

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

**ESTUDO DE FLUXO ATRAVÉS DE DANOS MECÂNICOS EM
GEOMEMBRANAS**

LUCÍA ISABEL DÁVILA CARDONA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-230/13

BRASÍLIA / DF: AGOSTO / 2013

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

**ESTUDO DE FLUXO ATRAVÉS DE DANOS MECÂNICOS
EM GEOMEMBRANAS**

LUCÍA ISABEL DÁVILA CARDONA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSARIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

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

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

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

DATA: BRASÍLIA/ DF, AGOSTO 21 DE 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

CARDONA, LUCÍA ISABEL DÁVILA

Estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas [Distrito Federal] 2013

xviii, 73 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2013)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Geomembrana | 2. Geossintéticos em Obras Hidráulicas |
| 3. Danos em Geomembranas | 4. Barreiras impermeabilizantes |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARDONA, L. I. D. (2013). Estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas, Publicação G.DM-230/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucía Isabel Dávila Cardona

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas.

GRAU / ANO: Mestre / 2013.

É concedida a 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 cópia para esta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Lucía Isabel Dávila Cardona
CLN 423/413 Bloco A apto 205
Edifício Real Park, Asa Norte
70867-405 – Brasília/DF – BRASIL

“A veces sentimos que lo que hacemos es tan solo una gota en el mar, pero el mar sería menos si le faltara una gota.”

Madre Teresa de Calcuta

Agradecimentos

Quero agradecer em primeiro lugar a Deus, meu criador, meu apoio e minha luz. A Nossa Senhora a Virgem Maria, por ser além da minha mãe, um exemplo de mulher para mim.

A minha família. Vocês são o meu maior tesouro. Especialmente a minha mãe Rosvelia, ao meu esposo Alberto Max, aos meus irmãos Ernesto e César Humberto e ao meu pai Ernesto Javier. Também aos meus sogros Zoila e Max. O apoio de cada um de vocês tem sido inestimável para eu ter atingido este objetivo. Obrigada por me fazerem sentir perto apesar de estarmos tão longe. Obrigada pelas mensagens, e-mails, ligações e todas as amostras de carinho.

Ao professor Ennio Marques Palmeira, meu orientador, pela sua paciência, disposição, tempo, apoio e ensino. O senhor é um exemplo de inteligência, sabedoria, temperança, dedicação e organização.

A minha querida amiga Janaína: muito obrigada pessoa! Agradeço muito pelo apoio ao longo da minha dissertação, por ter-me ensinado muitas coisas, pela tua amizade, boa vontade e acolhida.

Aos meus amigos Elizabeth e Raydel, por terem me apoiado ao longo destes dois anos, pela suas amizades e sempre dispostos em me ajudar.

As minhas amigas em Honduras: Ana Esther, Rossie, Isby e Diana pelo apoio, orações e carinho.

Às minhas compatriotas: Thelma, por ter-me recebido em sua casa ao chegar ao Brasil, e Tania pela amizade e bons momentos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia especialmente ao professor Gregório por dividir comigo os seus conhecimentos e ter sempre a boa disposição de esclarecer as dúvidas.

Ao seu Arthur, do Laboratório de Engenharia Mecânica, por ter me ajudado no processo de montagem e reparação do equipamento. Obrigada pela sua criatividade e disposição para me auxiliar.

Aos meus colegas de turma: Angélica, Yaritza, Julián, Eduardo, Igor e Pedro, pela suas amizades e companhia durante o período das aulas.

Aos meus colegas que foram um apoio durante a realização dos ensaios: Claudia, Mariana, Daniel Arthur Carolina e Oisy. Também aos técnicos que me auxiliaram com suas forças quando necessárias: Adolfo, Thiago, Simon e Jonas.

Aos meus colegas: Luciana, Daniel Fernando, Ivonne, Jaime, Ewerton e Marcelo, pela suas disposições, sugestões e ajuda em geral.

Agradeço também à Universidade de Brasília e ao CNPQ, pelo apoio logístico e financeiro prestado.

Geomembranas são comumente definidas como materiais sintéticos impermeáveis e bidimensionais utilizados como barreira em obras geotécnicas e geoambientais. Elas têm sido utilizadas como barreiras em barragens desde 1959 (Barragem de Contrada Sabetta, Itália, por exemplo), e desde então, a sua elevada disponibilidade e bom desempenho as tem colocado como um material amplamente utilizado em estruturas importantes em todo o mundo. Como parte de um programa de pesquisa sobre os efeitos dos danos em geomembranas em obras hidráulicas, ensaios de laboratório foram realizados com o propósito de medir a vazão que passa através de geomembranas com danos mecânicos. Um equipamento especialmente construído para a pesquisa foi utilizado. Ele tem a capacidade de imprimir altas pressões na água em contato com as geomembrana testadas. Danos lineares com comprimentos entre 5 mm e 50 mm foram provocados nas amostras de uma geomembrana de PVC com 1 mm de espessura. As amostras danificadas foram submetidas a elevadas alturas de coluna de água. Os danos foram realizados com diferentes tipos de ferramentas para avaliar a influência do tipo de mecanismo provocador do corte no vazamento através da geomembrana. As amostras de geomembrana foram apoiadas numa base lisa e rígida durante a realização dos ensaios. Pressões de 20 kPa a 800 kPa foram aplicadas na água, equivalentes a aproximadamente de 2 m a 80 m de coluna d'água sobre o dano. Foram avaliadas a influência da dimensão e das características do dano no vazamento através da geomembrana. Os resultados obtidos mostram que o tipo de mecanismo provocador do corte e a pressão aplicada no sistema influenciam a intensidade de vazamento pelo dano. Variações de temperatura e conseqüentes deformações na geomembrana também podem influenciar a intensidade e o padrão de vazamento pelo corte.

Geomembranes are often defined as impervious two-dimensional synthetic materials, utilized for barrier purposes in geotechnical and in geoenvironmental projects. They have been used as barriers in dams since 1959 (Contrada Sabetta Dam, Italy, for instance), and from then on, their high availability and good performance have made them a widely used material in important structures around the world. As part of a research programme on the effects of damages in geomembranes in hydraulic works, laboratory tests were carried out in order to measure the volume of water that passes through geomembranes with mechanical damages. A special apparatus capable of applying high water pressures on geomembrane specimens was built for the tests. Cuts 5 mm to 50 mm long were made in specimens of a 1mm thick PVC geomembrane, which was subjected to high water heads. The cuts were made with different types of tools for the evaluation on the influence of the type of damage mechanism on the leakage through the damage. The geomembrane specimen rested on a smooth plane rigid base. Pressures from 20 kPa to 800 kPa were applied to the system, which are equivalent to water heads between 2 m and 80 m above the damaged geomembrane. The influence of the dimension and characteristics of the damage on the leakage through the geomembrane were assessed. The results obtained show that not only the dimension of the cut influences leakage rate but the type of mechanism causing the cut and the pressure applied to the system are also important. Temperature variations and consequent geomembrane deformations also influence the intensity and the pattern of leakage through the cut.

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Motivação da Pesquisa | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 2 |
| 1.3 Metodologia | 2 |
| 1.4 Estrutura da dissertação | 3 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 Geossintéticos em obras hidráulicas e de proteção ambiental..... | 4 |
| 2.1.1 Introdução | 4 |
| 2.1.2 Generalidades..... | 4 |
| 2.1.3 Utilização de geomembranas em barragens | 7 |
| 2.2 Geomembranas | 11 |
| 2.2.1 Definição | 11 |
| 2.2.2 Função Barreira..... | 13 |
| 2.3 Danos em geomembranas | 14 |
| 2.3.1 Introdução | 14 |
| 2.3.2 Danos mecânicos em geomembranas..... | 16 |
| 2.3.3 Proteção contra danos mecânicos..... | 19 |
| 2.4 Barreiras impermeabilizantes compostas | 20 |
| 2.4.1 Introdução | 20 |
| 2.4.2 Geotêxteis para proteção de geomembranas..... | 21 |
| 2.4.3 GCL combinados a geomembranas..... | 23 |
| 2.5 Fatores que influenciam a taxa de fluxo através de danos em geomembranas | 25 |
| 2.5.1 Introdução | 25 |
| 2.5.2 Influência da qualidade do contato | 25 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.5.3 | Rugas em geomembranas | 27 |
| 2.5.4 | Influência da carga hidráulica..... | 29 |
| 3 | METODOLOGIA DA PESQUISA | 30 |
| 3.1 | Equipamento e materiais | 30 |
| 3.1.1 | Equipamento para ensaios de vazamento em geomembranas danificadas..... | 30 |
| 3.1.1.1 | Sistema ar-água | 31 |
| 3.1.1.2 | Célula de ensaio | 33 |
| 3.1.1.3 | Sistema de aquisição de dados..... | 35 |
| 3.1.1.4 | Outros equipamentos | 36 |
| 3.1.2 | Geomembrana | 37 |
| 3.2 | Metodologia da Pesquisa..... | 38 |
| 3.2.1 | Preparação das amostras de geomembrana..... | 38 |
| 3.2.2 | Montagem do ensaio | 38 |
| 3.2.3 | Metodologia dos ensaios de vazamento através de danos em geomembranas..... | 41 |
| 3.2.3.1 | Medida da vazão..... | 41 |
| 3.2.3.2 | Correção da temperatura..... | 42 |
| 4 | RESULTADOS E ANÁLISES..... | 44 |
| 4.1 | Introdução..... | 44 |
| 4.2 | Resultados dos primeiros ensaios | 44 |
| 4.3 | Estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas..... | 45 |
| 4.3.1 | Vazão através de danos provocados por estilete..... | 46 |
| 4.3.2 | Vazão através de danos provocados por formão..... | 48 |
| 4.4 | Fatores que influenciam a taxa de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas | 52 |
| 4.4.1 | Influência do tipo de dano | 52 |
| 4.4.2 | Influência da temperatura | 55 |
| 5 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 59 |

| | |
|--|----|
| 5.1 Conclusões..... | 59 |
| 5.2 Sugestões para pesquisas futuras | 60 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 62 |
| APÊNDICES | 67 |
| A. Influência da temperatura na vazão..... | 68 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1. Principais áreas de aplicação para geossintéticos em obras hidráulicas e de proteção ambiental (Modificado de Shukla, 2012)..... | 5 |
| Tabela 2.2. Primeiros usos de geomembranas em barragens de terra e enrocamento (dados de Cazzuffi, <i>et al.</i> , 2010)..... | 9 |
| Tabela 2.3. Sistemas de impermeabilização com geomembranas (ICOLD, 2010)..... | 12 |
| Tabela 2.4. Tipo e dimensão dos danos em geomembranas expostas (Rollin <i>et al.</i> , 1999). | 19 |
| Tabela 2.5. Tipo e área dos danos em geomembranas cobertas (Nosko & Touze Foltz, 2000). | 19 |
| Tabela 2.6. Qualidade da superfície subjacente à geomembrana (Rollin <i>et al.</i> , 1999)... | 22 |
| Tabela 3.1 Especificações técnicas da geomembrana utilizada (Fernandes, 2012). | 37 |
| Tabela 4.1 Ensaios analisados no estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas. | 45 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Esq.: Reservatório de montanha na França. Dir.: Derrapagem de gelo sobre a geomembrana num reservatório de montanha (Girard <i>et al.</i> , 2010)..... | 7 |
| Figura 2.2. Classificação de barragens que utilizam geomembranas como principal meio impermeabilizante (dados de ICOLD, 2010). | 8 |
| Figura 2.3. Geomembranas para impermeabilização da face de montante. (a) Barragem de CCR Concepción, 70 m., Honduras, 1991. (b) Barragem de CCR Miel, 180 m., Colômbia, 2002. (c) Barragem de CCR Nacaome, 55 m., Honduras, 1994. (Scuero <i>et al.</i> , 2012). | 10 |
| Figura 2.4. Tipos de geomembranas em barragens (ICOLD, 2010)..... | 10 |
| Figura 2.5. Máximas alturas de colunas de água suportadas por geomembranas em barragens no mundo (Scuero <i>et al.</i> , 2012; Cazzuffi <i>et al.</i> , 2010 da base de dados da ICOLD 2010)..... | 11 |
| Figura 2.6. Danos mecânicos em geomembranas: rasgos, cortes e puncionamentos (Rebelo 2008) | 15 |
| Figura 2.7. Importância da garantia de qualidade na construção (CQA) em geomembranas (dados de Forget <i>et al.</i> 2005)..... | 17 |
| Figura 2.8. Causas de dano em geomembranas após cobertura (dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000)..... | 17 |
| Figura 2.9. Principais causas de danos em geomembranas expostas (Rollin <i>et al.</i> 1999) | 18 |
| Figura 2.10. Localização dos danos em geomembranas cobertas (dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000)..... | 18 |
| Figura 2.11. Múltiplas aplicações de geossintéticos no Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Laogang em Shangai, China (Yee & Wong, 2008)..... | 21 |
| Figura 2.12. Fluxo de líquido através de uma barreira composta devido a um dano na geomembrana (Giroud, 1997)..... | 26 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.13. Liner de argila que fornece uma condição de contato ruim devido às trincas e a superfície rugosa observadas após a compactação (Rowe & Hosney, 2010)..... | 27 |
| Figura 2.14. Rugas interconectadas numa geomembrana (esq.) e geomembrana essencialmente sem rugas (dir.) (Rowe & Hosney, 2010)..... | 28 |
| Figura 3.1. Vista geral do equipamento utilizado na pesquisa..... | 30 |
| Figura 3.2. Esquema do equipamento utilizado na pesquisa..... | 31 |
| Figura 3.3. Sistema de pressurização: (a) compressor; (b) manômetros e válvulas reguladoras. | 32 |
| Figura 3.4. Esquema do sistema ar-água..... | 33 |
| Figura 3.5. Célula de ensaio utilizada durante a pesquisa..... | 34 |
| Figura 3.6. Esquema da célula de ensaio utilizada durante a pesquisa..... | 35 |
| Figura 3.7. Sistema de aquisição de dados: (a) Transdutor de pressão, (b) aquisitor de dados Spider 8 e (c) sistema de aquisição de dados. | 35 |
| Figura 3.8. Outros equipamentos utilizados: (a) Câmera Web HD, (b) Termohigrômetro digital, (c) balança de precisão e (d) microscópio. | 37 |
| Figura 3.9. Geomembrana lisa de PVC utilizada nos ensaios..... | 37 |
| Figura 3.10. Preparação das amostras: (a) Corte das amostras de geomembrana a serem ensaiadas. (b) Realização de dano na geomembrana mediante corte com estilete. (c) Ferramentas utilizadas para danificar a geomembrana por meio de queda sobre a ferramenta. (d) Realização de dano na geomembrana. | 38 |
| Figura 3.11. Amostras de geomembrana com dano mecânico induzido..... | 39 |
| Figura 3.12. Montagem do ensaio: (a) o cilindro de suporte da placa metálica colocado dentro do cilindro inferior da célula, (b) a placa metálica para apoio da geomembrana (c) placa metálica, (d) colocação da geomembrana, (e) cilindro superior posicionado sobre a geomembrana e (f) silicone aplicado nas bordas do cilindro em contato com a geomembrana..... | 40 |
| Figura 3.13. Cronologia dos ensaios..... | 41 |
| Figura 3.14. Esq.: Recipiente para medição da vazão passante pela geomembrana danificada. Dir.: Recipiente para monitoramento da evaporação..... | 42 |
| Figura 3.15. Pipeta para medir a vazão durante os ensaios..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.1. Resultados do Ensaio 1: vazão através de um rasgo de 5 mm realizado com estilete. | 44 |
| Figura 4.2. Resultados do Ensaio 2: vazão através de um rasgo de 50 mm realizado com estilete. | 44 |
| Figura 4.3. Resultados do Ensaio 3: vazão através de um rasgo de 20 mm realizado com estilete. | 45 |
| Figura 4.4. Resultados do Ensaio 1: vazão através de um rasgo de 5 mm realizado com estilete. | 46 |
| Figura 4.5. Volume total para o Ensaio 1: Estilete 5 mm. | 46 |
| Figura 4.6. Resultados do Ensaio 2: vazão através de um rasgo de 20 mm realizado com estilete. | 47 |
| Figura 4.7. Volume total para o Ensaio 2: Rasgo 20 mm com estilete..... | 47 |
| Figura 4.8 Resultados do Ensaio 3: vazão através de um rasgo de 50 mm realizado com estilete. | 48 |
| Figura 4.9. Volume total para o Ensaio 3: Estilete 50 mm. | 48 |
| Figura 4.10 Resultados do Ensaio 4: Vazão através de um rasgo de 5 mm realizado com formão. | 49 |
| Figura 4.11. Volume total para o Ensaio 4: Formão 5 mm. | 49 |
| Figura 4.12 Resultados do Ensaio 5: Vazão através de um rasgo de 20 mm realizado com formão..... | 50 |
| Figura 4.13. Volume total para o Ensaio 5: Formão 20 mm. | 50 |
| Figura 4.14 Resultados do Ensaio 6: Vazão através de um rasgo de 50 mm realizado com formão..... | 51 |
| Figura 4.15. Volume total para o Ensaio 6: Formão 50 mm. | 51 |
| Figura 4.16. Volume total passante pela geomembrana com dano de 5 mm. Comparação entre dano realizado com estilete (E 5 mm) e dano realizado com formão (F 5 mm).... | 52 |
| Figura 4.17. Dano de 5 mm na geomembrana. (a) Dano provocado com estilete. (b) Dano provocado com formão. | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.18. Volume total passante pela geomembrana com dano de 20 mm. Comparação de dano realizado com estilete (R 20 mm) vs. dano realizado com formão (F 20 mm)..... | 53 |
| Figura 4.19. Dano de 20 mm na geomembrana. Dano provocado com estilete (a), (b) e (c). Dano provocado com formão(d), (e) e (f)..... | 54 |
| Figura 4.20. Volume total passante pela geomembrana com dano de 50 mm. Comparação de dano realizado com estilete (E 50 mm) vs. dano realizado com formão (F 50 mm)..... | 54 |
| Figura 4.21. Dano de 50 mm na geomembrana. Dano provocado com estilete(a), (b) e (c). Dano provocado com formão (d), (e) e (f)..... | 55 |
| Figura 4.22. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 20 kPa..... | 56 |
| Figura 4.23. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 100 kPa..... | 56 |
| Figura 4.24. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 200 kPa..... | 56 |
| Figura 4.25. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 400 kPa..... | 57 |
| Figura 4.26. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 800 kPa..... | 57 |
| Figura A1. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com estilete, pressão de 20 kPa. | 68 |
| Figura A2. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com estilete, pressão de 100 kPa. | 68 |
| Figura A3. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com estilete, pressão de 200 kPa. | 68 |
| Figura A4. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com estilete, pressão de 400 kPa. | 69 |
| Figura A5. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 20 kPa..... | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura A6. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 100 kPa..... | 69 |
| Figura A7. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 200 kPa..... | 70 |
| Figura A8. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 400 kPa..... | 70 |
| Figura A9. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 800 kPa..... | 70 |
| Figura A10. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 20 kPa..... | 71 |
| Figura A11. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 100 kPa..... | 71 |
| Figura A12. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 200 kPa..... | 71 |
| Figura A13. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 400 kPa..... | 72 |
| Figura A14. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 800 kPa..... | 72 |
| Figura A15. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com formão, pressão de 20 kPa..... | 72 |
| Figura A16. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com formão, pressão de 100 kPa..... | 73 |
| Figura A17. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com formão, pressão de 200 kPa..... | 73 |
| Figura A18. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com formão, pressão de 400 kPa..... | 73 |

Lista de Símbolos e Abreviações

| | |
|-------------------|--|
| °C | Graus Celsius |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AHE | Aproveitamento Hidrelétrico |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CCL | Camada de Argila Compactada |
| cm | Centímetro |
| CPE | Polietileno clorado |
| CQA | Construction Quality Assurance |
| E | Dano realizado com estilete |
| F | Dano realizado com formão |
| g | Grama |
| g/cm ³ | Grama por centímetro cúbico |
| GCL | Geocomposto Argiloso |
| GM | Geomembrana |
| h | Hora |
| ICOLD | International Commission on Large Dams |
| IGS | International Geosynthetics Society |
| kN/m ² | Quilo Newton por metro quadrado |
| kPa | Quilo Pascal |
| l | Litro |
| l/h | Litros por hora |
| LDPE | Polietileno de Baixa Densidade |
| m | Metro |
| ml | Mililitro |
| mm | Milímetro |
| NBR | Norma Brasileira |
| Pa | Pascal |
| PCH | Pequenas Centrais Hidrelétricas |
| PE | Polietileno |
| PEAD | Polietileno de Alta Densidade |
| PVC | Policloreto de vinila ou polivinil clorado |
| PVC-P | Policloreto de vinila - Plastificado |
| RCC | Concreto Compactado a Rolo |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| T | Temperatura |
| UnB | Universidade de Brasília |
| η | Viscosidade |

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

As geomembranas são mundialmente utilizadas como barreira impermeabilizante em muitas obras de grande porte. Elas são utilizadas principalmente em obras de aterros sanitários, barragens, lagoas de contenção, reservatórios, canais, túneis e estruturas subterrâneas. A utilização de geomembranas apresenta numerosas vantagens como, por exemplo: facilidade e rapidez de instalação, facilidade de manuseio e transporte, resistência química, longa vida útil, etc. Além destas vantagens a utilização de geomembranas apresenta vários outros aspectos ambientais positivos, como:

- Redução na quantidade de materiais naturais que precisam ser obtidos e transportados para as construções (Singh, *et al.* 2012).
- Reduções substanciais na emissão de gases poluentes para a atmosfera (Frischknecht *et al.* 2013).
- Aumento da capacidade de armazenamento em aterros sanitários (Zanzinger *et al.*, 2012).

A utilização de geomembranas em barragens data de 1959, na barragem de Contrada Sabetta, na Itália. Desde então elas têm sido utilizadas com êxito em muitas barragens em diversos outros países, sendo capazes de suportar elevadas alturas de coluna de água (Cazzuffi *et al.*, 2010, Scuro *et al.*, 2012).

As geomembranas podem ser danificadas se os cuidados durante a sua instalação e ou cobertura não forem garantidos e sua função como barreira pode ser comprometida. Neste contexto, torna-se importante o estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas e os fatores que influenciam a intensidade desse fluxo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar fatores que influenciam a vazão de água através de danos mecânicos em geomembranas, por meio da utilização do equipamento para ensaio de vazamento em geomembranas danificadas desenvolvido na Universidade de Brasília.

Os tipos de dano que as geomembranas podem sofrer em uma obra são de diversos tipos e podem ser ocasionados por uma variedade de formas. O escopo desta pesquisa é avaliar a vazão através de danos mecânicos em geomembranas, e mais especificamente, rasgos. Desta forma, busca-se verificar a influência dos seguintes fatores na vazão através de uma geomembrana danificada por corte:

- Tipo de mecanismo provocador do corte
- Comprimento do corte
- Pressão de água sobre a geomembrana

1.3 METODOLOGIA

O estudo da vazão através de danos mecânicos em geomembranas compreendeu 6 ensaios de laboratório que foram realizados em equipamento desenvolvido especificamente para a pesquisa. Os ensaios foram feitos em diferentes configurações variando-se os seguintes fatores:

- A dimensão dos cortes e a ferramenta com que os mesmos foram provocados. Os cortes provocados foram lineares, com diferentes comprimentos.
- As pressões aplicadas na água durante o ensaio.

Os resultados obtidos durante a realização dos ensaios foram analisados e serão apresentados em capítulos subseqüentes.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em cinco capítulos.

No *Capítulo 1* é apresentada a motivação da pesquisa, os objetivos, a metodologia e a estrutura da dissertação.

No *Capítulo 2* são apresentados os fundamentos teóricos e alguns trabalhos relacionados ao tema da dissertação. Os tópicos fundamentais são: geossintéticos em obras hidráulicas e de proteção ambiental, geossintéticos em barragens, geomembranas, danos em geomembranas, barreiras compostas e fatores que influenciam o fluxo através de danos em geomembranas.

No *Capítulo 3* é descrito o equipamento utilizado para a realização dos ensaios de vazamento através de danos em geomembranas, os materiais utilizados, a preparação das amostras de geomembrana e a montagem dos ensaios realizados.

No *Capítulo 4* são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa, bem como os análises realizadas.

Finalmente no *Capítulo 5* são expostas as principais conclusões sobre o trabalho realizado e as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS HIDRÁULICAS E DE PROTEÇÃO AMBIENTAL

2.1.1 Introdução

A Engenharia Hidráulica é quase tão antiga quanto a civilização. O homem tem evoluído ao longo dos séculos e com a evolução das sociedades têm evoluído também as ciências e a tecnologia. É por isso que cada vez tem maior importância o desenvolvimento de materiais inovadores, de baixo custo, fácil manuseio e instalação, que requeiram o mínimo de esforço em manutenção. Os geossintéticos são exemplos destes tipos de materiais: fabricados em grande escala, facilmente transportados se comparados com os materiais mais tradicionais de construção, e com controle de qualidade superior ao dos materiais comumente empregados.

