm de diâmetro), percebeu-se que o formato e a qualidade das pontas das ferramentas podem influenciar no padrão do furo. A ponta do vazador de 2,2 mm é mais grossa que a do vazador de 5 mm, o que pode resultar em rebarbas do material durante o processo de perfuração (ver Figura 3.30).

Outro fator importante é a resistência ao puncionamento do material (ver Figura 3.9). Quanto mais resistente for, mais difícil perfurá-lo e maior será a chance de ocorrer uma rebarba na borda do furo. Isso pode reduzir a qualidade do contato e intensificar o vazamento na área de interface (entre a GM e o material de base). Danos pequenos podem ocorrer e passarem despercebidos durante a detecção por uma vistoria de garantia de qualidade da construção, conforme mencionado por Giroud & Bonaparte (1989).

4.3 VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS EM GEOMEMBRANAS DE PVC SOBRE OUTROS MATERIAIS

Os resultados a seguir são os obtidos para vazamento total por dano mecânico em geomembranas (PVC e PEAD) com a instalação de outros materiais de base (geotêxteis ou GCLs). A Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos para quatro tipos de barreiras: geomembrana única (PVC/PM), barreira composta PVC/GT200, PVC/GT900 e PVC/GCL. A figura também inclui três curvas que representam previsões de vazamentos entre a geomembrana e o material subjacente (devido a qualidade de contato em excelente, bom ou

ruim), bem como duas curvas representando vazamentos impostos pelo tamanho do dano mecânico ou sem o uso da geomembrana como barreira hidráulica (ver Equações 9 e 10), como mencionado por Rowe (2018).

Analisando a Figura 4.3, pode-se observar que os resultados obtidos para cortes de 50 mm não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas Equações 9 e 10. Além disso, o vazamento ficou abaixo da curva correspondente à condição de contato excelente, equivalente ao uso de GCL (ver resultados na Tabela 4.1).

Para a barreira composta de PVC/GCL-A, o menor vazamento foi observado na pressão de 20 kPa, que foi de $1,69E-6$ ml/s. Nos demais estágios de pressão (100 a 800 kPa), o vazamento aumentou, variando entre 0,005 ml/s e 0,07 ml/s.

Comparando os resultados de vazamento das barreiras de PVC/GCL-A e PVC/GT200, nota-se que a barreira de PVC/GCL-A apresentou menor vazamento nas pressões de 20 kPa e 100 kPa. Na pressão de 200 kPa, a barreira de PVC/GT200 produziu 4% a mais de vazamento em relação à barreira de PVC/GCL-A. Para os estágios de pressão de 400 e 800 kPa, o vazamento foi menos intenso para PVC/GT200, com vazões aproximadamente 34% e 21% de redução, respectivamente. A maior intensidade de vazamento foi registrada para a barreira PVC/GT900 no caso do corte de 50 mm. A barreira PVC/PM apresentou os menores resultados de vazamento entre as demais, exceto para a pressão de 20 kPa.

Como esperado, as barreiras compostas de PVC/GT200 e PVC/GT900 resultaram em maior vazamento em comparação aos demais testes. As propriedades hidráulicas dos materiais influenciaram significativamente os resultados (ver propriedades na Tabela 3.2), além do comprometimento na selagem da interface geomembrana-material subjacente.

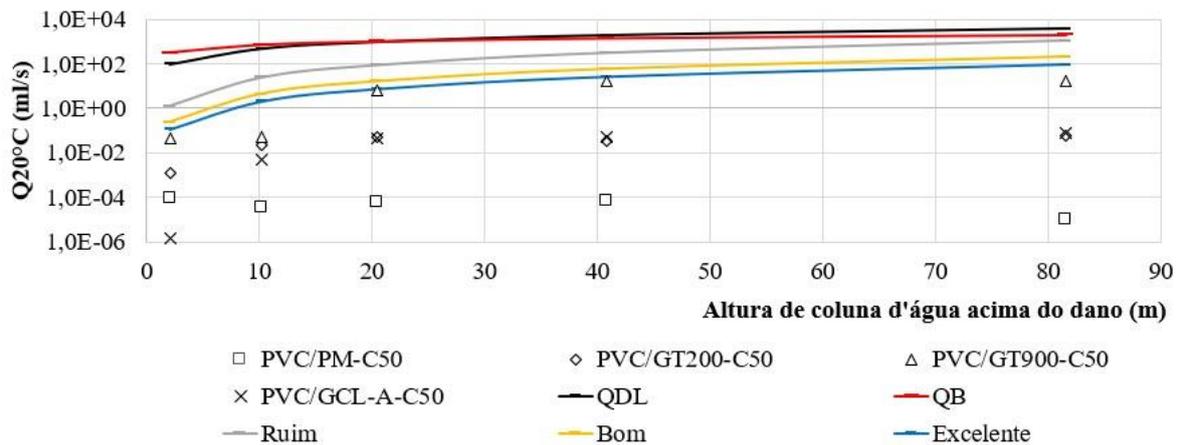


Figura 4.3 - Resultados de vazamento através de danos em GM PVC (corte de 50mm).

Na Figura 4.4, é possível verificar os resultados dos testes de vazamento com um furo de 2,2 mm. Foi constatado que os resultados não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas Equações 9 e 10. No entanto, quando a pressão aplicada sobre as barreiras PVC/GCL-A e PVC/GT200 foi de 20 kPa, os resultados de vazamento foram superiores à curva que representa a qualidade do contato ruim, o que indica que a água encontrou caminhos preferenciais sobre o GCL-A e o processo de expansão não foi suficiente para fechar o dano mecânico. Já as pressões sobre a barreira PVC/GCL-A produziram menos vazamentos do que sobre a PVC/GT200.

No que diz respeito à barreira PVC/GT900, percebeu-se que a pressão de 20 kPa produziu uma vazão inferior em relação às barreiras PVC/GCL-A e PVC/GT200. Isso pode ter ocorrido porque a pressão aplicada foi baixa (20 kPa) e a pressão sobre a geomembrana reduziu o fluxo de água na interface geomembrana-material subjacente. Como era esperado, as demais pressões (200, 400 e 800 kPa) produziram vazamentos superiores em relação às demais combinações de geossintéticos.

Em geral, os parâmetros hidráulicos dos materiais de base, tanto de proteção quanto de barreira hidráulica, devem ser levados em consideração na concepção do projeto. Observa-se que os parâmetros hidráulicos de permissividade e permeabilidade do GT900 são inferiores aos do GT200. No entanto, é importante notar que a espessura do GT900 é maior do que a do GT200, o que pode ter influência nos resultados obtidos (conforme mostrado na Tabela 3.2).