Segundo a ASTM D 4354 um geossintético é um produto plano manufaturado a partir de material polimérico utilizado com solo, rocha ou outro material relacionado à engenharia geotécnica como uma parte integral de uma obra feita pelo homem, estrutura ou sistema. Vários são os geossintéticos utilizados em obras hidráulicas e de proteção ambiental. Entre eles podemos mencionar: geotêxteis, geomembranas, geocompostos drenantes, geocélulas e geofôrmas, por exemplo.

Os geossintéticos para barreira são utilizados em várias situações e na impermeabilização de diversos tipos de obras e estruturas, tais como: aterros de resíduos domésticos e industriais, lagoas de contenção e de tratamento de resíduos industriais, revestimento de túneis, bases encapsuladas de estradas, tanques e silos subterrâneos de armazenamento, lagoas para piscicultura, esporte e lazer, coberturas e solos de edificações, caixas d'água elevadas ou enterradas, canais de adução e irrigação, piscinas e praias artificiais e confinamentos de áreas contaminadas.

2.1.2 Generalidades

Por sua baixa permeabilidade, boas características de resistência química e mecânica, controle de fabricação e facilidade de instalação, os geossintéticos constituem uma

imprescindível opção em obras de proteção ambiental, como na disposição de resíduos das mais variadas naturezas (Bueno *et al.*, 2004). Além dessas vantagens, os geossintéticos podem desempenhar suas funções sob cobertura de solo por pelo menos 120 anos (Shukla, 2012). Na Tabela 2.1 encontram-se as principais áreas de aplicação para geossintéticos em obras hidráulicas e de proteção ambiental.

Tabela 2.1. Principais áreas de aplicação para geossintéticos em obras hidráulicas e de proteção ambiental (Modificado Shukla, 2012).

| Área | Propósito | Funções principais | Produtos geossintéticos principais | Propriedades mais importantes | Considerações especiais |
|---|--|---|---|---|--|
| Aterros sanitários | Extrair o chorume e reter os desperdícios | Barreira de fluidos Drenagem Filtração Reforço | Geomembranas Geotêxteis Geogrelhas Geocompostos | Tamanho dos poros Permeabilidade Resistência Resistência à abrasão | Características do chorume Esforços durante a construção Alongamento |
| Barragens | Reduzir a infiltração através do aterro da barragem, prevenir a erosão interna/piping, prover drenagem, proteção do talude contra erosão | Barreira de fluidos Drenagem Filtração | Geomembranas Geotêxteis Georredes Geogrelhas Geocompostos | Tamanho dos poros Permeabilidade Resistência à abrasão | Colmatação Esforços durante a construção |
| Lagoas de contenção, reservatórios e canais | Reduzir a infiltração de água/líquido para dentro do solo | Barreira de fluidos | Geomembranas Geocompostos | Permeabilidade Resistência à abrasão | Esforços durante a construção |
| Túneis e estruturas subterrâneas | Prevenir a infiltração, prover drenagem da água de infiltração | Barreira de fluidos Proteção Drenagem | Geomembranas Geotêxteis Geocompostos | Permeabilidade Transmissividade Permissividade | Colmatação Esforços durante a construção |

A primeira aplicação de geomembranas em estruturas definitivas de usinas hidroelétricas no Brasil se deu recentemente, com o revestimento de alguns quilômetros de canais de grandes dimensões no AHE Itiquira, no sul do estado de Mato Grosso (Colmanetti 2006). Dos 5.500 m de canais, 4.800 foram revestidos com geomembranas

de polietileno de alta densidade (PEAD), protegidas por um geotêxtil não tecido instalado subjacente à membrana, totalizando 250.000 m² de revestimento.

Outras obras como o revestimento dos canais de transposição das águas do Açude Castanhão (CE) e do canal de adução da PCH Ponte de Pedra (MT) com geomembranas podem ser citadas como exemplos pioneiros de aplicação de geossintéticos em obras hidráulicas no Brasil (Colmanetti 2006).

Segundo Sandroni *et al.*, (2010), as rigorosas normas ambientais publicadas nos últimos anos do século XX têm chamado a atenção para a correta disposição de todo o tipo de resíduos, especialmente os resíduos sólidos domésticos. A opção dos lixões começou a ser abandonada em favor de aterros sanitários, uma estrutura de engenharia que abrange muitos elementos, como sistemas de *liner* e cobertura incluindo componentes de coleta de gases e de chorume.

A utilização de geomembranas é obrigatória em alguns países para os *liners* de certos tipos de instalações de contenção de resíduos como, por exemplo, aterros de resíduos perigosos e represamento de líquidos poluentes. Quando são utilizados processos de redução de resíduos sólidos urbanos (RSU) (por exemplo, compostagem, reciclagem, incineração) ainda há uma fração substancial de desperdício (às vezes maior que 50%) que devem ser depositados e, nos casos de aterros sobre aquíferos, eles precisam ser dimensionados com sistemas de barreira apropriados (Giroud & Bonaparte 1989a).

Provavelmente, um dos primeiros usos de geomembranas em aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil ocorreu ao redor de 1990, no aterro de São João, na cidade de São Paulo, que recebia cerca de 7500 toneladas de RSU por dia. Neste caso, uma geomembrana de PVC com 2 mm de espessura foi utilizada sobre uma camada de solo argiloso compactado (Sandroni *et al.*, 2010).

Outra aplicação das geomembranas é em reservatórios de montanhas, que são estruturas hidráulicas construídas em montanhas utilizadas em estações de ski para armazenar grandes quantidades de água para produzir gelo (Figura 2.1). Na França, a geomembrana é utilizada como núcleo do sistema impermeabilizante em 85% dos casos (Girard *et al.*, 2010). Também na França, geomembranas são utilizadas em grandes armazenamentos de água potável devido à facilidade de construção, eficiência e custos reduzidos se comparados com reservatórios de concreto. Além disso, já foi comprovado

que as geomembranas não produzem um sabor desagradável à água (Fayoux *et al.*, 2010).



Figura 2.1. Esq.: Reservatório de montanha na França. Dir.: Derrapagem de gelo sobre a geomembrana num reservatório de montanha (Girard *et al.*, 2010).

Além das aplicações mencionadas, as geomembranas têm sido utilizadas em obras de grande porte ao redor do mundo há algum tempo. Um exemplo deste tipo de obras de grande porte são as barragens.

2.1.3 Utilização de geomembranas em barragens

O emprego de geomembranas em barragens, em complemento ou substituição de materiais convencionais como a argila, concreto, ou concreto betuminoso, foi consequência, dentre outras considerações, do êxito obtido com sua utilização exitosa em canais e reservatórios. A credibilidade dos materiais sintéticos em barragens tem sido fundamentada no bom desempenho das barreiras de PVC incorporadas num grande número de barragens de concreto em diversas partes do mundo (Cazzuffi *et al.*, 2010). Segundo dados da ICOLD (2010), as geomembranas são utilizadas em diversos tipos de barragens como principal meio impermeabilizante. Estas podem ser barragens de concreto, de terra e enrocamento, e de concreto compactado a rolo (RCC), como mostrado na Figura 2.2.

A primeira utilização de geomembranas em barragens foi em 1959, na Barragem de Contrada Sabetta, na Itália (ICOLD, 2010). Em 1970 o uso de geomembranas foi estendido à reabilitação de barragens de concreto. A primeira aplicação de uma geomembrana numa barragem de concreto ocorreu em 1971, na barragem Lago Baitone, na Itália. Esta barragem possui uma altura de 37 m e um comprimento de 227 m. A membrana sofreu danos pelo gelo e pedaços de madeira flutuante e foi substituída em 1994. O primeiro caso bem sucedido de utilização de geomembranas na reabilitação

de barragens de concreto foi em 1976 na barragem Lago Miller, na Itália (Cazzuffi *et al.*, 2010). São listadas na Tabela 2.2 (Cazzuffi *et al.*, 2010) as primeiras barragens a utilizar geomembrana como o principal meio impermeabilizante, as dimensões da barragem, a localização e o tipo de membrana que foi utilizada.

Segundo Colmanetti (2006) e Colmanetti *et al.* (2010), diversos tipos de materiais podem ser empregados na construção de barragens: terra, enrocamento, concreto ou uma combinação destes. Para garantir a impermeabilidade da estrutura o recomendável é a execução de uma face não rígida que possa acompanhar as deformações do maciço sem deixar de atender a sua função de barreira hidráulica. Segundo os mesmos autores, as geomembranas de PVC-P (Policloreto de vinila - Plastificado) são a melhor escolha principalmente quando as barragens são de grande altura.

A utilização de geossintéticos está associada com uma redução na quantidade de materiais naturais que precisam ser obtidos e transportados para as construções das barragens. Este é um aspecto ambiental positivo em se utilizar geossintéticos (Singh, *et al.* 2012), que também provoca reduções substanciais na emissão de gases poluentes para a atmosfera (Frischknecht *et al.* 2013). Nas Figuras 2.3(a) a (c) podem-se observar alguns exemplos de utilização de geomembranas em barragens ao redor do mundo.

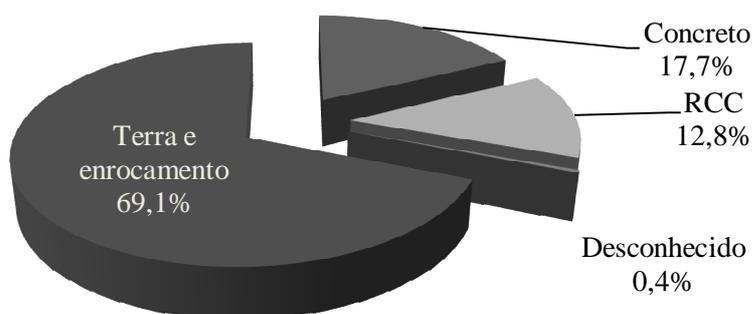


Figura 2.2. Classificação de barragens que utilizam geomembranas como principal meio impermeabilizante (dados de ICOLD, 2010).

A escolha da geomembrana adequada para uma barreira é baseada principalmente na compatibilidade química, mas é também dependente da facilidade de instalação e soldagem (Singh *et al.*, 2012).

Tabela 2.2. Primeiros usos de geomembranas como principal meio impermeabilizante em barragens de terra e enrocamento (dados de Cazzuffi, *et al.*, 2010).

| Barragem | Localização | Ano | Altura (m) | Comprimento (m) | Tipo de Membrana | Condições |
|------------------|--------------------|------------|-------------------|------------------------|---|---|
| Contrada Sabetta | Itália | 1959 | 32,5 | 155 | | Coberta |
| Dobsina | Eslováquia | 1960 | 10 | 204 | Polisobutileno, 2,0 mm | Coberta |
| Miel | França | 1968 | 15 | 130 | Borracha de butilo, 1,0 mm | Coberta |
| Odiel | Espanha | 1970 | 41 | Desconhecido | CPE | Dentro da barragem |
| Obecnice | República Checa | 1971 | 16 | 370 | PVC, 0,9 mm | Coberta |
| Wenholthausen | Alemanha | 1971 | 17 | 100 | PVC | Coberta |
| Neris | França | 1972 | 18 | 100 | Borracha de butilo, 1,5 mm | Coberta |
| Bitburg | Alemanha | 1972 | 13 | 95 | PVC | Coberta |
| Landstein | República Checa | 1973 | 26,5 | 376 | PVC, 1,1 mm | Coberta |
| Banegon | França | 1973 | 17 | Desconhecido | Betuminoso, 4,0 mm | Exposta |
| Herbes Blanches | França | 1975 | 13 | 85 | Borracha de butilo, 1,0 mm | Exposta |
| TwrDOSin | Eslováquia | 1977 | 16 | 307 | PVC, 0,9 mm | Coberta |
| L'Ospedale | França | 1978 | 26 | 135 | Betuminoso, 4,8 mm | Coberta |
| Avoriaz | França | 1979 | 11 | 135 | Betuminoso, 4,0 mm | Exposta |
| Gorghiglio | Itália | 1979 | 12 | 125 | PVC, 2,0 mm | Exposta nas encostas, coberta no fundo |
| Mas d'Armand | França | 1981 | 21 | 403 | Betuminoso, 4,8 mm | Coberta |
| Kyiche | República Checa | 1983 | 17,5 | 1660 | Polimérico feito in situ | Coberta |
| Trnavka | República Checa | 1983 | 21 | 165 | Polimérico feito in situ | Coberta |
| Codole | França | 1983 | 28 | 460 | PVC, 1,9 mm ligado a um geotêxtil agulhado não tecido 400g/m ² | Coberta |
| La Lande | França | 1983 | 17 | 80 | Betuminoso, 4,8 mm | Coberta |
| Rouffiac | França | 1983 | 12,5 | 157 | Betuminoso, 4,0 mm | Coberta na parte superior, exposta à água na parte inferior |

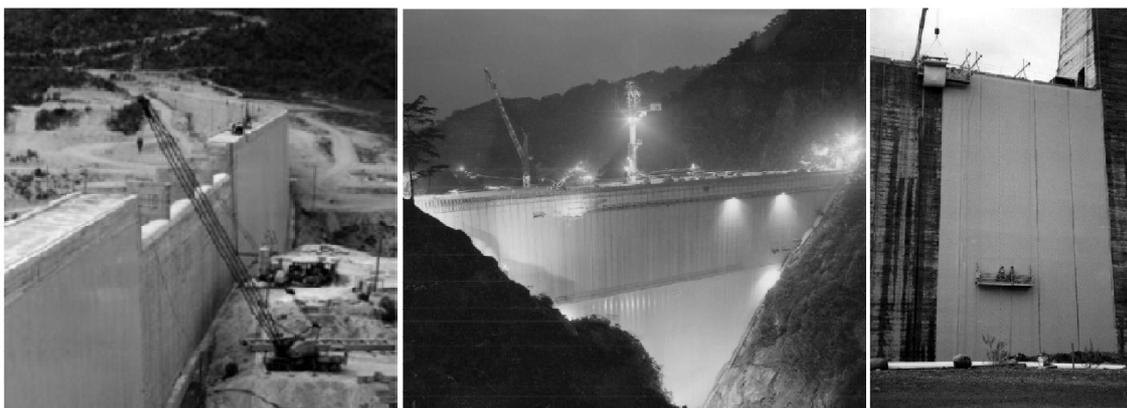


Figura 2.3. Geomembranas para impermeabilização da face de montante. (a) Barragem de CCR Concepción, 70 m., Honduras, 1991. (b) Barragem de CCR Miel, 180 m., Colômbia, 2002. (c) Barragem de CCR Nacaome, 55 m., Honduras, 1994. (Scuero *et al.*, 2012).

Segundo Scuero *et al.* (2012) geomembranas plastificadas de PVC (PVC-P) são muito valorizadas devido às suas características de flexibilidade. Estas características permitem suportar grandes recalques e resistir a movimentos que comprometeriam barreiras mais rígidas elaboradas a partir de materiais como concreto, concreto projetado e até mesmo camadas de argila compactada. Além da flexibilidade, segundo Singh *et al.*, (2012) as geomembranas de PVC são preferidas sobre as geomembranas rígidas de PE pela dificuldade de instalação e soldagem que as últimas apresentam. Segundo dados da ICOLD (2010), 91% das geomembranas em barragens no mundo fabricadas feitas com materiais poliméricos e só 9% delas com materiais betuminosos. Das poliméricas, 59% do total são do tipo PVC-P (Figura 2.4).

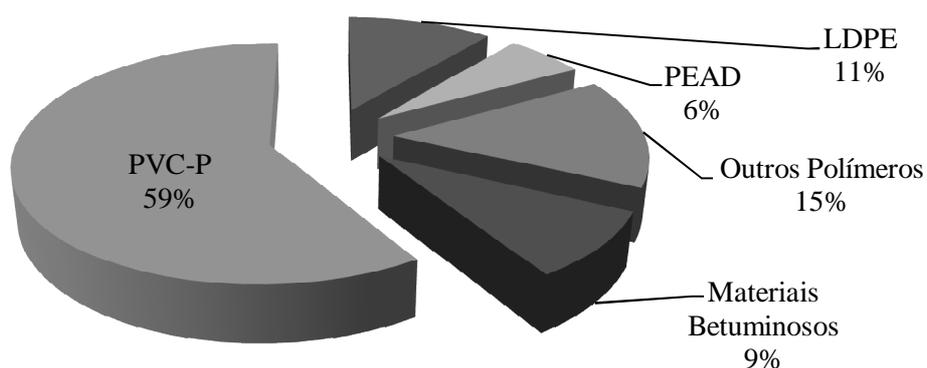


Figura 2.4. Tipos de geomembranas em barragens (ICOLD, 2010).

Segundo Cazzuffi *et al.*, (2010) & Scuero *et al.* (2012) a altura da coluna de água que as geomembranas podem resistir não tem limite. Até agora, a maior coluna de água sobre

uma geomembrana ocorre em uma barragem de concreto na Áustria, totalizando 200 metros de coluna de água (Figura 2.5).

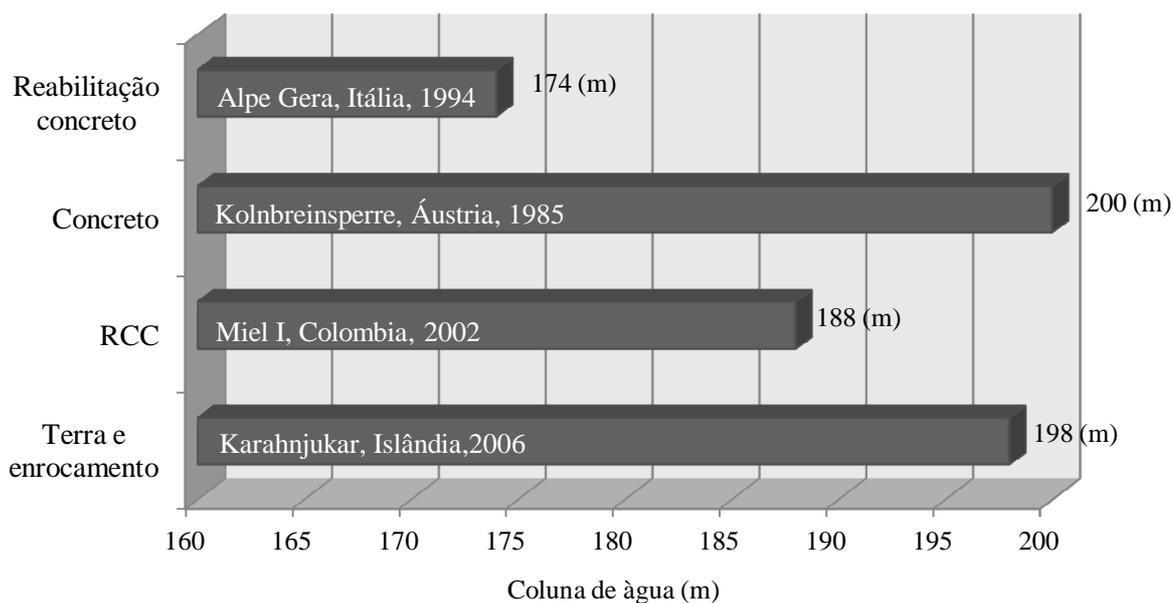


Figura 2.5. Máximas alturas de colunas de água suportadas por geomembranas em barragens no mundo (Scuero *et al.*, 2012; Cazzuffi *et al.*, 2010 da base de dados da ICOLD 2010).

Os sistemas de barreira com geomembranas podem ser executados com diferentes arranjos. A geomembrana pode estar exposta ou não, ela pode ser instalada a montante, o no meio da barragem, ao longo de alguma das faces ou só no pé da estrutura. Na Tabela 2.3 são listados alguns exemplos típicos de arranjos de geomembranas em barragens.

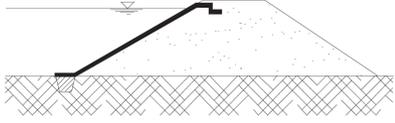
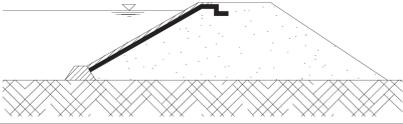
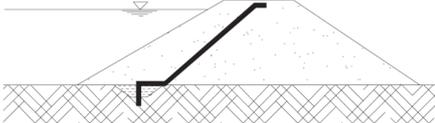
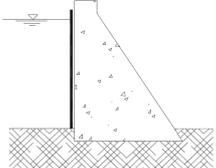
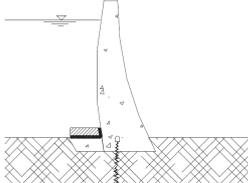
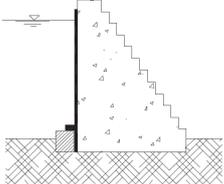
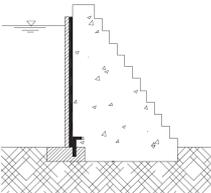
2.2 GEOMEMBRANAS

2.2.1 Definição

A geomembrana, segundo o Manual Brasileiro de Geossintéticos (Aguar & Vertematti, 2004), é um produto bidimensional de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por materiais termoplásticos, elastoméricos e asfálticos, utilizado para controle de fluxo e separação nas condições de solicitação.

A ASTM D 5199 define a geomembrana como uma membrana essencialmente impermeável utilizada com solo de fundação, rocha, solo ou qualquer outro material relacionado à engenharia geotécnica como parte integral de uma obra feita pelo homem, estrutura ou sistema.

Tabela 2.3. Sistemas de impermeabilização com geomembranas (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), Sa Forada (Itália), Upper Pond Okinawa (Japão), Winscar (UK) |
|  | 106 | Geomembrana coberta a montante em barragem de terra ou enrocamento: Contrada Sabetta (Itália), Jibiya (Nigéria), Middle Creek (EUA), Rouchain (França), Wenholthausen (Alemanha) |
|  | 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) |

A geomembrana é definida também segundo a norma ASTM D4439 como um geossintético essencialmente impermeável composto por uma ou mais lâminas sintéticas.

De acordo com a *International Geosynthetics Society (IGS)*, a geomembrana é uma camada polimérica, plana e relativamente impermeável, usada em contato com solo, rocha ou qualquer outro material geotécnico em aplicações da engenharia civil. São feitas a partir de finas camadas poliméricas contínuas, podendo também ser fabricadas a partir da impregnação de geotêxteis com asfalto, pulverização elastomérica e material betuminoso.

2.2.2 Função Barreira

Geomembranas têm permeabilidade consideravelmente menor que os outros materiais comumente utilizados em barreiras. Esta propriedade das geomembranas é essencial para a contenção de líquidos que poderiam contaminar o solo ou o lençol freático. Atualmente, com a crescente ênfase na conservação da água, é provável que a baixa permeabilidade das geomembranas será considerada como um aspecto significativo deste material no futuro (Cazzuffi *et al.*, 2010).

Na definição de uma barreira para fluxo, diversos requisitos devem ser verificados e atendidos. Estes incluem desde a concepção do sistema em si, com a escolha da geomembrana e dos elementos apropriados para a finalidade desejada, até requisitos construtivos de controle de instalação e de monitoramento em serviço, que deverão ser obedecidos para que a barreira cumpra a sua função.

Segundo uma pesquisa desenvolvida em 1995 pelo *US Army Corps of Engineers* (Christensen *et al.*, 1995), as características fundamentais das geomembranas, em ordem de importância decrescente, são as seguintes:

- Permeabilidade muito baixa;
- Alta resistência à tensão de tração, pressão, puncionamento;
- Comportamento elástico, com alta porcentagem de alongação plástica;
- Alta resistência ao ambiente de serviço;
- Facilidade nas uniões para permitir a construção de grandes lençóis pré-fabricados;
- Desempenho satisfatório em aplicações prévias;

- Reparabilidade;
- Custo aceitável, e
- Disponibilidade.

Todas estas características mencionadas fazem das geomembranas uma escolha prática e confiável.

Ainda que não seja parte das suas funções, as geomembranas podem estar submetidas a diferentes tipos de cargas que ocasionam tensões. Estas tensões podem levar ou não a deformações excessivas e, inclusive, a rupturas, as quais comprometem a função barreira da geomembrana. Por isto, é importante avaliar quais são os tipos de esforços aos quais a geomembrana será submetida durante a sua vida útil. Também é importante conhecer os tipos de danos que as membranas podem sofrer.

2.3 DANOS EM GEOMEMBRANAS

2.3.1 Introdução

Segundo a ICOLD (2010) os danos em geomembranas podem ocorrer em três etapas da vida das estruturas:

- Durante a instalação
- Na cobertura
- Durante a operação.

Defeitos típicos observados em geomembranas utilizadas em aterros sanitários incluem: danos a geomembranas durante a instalação, construção ou a operação da instalação, como resultado de tensões excessivas causadas pelo tráfego de equipamentos, puncionamento de geomembranas por pedras no material de suporte ou cobertura ou pelo peso do material armazenado (Giroud & Bonaparte 1989a).

Danos em geomembranas em barragens podem ser classificados em dois grupos (ICOLD 2010):

- Danos mecânicos: ocasionados pela força de gravidade, deformação diferencial do subleito, cargas pontuais, carga do vento, ondas no reservatório, gelo e pressão da água ou ar. (Figura 2.6).
- Danos físicos, químicos e biológicos: calor, radiação UV, substâncias na água, ação biológica, vegetação, fauna e vandalismo.

O envelhecimento de uma geomembrana pode resultar no comprometimento gradual das propriedades químicas, físicas e mecânicas ocasionadas. Por vezes, mesmo em condições ambientais normais como: água e solo em contato com a geomembrana, radiação, gás (ozônio), calor, frio intenso, micro-organismos e substâncias no reservatório (ICOLD, 1991). A zona de flutuação do nível d'água é a região onde o processo de degradação é mais acelerado devido aos ciclos de umedecimento e secagem (Colmanetti, 2006).



Figura 2.6. Danos mecânicos em geomembranas: rasgos, cortes e puncionamentos (Rebelo 2008)

Segundo Yako *et al.*, (2010) as geomembranas expostas têm com certeza uma vida mais breve que as geomembranas cobertas. Entretanto, ainda não se sabe com exatidão da durabilidade das geomembranas expostas. Observações em barragens mais antigas (mais de 40 anos) têm mostrado bom desempenho (Comanetti 2006).

Os mecanismos de degradação das geomembranas incluem inchaço, degradação UV, degradação por extração, degradação biológica e degradação por oxidação (Rowe & Sangam, 2002). O processo de degradação por oxidação das geomembranas de PEAD tem três etapas principais. Inicialmente os agentes protetores, chamados antioxidantes, são esgotados, seja por reação simples com o oxigênio, perda por volatilização ou lixiviação. No final desta etapa o material se torna vulnerável ao oxigênio, se presente. A segunda etapa é o período de indução, que corresponde ao tempo requerido antes das propriedades relevantes começarem a ser alteradas. A terceira etapa corresponde ao tempo transcorrido antes da geomembrana falhar. Portanto, a vida de serviço é o tempo total de duração dos três estágios (Rowe & Sangam, 2002).

Sobre a vida útil e o envelhecimento das geomembranas têm sido realizados vários estudos. Yako *et al.* (2010) avaliaram uma geomembrana de PEAD com 2 mm de espessura e 20 anos de serviço num reservatório. Foi descoberto que a maioria das

propriedades da geomembrana e seu comportamento mecânico continuaram quase iguais aos da época de instalação. A espessura, densidade, tensão de plastificação, resistência ao alongamento, resistência ao rasgo, resistência ao puncionamento e conteúdo e distribuição de negro de fumo não sofreram modificações significativas e continuaram a atender aos requisitos das especificações. No caso da tensão de ruptura e o alongamento de ruptura, ambos diminuíram com o tempo e foram levemente menores que as especificações. No caso de geomembranas de PVC, Hemsí *et al.* (2010) realizaram uma exumação de uma geomembrana de 1 mm de espessura e 20 anos de serviço em contato com resíduos catalogados como perigosos segundo a NBR-10.004. A espessura e a massa por unidade de área diminuíram em menos de 5%. A dureza aumentou em porcentagens entre 9% e 12%. A tensão de ruptura foi reduzida em alguns casos em 10% a 25% para amostras classificadas visualmente como boas e manchadas, respectivamente.

2.3.2 Danos mecânicos em geomembranas

O controle de qualidade durante a instalação da barreira contra fluidos desempenha um papel muito importante no resultado final e na eficiência de um projeto. É realçada na literatura a importância de ter garantia de qualidade na construção (CQA pelas sua sigla em Inglês) para ter a certeza que a geomembrana não sofreu danos durante a instalação (Forget *et al.*, 2005, Nosko & Touze Foltz 2000, Rollin *et al.*, 1999, ICOLD, 2010).

Segundo ICOLD (2010) um fator importante no sucesso é uma boa mão de obra e precisão na colocação e na realização das soldas. Isto pode ser obtido por meio da certificação e experiência de soldadores e instaladores. Rollin *et al.* (1999) classificou os níveis de instalação segundo os anos de experiência dos instaladores:

- Alto: mais de 6 anos de experiência
- Médio: entre 2 e 6 anos de experiência
- Baixo: menos de 2 anos de experiência.

Forget *et al.* (2005) dão ênfase à importância da garantia de qualidade na construção (CQA). Na Figura 2.7 pode-se observar a grande variação na quantidade de danos por hectare com e sem CQA.

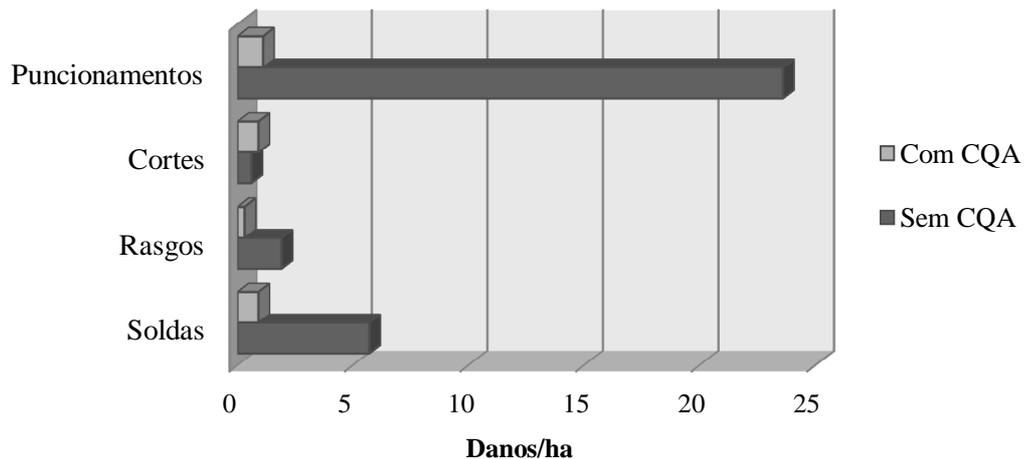


Figura 2.7. Importância da garantia de qualidade na construção (CQA) em geomembranas (dados de Forget *et al.* 2005).

As causas de dano em geomembranas podem ser avaliadas segundo as condições nas quais elas foram instaladas. No caso de geomembranas cobertas, entram em cena fatores como circulação de equipamentos, material granular de cobertura e outros previamente mencionados. Nosko & Touze-Foltz (2000) reuniram as causas de danos em geomembranas após cobertura como mostrado na Figura 2.8.

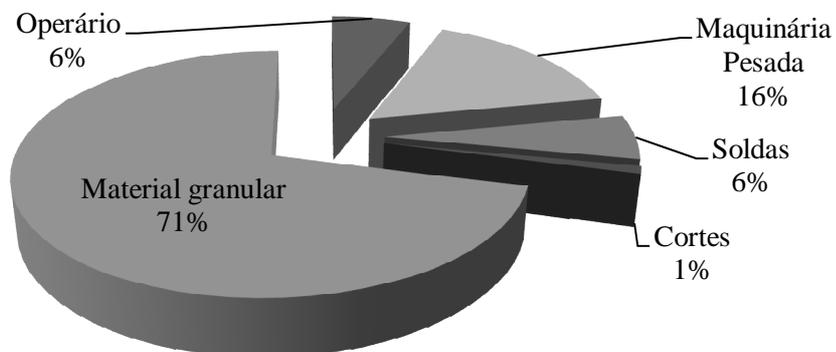


Figura 2.8. Causas de dano em geomembranas após cobertura (dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000).

As causas de dano em geomembranas expostas são diferentes, já que elas não são submetidas ao trânsito de máquinas e instalação de materiais na sua superfície. A Figura 2.9 apresenta as principais causas de danos em geomembranas expostas (Rollin *et al.* 1999).

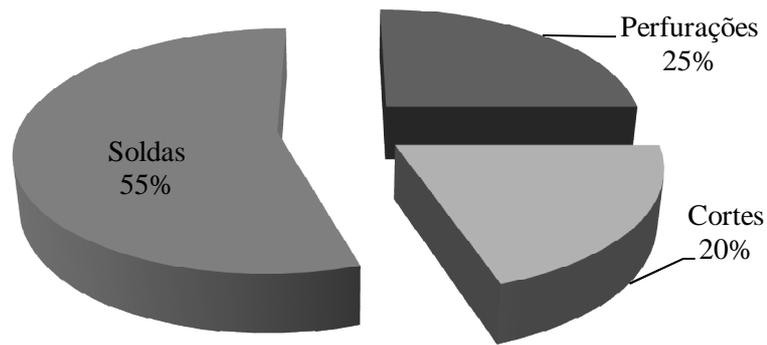


Figura 2.9. Principais causas de danos em geomembranas expostas (Rollin *et al.* 1999)

Sobre a localização dos danos, é importante notar que na pesquisa desenvolvida por Forget *et al.* (2005) em geomembranas expostas, a maior parte dos danos ocorreu nos painéis (até 70%), e não nas soldas. Segundo Touze-Foltz (2000), no caso das geomembranas cobertas, a maior parte dos danos (78%) também ocorreram no plano da geomembrana, 9% foram detectados nas bordas e cantos, 4% sob tubos, 2% nas proximidades de penetração das tubulações e 7% em outros lugares (Figura 2.10).

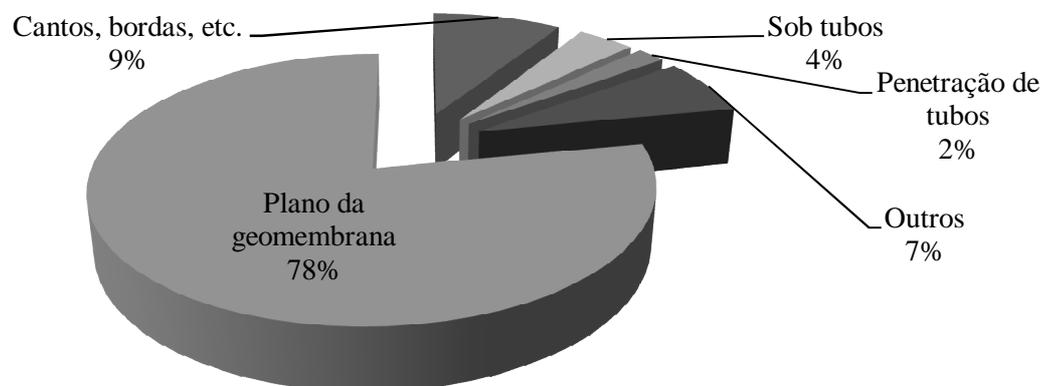


Figura 2.10. Localização dos danos em geomembranas cobertas (dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000).

Sobre o tipo e dimensão dos danos, diferentes informações têm sido encontradas na literatura. Segundo Rollin *et al.* (1999) os danos em geomembranas expostas podem variar desde dimensões $< 2 \text{ mm}^2$ até $> 10 \text{ mm}^2$. Eles incluem cortes, furos e defeitos nas soldas (Tabela 2.4). Segundo estes dados a maior parte (43% dos danos) tem uma dimensão menor que 2 mm^2 e só o 22% deles são maiores que 10 mm^2 .

Tabela 2.4. Tipo e dimensão dos danos em geomembranas expostas (Rollin *et al.*, 1999).

| Tipologia do dano | Tamanho do dano | | | TOTAL | % |
|-------------------|---------------------|------------------------|----------------------|-------|-------|
| | < 2 mm ² | 2 - 10 mm ² | > 10 mm ² | | |
| Furos | 3 | 6 | 3 | 12 | 24,5% |
| Cortes | 0 | 4 | 6 | 10 | 20,4% |
| Soldas | 18 | 7 | 2 | 27 | 55,1% |
| Total | 21 | 17 | 11 | 49 | 100% |
| (%) | 42,9% | 34,7% | 22,4% | 100% | |

Segundo Nosko & Touze-Foltz (2000), a maior parte dos danos ocasionados na geomembrana são furos provocados pela presença da camada granular sobre a geomembrana (71%), seguido por rasgos ocasionados pelo tráfego de máquinas e operadores (22%), soldas defeituosas (6%) e cortes (1%). Por volta de 56% dos rasgos apresentaram dano com áreas superiores a 1000 mm², enquanto os furos, em sua maioria (58%), têm áreas entre 50 e 200 mm². A Tabela 2.5 apresenta a área e os tipos de danos provocados na geomembrana após a sua cobertura.

Tabela 2.5. Tipo e área dos danos em geomembranas cobertas (Nosko & Touze Foltz, 2000).

| Área do dano | Furos | Rasgos | Soldas | Cortes |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|
| < 50 mm ² | 11% | | 43% | 8% |
| 50 - 200 mm ² | 58% | 27% | 40% | 61% |
| 200 - 1000 mm ² | 28% | 17% | 11% | 31% |
| > 1000 mm ² | 3% | 56% | 6% | |
| Total | 71% | 22% | 6% | 1% |

2.3.3 Proteção contra danos mecânicos

O emprego da geomembrana como barreira de fluxo em barragens requer, certos cuidados com relação ao controle de qualidade durante a instalação do produto, cuidados especiais durante sua fixação, detalhes construtivos que assegurem uma ancoragem adequada, além de sistemas adequados para apoio e proteção das mesmas (Colmanetti 2006).

Segundo Bueno *et al.* (2004), o interesse na adoção de sistemas compostos e de barreiras duplas visa prevenir que imperfeições de fabricação, danos de instalação e de operação nas geomembranas causem a fuga descontrolada de percolado, o qual será contido pela camada inferior.

Segundo Colmanetti et al. (2010), as opções disponíveis para proteção da face da geomembrana em barragens são: concreto projetado, lajes de concreto, riprap ou cobertura de solo. Segundo os mesmos autores, por motivos práticos e econômicos, a melhor alternativa é utilizar lajes de concreto colocadas sobre a geomembrana.

Segundo a ICOLD (1991) o sistema de proteção da geomembrana a protege completamente de: danos de impacto após o enchimento do reservatório, sucção do vento, radiação ultravioleta e danos por fadiga devido ao levantamento ocasionado pelas ondas e o vento. O sistema de proteção protege a geomembrana parcialmente de leves pressões de elevação, rugas devidas à expansão térmica, deterioração das propriedades mecânicas ocasionadas pelo calor e danos ocasionados pelo gelo.

Em contrapartida, a colocação de uma camada de proteção pode ser prejudicial pelos seguintes motivos (ICOLD, 1991):

- Risco de puncionamentos durante a colocação;
- Risco de danificar a geomembrana no caso deslizamento sobre ela;
- Necessidade de remover a camada para inspecionar e reparar a geomembrana subjacente.

2.4 BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES COMPOSTAS

2.4.1 Introdução

As barreiras compostas apresentam muitos benefícios nas aplicações geotécnicas. Geralmente os geossintéticos em obras hidráulicas e de proteção ambiental são utilizados em conjunto e quase nunca são instalados individualmente.

No campo da impermeabilização, as primeiras aplicações de barreiras empregavam apenas solos de baixa permeabilidade, em geral compactados. O advento das geomembranas e, mais recente dos geocompostos argilosos, modificou as configurações das barreiras, graças a uma série de vantagens, entre as quais se incluem o controle de qualidade de um produto manufaturado, a facilidade de instalação, a sua reduzida permeabilidade e o ganho de espaço no aterro (Bueno *et al.*, 2004).

Giroud & Bonaparte (1989a) demonstraram que barreiras compostas são utilizadas para diminuir as taxas de vazamento. Neste caso a barreira composta envolve uma geomembrana sobre um solo de baixa permeabilidade. Pode-se observar na Figura 2.11

a interação de diversos materiais e geossintéticos numa barreira composta no fundo de um aterro sanitário na China (Yee & Wong, 2008).

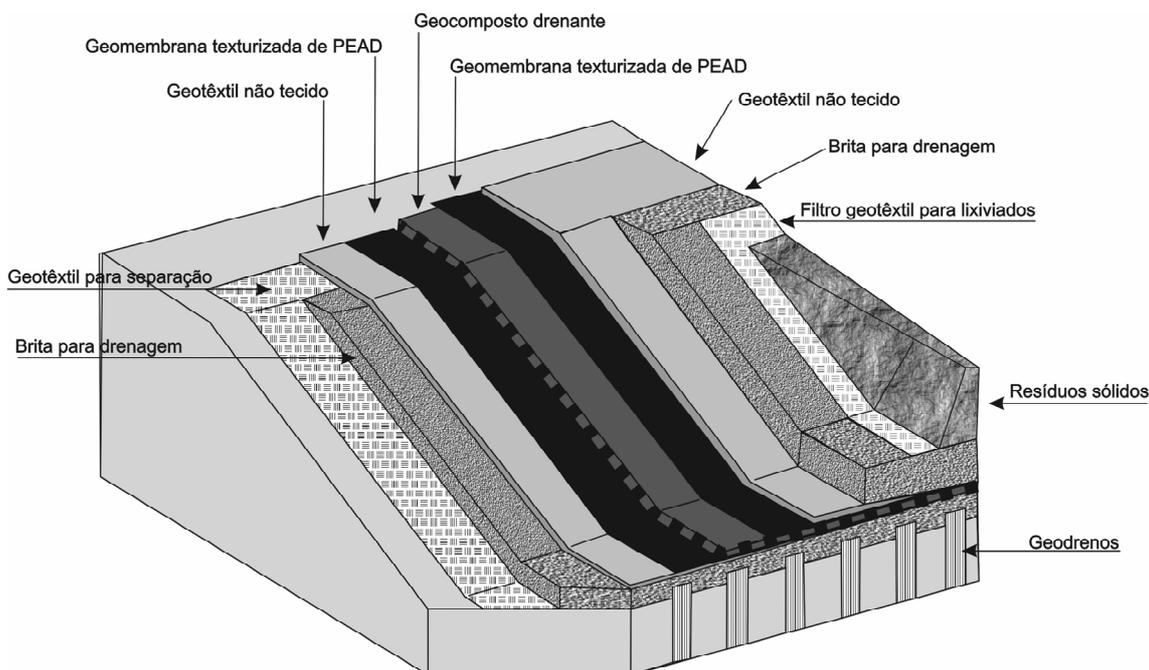


Figura 2.11. Múltiplas aplicações de geossintéticos no Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Laogang em Shangai, China (Yee & Wong, 2008).

2.4.2 Geotêxteis para proteção de geomembranas

Uma série de problemas encontrados na aplicação de geomembranas e a susceptibilidade de se danificarem levaram à utilização de geotêxteis associados às mesmas. Os geotêxteis ajudaram a resolver os problemas de drenagem de líquidos e gases sob e sobre a geomembrana e também conferem proteção à membrana contra danos mecânicos (Colmanetti 2006, Singh *et al.* 2012).

O geotêxtil é um produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções numa obra geotécnica (Aguiar & Vertematti 2004).

Segundo a ASTM D 5199 um geotêxtil é um produto plano manufaturado a partir de material polimérico utilizado com solo, rocha ou outro material relacionado de engenharia geotécnica como uma parte integral de uma obra feita pelo homem, estrutura ou sistema. Ele também é definido pela mesma norma como qualquer têxtil permeável

utilizado com solo, rocha ou outro material relacionado à engenharia geotécnica como uma parte integral de uma obra feita pelo homem, estrutura ou sistema.

Segundo ICOLD (1991), um geotêxtil utilizado em combinação com uma geomembrana proporciona os seguintes benefícios adicionais:

- Proteção da geomembrana contra danos ocasionados pela camada de suporte ou de proteção.
- Elimina a acumulação imediata de poropressão sob a geomembrana porque atua como uma camada drenante.
- Melhora a distribuição de tensões sob a geomembrana.

Rollin *et al.* (1999), associaram a quantidade de danos observados nas geomembranas em obras reais a diversos fatores, dentre eles a qualidade da superfície do solo subjacente à geomembrana, como mostra a Tabela 2.6.

Tabela 2.6. Qualidade da superfície subjacente à geomembrana (Rollin *et al.*, 1999)

| Qualidade | Materiais |
|-----------|--|
| Alta | Argila |
| Alta | Material granular 0-5 mm |
| Alta | Material granular 0-25 mm com bom geotêxtil de proteção |
| Media | Material granular 0-25 mm sem bom geotêxtil de proteção |
| Baixa | Material granular com partículas > 25 mm sem geotêxtil de proteção |

Os geocompostos consistindo de uma geomembrana e um geotêxtil acoplado a ela durante o processo de fabricação, são o tipo de geossintético mais amplamente adotado em barragens (Cazzuffi *et al.*, 2010 e ICOLD, 2010). O componente geomembrana aporta impermeabilização; o componente geotêxtil fornece proteção anti-perfurações reduzindo a necessidade de preparação da superfície, maior estabilidade dimensional, maior ângulo de atrito, aumentando a estabilidade em superfícies inclinadas e alguma capacidade de drenagem. Um geocomposto geomembrana-geotêxtil apresenta melhor desempenho que uma geomembrana com um geotêxtil separado, porque possui um maior ângulo de atrito e transfere melhor as tensões ao sistema de ancoragem e ao substrato (Cazzuffi *et al.*, 2010)

Segundo Colmanetti (2006), os geotêxteis podem ser aplicados em ambos os lados da geomembrana formando uma espécie de sanduíche ou em apenas um dos lados. A

presença dessas camadas têxteis coladas à geomembrana impõe resistência adicional que deve ser considerada no caso de utilização de geocompostos em substituição às geomembranas usadas isoladamente, ou apenas sobrepostas ou subjacentes a geotêxteis. Como o geotêxtil restringe a dilatação da geomembrana, a formação de rugas é minimizada (Colmanetti, 2006).

Apesar do uso de geotêxteis na interface entre a geomembrana e o material subjacente melhorar a qualidade de contato na interface entre eles, geotêxteis são materiais drenantes, o que pode espalhar o vazamento por uma área maior, no caso de dano na geomembrana (Mendes 2010, Giroud & Bonaparte 1989a e 1989b e Giroud 1997). Segundo pesquisa desenvolvida pelo Cartaud *et al.* (2005) a taxa de fluxo é incrementada na presença de um geotêxtil na interface geomembrana – argila compactada. Segundo o mesmo autor, o tipo de geotêxtil utilizado tem uma grande influência na taxa de fluxo na interface.

Devido ao risco de aumento do fluxo através de um geotêxtil subjacente em caso de dano na geomembrana, o uso de geocompostos bentoníticos, GCLs, tem sido difundido como uma opção para redução de vazamentos, uma vez que, além de melhorar a qualidade de contato na interface, os GCLs apresentam baixíssima condutividade hidráulica quando hidratados (Mendes, 2010).

2.4.3 GCL combinados a geomembranas

O sistema de barreira no fundo dos aterros modernos tipicamente incorpora um sistema de coleta de chorume, uma camada de proteção geotêxtil e uma barreira formada por uma geomembrana (GM) sobre um geocomposto argiloso (GCL) ou uma camada de argila compactada (CCL), como camada de atenuação (Rowe & Hosney 2010).

Quando utilizado em barreiras compostas, o GCL desempenha o papel do solo de baixa permeabilidade associado à geomembrana (Giroud *et al.*, 1997). Segundo Rowe (2005) a combinação de um GCL com uma geomembrana reduz significativamente o vazamento se comparado com a geomembrana somente. Isto é devido em parte à boa qualidade de contato entre as duas superfícies.

O geocomposto argiloso para barreira impermeabilizante (GCL) é uma estrutura formada pela associação de geossintéticos a um material argiloso de baixa condutividade, desenvolvida para a função de barreira impermeabilizante (Aguiar &

Vertematti 2004). Segundo a norma ASTM D 4439, um geocomposto argiloso pode ser definido como uma barreira hidráulica manufaturada composta por argila ligada a uma camada ou camadas de materiais geossintéticos.

Os geocompostos argilosos constituem excelentes materiais para impermeabilização. Quando combinados com geomembranas, provêm uma maior proteção contra vazamentos. Eles apresentam maiores vantagens sobre a utilização de barreiras de argila compactada, entre outras razões porque o controle de qualidade com que são fabricados é mais rigoroso que aquele que pode ser atingido durante a compactação de uma camada de argila. Além disso, eles não dependem da disponibilidade do material no campo porque podem ser adquiridos e facilmente transportados para o local da obra.

Outras vantagens técnicas numeradas por Zanzinger *et al.* (2012) incluem:

- Por ser manufaturado o GCL é um elemento consistente, uniforme e de alta qualidade.
- Dependendo da estrutura do GCL, permite a instalação da barreira em taludes mais íngremes.
- A instalação simples permite uma construção mais rápida.
- A barreira possui uma grande capacidade de deformação
- A menor espessura aumenta a capacidade de armazenamento no aterro.

O desempenho da barreira de GCLs é significativamente dependente da expansibilidade da bentonita. A bentonita em contato com água pura exibe a suficiente expansão e bom desempenho como barreira (Katsumi *et al.*, 2010).

Danos de instalação e operação podem provocar furos em geocompostos argilosos. No entanto, a elevada capacidade de expansão da bentonita faz com que a autocicatrização ocorra com facilidade, dependendo do tamanho do furo. Furos com diâmetro inferior a 25 mm pouco afetam a condutividade hidráulica após hidratação da bentonita. Os geocompostos, depois de hidratados, expandem e, quando ressecados, contraem e trincam, com aumento da permeabilidade. Também nesses casos, a capacidade de autocicatrização recupera as propriedades hidráulicas do geocomposto, quando novamente hidratado, praticamente sem alteração da condutividade hidráulica (Bueno *et al.*, 2004).