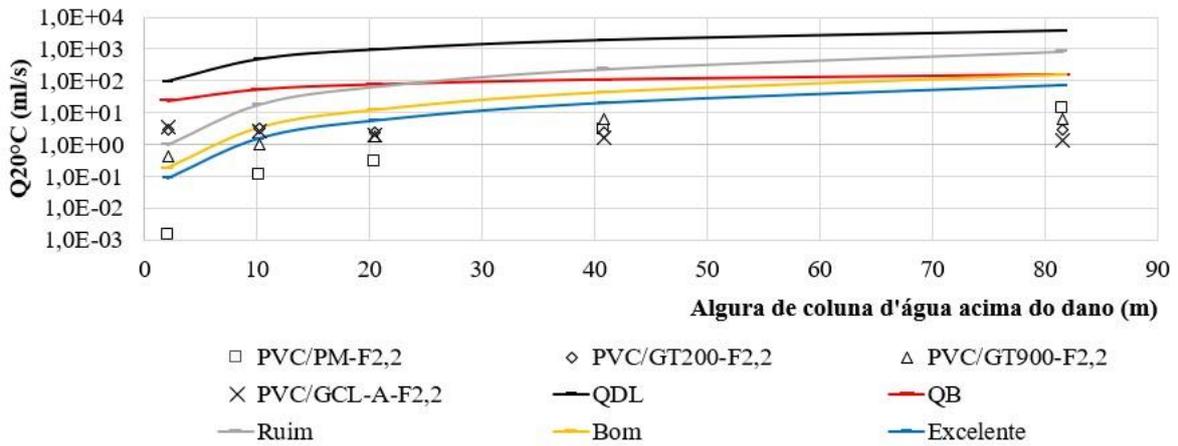


Figura 4.4 - Resultados dos ensaios de vazamento através de danos em GM de PVC (furo de 2,2 mm).

A Figura 4.5 ilustra os resultados dos testes de vazamento com um orifício de 5 mm. Verificou-se que os resultados não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas Equações 9 e 10. No entanto, quando foi aplicada pressão de 20 kPa no PVC/PM, PVC/GT200, PVC/GT900, PVC/GCL-B, PVC/GCL-C e PVC/GCL-E, os resultados de vazamento ultrapassaram a curva que representa má qualidade de contato. Isso indica que a água percola facilmente pelo furo e pela interface entre os materiais. Vale ressaltar que à medida que as pressões de 100, 200, 400 e 800 kPa foram aplicadas nas barreiras PVC/GT200, PVC/GCL-B e PVC/GCL-C, houve uma tendência de diminuição dos resultados de vazamento. Por outro lado, as barreiras de PVC/GT900 e PVC/GCL-E apresentaram uma tendência crescente de vazamento.

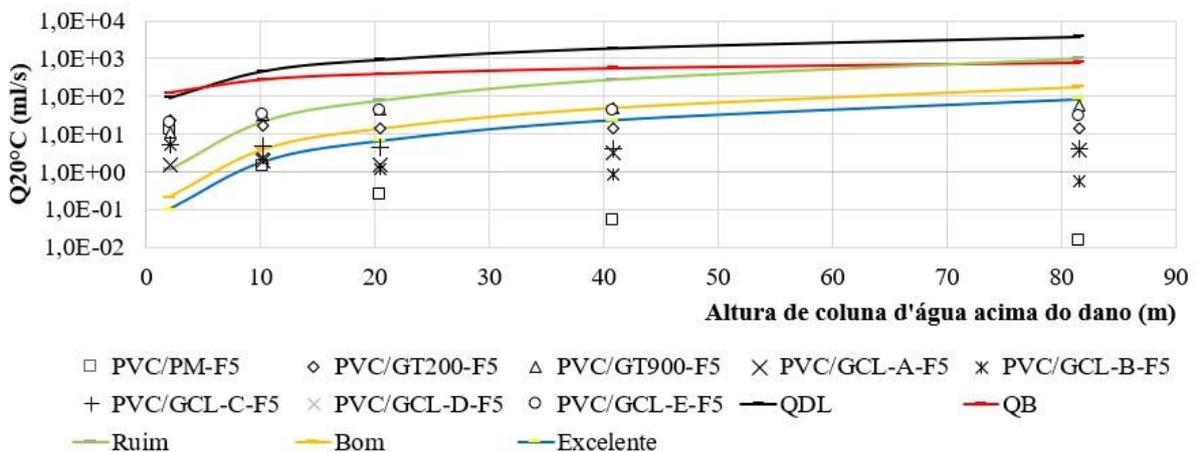


Figura 4.5 - Resultados dos ensaios de vazamentos através de danos em GM de PVC (furo de 5 mm).

As pressões de 20 e 100 kPa na barreira de PVC/GCL-B resultaram em aproximadamente 255% e 23% a mais de vazamento, respectivamente, em relação ao PVC/GCL-A. Para pressões de 200, 400 e 800 kPa, a barreira composta de PVC/GCL-B reduziu as vazões em cerca de 25%, 72% e 85%, respectivamente, em comparação com a barreira de PVC/GCL-A. Deve-se notar que o tipo de geotêxtil não tecido na camada superior dos GCLs e o processo de fabricação (agulhamento) podem facilitar a formação de caminhos de fluxo preferenciais na interface de contato entre a geomembrana e o material de base (Mendes, 2010; Cardona, 2013). Por outro lado, nenhum vazamento foi observado na barreira PVC/GCL-D (não são apresentados na Figura 4.6). Isso pode ser atribuído ao processo de hidratação da bentonita, que resultou na cicatrização do furo (ver Figura 4.6). A Figura 4.6a mostra a instalação da geomembrana de PVC sobre a bentonita em pó. A Figura 4.6b ilustra o aspecto da geomembrana de PVC após a expansão da bentonita em contato direto com o dano. As Figuras 4.6c e 4.6d demonstram como a bentonita em pó se expandiu e realizou a cicatrização do furo. Assim, fica evidente que o escoamento no espaço entre a geomembrana e a bentonita em pó resultou em uma área hidratada que facilitou a cicatrização do furo, conforme citado por Giroud (1997) e Mendes (2010).

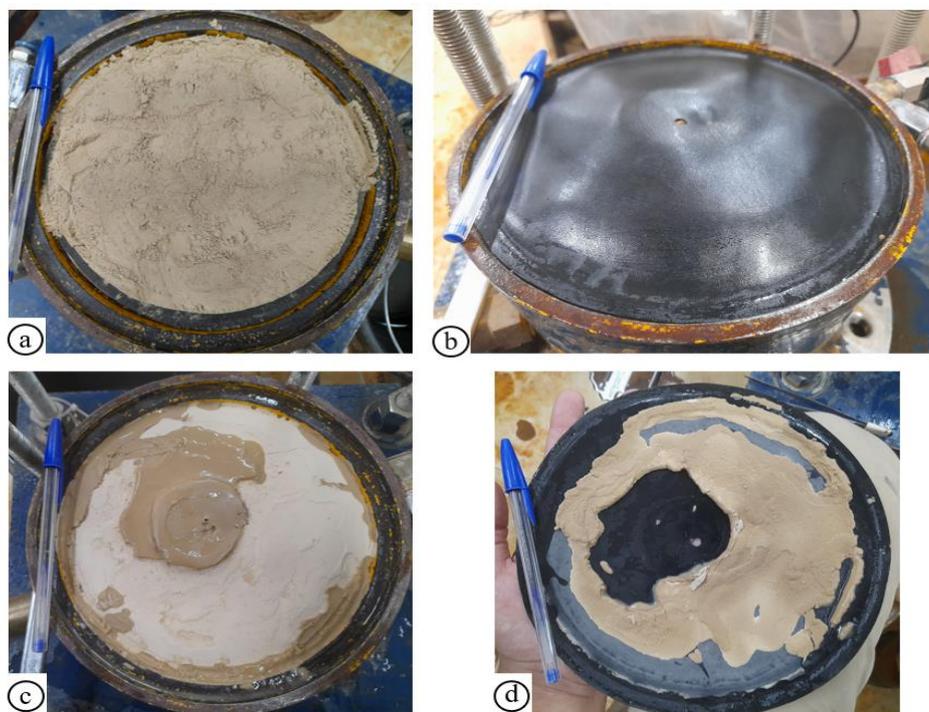


Figura 4.6 - Ensaio de vazamento através da barreira PVC/GCL-D: a) instalação do GCL-D; b) expansão da bentonita em pó sob a GM de PVC; c) hidratação e expansão da bentonita; d) face inferior da geomembrana após o ensaio.