Barroso *et al.* (2006) fizeram estudos em barreiras compostas por uma combinação de geomembrana + GCL + camada de argila. Segundo eles, o aumento na pressão confinante de 50 kPa para 200 kPa não influenciou significativamente no fluxo para GCLs não pré-hidratados, mas teve um impacto maior na taxa de fluxo para GCLs pré-hidratados. A taxa de fluxo aumenta com o incremento da carga hidráulica no topo da geomembrana.

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A TAXA DE FLUXO ATRAVÉS DE DANOS EM GEOMEMBRANAS

2.5.1 Introdução

Além do tamanho e a forma do dano, são diversos os fatores que exercem influência na taxa de fluxo que passa através de uma geomembrana danificada. Diversas pesquisas têm sido conduzidas neste sentido.

Segundo Brown (1987), a taxa de fluxo pode ser afetada pelos seguintes parâmetros:

- Tipo de geomembrana;
- Espessura da geomembrana;
- Forma e tamanho do defeito;
- Características do material subjacente;
- Presença ou não de um geotêxtil entre a geomembrana e o material subjacente;
- Carga hidráulica sobre o defeito, e
- Características do líquido a ser retido.

2.5.2 Influência da qualidade do contato

A qualidade do contato entre os componentes de uma camada impermeabilizante é um dos fatores de maior importância que regem a taxa de fluxo através dela, já que influencia no raio da área molhada (Giroud & Badu-Tweneboah, 1992) ;(Giroud, 1997).

O raio molhado é o raio da área ao redor de um furo ou ruga onde o fluido escoar horizontalmente na interface entre a geomembrana e o material subjacente (Chappel *et al.* 2012).

O mecanismo de fluxo através de uma barreira composta devido a um dano na geomembrana ocorre da seguinte maneira: o líquido flui através do dano na geomembrana, o líquido escoar lateralmente, se existe espaço, ao longo da interface

entre a geomembrana e o material subjacente até certa distancia e finalmente infiltra no material subjacente (Giroud & Bonaparte 1989b). Este mecanismo pode ser observado na Figura 2.12.

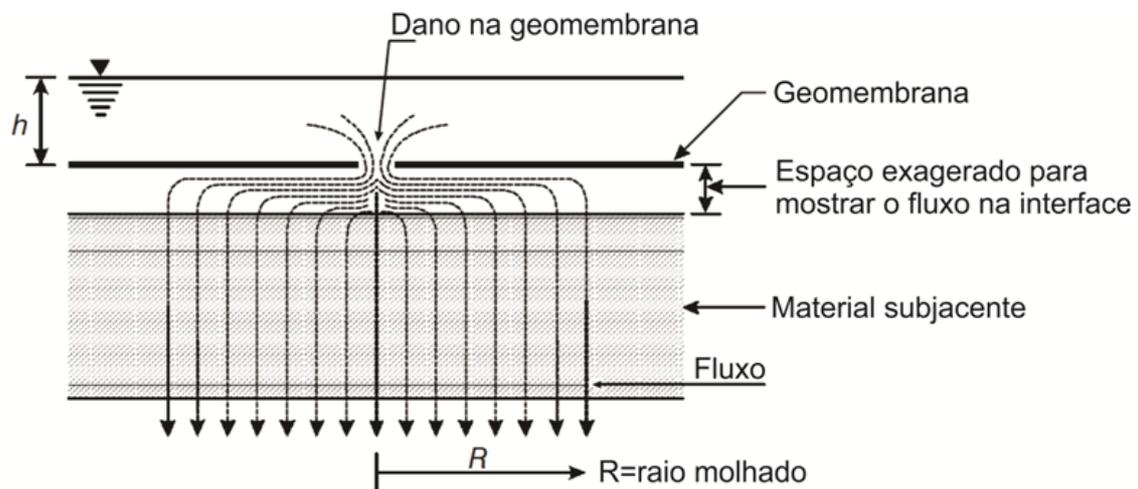


Figura 2.12. Fluxo de líquido através de uma barreira composta devido a um dano na geomembrana (Giroud, 1997).

Mendes (2010) apresentou as definições qualitativas dos tipos de contato (bom e ruim) segundo Giroud (1997) e segundo Touze-Foltz & Giroud (2003). As definições são as seguintes:

- Condição de contato ruim: consiste em uma geomembrana instalada com certo número de rugas e/ou instalada sobre um solo de baixa permeabilidade mal compactado e de superfície rugosa (Giroud *et al.* 1989, Giroud 1997) (Figura 2.13).
- Condição de contato boa: consiste em uma geomembrana instalada com o menor número de rugas possível sobre um solo de baixa permeabilidade bem compactado com superfície lisa e tensão confinante suficiente para garantir o contato entre a geomembrana e o solo subjacente (Giroud *et al.* 1989, Giroud 1997);
- Condição de contato excelente: consiste em uma geomembrana instalada sem rugas sobre um geocomposto bentonítico (GCL) que por sua vez está em contato íntimo com um solo de baixa permeabilidade compactado adequadamente e com uma superfície muito lisa. Considera-se que a pressão confinante é suficiente para manter um bom contato entre a geomembrana e o GCL (Touze-Foltz & Giroud 2003).

Segundo pesquisa desenvolvida pelo Zornberg (2005), a qualidade do contato é um fator muito importante para a previsão da vazão sob baixas cargas hidráulicas, mas não é um parâmetro significativo quando é estimada a vazão sob cargas hidráulicas elevadas.

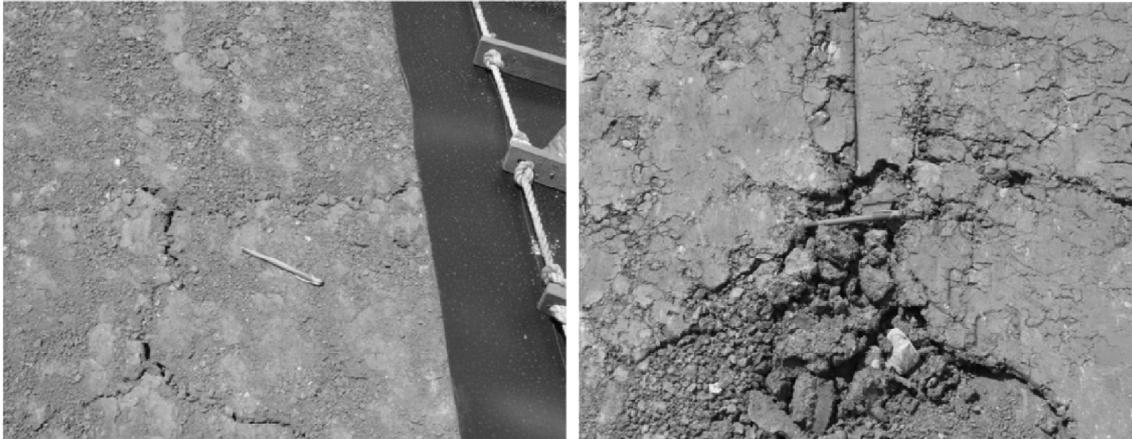


Figura 2.13. Liner de argila que fornece uma condição de contato ruim devido às trincas e a superfície rugosa observadas após a compactação (Rowe & Hosney, 2010).

2.5.3 Rugas em geomembranas

Segundo Rowe (2005), uma ruga é uma irregularidade de uma geomembrana quando colocada numa superfície plana (Figura 2.14). Frequentemente ocorre como resultado de expansão térmica (após a colocação) decorrente da radiação solar (Giroud & Morel 1992, Take *et al.* 2007, Rowe 2007). Segundo Chappel *et al.* (2012), as rugas podem reduzir substancialmente a efetividade da geomembrana como barreira hidráulica se houver um furo na ruga ou próximo a ela.

As rugas são importantes porque aumentam o potencial de migração de fluidos através de um furo na geomembrana (Rowe & Hosney 2010, Rowe 2007). Além disso, as rugas podem ser dobradas durante as operações de construção, especialmente durante a colocação de materiais sobre a geomembrana, podendo resultar em ruptura na membrana. Durante a fase de operação, elas impedem a passagem do líquido na camada drenante (Giroud & Morel, 1992).

Devido às rugas usualmente encontrarem-se interconectadas, o comprimento de uma ruga deve ser considerado como a distância linear total que o fluido pode migrar ao longo da ruga e de suas interconexões (Rowe 2005, Take *et al.* 2007, Chappel, *et al.* 2012). Elas criam um vazio entre a geomembrana e o material subjacente, diminuindo

assim a qualidade do contato. Um furo pequeno numa geomembrana pode levar a um fluxo através do material subjacente ao longo de uma área muito maior. Neste caso, o vazamento vai depender do número, comprimento e largura da(s) ruga(s) interconectada(s) com o(s) furo(s) (Chappel *et al.*, 2012).



Figura 2.14. Rugas interconectadas numa geomembrana (esq.) e geomembrana essencialmente sem rugas (dir.) (Rowe & Hosney, 2010).

Segundo Giroud & Morel (1992) as geomembranas de PEAD tendem a apresentar rugas grandes (~10 cm. de altura), enquanto que geomembranas de PVC tendem a apresentar rugas pequenas (~1 cm. de altura). Segundo os autores, esta grande diferença entre alturas de rugas é devida provavelmente aos diferentes valores de módulos de elasticidade dos materiais. No entanto, é importante observar que segundo pesquisa desenvolvida por Brachman & Gudina (2008), a tensão vertical diminui a largura e comprimento das rugas. Take *et al.* (2012) observaram que quando coberta por um aterro de areia, a ruga apresentou uma redução em sua altura devido a sua contração. Porém, em rugas com altura maior de 20 mm esta contração não foi suficiente para eliminá-las completamente.

Segundo Elton & Peggs (2002), as técnicas atuais para redução de rugas incluem:

- Monitoramento das temperaturas de instalação e cobertura das geomembranas;
- Utilização de pigmentos de cores claras na superfície das geomembranas em vez do preto tradicional;
- Geomembranas texturizadas e mais flexíveis tendem a ter uma menor quantidade ou rugas de menor amplitude.

2.5.4 Influência da carga hidráulica

Segundo Barroso *et al.* (2006), num sistema composto por uma geomembrana, um GCL e uma camada de argila compactada, a taxa de fluxo aumenta com o incremento da carga hidráulica sobre a geomembrana.

Segundo Giroud & Bonaparte (1989a), o vazamento através de uma barreira em contato com um líquido é governado pela diferença de carga hidráulica à que a barreira está submetida. A intensidade de vazamento aumenta com o aumento da coluna de água sobre a geomembrana danificada.

Um estudo paramétrico foi realizado por Giroud & Badu-Tweneboah (1992) para estudar a influencia da carga hidráulica e do tamanho do defeito na taxa de vazamento. Segundo este estudo, para cargas hidráulicas baixas, que ocorrem tipicamente nos aterros sanitários, um defeito longo vai ocasionar maior vazamento do que um defeito curto. No entanto, para altas cargas hidráulicas, como aquelas encontradas em reservatórios, um defeito longo vai ocasionar um vazamento levemente maior que aquele ocasionado por um defeito curto.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 EQUIPAMENTO E MATERIAIS

3.1.1 Equipamento para ensaios de vazamento em geomembranas danificadas

O equipamento utilizado durante a pesquisa foi projetado e construído na Universidade de Brasília. Ele consiste de dois componentes principais: o sistema ar-água e a célula de ensaio. O equipamento permite avaliar o fluxo através de dano em geomembrana submetida a altas pressões e fez parte da tese de doutorado de Mendes (2010). Uma vista do equipamento é apresentada na Figura 3.1.

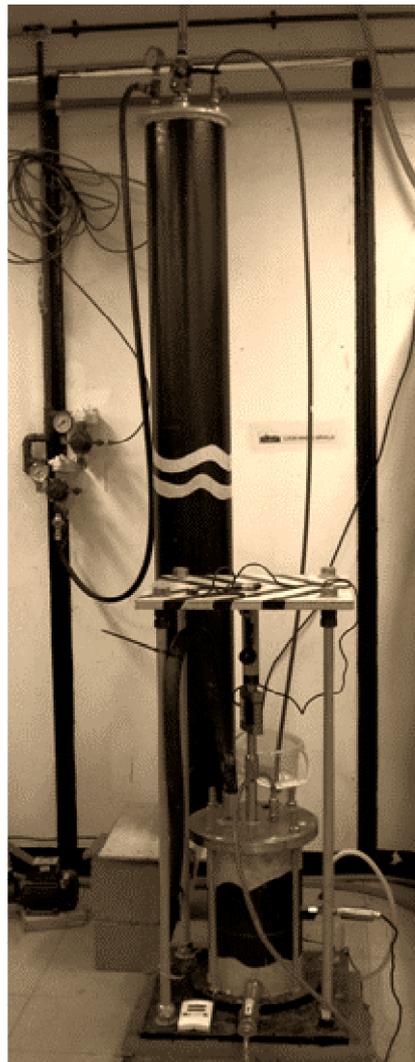


Figura 3.1. Vista geral do equipamento utilizado na pesquisa.

A geomembrana danificada é colocada e fixada na célula de ensaio e a massa de água sobrejacente é submetida a pressões geradas pelo sistema ar-água. Um esquema general do equipamento é mostrado na Figura 3.2.

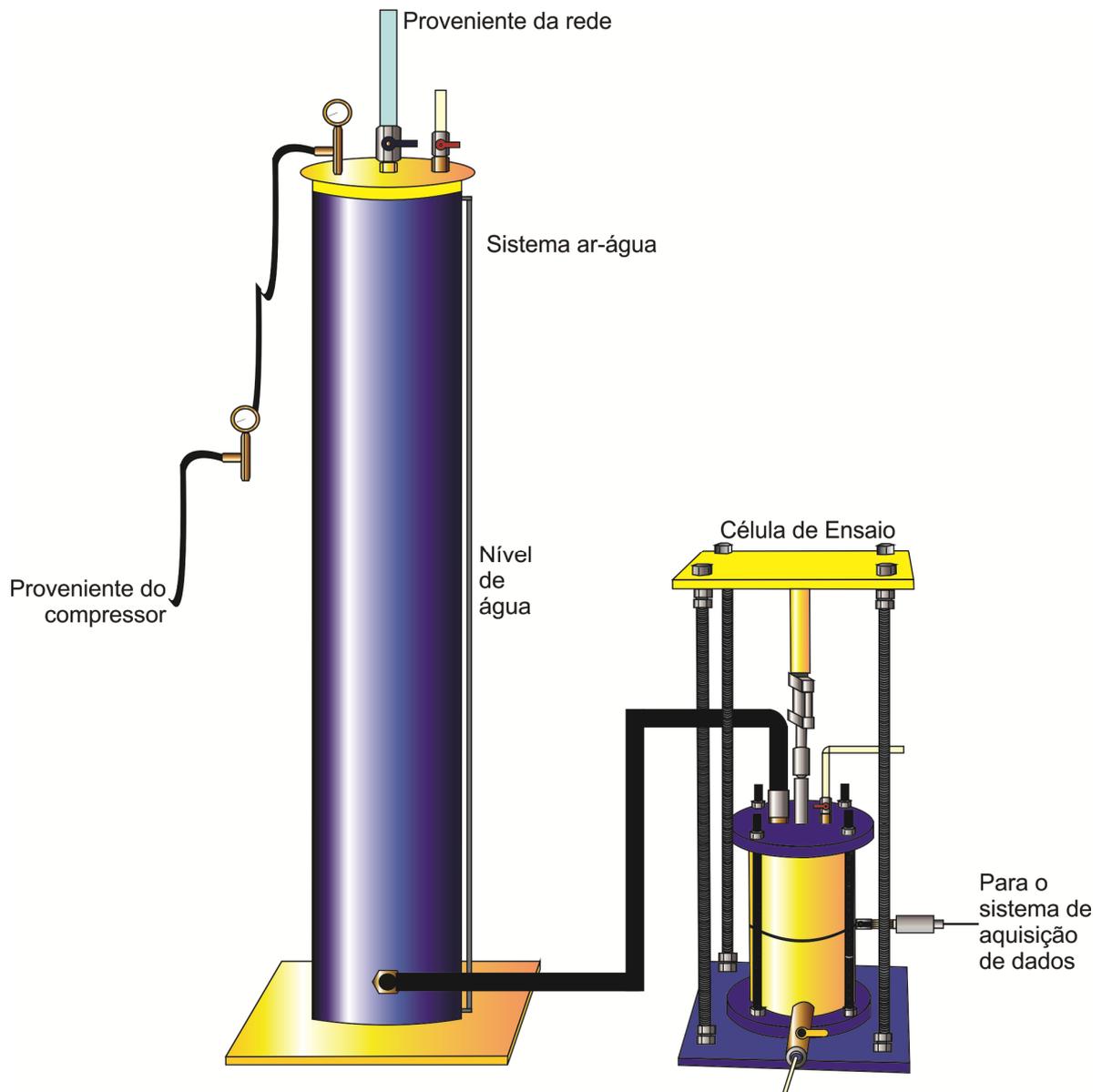


Figura 3.2. Esquema do equipamento utilizado na pesquisa.

3.1.1.1 Sistema ar-água

O sistema ar-água é um dos componentes do equipamento de ensaio de vazamento através de geomembranas danificadas. Como parte dele, foi construído para fins da pesquisa um tanque de 2,00 m de altura. O tanque possui três conexões na sua parte superior. Uma delas dá lugar à entrada de água e está conectada por uma mangueira diretamente à rede de abastecimento de água do prédio. O sistema possui um filtro antes

da entrada da água no tanque para evitar o transporte de ferrugem e sedimentos presentes na água. O nível de água dentro do tanque pode ser acompanhado mediante uma mangueira transparente externa. Outra conexão na parte superior do tanque funciona como ladrão. A sua função principal é permitir a saída de ar e água do tanque durante o seu enchimento. A terceira conexão na parte superior do tanque é a que permite a entrada de ar pressurizado. O ar pressurizado vem de um compressor e vai até o equipamento mediante tubulações no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. O compressor é da marca Schultz e tem uma capacidade nominal de até 1200 kPa (Figura 3.3a). As pressões atuantes durante a realização do ensaio são controladas pelo sistema ar-água, com o auxílio de um manômetro e válvula reguladora de pressão (Figura 3.3b).

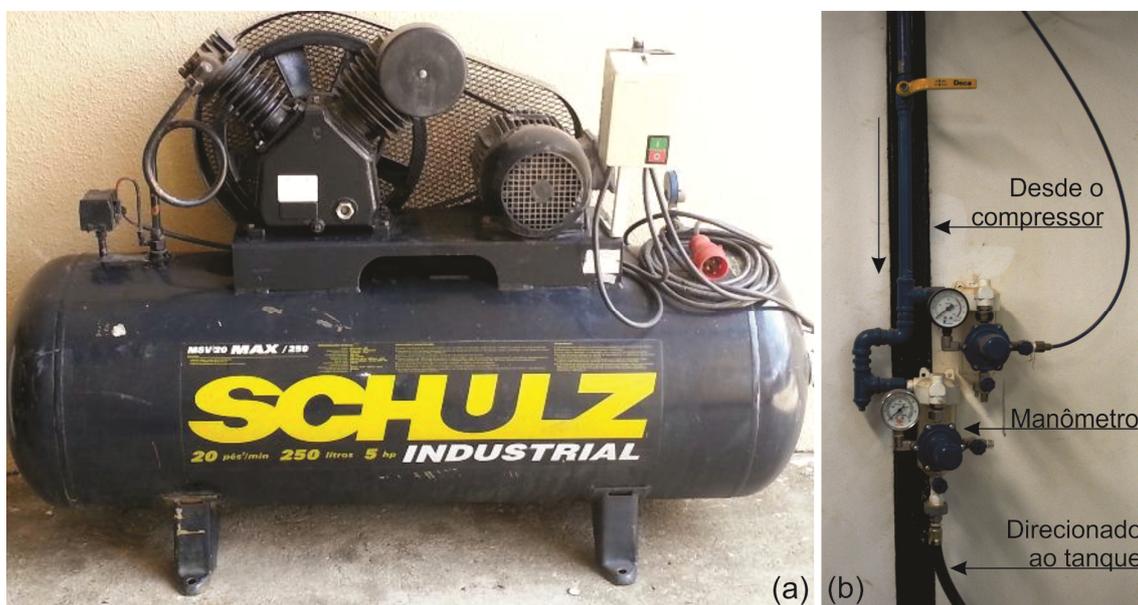


Figura 3.3. Sistema de pressurização: (a) compressor; (b) manômetros e válvulas reguladoras.

O ar comprimido proveniente do compressor entra na parte superior do tanque exercendo uma pressão uniforme sobre a coluna de água. A água pressurizada sai da parte inferior do tanque e passa por uma mangueira que suporta altas pressões. Esta mangueira leva a água até a célula de ensaios. Um esquema do sistema ar-água pode ser observado na Figura 3.4.

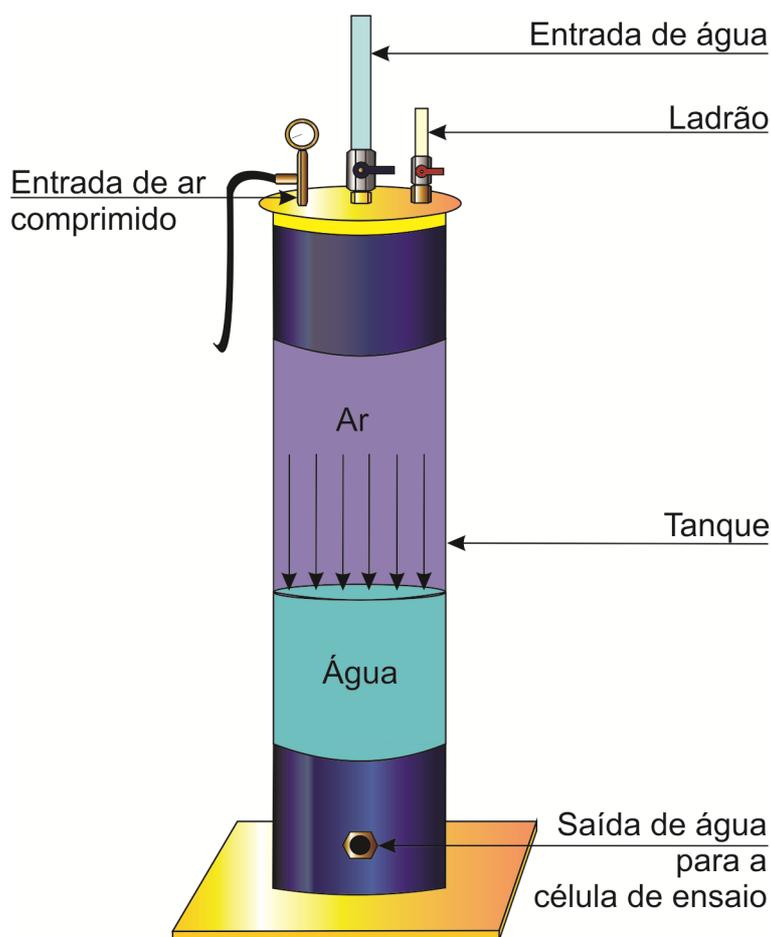


Figura 3.4. Esquema do sistema ar-água.

3.1.1.2 Célula de ensaio

A célula de ensaio é o segundo componente do equipamento para ensaios de vazamento em geomembrana danificada, como mostrado na Figura 3.5. A célula, semelhante a um permeâmetro, consiste em dois cilindros metálicos, um inferior e um superior, ambos com diâmetro interno de 18,5 cm e paredes de 1,7 cm de espessura, de uma base e de uma tampa, ambas circulares e com 30 cm de diâmetro e 2,5 cm de espessura. A saída para a água está situada no cilindro inferior. O sistema é fechado por parafusos. As pressões sobre e sob a geomembrana são monitoradas por dois transdutores de pressão situados nas paredes do cilindro superior e inferior, respectivamente. A célula é instalada em uma estrutura de reação para cargas verticais, no caso de também serem aplicadas tensões normais sobre a geomembrana.

A célula possui duas conexões na sua parte superior. A maior delas é para a entrada de água. A água proveniente do tanque (sistema ar-água) entra na célula através de uma mangueira conectada à sua tampa. A outra conexão funciona como ladrão.



Figura 3.5. Célula de ensaio utilizada durante a pesquisa.

No lateral do cilindro superior está instalado um dos transdutores de pressão. O objetivo de se ter instalado este transdutor nesse ponto é medir a pressão atuante na água imediatamente acima da geomembrana, sem a influência de perdas de carga no sistema.

Entre o cilindro superior e inferior da célula é instalada a geomembrana que vai ser testada. Na lateral do cilindro inferior encontra-se instalado o segundo transdutor, para a medição da pressão de saída da água que atravessa a geomembrana danificada. Também no cilindro inferior tem-se a saída de água da célula, onde é medida a vazão que passa pelo dano na geomembrana. Um esquema da célula de ensaios pode ser observado na Figura 3.6. Os dois transdutores de pressão foram fabricados pela empresa Micro Sensores Industrial, modelo MSP-1,5 com capacidade de 1500 kPa (Figura 3.7a).