4.4 VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS EM GEOMEMBRANAS DE PEAD SOBRE OUTROS MATERIAIS

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados dos testes de vazamento com corte de 50 mm em geomembrana de PEAD. Verificou-se que os resultados não ultrapassaram os limites estabelecidos pelas Equações 9 e 10. Quando as pressões (20, 100 e 200 kPa) foram aplicadas sobre a barreira PEAD/GT200, os resultados de vazamento diminuíram em aproximadamente 85%, 85% e 44%, respectivamente, em comparação com a barreira PEAD/PM (resultado de referência). No entanto, quando as pressões de 400 e 800 kPa foram aplicadas, as vazões aumentam consideravelmente, indicando que a vazão aumenta em pressões mais altas.

Em relação à barreira PEAD/GT900, observou-se que uma pressão de 20 kPa resultou em um aumento de 700% no vazamento em comparação com o uso de PEAD/GT200. A pressão de 100 kPa produziu menos vazamento, aproximadamente 59% menos que a barreira PEAD/GT200. No entanto, as pressões de 200, 400 e 800 kPa na barreira PEAD/GT900 aumentaram significativamente o vazamento e se aproximaram das curvas que representam boa e excelente qualidade de contato. Vale ressaltar que a espessura dos geotêxteis mais uma vez influenciou nos ensaios, como já mencionado nos ensaios com GM de PVC.

As pressões de 20 e 100 kPa na barreira PEAD/GCL-A-C50 (Figura 4.8a) resultaram nos menores resultados de vazamento, aproximadamente $1,52E-8$ ml/s. No entanto, quando as pressões foram alteradas, observou-se que as vazões aumentaram. Isso pode ter ocorrido porque o corte de 50 mm encontrou a direção de uma costura perfurada (Figura 4.8b), criando um caminho preferencial de vazamento através da interface da barreira composta. Outra razão foi que o silicone impregnado no perímetro da amostra rompeu quando uma pressão de 200 kPa foi aplicada (Figura 4.8c), iniciando o processo de carreamento da bentonita e intensificando a percolação de água (Figura 4.8d).

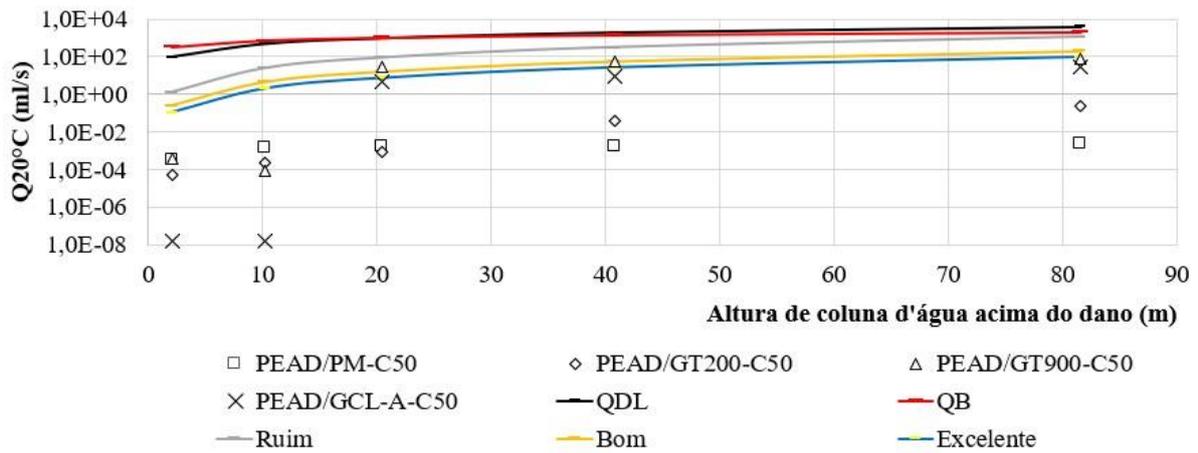


Figura 4.7 - Resultados dos ensaios de vazamentos através de danos em GM de PEAD (corte de 50 mm).

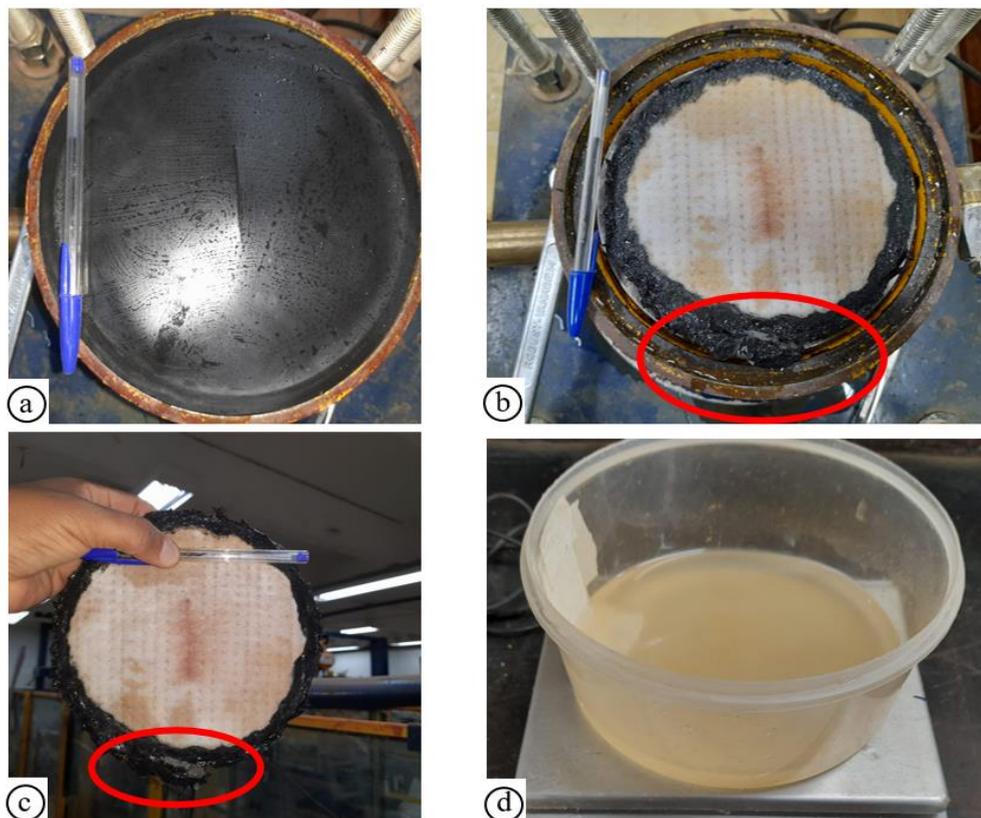


Figura 4.8 - Teste de vazamento através de corte de 50 mm na barreira PEAD/GCL-A: a) instalação da GM de PEAD sobre o GCL-A; b) amostra GCL-A após a execução dos testes; c) amostra GCL-A indicando o local de ruptura do silicone; d) coleta de água com carreamento de bentonita - a amostra rompeu a uma pressão de 200 kPa.