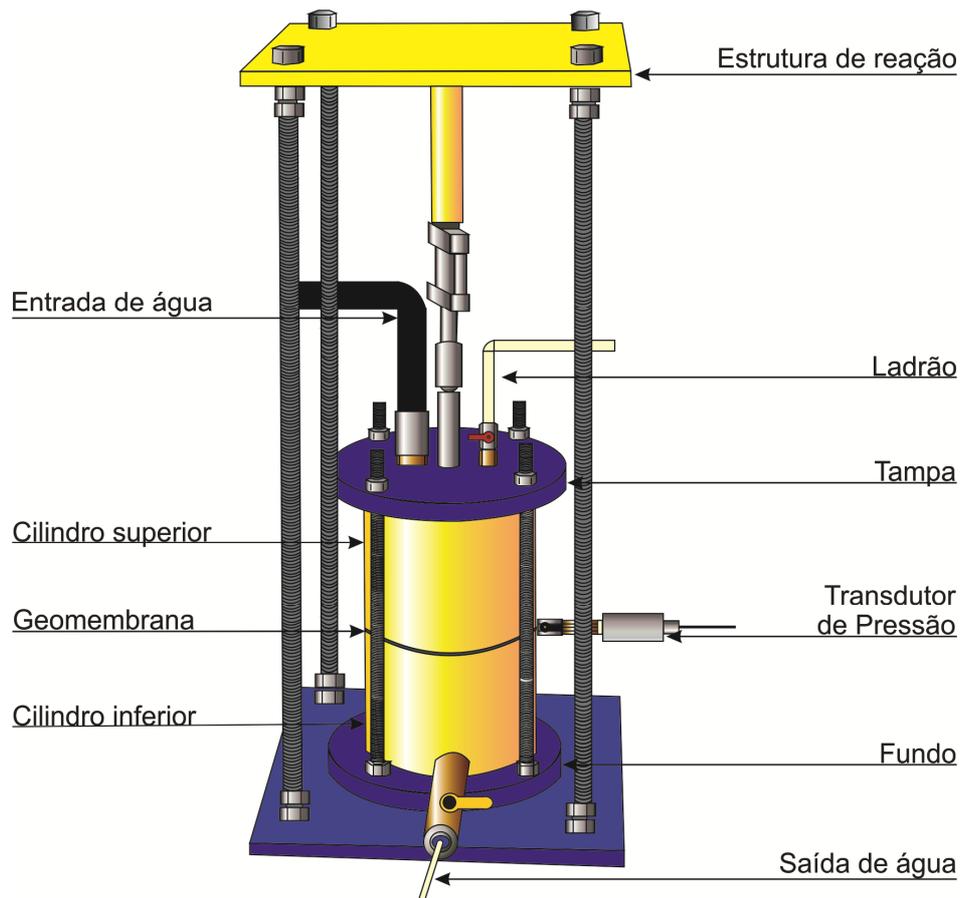


Figura 3.6. Esquema da célula de ensaio utilizada durante a pesquisa.

3.1.1.3 Sistema de aquisição de dados

Os sinais dos instrumentos são adquiridos por um aquisitor de dados modelo *Spider 8*, da empresa *HBM* (Figura 3.7b). Nele o sinal é tratado e transferido para um computador, onde está instalado o *Catman* (Figura 3.7c).



Figura 3.7. Sistema de aquisição de dados: (a) Transdutor de pressão, (b) aquisitor de dados Spider 8 e (c) sistema de aquisição de dados.

A calibração inicial dos transdutores foi realizada com auxílio de equipamento controlador de pressão e volume denominado *Standard Pressure/Volume Controller*, da *GDS Instrument*. Este equipamento pertence ao laboratório de solos não saturados do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB. Ele permite aplicação de pressões de até 2000 kPa e pode substituir outras formas tradicionais de aplicação de pressões, tais como a coluna de mercúrio, ar comprimido e dispositivos com peso morto. O instrumento pode ser controlado por um computador ou por um teclado próprio. Uma segunda calibração foi levada a cabo utilizando o sistema ar-água do próprio equipamento de ensaios de vazamento, descrito anteriormente.

3.1.1.4 Outros equipamentos

Os seguintes equipamentos foram também utilizados na pesquisa:

Câmera de vídeo e fotografia de alta definição: Com o propósito de medir a vazão durante a noite foi adquirida uma câmera web para tirar fotografias de alta definição (Figura 3.8 a). A câmera tirava fotos da pipeta na saída da água do equipamento e a análise das fotos permitia a determinação da vazão de saída de água. Foi fabricada pela *Gold Ship*, possui uma conexão USB 2.0 e resolução máxima de 1600 x 1200 pixels. O software livre *Yawcam* foi instalado no computador para programar a captura automática de dados. Este software permite estabelecer os intervalos e horários de aquisição de imagem.

Termohigrômetro: Foi utilizado um termohigrômetro eletrônico para monitorar a temperatura e umidade durante a realização dos ensaios (Figura 3.8b).

Balança analítica: Foi utilizada uma balança de precisão da marca *Shimadzu* modelo *AUW220D*, com sensibilidade de 0,00001 g, para medir a vazão de saída a partir do peso da água (Figura 3.8c).

Microscópio: Um microscópio foi empregado para observar as características superficiais dos danos causados à geomembrana por diferentes tipos de ferramentas (Figura 3.8d). O microscópio é da marca *ProScope HR* e possui uma ampliação máxima de até 400 vezes. Ele possui um dispositivo manual de foco, um sensor de imagem de 1,3 mega pixels e um cabo USB que se conecta ao computador. As imagens são obtidas por meio de software próprio do microscópio.

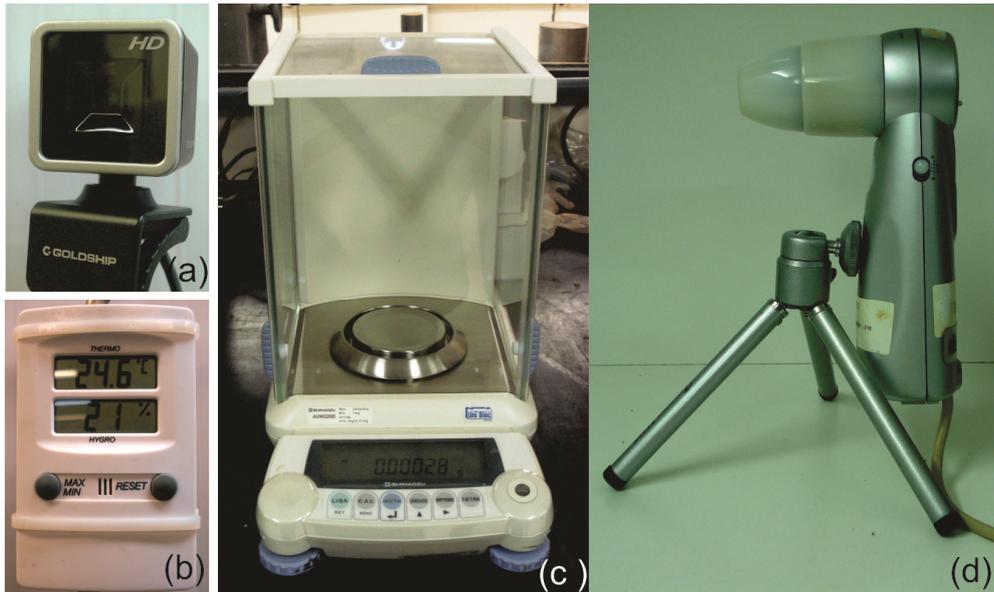


Figura 3.8. Outros equipamentos utilizados: (a) Câmera Web HD, (b) Termohigrômetro digital, (c) balança de precisão e (d) microscópio.

3.1.2 Geomembrana

Uma geomembrana de PVC lisa, com 1,00 mm de espessura (Figura 3.9) foi utilizada nos ensaios de vazamento. As principais especificações técnicas dessa geomembrana são apresentadas na Tabela 3.1 (Fernandes, 2012).

Tabela 3.1 Especificações técnicas da geomembrana utilizada (Fernandes, 2012).

| Propriedades | Unidades |
|-----------------------|-------------------------------|
| Espessura | 1,00 mm |
| Massa Específica | 1,20 – 1,35 g/cm ³ |
| Resistência a tração | 14,0 kN/m |
| Deformação na Ruptura | 350,0% |



Figura 3.9. Geomembrana lisa de PVC utilizada nos ensaios.

3.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

São descritos nesta seção do capítulo a preparação das amostras de geomembrana e a montagem e metodologia do ensaio.

3.2.1 Preparação das amostras de geomembrana

Inicialmente, a geomembrana foi cortada em círculos de 20 cm de diâmetro, em conformidade com o diâmetro da célula de ensaios (Figura 3.10a).

A seguir, diferentes tipos de danos mecânicos foram provocados na geomembrana utilizando-se dois tipos de ferramentas: estilete e formão para madeira (Figura 3.10 (b) e (c)). Os danos provocados com o formão para madeira foram causados pela queda de 20 cm de um peso de aço de 1,59 kg sobre a ferramenta (d).

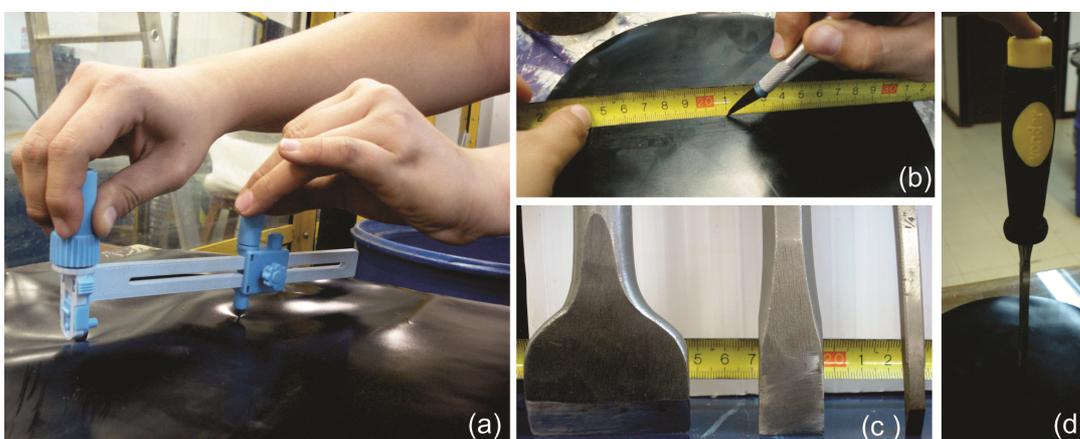


Figura 3.10. Preparação das amostras: (a) Corte das amostras de geomembrana a serem ensaiadas. (b) Realização de dano na geomembrana mediante corte com estilete. (c) Ferramentas utilizadas para danificar a geomembrana por meio de queda sobre a ferramenta. (d) Realização de dano na geomembrana.

Os danos foram lineares, com os seguintes comprimentos: 5 mm, 20 mm e 50 mm. Cada um destes espécimes danificados foi ensaiado. Eles são mostrados na Figura 3.11.

3.2.2 Montagem do ensaio

A montagem do ensaio é iniciada no cilindro inferior da célula de ensaios (Fig. 3.12). Dentro dele é colocado um cilindro concêntrico para apoiar uma placa metálica que serve de suporte para a geomembrana. Os cilindros são preenchidos com água destilada e deaerada. O propósito de utilizar água deaerada é evitar alterações na vazão de saída provocadas por bolhas de ar e aprisionamento de bolhas entre a geomembrana e a sua base de apoio.



Figura 3.11. Amostras de geomembrana com dano mecânico induzido.

Sobre o cilindro interior é colocada uma placa metálica com espessura de 1 cm. A amostra de geomembrana é posicionada sobre esta placa metálica. O propósito de utilizar esta placa metálica é evitar que a geomembrana sofra deflexão, alterando a taxa de fluxo que passa através do dano. Uma vez a geomembrana danificada instalada sobre a placa metálica, o cilindro superior da célula é colocado, fixando as extremidades do espécime. Silicone é aplicado entre borda interna do cilindro superior e a geomembrana para impedir o fluxo de água através desta zona e garantir que a vazão de saída seja aquela que passa exclusivamente através do dano. Depois de colocado o silicone são aguardadas pelo menos 12 horas para permitir a sua secagem completa. Após a secagem do silicone, o cilindro superior é preenchido com água deaerada. A tampa da célula é

colocada e o sistema é fechado. O processo de montagem pode ser visualizado na Figura 3.12.

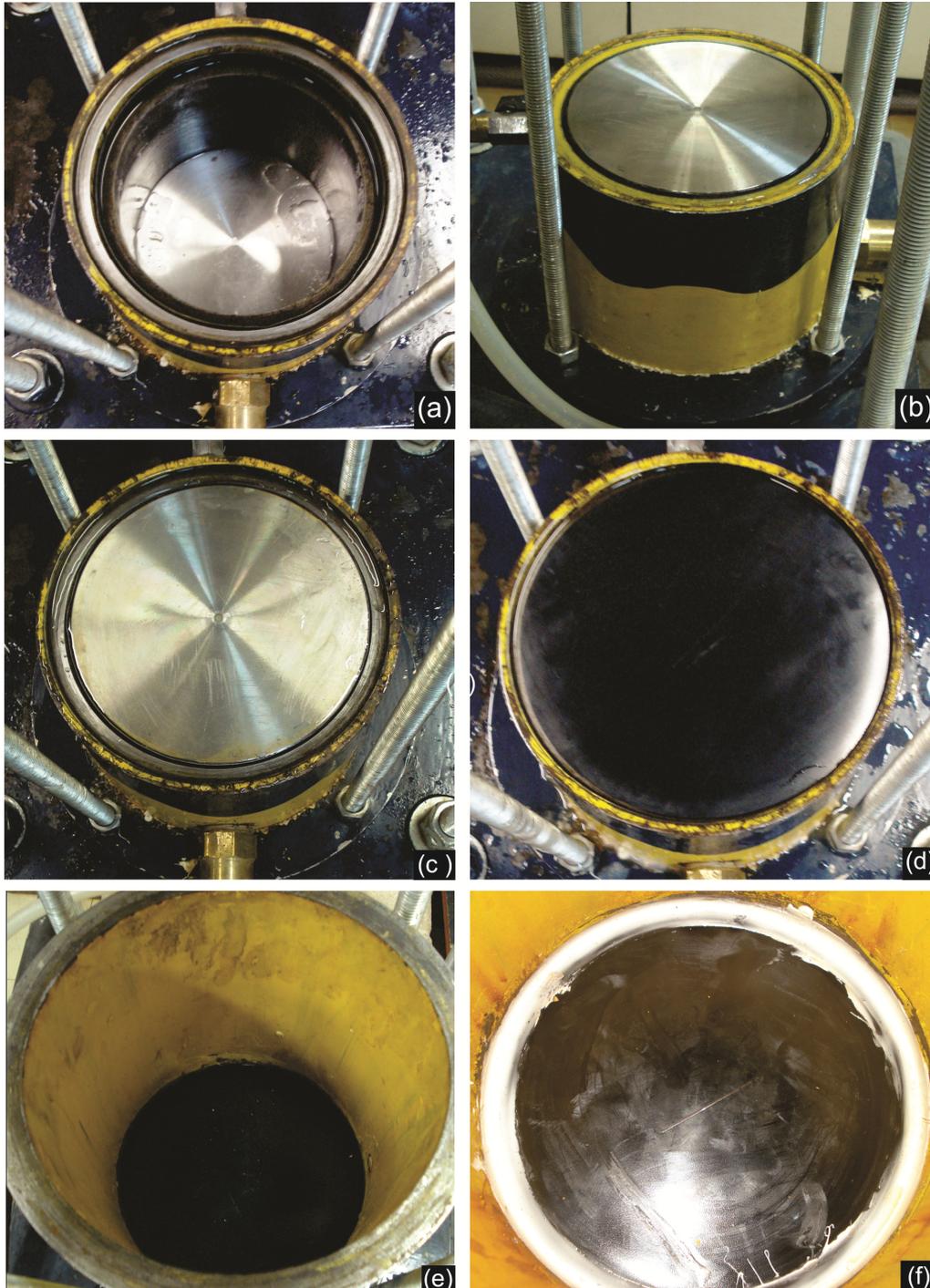


Figura 3.12. Montagem do ensaio: (a) o cilindro de suporte da placa metálica colocado dentro do cilindro inferior da célula, (b) a placa metálica para apoio da geomembrana (c) placa metálica, (d) colocação da geomembrana, (e) cilindro superior posicionado sobre a geomembrana e (f) silicone aplicado nas bordas do cilindro em contato com a geomembrana.

Uma vez colocada a tampa, prossegue-se então ao enchimento total da célula. O ar é retirado do seu interior pelo ladrão, quando então pode-se dar início ao ensaio.

3.2.3 Metodologia dos ensaios de vazamento através de danos em geomembranas

Durante o ensaio são aplicadas na água pressões hidrostáticas, simulando diversas alturas de coluna d'água sobre a geomembrana. O ensaio começa com a geomembrana danificada submetida a uma pressão de 20 kPa. Ela é obtida diretamente pela altura da coluna de água no tanque, já que este possui uma altura de 2,00 m. Para obter pressões maiores que 20 kPa é necessária a utilização do compressor (sistema ar-água). Após esta pressão inicial, as pressões são aumentadas a cada 24 horas. As pressões aplicadas no sistema foram de 20, 100, 200, 400 e 800 kPa, simulando aproximadamente alturas de coluna de água de 2, 10, 20, 40 e 80 metros, respectivamente. A cronologia dos ensaios pode ser observada na Figura 3.13.

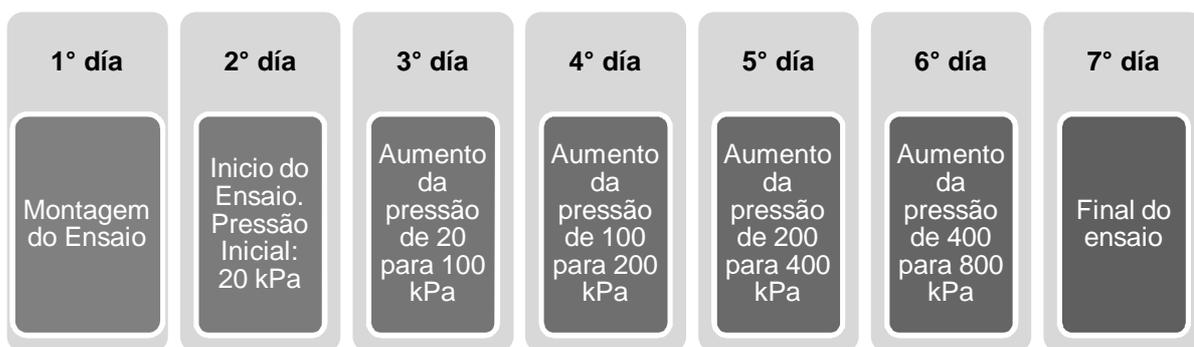


Figura 3.13. Cronologia dos ensaios.

3.2.3.1 Medida da vazão

Durante a realização dos ensaios a vazão de saída foi medida de duas formas. No início, a medição foi feita pesando a água que saía do permeâmetro. Foram colocados dois recipientes iguais, um do lado do outro (Figura 3.14). Num deles a água de saída do permeâmetro era coletada. No segundo recipiente foi colocada uma quantidade de água conhecida para se obter a perda de água por evaporação no ambiente. Ambos recipientes foram pesados em intervalos de uma hora durante a realização dos ensaios. Como cada estágio de aplicação de pressão teve uma duração de 24 horas uma parte do ensaio foi realizada de noite. Durante a noite os ensaios continuaram em andamento e a cada manhã as medições eram retomadas.

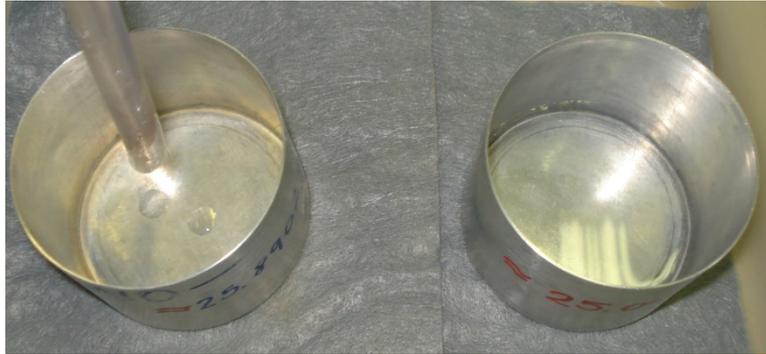


Figura 3.14. Esq.: Recipiente para medição da vazão passante pela geomembrana danificada. Dir.: Recipiente para monitoramento da evaporação.

A partir das análises dos primeiros ensaios realizados surgiram varias incógnitas:

- O que ocorre durante a noite? Porque a vazão caía durante a noite e era diferente daquela registrada durante o dia?
- A correção por evaporação era precisa? Poderia ser que ela estivesse alterando os resultados da vazão?

A partir destas incógnitas foram realizadas as seguintes modificações nos ensaios:

- Utilização de uma pipeta graduada para medir a vazão de saída durante o ensaio (Figura 3.15).
- Colocação de uma camada de azeite sobre o nível de água na pipeta para evitar a evaporação, como sugerido por Giroud & Bonaparte (1989a).
- Utilização de água deaerada na célula de ensaio para evitar bolhas de ar.
- Instalação de uma câmera para realizar as leituras durante a noite e desta forma poder conhecer o que acontece com o ensaio durante as 24 horas em que está sendo realizado.

3.2.3.2 Correção da temperatura

Na pesquisa foram analisados os resultados de seis ensaios para o estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas. Com o intuito de ter o mesmo ponto de comparação entre um e outro ensaio, as vazões de saída foram corrigidas utilizando a relação entre a viscosidade da água na temperatura de realização do ensaio e a viscosidade da água a 20 °C (ASTM D2434-68, ABNT NBR 13292/1995). Para fazer esta correção foi utilizada a seguinte relação (Caputo, 1975 e Lambe, 1951):

$$Vazão_{20^{\circ}\text{C}} = Vazão_T \frac{\eta_T}{\eta_{20^{\circ}\text{C}}}$$

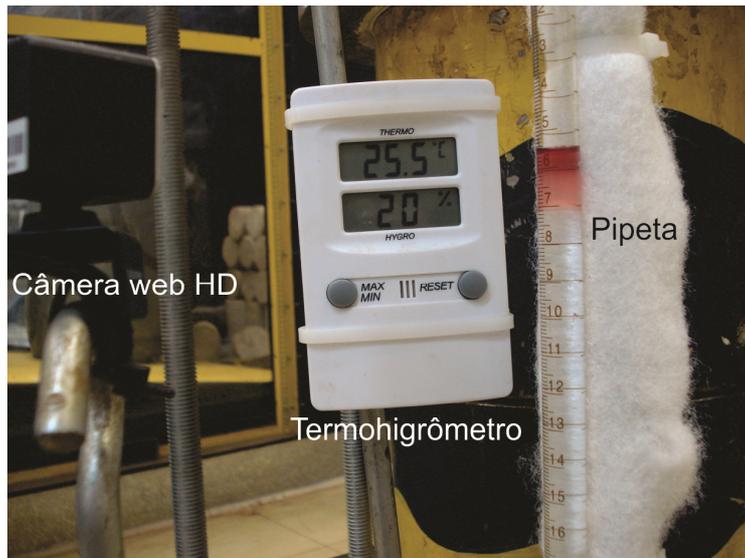


Figura 3.15. Pipeta para medir a vazão durante os ensaios.

Para calcular a viscosidade da água em função da temperatura foi utilizada a fórmula empírica proposta por Helmholtz (*apud* Caputo, 1975):

$$\eta_T = \frac{0,0178}{1 + 0,033 T + 0,00022 T^2}$$

Os resultados dos ensaios realizados serão apresentados no próximo capítulo.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a realização da pesquisa. Também são apresentadas as análises feitas a partir dos resultados. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos nos primeiros ensaios preliminares. Em seguida é apresentado o estudo de fluxo através de danos em geomembranas incluindo as análises realizadas, conforme as variáveis envolvidas no ensaio: influência da pressão, influência do tipo de dano e influência da temperatura.

4.2 RESULTADOS DOS PRIMEIROS ENSAIOS

Durante a realização ensaios preliminares a vazão de saída foi medida pesando a água numa balança analítica, segundo descrito no capítulo anterior. Pode-se observar nas Figuras 4.1 a 4.3 os resultados dos primeiros ensaios realizados.

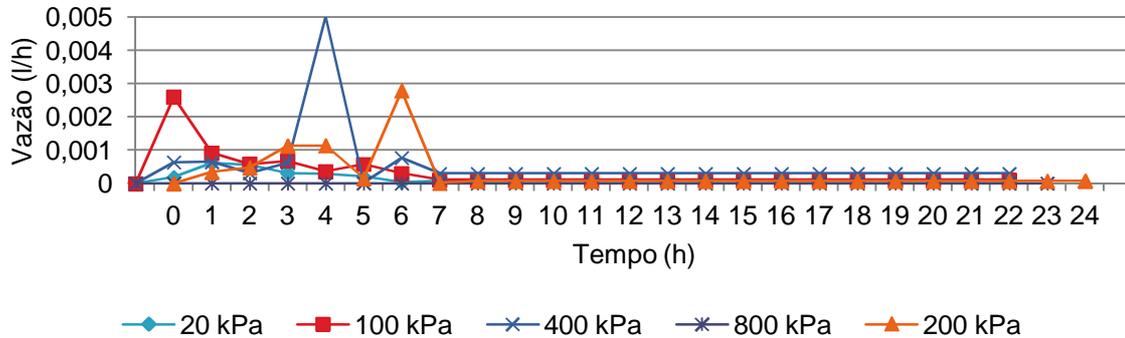


Figura 4.1. Resultados do Ensaio 1: vazão através de um rasgo de 5 mm realizado com estilete.

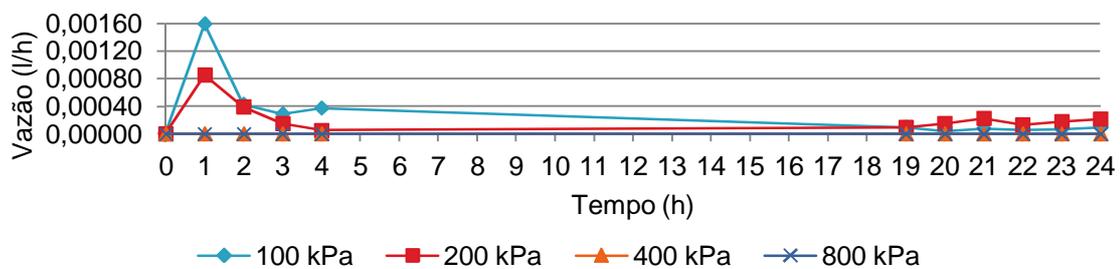


Figura 4.2. Resultados do Ensaio 2: vazão através de um rasgo de 50 mm realizado com estilete.

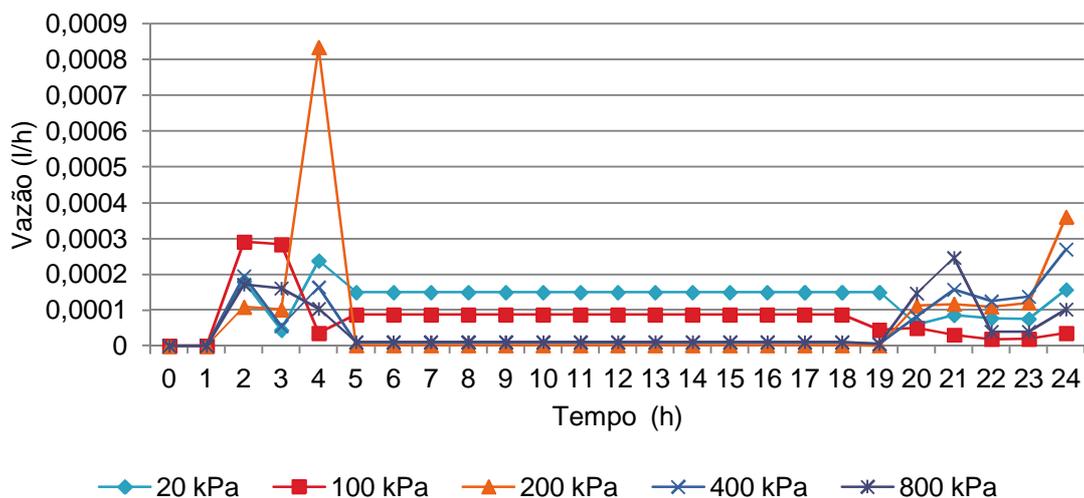


Figura 4.3. Resultados do Ensaio 3: vazão através de um rasgo de 20 mm realizado com estilete.

A partir das análises dos resultados destes ensaios foram realizadas as modificações na metodologia da pesquisa descritas no capítulo anterior. Posterior a estas modificações foram realizados os ensaios para a avaliação de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas. Estes resultados e análises são apresentados a seguir.

4.3 ESTUDO DE FLUXO ATRAVÉS DE DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS

Neste item são apresentados os gráficos de vazão vs. tempo para cada um dos seis ensaios realizados. Para efeitos de apresentação de resultados, os ensaios são denominados segundo o especificado na Tabela 4.1 e são apresentados em dois grupos: vazão através de danos provocados por estilete e vazão através de danos provocados por formão.

Tabela 4.1 Ensaios analisados no estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas.

| Denominação | Tamanho do dano | Ferramenta utilizada para provocar o dano |
|-------------|-----------------|---|
| Ensaio 1 | 5 mm | Estilete |
| Ensaio 2 | 20 mm | Estilete |
| Ensaio 3 | 50 mm | Estilete |
| Ensaio 4 | 5 mm | Formão |
| Ensaio 5 | 20 mm | Formão |
| Ensaio 6 | 50 mm | Formão |

4.3.1 Vazão através de danos provocados por estilete

No Ensaio 1 (Figura 4.4) são apresentados os resultados da vazão através de um dano de 5 mm provocado com estilete. Foi observado que para este ensaio a pressão que ocasionou o maior pico de vazão foi 100 kPa. Resultado anômalo foi observado no estágio de pressão 800 kPa após 9h de aplicação dessa pressão. Isso pode ser devido a deformações na geomembrana (contração ou expansão). Discussões adicionais sobre tal influência serão apresentadas adiante nesse capítulo. O estágio de pressão para o qual passou o maior volume de água em 24 horas foi 100 kPa, com um total de 2,5 ml (Figura 4.5).

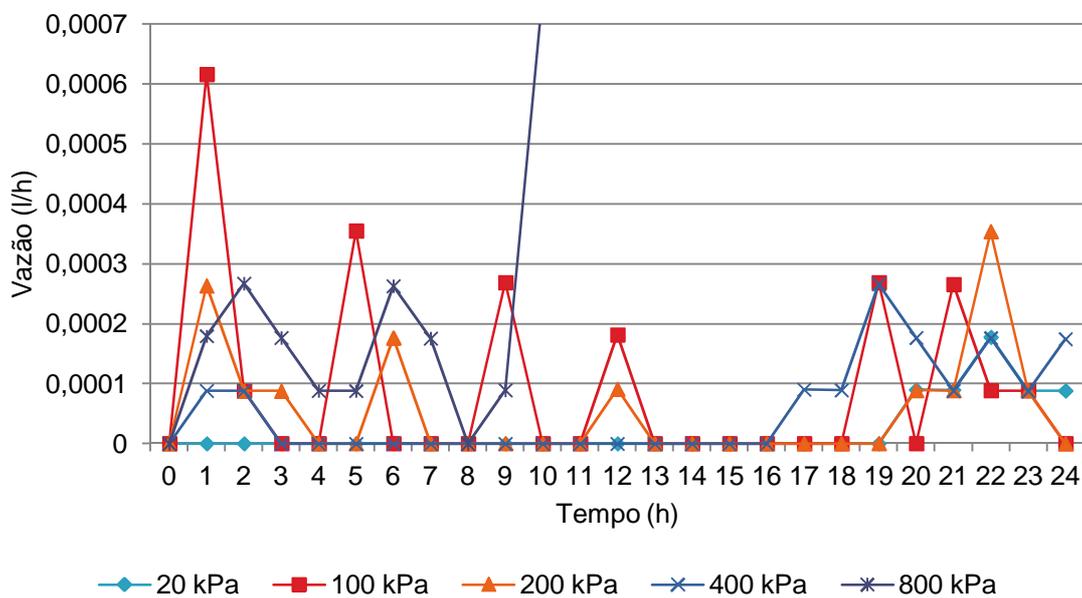


Figura 4.4. Resultados do Ensaio 1: vazão através de um rasgo de 5 mm realizado com estilete.

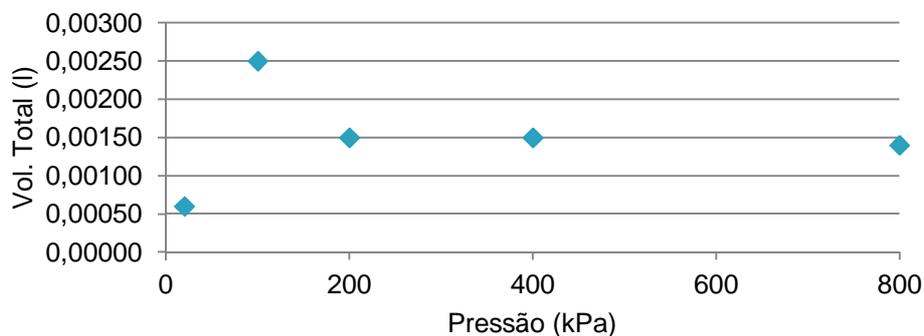


Figura 4.5. Volume total para o Ensaio 1: Estilete 5 mm.

No Ensaio 2 (Figura 4.6) são apresentados os resultados da vazão através de um dano de 20 mm realizado com estilete. Este ensaio foi o único realizado ainda com a primeira

metodologia utilizada ao longo da pesquisa (medição da vazão mediante a pesagem da água). Foi observado que para este ensaio a pressão para a qual se observou o maior pico de vazão foi 200 kPa. Esta vazão foi de 0,00083 l/h e se deu 4 horas após ter sido aumentada a pressão de 100 para 200 kPa. O estágio de pressão para o qual se observou um maior volume de água passante pelo dano na geomembrana foi a de 20 kPa, com um total de 3,5 ml. (Figura 4.7).

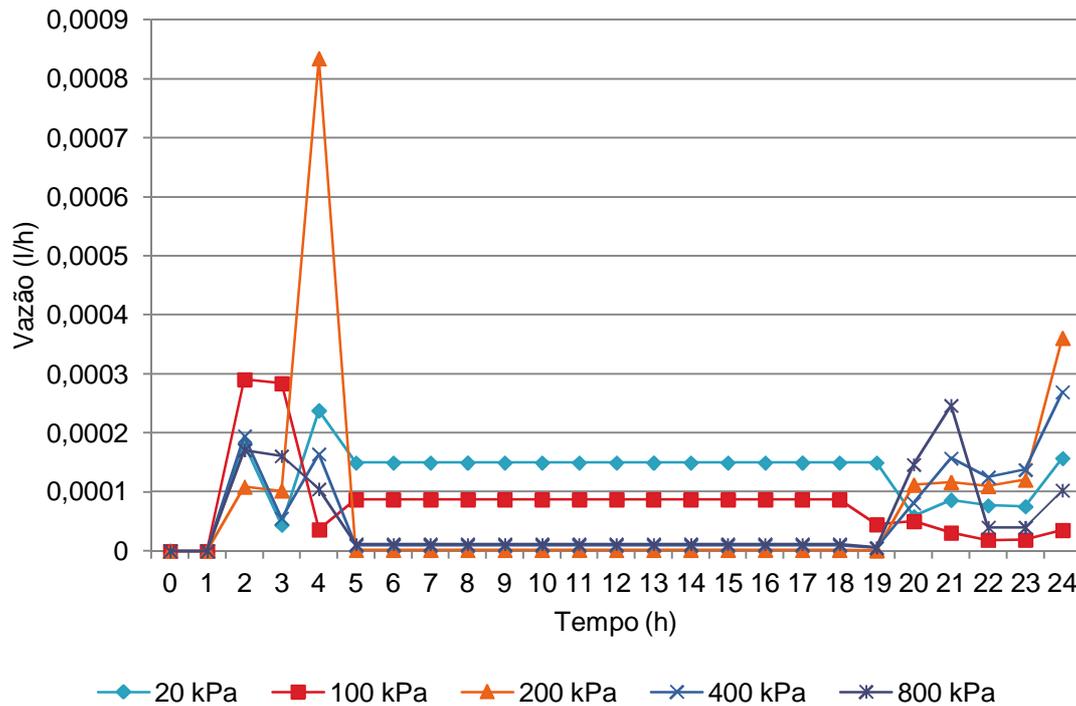


Figura 4.6. Resultados do Ensaio 2: vazão através de um rasgo de 20 mm realizado com estilete.

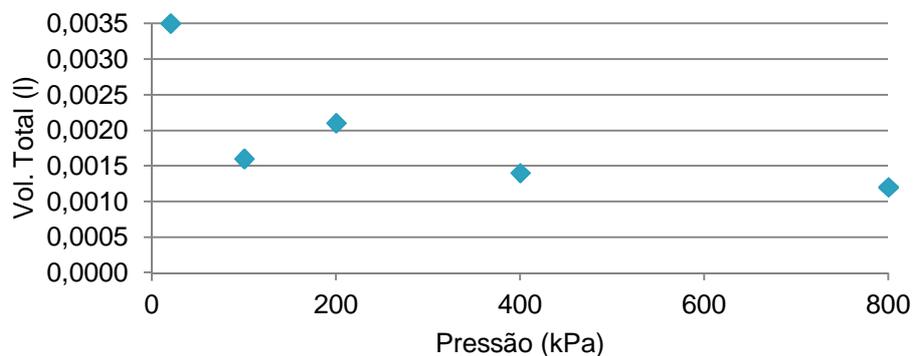


Figura 4.7. Volume total para o Ensaio 2: Rasgo 20 mm com estilete.

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados da vazão através de um dano de 50 mm realizado com estilete. Este ensaio foi realizado após se ter modificado a metodologia

com a vazão sendo medida com pipeta instalada na saída de água do tanque. Foi observado que para este ensaio as pressões que registraram os maiores picos de vazões foram 800 kPa (0,00071 l/h) e 100 kPa (0,00062 l/h). O estágio de pressão com maior volume passante pelo dano na geomembrana foi o de 100 kPa, com um total de 3,3 ml em 24 horas (Figura 4.9).

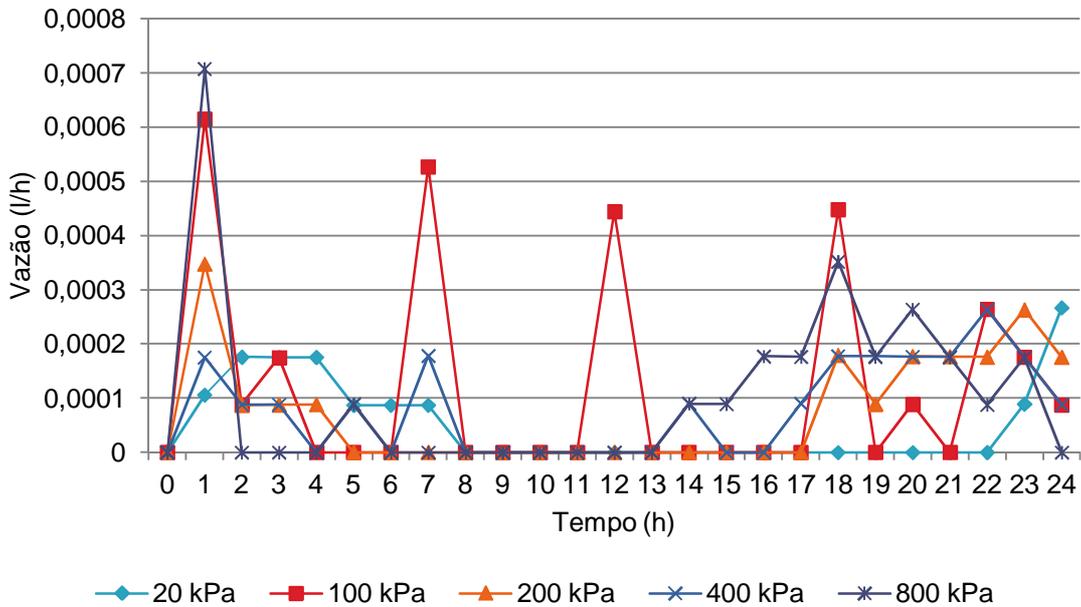


Figura 4.8 Resultados do Ensaio 3: vazão através de um rasgo de 50 mm realizado com estilete.

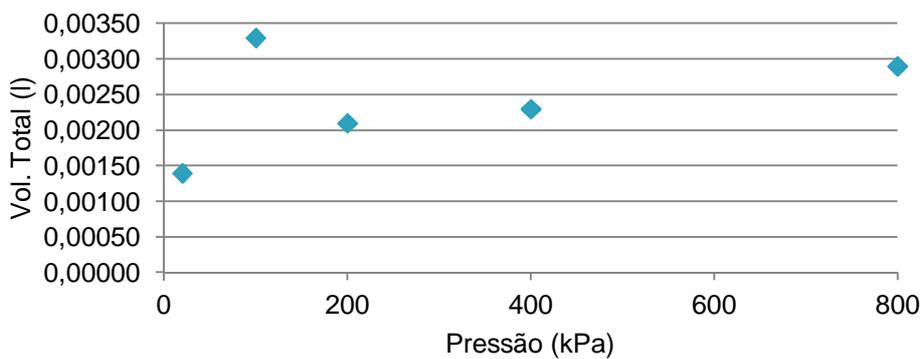


Figura 4.9. Volume total para o Ensaio 3: Estilete 50 mm.

4.3.2 Vazão através de danos provocados por formão

A Figura 4.10 apresenta os resultados de vazão através de um dano de 5 mm realizado com formão (Ensaio 4) versus tempo. Foi observado que para este ensaio o estágio de pressão para o qual se registrou o maior pico de vazão foi 100 kPa. A máxima vazão

registrada foi de 0,00096 (l/h). Foi esta pressão a que ocasionou o maior volume passante pelo dano na geomembrana, com um total de 4,1 ml em 24 horas, como mostrado na Figura 4.11.

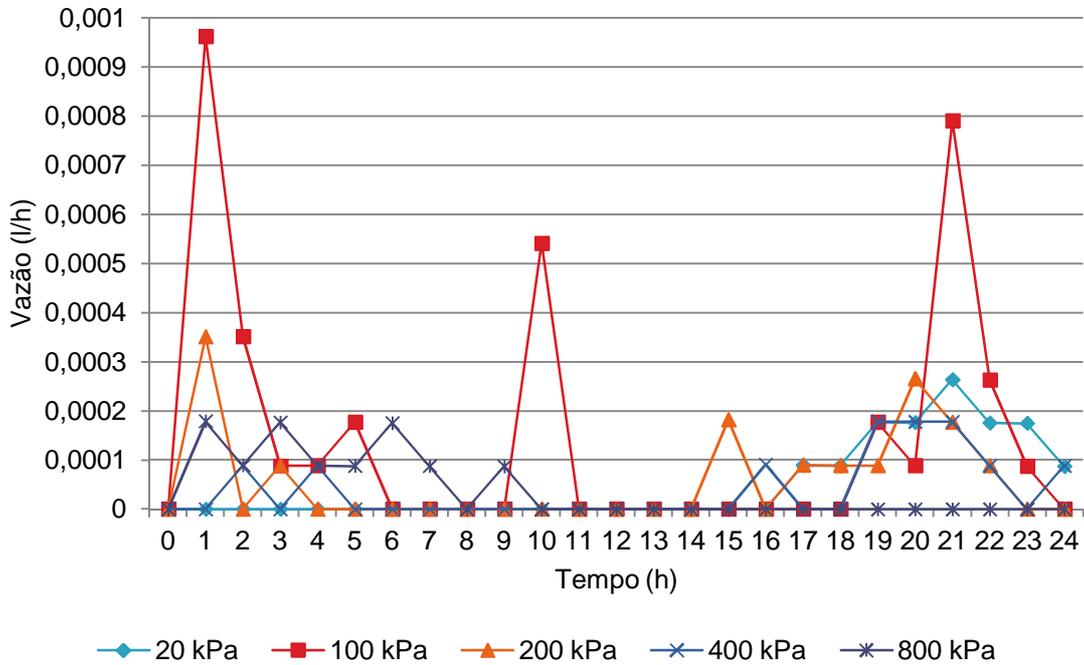


Figura 4.10 Resultados do Ensaio 4: Vazão através de um rasgo de 5 mm realizado com formão.

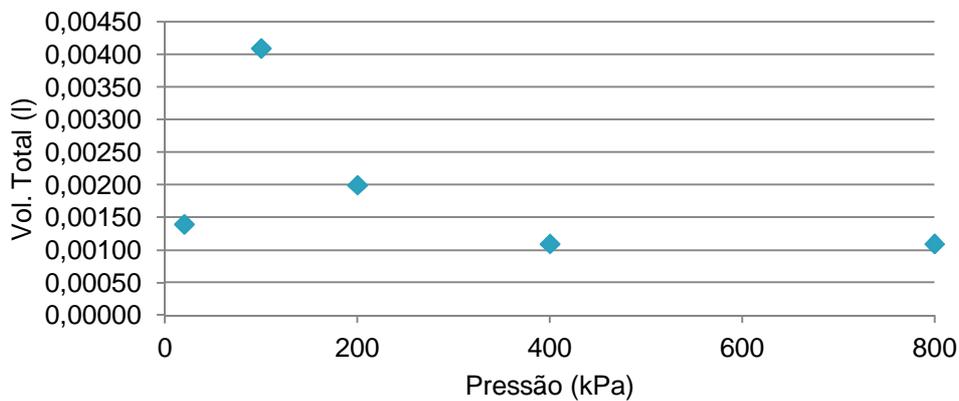


Figura 4.11. Volume total para o Ensaio 4: Formão 5 mm.

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados da vazão através de um dano de 20 mm realizado com formão versus tempo (Ensaio 5). Foi observado que para este ensaio o estágio de pressão onde se registrou o máximo pico de vazão foi 400 kPa. A máxima vazão registrada foi de 0,00027 l/h. O maior volume passante pelo dano na

geomembrana ocorreu durante o estágio de pressão de 200 kPa, com um total de 1,7 ml em 24 horas (Figura 4.13).

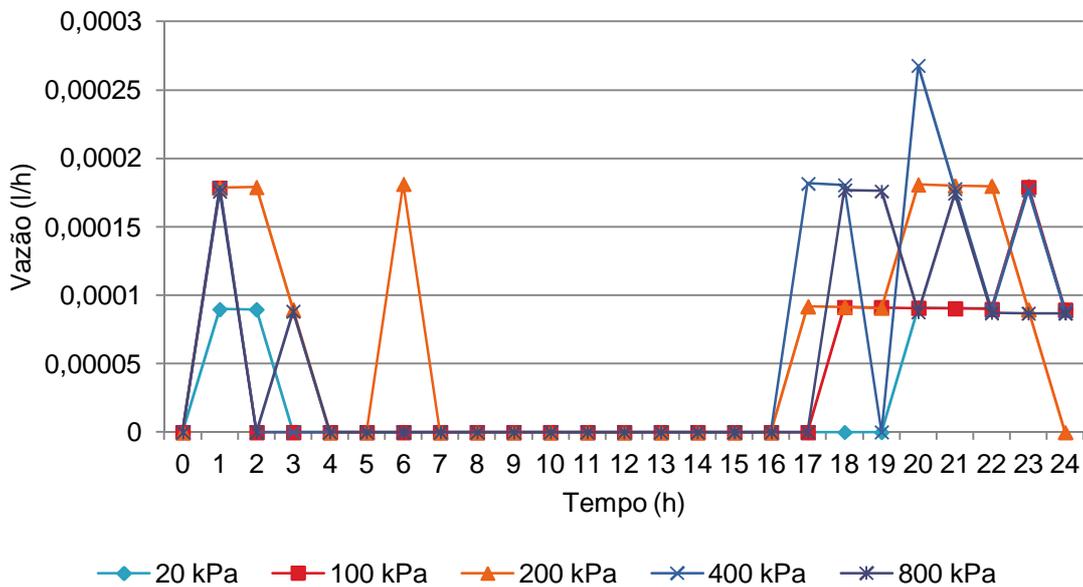


Figura 4.12 Resultados do Ensaio 5: Vazão através de um rasgo de 20 mm realizado com formão.

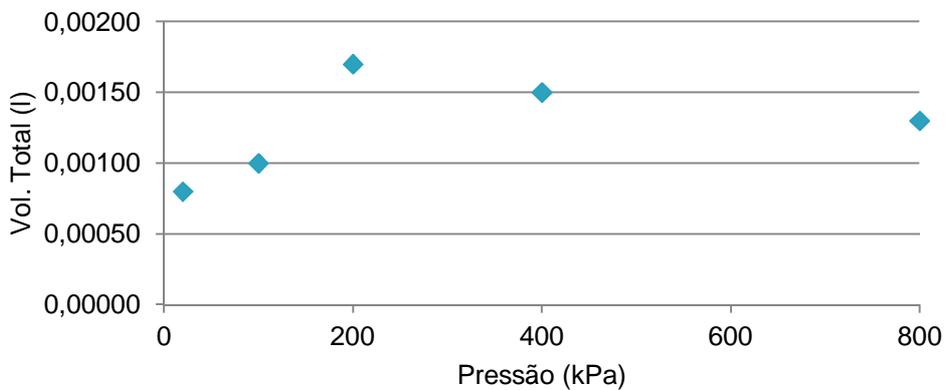


Figura 4.13. Volume total para o Ensaio 5: Formão 20 mm.