Na Figura 4.9 são apresentados os resultados dos testes de vazamento através do furo de 2,2 mm em geomembrana de PEAD. Verificou-se que os resultados não ultrapassaram os limites

estabelecidos pelas Equações 9 e 10. Quando a pressão aplicada sobre as barreiras PEAD/GT200 e PEAD/GCL-A foi de 20 kPa, as vazões foram superiores à curva que representa a qualidade do contato ruim. Observa-se que as vazões (PEAD/GT200) variaram entre 1,50 ml/s e 3,36 ml/s (20 kPa e 800 kPa).

A barreira PEAD/GT900 reduziu 49% de vazamento em relação à PEAD/GT200 quando foi aplicada a pressão de 20 kPa. No entanto, os vazamentos se intensificaram quando foram alteradas as pressões (de 100, 200, 400 e 800 kPa) cerca de 24%, 54%, 55% e 42% respectivamente, ou seja, a espessura do geotêxtil não tecido influenciou os resultados.

No que diz respeito à barreira PEAD/GCL-A, percebe-se que as vazões aumentam significativamente em relação à barreira PEAD/PM porém esses vazamentos são menores que os obtidos para as barreiras PEAD/GT200 e PEAD/GT900.

A PEAD/GCL-A teve os vazamentos reduzidos quando foram aplicadas pressões entre 20 kPa e 400 kPa (vazamentos entre 3,05 ml/s e 0,08 ml/s). Quando se aplicou a pressão de 800 kPa verificou-se aumento no vazamento (5,92 ml/s). A Figura 4.10a mostra como foi a instalação da geomembrana de PEAD sobre o GCL-A. A Figura 4.10b exibe como a amostra de GCL-A ficou após a realização dos ensaios. A Figura 4.10c exibe a coleta de água limpa durante o ensaio sob pressão de 400 kPa, comprovando a ausência de bentonita carregada. Após aplicação da pressão de 800 kPa, verificou-se que a água se tornou suja, demonstrando que a bentonita passou a ser carregada pelos caminhos preferenciais de percolação na interface da barreira hidráulica (Figura 4.10d).

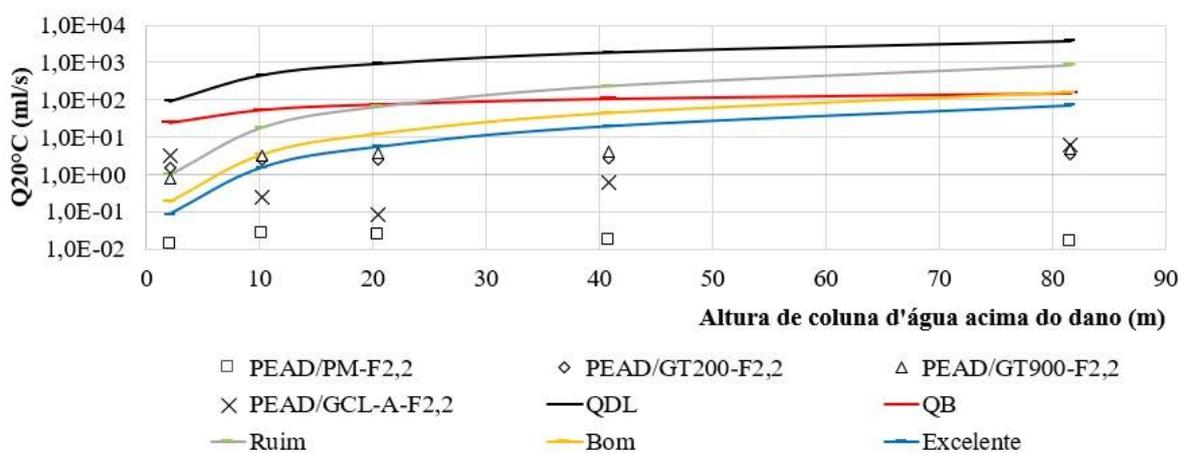


Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de vazamentos através de danos em GM de PEAD (furo de 2,2 mm).

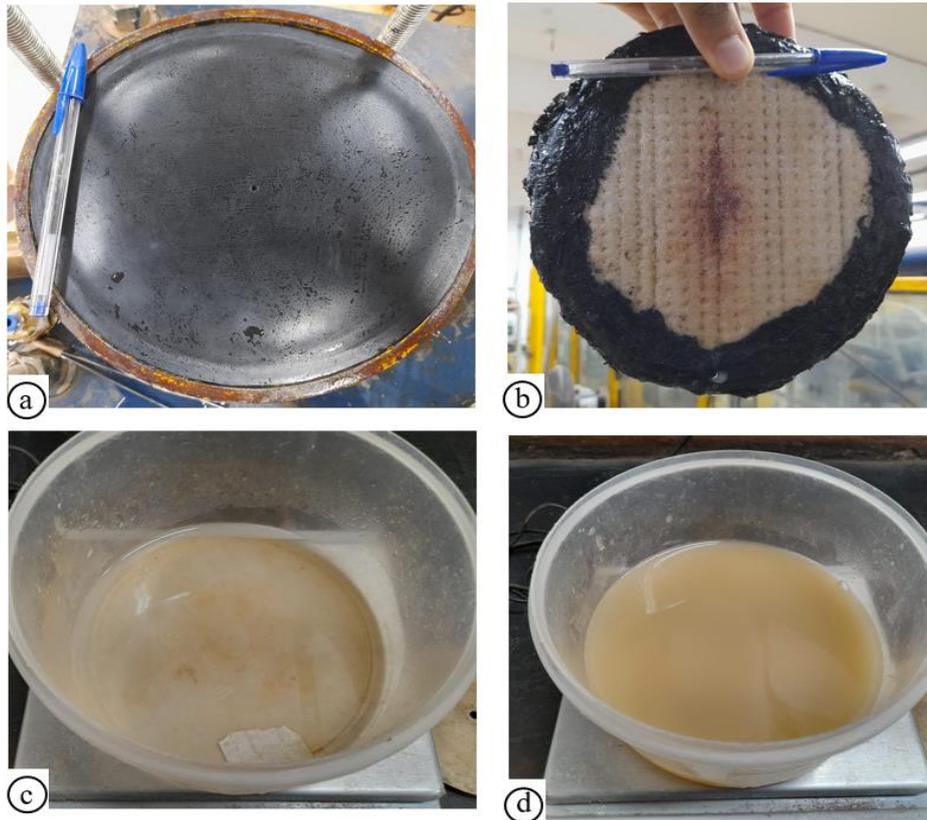


Figura 4.10 - Teste de vazamento através de furo de 2,2 mm na barreira PEAD/GCL-A: a) instalação do PEAD GM sobre o GCL-A; b) amostra GCL-A após a conclusão dos testes; c) coleta de água limpa após aplicação de uma pressão de 400 kPa; d) coleta de água com carreamento de bentonita sob pressão de 800 kPa.

A Figura 4.11 apresenta os resultados dos testes de vazamento através de um orifício de 5 mm em uma geomembrana PEAD. Pode-se observar que os resultados não ultrapassaram os limites previstos pelas Equações 9 e 10. Ao aplicar uma pressão de 20 kPa no PEAD/GT200, PEAD/GT900, PEAD/GCL-A, PEAD/GCL-B e PEAD/GCL-C, fica evidente que os resultados de vazamento foram maiores do que a curva que representa má qualidade de contato. Isso indica que a água percola facilmente pelo furo e uma pressão de 20 kPa sobre a GM não melhora a qualidade do contato da interface.