A Figura 4.14 apresenta os resultados de vazão através de um dano de 50 mm realizado com formão versus tempo (Ensaio 6). Neste ensaio o estágio de pressão onde se observou o maior pico de vazão foi 100 kPa. No caso da pressão de 800 kPa observa-se um resultado anômalo após 3 horas de aplicação da pressão. Acredita-se que isso foi devido a deformações na geomembrana, como será discutido adiante. O estágio de pressão para o qual passou o maior volume de água durante 24 horas foi 100 kPa, com um total de 2,2 ml em 24 horas (Figura 4.15).

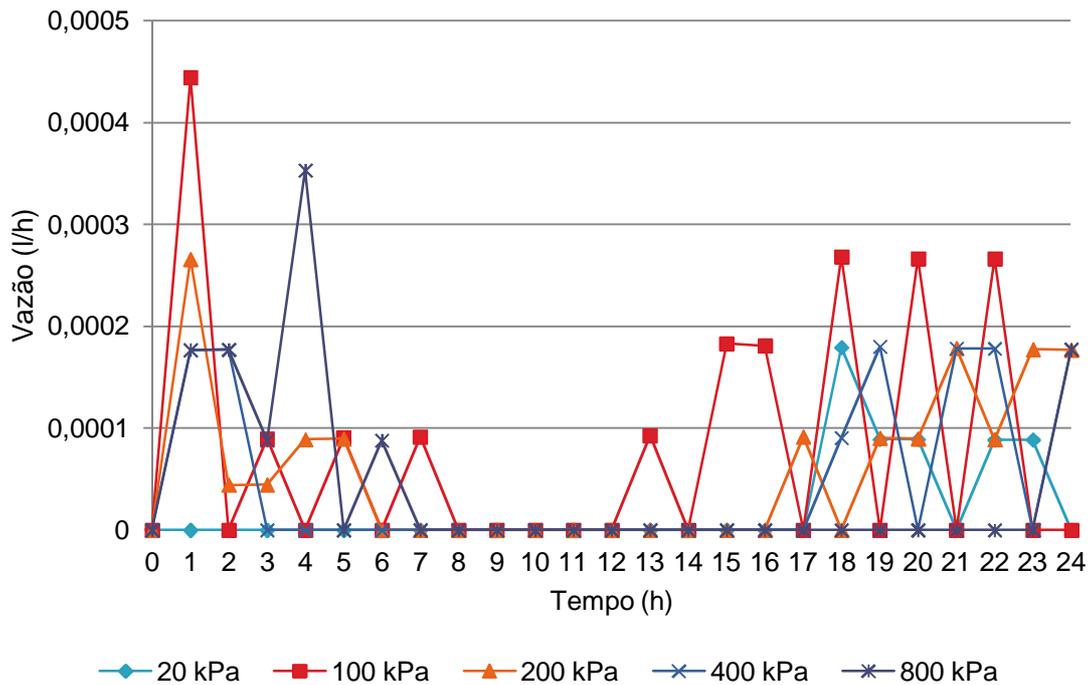


Figura 4.14 Resultados do Ensaio 6: Vazão através de um rasgo de 50 mm realizado com formão

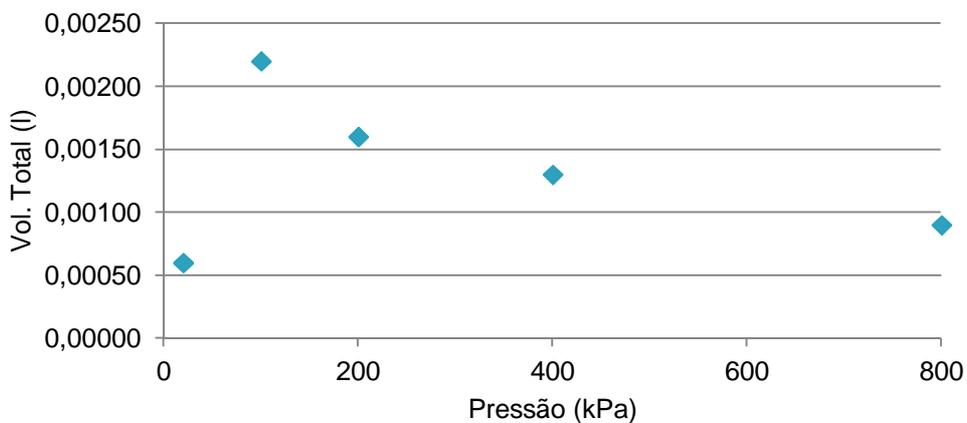


Figura 4.15. Volume total para o Ensaio 6: Formão 50 mm.

De forma geral, menores vazões foram observadas para maiores pressões de água. A razão para isso pode ser que o aumento da pressão de água dificulta a passagem da água ao longo da interface inferior da geomembrana em contato com a superfície lisa da base de aço subjacente. A compressão da geomembrana a pressões de água maiores também tenderá a fechar mais o corte, pelo efeito de Poisson, diminuindo as aberturas por onde a água poderia passar.

4.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A TAXA DE FLUXO ATRAVÉS DE DANOS MECÂNICOS EM GEOMEMBRANAS

4.4.1 Influência do tipo de dano

Foram comparados os efeitos de danos com o mesmo comprimento realizados com ferramentas diferentes. Para diferenciar o tipo de dano são utilizadas as seguintes denominações:

- E: quando o dano foi realizado utilizando estilete.
- F: quando o dano foi ocasionado utilizando formão.

A Figura 4.16 apresenta a comparação entre o volume total passante pelo dano em cada estágio de pressão para cortes com 5 mm de comprimento, executados com diferentes ferramentas. No caso do rasgo de 5 mm o volume total que passou pelo dano na geomembrana causado pelo estilete ao longo dos cinco estágios de aplicação de pressão foi de 7,5 ml. No caso do dano realizado com formão, durante o mesmo espaço de tempo passou um volume de água maior igual a 9,7 ml.

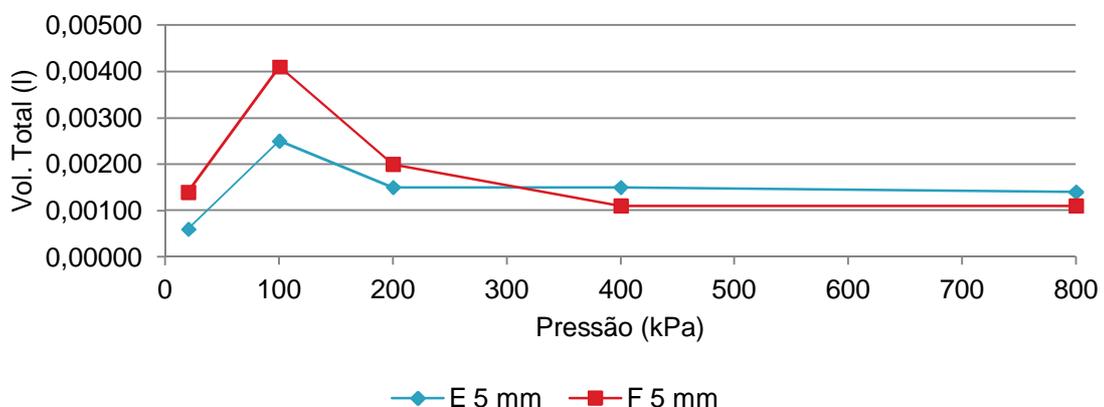


Figura 4.16. Volume total passante pela geomembrana com dano de 5 mm. Comparação entre dano realizado com estilete (E 5 mm) e dano realizado com formão (F 5 mm).

Para entender melhor a variação de vazão, a Figura 4.17 apresenta imagens dos cortes na geomembrana obtidas por microscopia. Elas permitem observar as características superficiais dos danos causados pelos diferentes tipos de ferramentas utilizadas. Pode-se observar que o dano provocado pelo formão é menos agressivo que o provocado pelo estilete. O dano realizado com estilete parece afetar uma região maior no seu entorno.

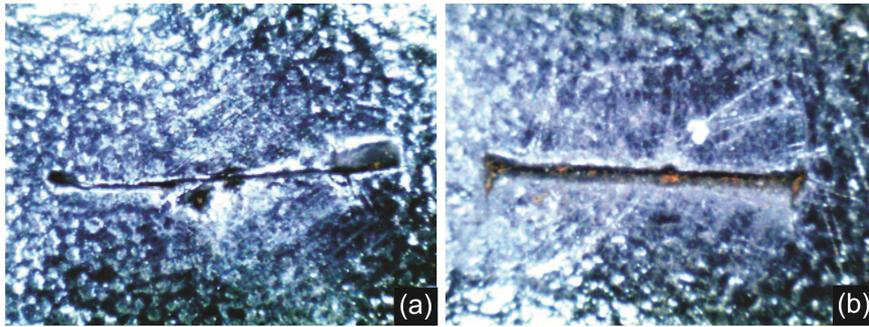


Figura 4.17. Dano de 5 mm na geomembrana. (a) Dano provocado com estilete. (b) Dano provocado com formão.

O caso seguinte a ser analisado foi o das duas amostras com dano de 20 mm de comprimento. A Figura 4.18 apresenta uma comparação do volume total passante pela geomembrana danificada em ambos os casos. No caso do dano com estilete, o volume total que passou através da geomembrana durante os cinco estágios de aplicação de pressão foi de 9,9 ml. Pode-se observar que para pressões superiores a 200 kPa os resultados obtidos são semelhantes para os dois tipos de dano. No caso do dano realizado com formão o volume total que passou pela geomembrana no mesmo espaço de tempo foi de 6,3 ml.

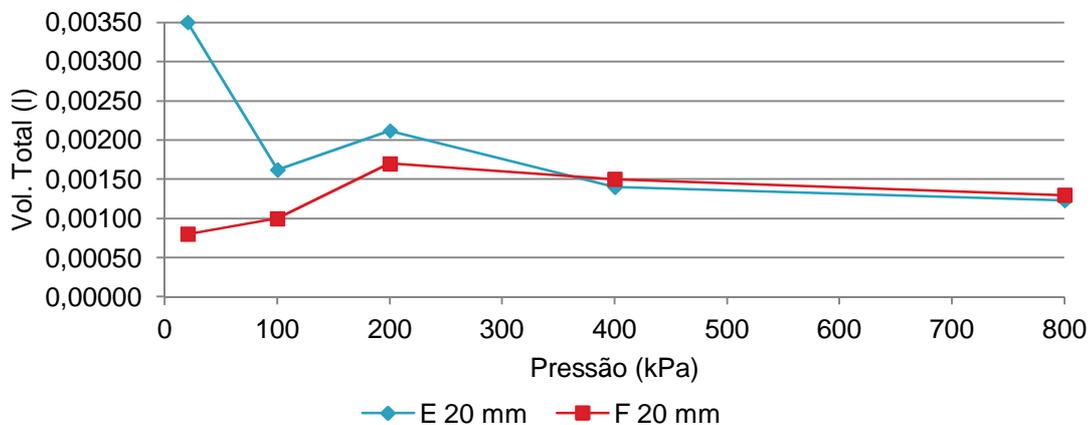


Figura 4.18. Volume total passante pela geomembrana com dano de 20 mm. Comparação de dano realizado com estilete (R 20 mm) vs. dano realizado com formão (F 20 mm).

Na Figura 4.19 são apresentadas as imagens dos cortes de 20 mm de comprimento obtidas por microscopia. Novamente, o dano provocado pelo formão parece menos agressivo que o dano com o estilete, que apresenta um traço menos uniforme e levemente curvo. Esta diferença pode ser devida à imperfeição do corte realizado com a mão em contraposição ao corte mais perfeito realizado pelo formão.

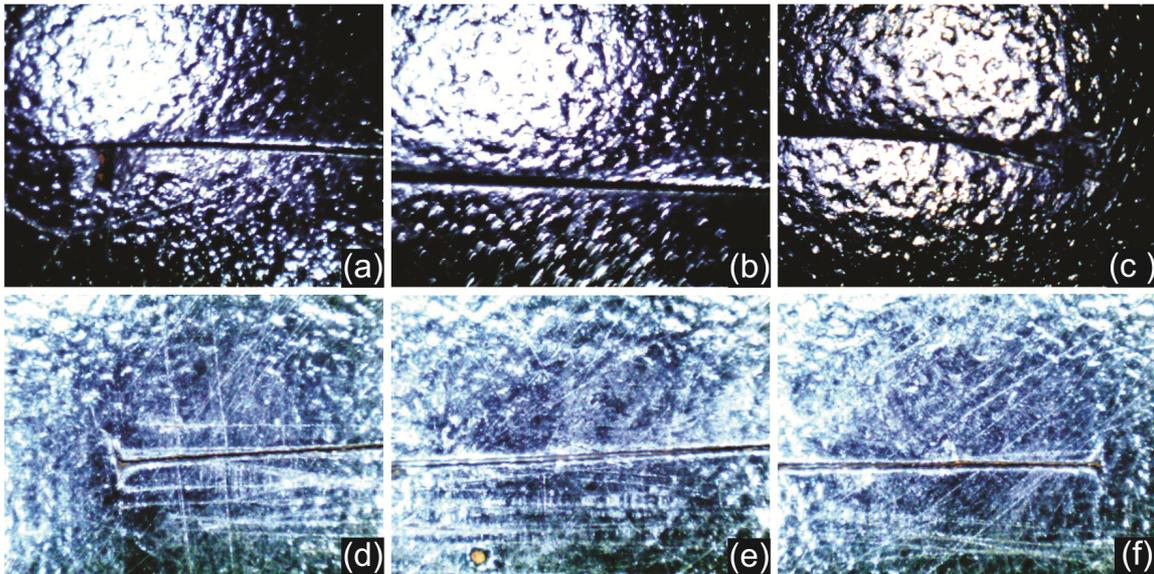


Figura 4.19. Dano de 20 mm na geomembrana. Dano provocado com estilete (a), (b) e (c). Dano provocado com formão(d), (e) e (f).

A Figura 4.20 apresenta a comparação entre volume total passante pela geomembrana danificada para cortes com 50 mm de comprimento, executados com diferentes ferramentas. Pode ser observado claramente que o dano provocado com estilete provocou uma vazão maior que o com formão. O volume total que passou pelo dano durante os cinco estágios de aplicação de pressão foi de 12,0 ml. no caso do dano executado com estilete.No caso do dano realizado com formão o volume total que passou pelo dano na geomembrana no mesmo espaço de tempo foi de 5,8 ml..

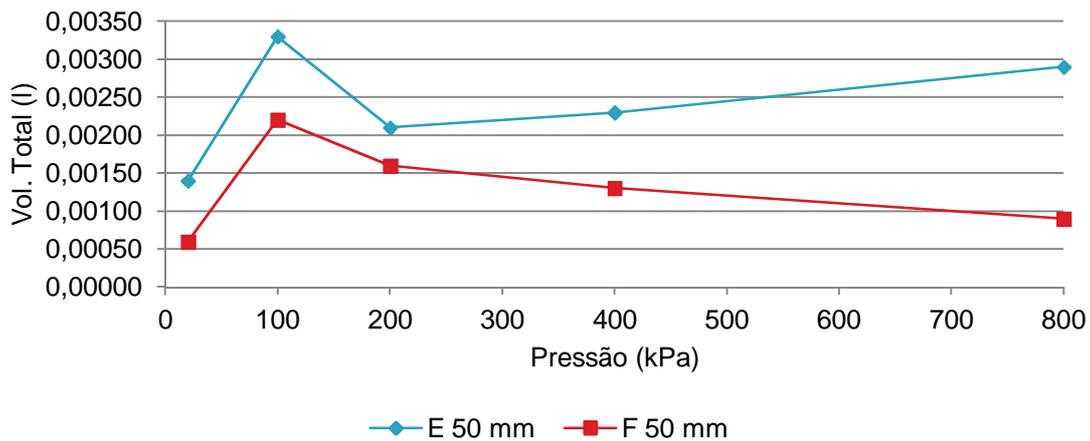


Figura 4.20. Volume total passante pela geomembrana com dano de 50 mm. Comparação de dano realizado com estilete (E 50 mm) vs. dano realizado com formão (F 50 mm).

Para entender melhor a variação de vazão, a Figura 4.21 apresenta imagens dos cortes obtidas por microscopia. Pode-se observar a imperfeição do corte realizado com a mão em contraposição ao corte mais uniforme realizado pelo formão, semelhante ao observado para o corte com 20 mm de comprimento, comentado anteriormente.

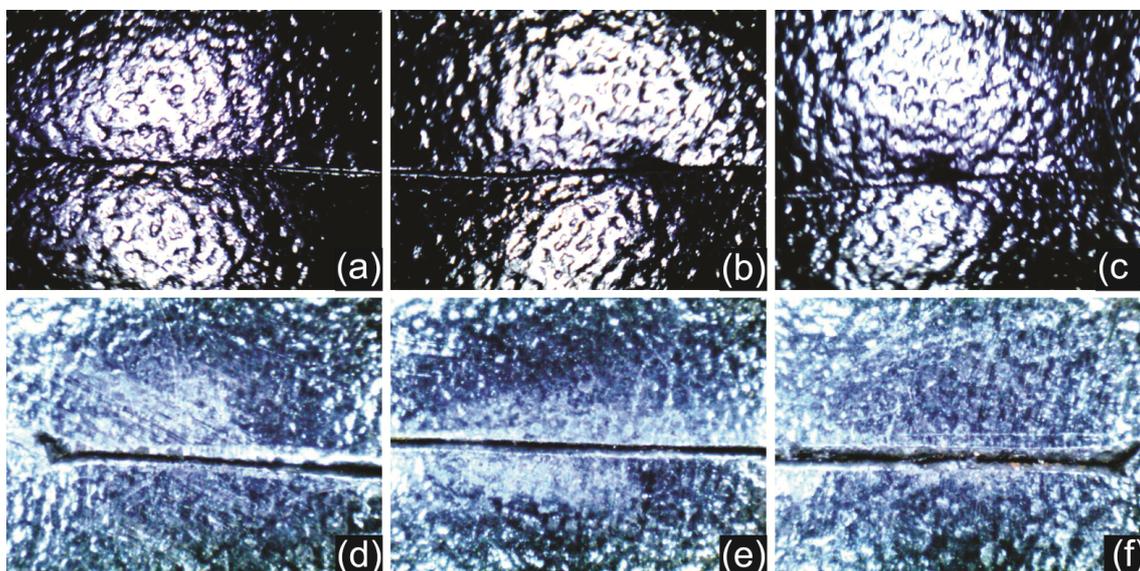


Figura 4.21. Dano de 50 mm na geomembrana. Dano provocado com estilete(a), (b) e (c). Dano provocado com formão (d), (e) e (f).

Com exceção dos ensaios em cortes com 5 mm de comprimento, para os demais ensaios os cortes com estilete provocaram maiores vazamentos que os realizados com formão. Isso pode ter sido causado em parte pela maior agressividade dos cortes com estilete, danificando mais as faces internas dos cortes.

4.4.2 Influência da temperatura

As Figuras 4.22 a 4.26 apresentam, em um mesmo gráfico, as variações de vazão e de temperatura ao longo do tempo para o ensaio com dano de 20 mm de comprimento realizado com formão. Foi observado em todos os ensaios que, para a maioria das pressões, a temperatura foi um fator que influenciou a vazão ao longo do dia. Na maior parte dos casos a vazão caiu para 0 (l/h) durante a madrugada, onde foi registrada a temperatura mais fria do dia. De forma geral, a vazão começou a aumentar ao redor das 9:00 a.m., apenas poucas horas após a temperatura do dia começar a aumentar também. As vazões apresentaram os maiores valores durante o meio-dia ou no início da tarde. Resultados semelhantes foram obtidos nos demais ensaios, cujos resultados estão apresentados no Apêndice A.

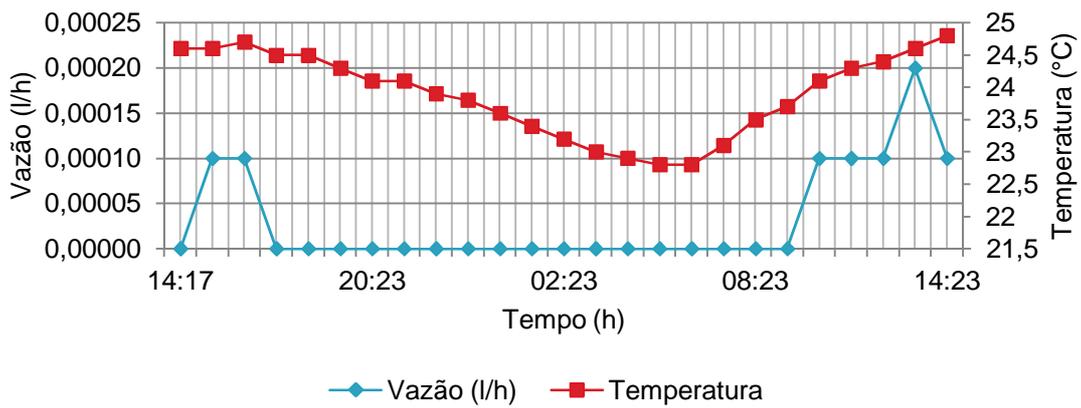


Figura 4.22. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 20 kPa.

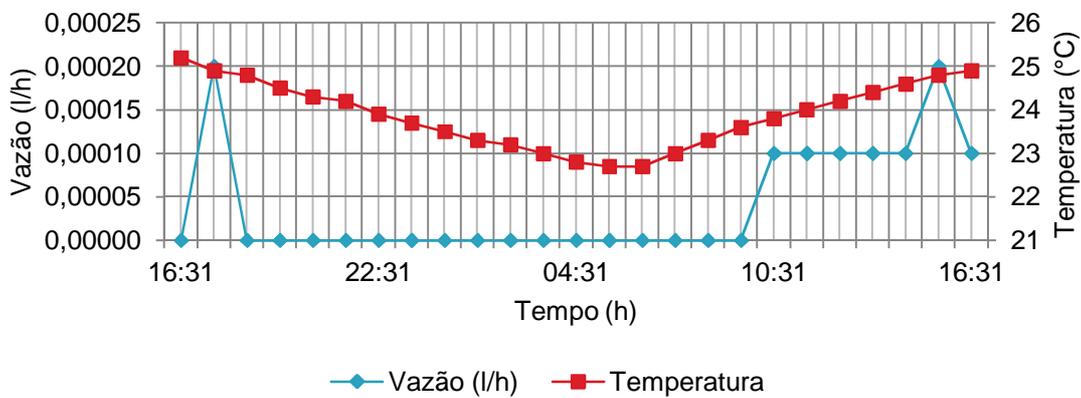


Figura 4.23. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 100 kPa.

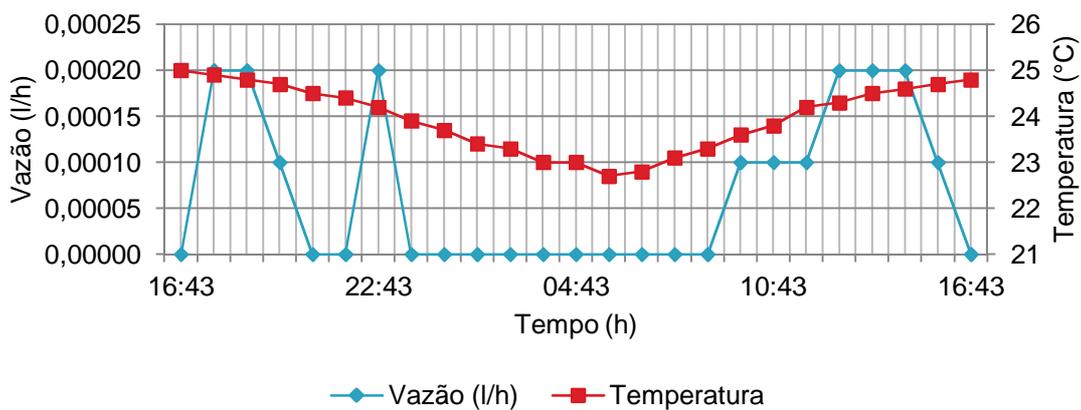


Figura 4.24. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 200 kPa.

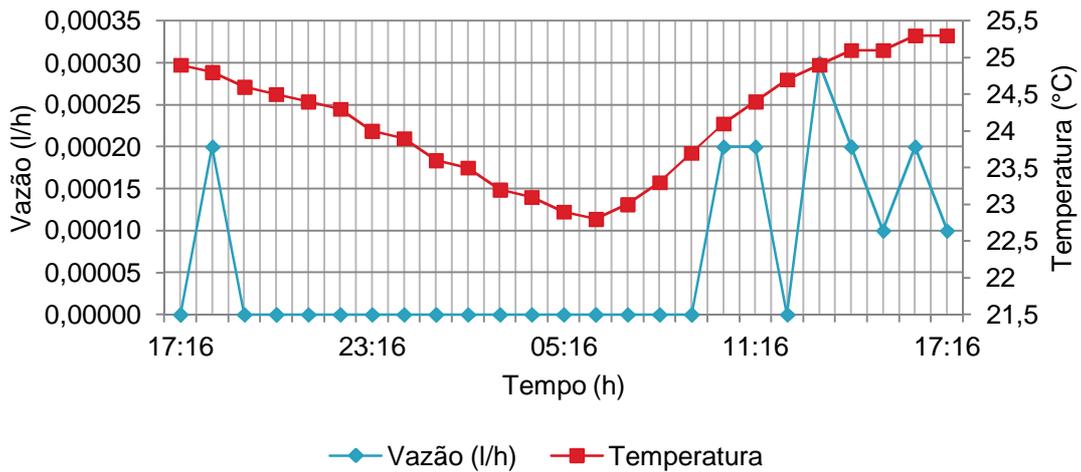


Figura 4.25. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 400 kPa.