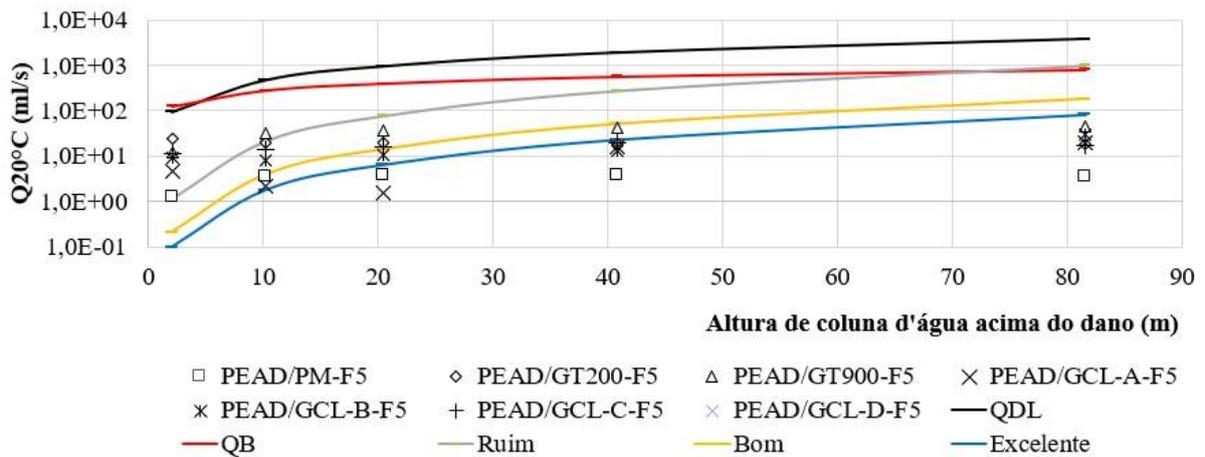


Figura 4.11 - Resultados dos ensaios de vazamentos através de danos em GM de PEAD (furo de 5 mm).

Pode-se observar que as pressões de 100, 200, 400 e 800 kPa nas barreiras PEAD/GT200 e PEAD/GT900 aumentaram significativamente as vazões em relação à barreira PEAD/PM. Em relação ao PEAD/GCL-A (ver Figura 4.12a), a vazão inicial foi de 4,67 ml/s (a 20 kPa) e depois diminuiu para as pressões seguintes de 100 e 200 kPa (aproximadamente 55% e 66% de redução, respectivamente). Ao aplicar pressão de 400 kPa e 800 kPa, observa-se percolação de água com presença de bentonita, indicando que caminhos preferenciais podem ter ocorrido devido ao tamanho do furo e à pressão de água exercida sobre ele (Figura 4.12b).

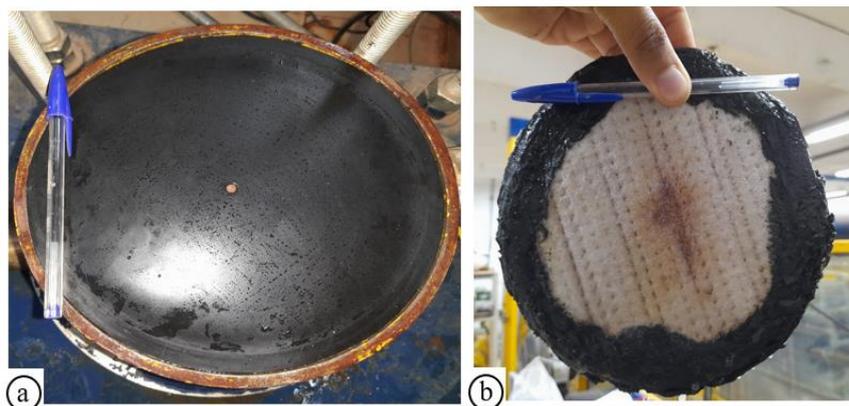


Figura 4.12 - Ensaio de vazamento através do furo de 5 mm em barreira de PEAD/GCL-A: a) instalação da GM de PEAD sobre o GCL-A; b) amostra de GCL-A após a realização dos ensaios.

Nos testes relacionados ao PEAD/GCL-B, pode-se observar que a alteração das pressões levou a uma tendência de redução dos resultados (variando entre 5,39 ml/se 0,56 ml/s). A Figura 4.13 mostra o GCL ensaiado e um recipiente com amostra de água coletada do ensaio, aplicando uma pressão de 800 kPa.

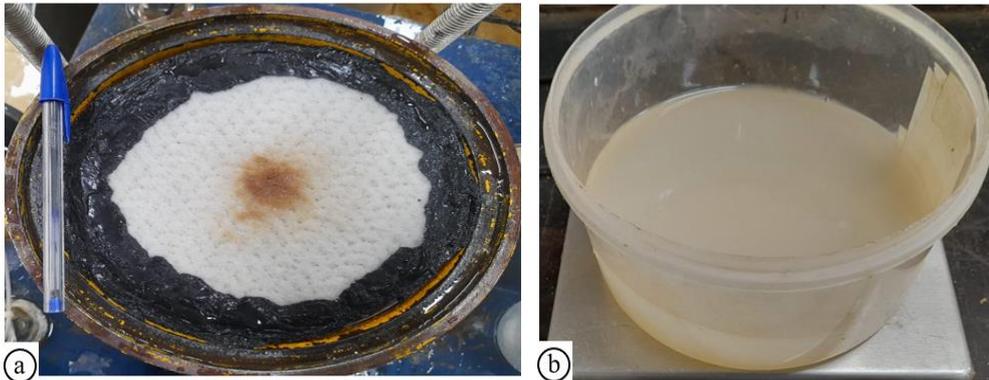


Figura 4.13 - Ensaio de vazamento através do furo de 5 mm em barreira de PEAD/GCL-B: a) amostra de GCL-B após o ensaio; b) coleta de água com bentonita após o ensaio.

Analisando os resultados referentes ao PEAD/GCL-C, pode-se observar que os vazamentos ficaram em torno de 5,18 ml/s e 3,98 ml/s ao alterar as pressões. Isso indica que a barreira PEAD/GCL-C produziu maiores vazamentos, exceto para a pressão de 800 kPa, que produziu menos vazamentos em comparação com as barreiras PEAD/GCL-A e PEAD/GCL-B. Por outro lado, as pressões na barreira PEAD/GCL-D não resultaram em vazamentos; a bentonita agiu na cicatrização do furo de 5 mm, conforme observado no ensaio PVC/GCL-D (ver Figura 4.14). A Figura 4.14a mostra a instalação do PEAD/GCL-D na placa metálica e posterior fechamento do equipamento para teste. Na Figura 4.14b pode-se observar o aspecto da geomembrana PEAD após o ensaio, indicando uma superfície lisa. Após a remoção do GM, observa-se uma cavidade na amostra GCL-D (Figura 4.14c). Isso pode ter ocorrido devido à cicatrização do orifício de 5 mm, pois uma parte da bentonita aderiu à área danificada, que provavelmente era a área úmida que cicatrizou o orifício. Os resultados deste teste (PVC/GCL-D) não são apresentados na Figura 4.11 devido à escala do eixo das abcissas.

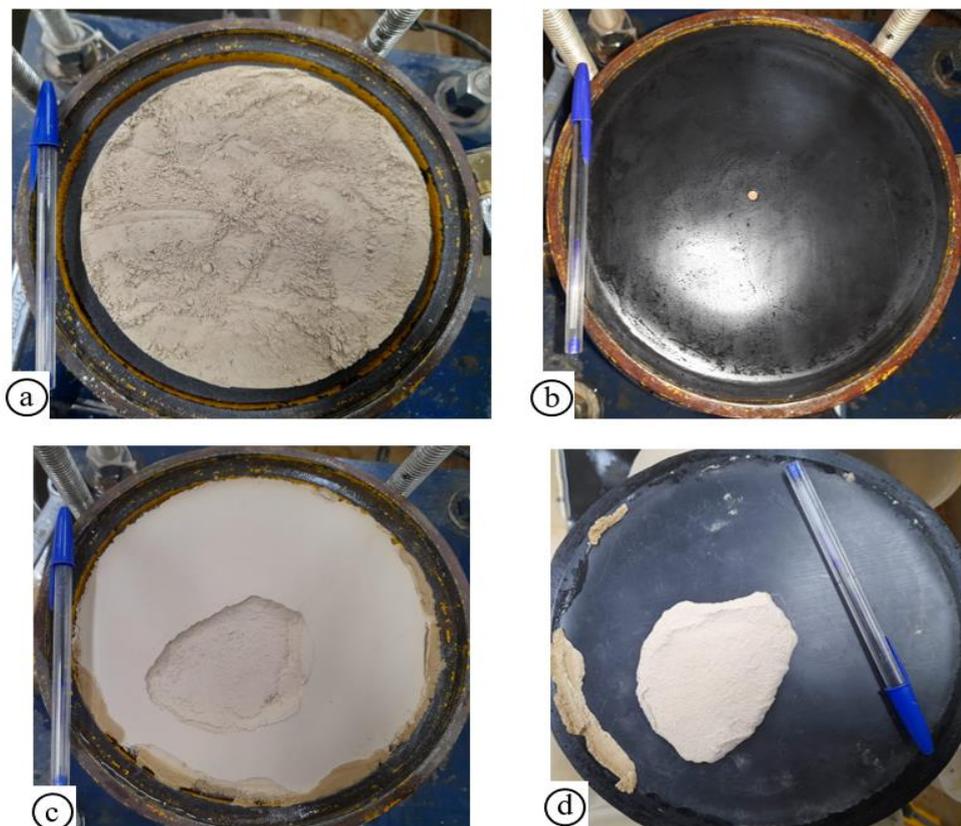


Figura 4.14 - Ensaio de vazamento através do furo de 5 mm em barreira de PEAD/GCL-D: a) instalação do GCL-D sobre o prato metálico; b) PEAD/GCL-D após o ensaio; c) amostra de GCL-D após o ensaio; d) face inferior da geomembrana de PEAD após o ensaio.

4.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO FLUXO DE ÁGUA ATRAVÉS DO DANO EM GEOMEMBRANA DE PVC E PEAD

A Figura 4.15 apresenta, no mesmo gráfico, a vazão e a temperatura para alguns ensaios com aquecimento de água para analisar a influência da temperatura nos resultados dos experimentos. Mantendo uma pressão constante de 800 kPa e instalando lâmpadas refletoras de infravermelho para aquecer a água, pode-se observar que a temperatura aumentou aproximadamente 63% no teste utilizando o corte de 50 mm na geomembrana PEAD, por exemplo.

Os volumes efluentes nos testes aumentam significativamente em comparação com a situação sob temperatura ambiente na mesma pressão de teste (ver Figura 4.16). Em geral, o tamanho do dano mecânico e a mudança de temperatura influenciaram significativamente o vazamento. Foi registrada a temperatura mais alta de 39,56 °C durante o ensaio PVC/PM-C5. Aumentos na vazão em temperaturas elevadas podem ocorrer devido a deformações na geomembrana alterando sua forma inicial, pois as bordas da geomembrana são ancoradas pelo equipamento

de ensaio. Cardona (2013) relata que o aumento do vazamento sob temperaturas mais altas seria esperado também devido à menor viscosidade da água sob temperaturas mais elevadas.

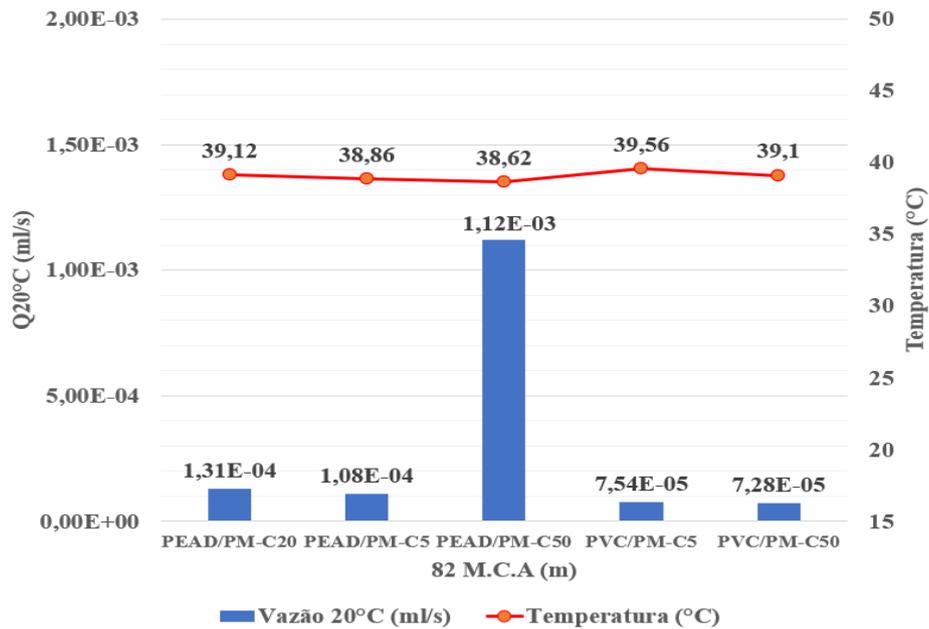


Figura 4.15 - Resultados de vazamentos através de danos mecânicos por corte em geomembranas de PVC e PEAD.

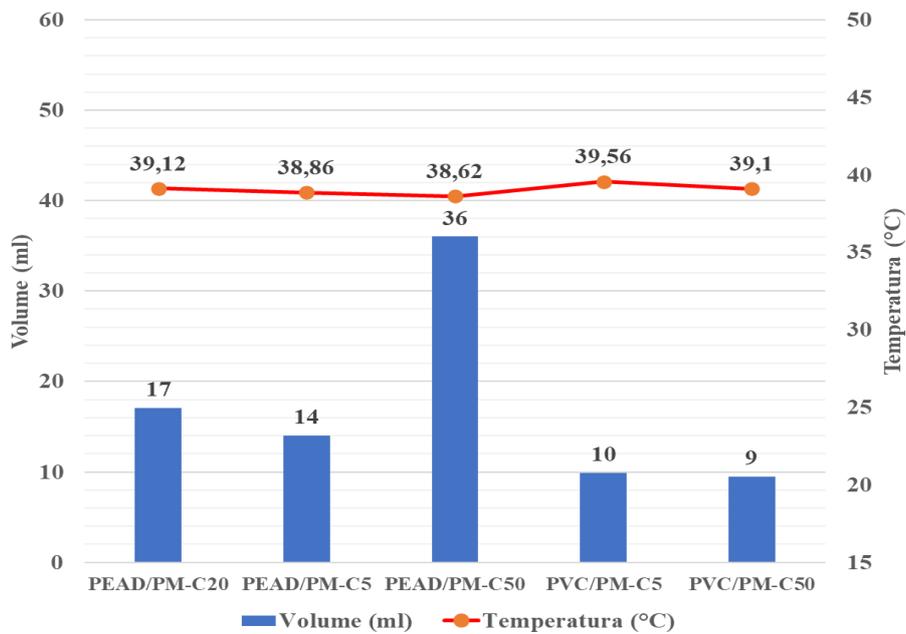


Figura 4.16 - Influência da temperatura na vazão dos ensaios com dano em geomembrana de PVC e PEAD.

As variações de temperatura podem causar expansão ou contração dos geossintéticos, gerando tensões de tração ou compressão. Portanto, é importante prever folgas de instalação nos projetos para compensar essas possíveis deformações. Além disso, estas tensões podem alterar a forma geométrica e dimensões de danos mecânicos, com repercussões nas intensidades de vazamentos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

No presente estudo, o vazamento por danos mecânicos como cortes e furos em geomembranas de PVC e PEAD foi analisado sob a influência de diferentes pressões de água, variando de 20 kPa a 800 kPa, que equivalem a de 2 a 80 m de coluna de água sobre a geomembrana. Além do estudo experimental, os gráficos dos resultados incluíram previsões de vazamento total com base na qualidade do contato da interface, conforme mencionado nos estudos de Nosko & Touze-Foltz (2000), Rowe & Hosney (2010) e Rowe (2018).

Em geral, foram observadas taxas de vazamento variando de $10E-8$ a $10E+1$ ml/s, com um volume total de água passando pelo dano mecânico de até $10E+3$ ml em um intervalo de tempo de 20 segundo, dependendo do tipo e tamanho do dano e da pressão na geomembrana. Esses estudos podem ser relevantes dependendo do tipo de construção e onde ocorre o vazamento.

Observou-se que as taxas de vazamento são influenciadas por vários fatores, incluindo o tipo e o tamanho do dano (ferramenta usada durante a construção que danificou involuntariamente a geomembrana), a pressão da água na barreira composta e a temperatura do ambiente. As principais conclusões obtidas na pesquisa são apresentadas a seguir.

As condições do elemento de corte podem influenciar significativamente o vazamento produzido pelo dano. Além de causar o corte (usando uma faca), o elemento pode criar anomalias nas extremidades do dano mecânico e intensificar o fluxo através dele. Os danos circulares tendem a causar vazamentos mais intensos em relação aos cortes longitudinais devido à maior área aberta do dano para a passagem do líquido.

A intensidade do vazamento depende da qualidade do contato entre a geomembrana e a camada subjacente. Neste caso, como a geomembrana de PEAD é mais rígida que a geomembrana de PVC, foram observadas melhores condições de contato para a geomembrana de PVC, que, aliada a algum fechamento do dano tipo corte devido ao efeito de Poisson, resultou em menores vazamentos.

Quanto ao uso de geotêxteis não tecidos sob a geomembrana

- Aumentos significativos no vazamento foram observados ao usar geotêxteis não tecidos como proteção subjacente à geomembrana em comparação com o uso da barreira

GM/PM (para geomembranas de PVC e PEAD). A espessura dos geotêxteis não tecidos facilita o escoamento da água através da drenagem lateral e posterior infiltração.

- Ao comparar as propriedades hidráulicas entre o GT200 e o GT900, pôde-se observar que o GT900 possui propriedades hidráulicas menores, mas sua espessura é 129% maior que a do GT200, o que resultou em maiores taxas de vazamento. O vazamento foi intensificado com o aumento das pressões hidrostáticas nas geomembranas de PVC e PEAD.
- A geometria (forma e tamanho) do dano mecânico (seja corte ou furo) também influenciou os resultados. Observou-se que o uso do GT900 apresentou maiores taxas de vazamento em relação ao uso do GT200.

Os estudos realizados sobre o uso de geocompósito de bentonita como barreira hidráulica examinaram a influência das características da bentonita (bentonita sódica em pó ou granulada), bem como a influência do processo de fabricação da GCL. As seguintes conclusões foram obtidas:

- Ao utilizar o GCL como barreira hidráulica, deve-se atentar para a ocorrência de erosão de bentonita ao longo do tempo. Esse comportamento foi observado durante alguns ensaios com GCL, onde a água efluente ficou suja devido à percolação da água com bentonita em pó ou granulada, principalmente em ensaios realizados em geomembranas com danos circulares.
- Um geotêxtil não tecido na camada superior do GCL (GCL-A, GCL-B, GCL-C) pode facilitar o escoamento superficial e a saturação, tornando a superfície da amostra mais homogênea.
- Observou-se que o processo de erosão no GCL iniciou no centro do furo e irradiou-se em direção às bordas da amostra, criando caminhos preferenciais para escoamento de água com bentonita. A aplicação de silicone ao redor do perímetro das amostras GCL (GCL-A, GCL-B) reduz as chances de criar caminhos de fluxo preferenciais e erosão de bentonita durante o teste. O desempenho do GCL-A foi melhor para baixas pressões (entre 20 kPa e 100 kPa), enquanto o GCL-B apresentou melhores resultados para pressões acima de 200 kPa. Processo de hidratação e expansão da bentonita em contato direto com o dano mecânico na geomembrana levou à cicatrização do dano, conforme identificado nos ensaios com a barreira composta GCL-D (PVC/GCL-D e PEAD/GCL-D).

Imperfeições na superfície do material subjacente rígido (material de base) podem também influenciar a intensidade do vazamento. O tipo e a qualidade da face inferior da geomembrana (lisa ou texturizada) também podem influenciar no fluxo de interface entre a geomembrana e o material de base. Além disso, o tipo de material da geomembrana desempenha um papel crucial no comportamento quanto a vazamentos. As geomembranas de PVC e PEAD possuem diferentes propriedades mecânicas, o que afeta suas respostas a danos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados e conclusões obtidos na pesquisa, os seguintes tópicos são sugeridos para estudos futuros:

- Avaliar o fluxo de água por danos mecânicos em outras barreiras compostas (GM/GCL/CCL, GM/CCL) em condições semelhantes às empregadas nesta pesquisa.
- Realizar testes com solos como material de base.
- Realizar testes com outros tipos de GCLs.
- Avaliar o fluxo de água através de danos mecânicos em geomembranas sob baixas temperaturas (climas frios).
- Medir diretamente a temperatura da água durante o teste.
- Avaliar o fluxo de água através de danos mecânicos com diferentes formas (triangulares, quadrados, losangos formas irregulares) e dimensões dos danos.
- Avaliar o fluxo de água através de múltiplos danos mecânicos na geomembrana.
- Estudar vazamento por danos em outros tipos de geomembranas, variando a espessura e composição do material.
- Executar simulações numéricas (elementos finitos, por exemplo) dos ensaios executados na presente pesquisa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMENTO, M., PEZZOLO, V.C. (2015). Manual Brasileiro de Geossintéticos: Aplicações em proteção. Edgar Blucher, São Paulo, SP, Brasil, 2 ed., 572 p.
- ASSIS, A.P., HERNANDEZ, H.M., COLMANETTI, J.P. (2014). Notas de aulas de barragens. Apostila, Publicação G.AP-AA006/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- ABNT NBR 8419 (1992). Versão corrigida 1996. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 7 p.
- ABNT NBR ISO 10318-1 (2021). Geossintéticos – Termos e definições. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2021.
- ASTM D 4439 (2022). Standard Terminology for Geosynthetics. American Society for Testing Materials.
- BUENO, B.S. & VILAR, O.M. (2015). Manual Brasileiro de Geossintéticos: Propriedades, Ensaio e Normas. Edgar Blucher, São Paulo, SP, Brasil, 2 ed., 572 p.
- CAMARGOS, C.S. (2022). Análise numérica de vazamentos através de danos em geomembranas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-345/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111 p.
- CAPUTO, H. P. (1975). Permeabilidade dos solos. Mecânica dos Solos e suas Aplicações, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, pp. 66-69.
- CARDONA, L. I. D. (2013). Estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-230/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73 p.
- CARPI (2011). RCC Dams waterproofing of the upstream face. CARPI TECH. Passeggiata, Switzerland, 12 p.
- CARPI (2023). Waterproofing specialist and contractors. CARPI TECH. Passeggiata, 2015. Disponível em: <https://www.carpitech.com/en/projects/dams-repair-and-rehabilitation/?cat=rcc>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- COLMANETTI, J.P. (2006). Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da fase de montante de barragens de enrocamento. Tese de doutorado, Publicação n° G.TD-037/2006, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 272 p.
- DÁVILA, L.I & PALMEIRA, E.M. (2014). Study of Flow through mechanical damages in PVC geomembranes under high hydraulic heads. Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics, ICG, Berlin, Germany, 339-345.
- FERNANDES, L. R. (2012). Estudo da Cobertura do Lixão “Morávia” da Cidade de Medellín, Colômbia. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-219/12, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 170 p.
- FOOSE, G. J., BENSON, C. H. & EDIL, T. B. (2001). Predicting Leakage Through Composite Landfill Liners, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(6): 510-520.

- FOX, P. J., ATHANASSOPOULOS, C., THIELMANN, S. S. & STERN, A. N. (2012). Shear-Induced Geomembrane Damage due to Gravel in Underlying Compacted Clay, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 43(2): 30-34.
- GIROUD, J.P. & BONAPARTE, R. (1989). Leakage through liners constructed with geomembranes – part I. Geomembrane liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 8(1), 27-67.
- GIROUD, J. P. (1997). Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects. *Geosynthetics International*, 4(3-4), 335-348
- GUYONNET, D., TOUZE-FOLTZ, N., NOROTTE, V., PTHIER, C., DIDIER, G., GAILHANOU, H., BLANC, P. & WARMONT, F. (2009). Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5): 321-331.
- HARPUR, W.A., WILSON-FAHMY, R.F. & KOERNER, R.M. (1993). Evaluation of the contact between geosynthetic clay liners and geomembranes in terms of transmissivity. *Proceedings of the Seventh GRI Conference on Geosynthetic Liners Systems: Innovations, Concerns and Design*, IFAI, St. Paul, MN, pp. 138-149.
- ICOLD (2010). Geomembrane sealing systems for dams – Design principles and review of experience. *Bulletin 135 of the International Commission on Large Dams*, Paris, 464 p.
- INGOLD, T.S. (1994). *The Geotextiles and Geomembranes Manual*. Elsevier Advanced Technology, UK, 610 p.
- JOSHI, P., ROWE, R. K. & BRACHMAN, R. W. I. (2017). Physical and hydraulic response of geomembrane wrinkles underlying saturated fine tailings. *Geosynthetics International*, 24(1), 82-94.
- KRAUS, J. (2022). Geosynthetics, sustainability and planetary boundaries: Real global benefits and potential policy risks in Europe. *XXXII Conferência Nacional de Geossintéticos*, IGS, Bologna, Itália, pp 29-37.
- KOERNER, R. M. (2005). Designing with geomembranes. *Designing with Geosynthetics*, Horton, M. J. & Svendsen (eds), Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, pp. 430-474.
- MACCAFERRI. (2021). *Catálogo: Sistemas de Proteção Ambiental: Necessidades e Soluções*. São Paulo, Brasil.
- MANO, E. B. (1991). *Polímeros como materiais de engenharia*. Editora Edgard Blucher, São Paulo, SP, 1ed, 197 p.
- MENDES, M.J.A. (2010). *Alguns Fatores que Influenciam o Desempenho de Geocompostos Bentoníticos sob Fluxo de Gases e Líquidos em Barreiras de Aterros Sanitários*. Tese de Doutorado. Publicação G.TD-064/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180 p.
- MONTORO, M.A., FRANCISCA, F.M. & JUAREZ, M.A. (2015). Leakage analysis through composite liners in landfills. *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*, IOS Press, Córdoba, pp. 769- 776.
- NOSKO, V. & TOUZE-FOLTZ, N. (2000). Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer. *Proceedings of the Second European Conference on Geosynthetics*, AGI, AGI-IGS, Bologna, Italy, Vol. 2, pp. 557-560.

- PALMEIRA, E. M. (2018). Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 1. Ed. 1 vol., 294 p.
- ROWE, R.K. (2012). Short and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur Casagrande Lecture, NRC, Toronto, Canada, 49: 141-169.
- ROWE, R. K. (2018). Environmental geotechnics: looking back, looking forward. Sixteenth Croce Lecture, IGJ, 4: 8-40.
- ROWE, R.K., BRACHMAN, R.W.I, IRFAN, H., SMITH, M.E. & THIEL, R. (2013). Effect of underliner on geomembrane strains in heap Leach applications. Geotextiles and Geomembranes, 40: 37-47.
- ROWE, R. K. & FAN, J. (2021). Effect of geomembrane hole geometry on leakage overlain by saturated tailings. Geotextiles and Geomembranes, 49: 1506-1518.
- ROWE, R. K. & HOSNEY, M. S. (2010). A systems engineering approach to minimizing leachate leakage from landfills. 9th International Conference on Geosynthetics, pp. 501-510.
- SCHEIRS, J. (2009). A guide to polymeric geomembranes: a practical approach, Scheirs, J. (eds), John Wiley and Sons Ltd, Edithvale, Australia. 572 p.
- SHUKLA, S. K. (2016). An Introduction to Geosynthetic Engineering, CRC Press/Balkema is an Imprint of the Taylor & Francis Group, London, United Kingdom, 449 p.
- VENTERS, J. (2021). What is the difference between a woven and nonwoven geotextile. ATA. Roseville, junho, 2021. Disponível em: <https://geosyntheticsmagazine.com/2021/06/16/what-is-the-difference-between-a-woven-and-nonwoven-geotextile/>. Acesso em: 10 mai. 2023.
- VERTEMATTI, J. C. (2015). Manual Brasileiro de Geossintéticos: Aplicações em Reforço de Solos. Edgar Blucher, São Paulo, SP, Brasil, 2 ed., 572 p.
- VERTOWN (2022). Como funciona o aterro sanitário. Vertown Gestão de resíduos, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://www.vertown.com/blog/como-funciona-o-aterro-sanitario/>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- VIANA, H.N.L. (2007). Estudo da Estabilidade e Condutividade Hidráulica de Sistemas de Revestimento Convencionais e Alternativos para Obras de Disposição de Resíduos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-048/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 259 p.
- VON MAUBEUGE, K.P. & STOYLE, J. (2021). The ISO design guide for Geosynthetics barriers and the use for safe and economic barrier solutions. 11th Int. Conf. On Geotechnique, Construction Materials & Environment, Kyoto, Japan, 428-435.
- YASODYAN, S.E., DUTTA, R.K., NISHA, N.P. & SALILA, S. (2011). Quantification of Discharge through the Composite Liner due to Geomembrane Defect. International Journal of Geotechnics and Environment, IJGE, 3(1): 17-34.