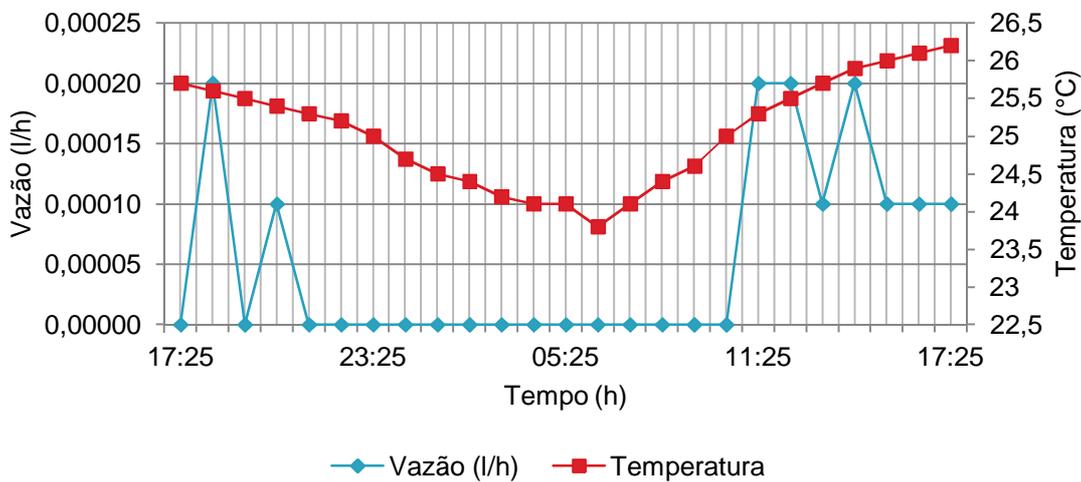


Figura 4.26. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 20 mm provocado com formão, pressão de 800 kPa.

Os resultados das Figuras 4.1 a 4.25 sugerem que as variações de temperatura (embora pequenas) influenciaram as vazões através dos danos. Nota-se uma clara tendência a aumento na vazão com aumento na temperatura durante o dia. Aumentos de vazão sob maiores temperaturas seriam esperados devido à menor viscosidade da água à maiores temperaturas, mas tal fator foi corrigido nos cálculos de vazão. Uma outra razão para aumentos de vazão a temperaturas maiores poderiam ser deformações na geomembrana (dilatação), mudando a sua forma (inicialmente plana), uma vez que as extremidades da geomembranas são ancoradas pela célula de ensaio. A mudança de forma da geomembrana pode alterar a geometria dos danos, tal como aumento das suas aberturas, ou acentuar os vazamentos por eles no caso de formação de rugas. Deve-se levar em

conta também a redução do volume da água com a redução da temperatura, para temperaturas maiores que 4 °C. Para vazões muito pequenas, essa redução de volume da água, embora também possa ser pequena para variações de temperatura da ordem de 3 °C nas madrugadas, pode também ter alguma influência nas vazões através dos danos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou analisar o fluxo através de danos mecânicos lineares (cortes) em geomembranas submetidas a elevadas pressões de água. O equipamento desenvolvido para realizar os ensaios de vazamento em geomembranas danificadas e a metodologia se mostraram adequados para os propósitos da pesquisa e os ensaios realizados permitiram ainda aprimoramentos no equipamento e metodologia originais.

Foram realizados ensaios com pressões de água de até 800 kPa, equivalentes a cerca de 80 m de coluna de água sobre a geomembrana. De forma geral, observaram-se vazamentos da ordem de 10^{-4} l/h, com volume total e água passante pelo dano da ordem de 10^{-2} l, em função do tipo de dano e pressão na água. Estes dados podem ser relevantes ou não dependendo do tipo de obra em que o vazamento ocorre (barragem, túnel, reservatório, canal, etc.), do sistema drenante da mesma e do tipo de barreira (única, dupla, tripla, etc.). A vazão através de danos mecânicos é influenciada por diversos fatores, tais como: pressão na água, ferramenta utilizada para provocar o dano e temperatura. A seguir são sumariadas as principais conclusões dessa dissertação.

Influência da pressão da água

Nos primeiros estágios de pressão foi observado um aumento na vazão com a pressão. Nas fases de aplicação de pressões maiores (> 100 kPa) a vazão tende a diminuir com o aumento da pressão. A razão para isso pode ser que nos estágios iniciais do ensaio ainda não há um perfeito contato entre a geomembrana e a base onde está apoiada, favorecendo uma maior intensidade de vazamento. À medida que a pressão aumenta a quantidade de espaços vazios nesta interface diminui, dificultando a passagem da água e, conseqüentemente, reduzindo a vazão. A compressão da geomembrana sob pressões de água maiores também tende a fechar mais o corte, pelo efeito de Poisson, diminuindo as aberturas por onde a água poderia passar.

Influência da ferramenta utilizada para provocar o dano

Na presente pesquisa foram ensaiados danos produzidos por estilete e por formão. Sobre a influência da ferramenta provocadora do dano, pode-se concluir que a qualidade das faces internas dos cortes é um dos fatores que influem a intensidade do vazamento. Para cortes com faces internas lisas e uniformes o fluxo tende a ser menor. Para cortes com faces internas danificadas, desiguais e rugosas a vazão tende a ser maior. Análises de imagens obtidas por microscopia evidenciaram as diferentes condições impostas ao corte pelas duas ferramentas utilizadas. Assim, o tipo e condições do elemento cortante em uma obra pode ter grande influência na quantidade de vazamento através do dano produzido.

Influência da temperatura

As variações de temperatura influenciam a vazão através dos danos. Existe uma clara tendência a aumento na vazão com aumento na temperatura durante o dia e uma diminuição na vazão com a diminuição na temperatura durante a noite. A razão para estas variações podem ser a diminuição da viscosidade da água com o aumento da temperatura (que foi corrigida de certa forma no ensaio) e deformações na geomembrana. O aumento da temperatura pode também provocar deformações no espécime de geomembrana, formando rugas e/ou alterando as características geométricas do corte. Tais fatores certamente influenciam a quantidade de água que é capaz de passar pelo dano.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Em função dos resultados obtidos nesta dissertação, são sugeridos os seguintes tópicos para pesquisas futuras:

- Melhorar as condições de fixação da geomembrana na célula de ensaios visando evitar deformações significativas por variação de temperatura;
- Estudar o fluxo de diferentes tipos de fluidos através de danos em geomembranas;
- Estudar o fluxo através de danos em diferentes tipos de geomembranas variando o principal material de composição (PVC, PEAD) e a espessura das mesmas;

- Estudar isoladamente o comportamento das geomembranas sob a influência da temperatura, utilizando temperaturas baixas simulando climas muito frios e temperaturas elevadas correspondentes a climas quentes;
- Avaliar o estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas com diferentes formas e tamanhos de dano na geomembrana. Por exemplo: danos circulares, rasgos curvos, etc.;
- Avaliar o estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas utilizando diferentes condições de contato na superfície geomembrana-material subjacente e diferentes tipos de materiais de base;
- Influência da presença de camada de solo, e de suas propriedades, sobre e sob a geomembrana danificada (GCL sob a geomembrana por exemplo).
- Estudar o fluxo através de danos mecânicos em geomembranas sob outras faixas de pressões de água não utilizadas na presente dissertação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 13292/1995 Solo- Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 8 p.
- AGUIAR, P. R. & VERTEMATTI, J. C. (2004). Introdução. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Vertematti, José Carlos (ed.), Edgar Blücher, São Paulo, Brasil, pp. 1- 12
- ASTM D 2434- 68 (Reapproved 2000) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).
- ASTM D 4354-99 Standard Practice for Sampling of Geosynthetics for Testing
- ASTM D 4439-00 Standard Terminology for Geosynthetics
- ASTM D 5199-99 Standard Test Method for Measuring the nominal Thickness of Geosynthetics
- BARROSO, M., TOUZE-FOLTZ, N., VON MAUBEUGE, K., PIERSON, P. (2006). Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner. *Geotextiles and Geomembranes* 24: 139-155.
- BRACHMAN, R. W. I. & GUDINA, S. (2008). Geomembrane strains from coarse grave and wrinkles in a GM/GCL composite liner. *Geotextiles and Geomembranes* 26: 488-497
- BROWN, K. W., THOMAS, J. C., LYTTON, R. L., JAYAWICKRAMA, P. & BAHRT, S. C. (1987). Quantification of leak rates through holes in landfill liners. United States Environmental Protection Agency Report CR810940, Cincinnati, OH, 147 p.
- BUENO, B. dS.; BENVENUTO, C. & VILAR, O. M. (2004). Aplicações em barreiras impermeabilizantes. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Vertematti, José Carlos (ed.), Edgar Blücher, São Paulo, Brasil, pp. 335-380
- CAPUTO, H.P. (1975). Permeabilidade dos solos. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. Livros técnicos e científicos editora, Rio de Janeiro, pp 75-86.
- CARTEAUD, F., TOUZE-FOLTZ, N., DUVAL, Y. (2005) Experimental investigation of the influence of a geotextile beneath the geomembrane in a composite liner on the leakage through a hole in the geomembrane. *Geotextiles and Geomembranes* 23: 117-143.

- CAZZUFFI, D., GIROUD, J. P., SCUERO, A. & VASCHETTI, G. (2010). Geosynthetic barrier systems for dams. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World. E. M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil, 1: 115-163
- CHRISTENSEN, J. C., MARCY, M. A., SCUERO, A. M. & VASCHETTI, G. L. (1995). A conceptual design for underwater installation of geomembrane systems on concrete hydraulic structures. Technical Report REMR-CS-50, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, USA.
- CHAPPEL, M. J., BRACHMAN R. W. I., TAKE, W. A. & ROWE, R. K. (2012). Large scale quantification of wrinkles in a smooth black HDPE geomembrane. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2012.138:671-679.
- COLMANETTI, J. P., ASSIS, A. P. & PALMEIRA, E. M. (2010). An approach for the design and installation of geomembranes on the upstream face of rockfill dams. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World. E. M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil,3: 1201-1206
- COLMANETTI, J.P. (2006). Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face 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.
- ELTON, D.J., & PEGGS, I. (2002). Geomembrane research needs. Geosynthetics International, 9(3), 283-300.
- FAYOUX, D., BENEDETTI, P.F. & POTIÉ, G. (2010). Large drinking water storages with PVC geomembrane and floating cover. Experience and long term performance in Corsica. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World. E. M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil,3: 1207-1212
- FERNANDES, L.R. (2012). Estudo da Cobertura do Lixão “Morávia” da Cidade de Medellín, Colômbia. Dissertação de Mestrado, Publicação n° G. DM-219/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.
- FORGET, B., ROLLIN, A.L. & JACQUELINE, T. (2005). Lessons learned from 10 years of leak detection surveys on geomembranes. Proceedings of Sardinia '05: The Tenth International Waste Management and Landfilling Symposium, ESEC, University of Cagliari, Sardinia, Italy, 9pp.
- FRISCHKNECHT, R., STUCKI, M., BÜSSER, S. & ITTEN, R. (2013). Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials. Ground Engineering, 45 (10), 24-28.

- GIRARD, H., DELORME, F., DEROO, L., PEYRAS, L., MÉRIAUX, P., DEGOUTTE, G. & LEFRANC, M. (2010). Mountain reservoirs with geomembrane lining systems in France: behaviour, pathology, guidelines and outstanding projects. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World. E. M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil,3: 1191-1196.
- 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
- GIROUD, J. P., RAD, N. S. & Mc KELVEY, J. A. (1997). Evaluation of the surface área of a GCL hydrated by a leachate migrating through geomembrane defects. *Geosynthetics International*, 4 (3-4), 433-462.
- GIROUD, J.P. & BADU-TWENEBOAH (1992). Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects. *Geotextiles and Geomembranes* 11:1-28.
- GIROUD, J. P. & BONAPARTE, R. (1989a). Leakage through liners constructed with geomembranes- Part I. Geomembrane liners. *Geotextiles and Geomembranes* 8: 27-67.
- GIROUD, J. P. & BONAPARTE, R. (1989b). Leakage through liners constructed with geomembranes- Part II. Composite liners. *Geotextiles and Geomembranes* 8 (2):71-111.
- GIROUD, J.P., KHATAMI, A. & BADU-TWENEBOAH, K. (1989). Evaluation of the rate of leakage through composite liners. *Geotextiles and Geomembranes* 8:337-340.
- GIROUD, J.P. & MOREL, N. (1992). Analysis of geomembrane wrinkles. *Geotextiles and Geomembranes* 11: 255-276.
- HEMSI, P.S., VIDAL, D.M., FONSECA, C., YOSHIMURA, P. & URASHIMA, D.C. (2010). Mechanical behavior of a PVC geosynthetic barrier exhumed from an industrial waste disposal trench. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World. E. M. Palmeira-D.M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil, 2: 881-886.
- ICOLD (2010). Geomembrane sealing systems for dams, Design principles and review of experience. Bulletin 135 of the International Comission on Large Dams, Paris, 464p.
- ICOLD (1991). Watertight geomembranes for dams, State of the art. Bulletin 78 of the International Comission on Large Dams, Paris, 140p.
- KATSUMI, T. & I. T., ISHIMORI, H. & KAMON, M. (2010). Geosynthetics applied in waste landfills and containment facilities. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World. E. M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil,1: 323-342

- LAMBE, T.W. (1951). Permeability test. *Soil Testing for Engineers*, Lambe T.W. & Whitman, R.V. (eds.), John Wiley & Sons, New York, pp. 52-62.
- MENDES, M. J. de 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 nº G.TD-064/2010, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180 p.
- 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
- REBELO, K.M.W. (2008). Avaliação de camadas de proteção para geomembranas de PVC e PEAD. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, (EESC/USP), São Paulo, Brasil, 247 p.
- ROLLIN, A.L., MARCOTTE, M., JAQUELIN, T. & CHAPUT, L. (1999). Leak location in exposed geomembrane liners using an electrical leak detection technique. *Geosynthetics '99*, Boston, Massachusetts, Vol. 2, pp. 615-626
- ROWE, R.K. (2007). Advances and remaining challenges for geosynthetics in geoenvironmental engineering applications. XXIII Manuel Rocha Lecture, *Soils & Rocks* 30, No. 1, 3-30.
- ROWE, R. K. (2005). Long-term performance of contaminant barrier systems. 45th Rankine Lecture, *Géotechnique* 55, No. 9, 631-678
- ROWE, R. K. & HOSNEY M. S. (2010). A systems engineering approach to minimizing leachate leakage from landfills. *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World*. E. M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil, 1: 501-510
- ROWE, R. K. & SANGAM, H. P. (2002). Durability of HDPE geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes* 20: 77-95.
- SANDRONI, S.S., DE MELLO, L. G., GOMES, R. C. & VILAR, O. M. (2010). Brazilian research and practice with geosynthetics. *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World*. E. M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil, 1: 3-41.
- SCUERO, A., VASCHETTI, G., MACHADO DO VALE, J., GONTIJO, M. (2012). PVC geomembranes to enhance performance of South American dams. XXIX National Seminar on Large Dams. Brazilian Committee On Dams. Porto de Galinhas, Pe., pp. 1-19.
- SHUKLA, S. K. (2012). Fundamentals of geosynthetics. *Handbook of Geosynthetic Engineering*, Sanjay Kumar Shukla (ed.), ICE Publishing, London, England, pp.1-44.

- SINGH, D. N., SHUKLA, S. K. & ARNEPALLI, D. N. (2012). Earth dams. Handbook of Geosynthetic Engineering, Sanjay Kumar Shukla (ed.), ICE Publishing, London, England, pp.263-278.
- TAKE, W.A., WATSON, E., BRACHMAN, R.W.I., ROWE, R.K. (2012). Thermal expansion and contraction of geomembrane liners subjected to solar exposure and backfilling. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138: 1387-1397.
- TOUZE-FOLTZ, N. & GIROUD, J. P. (2003) Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembrane defects. Geosynthetics International, 10(6), 215-233.
- YAKO, M. A., KOERNER, G. R., KOERNER, R. M. & HSUAN, Y.G. (2010). Case history of a 20-year old exposed HDPE surface impoundment liner. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging World. E. M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil,2: 805-808
- YEE, T. W. & WONG, K. H. (2008). Leachate filter geotextile and application for Laogang municipal solid waste landfill, Shanghai. Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics. L. Guangxin - Y. Chen- X. Tang. Shanghai, China:479- 485.
- ZANZINGER, H., GARTUNG, E. & HORNSEY, W. P. (2012). Landfills. Handbook of Geosynthetic Engineering, Sanjay Kumar Shukla (ed.), ICE Publishing, London, England, pp.245-261.
- ZORNBERG, J. G. (2005) Advances on the use of geosynthetics in hydraulic systems. Nineteenth Geosynthetic Research Institute Conference (GRI), Geosynthetics Institute, Las Vegas, NV, pp. 1-17.

APÊNDICES

A. Influência da temperatura na vazão.

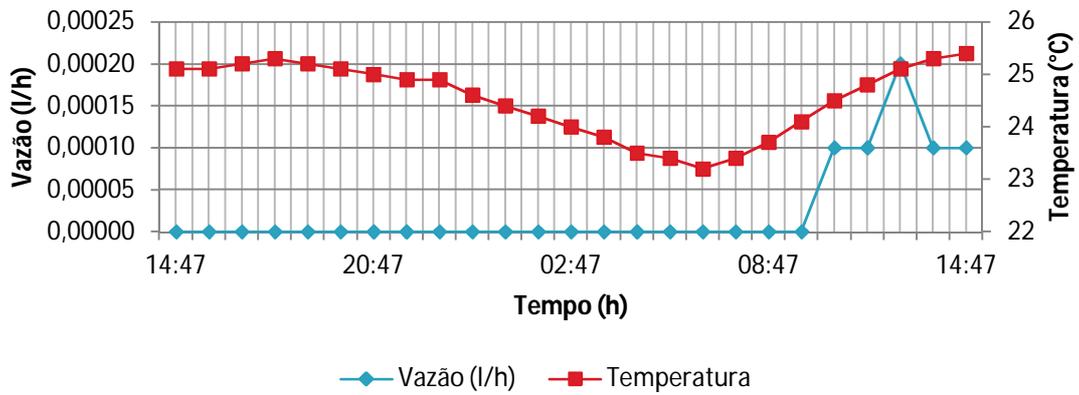


Figura A1. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com estilete, pressão de 20 kPa.

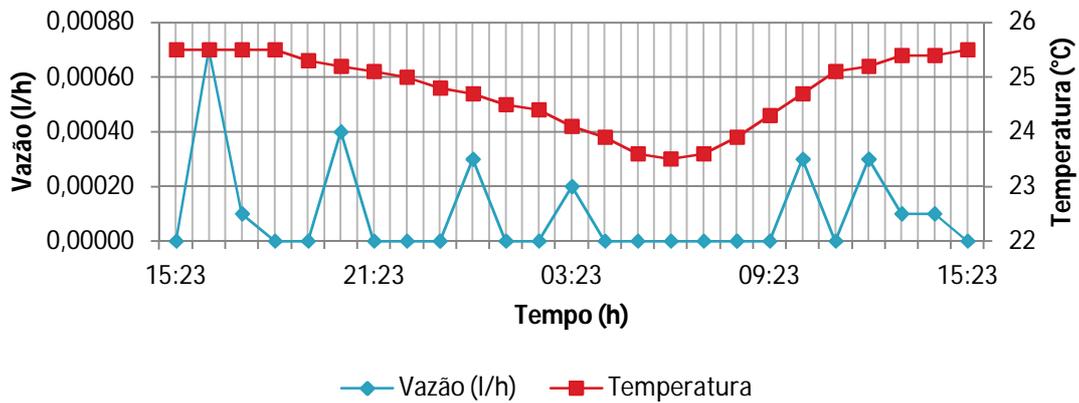


Figura A2. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com estilete, pressão de 100 kPa.

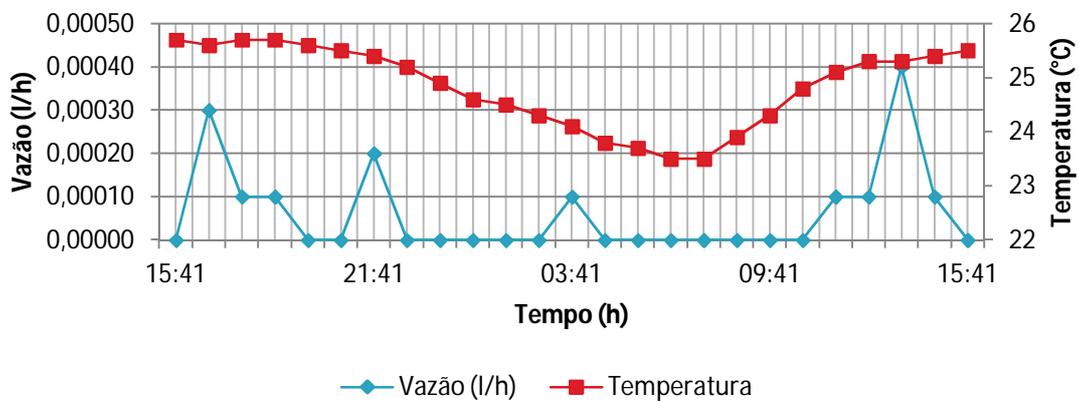


Figura A3. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com estilete, pressão de 200 kPa.

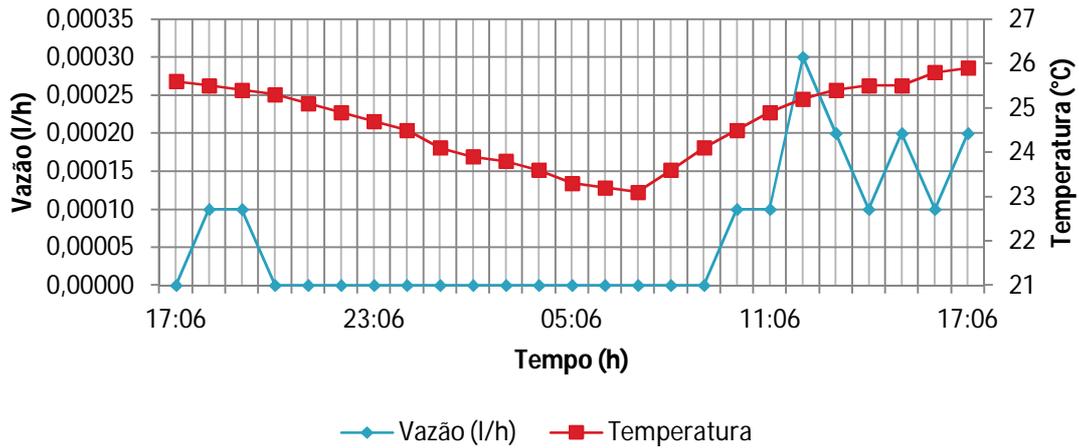


Figura A4. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com estilete, pressão de 400 kPa.

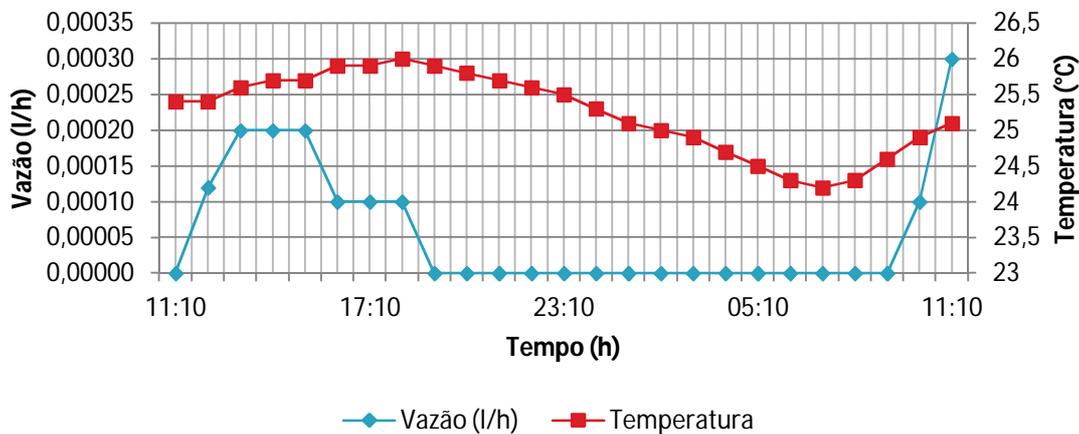


Figura A5. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 20 kPa.

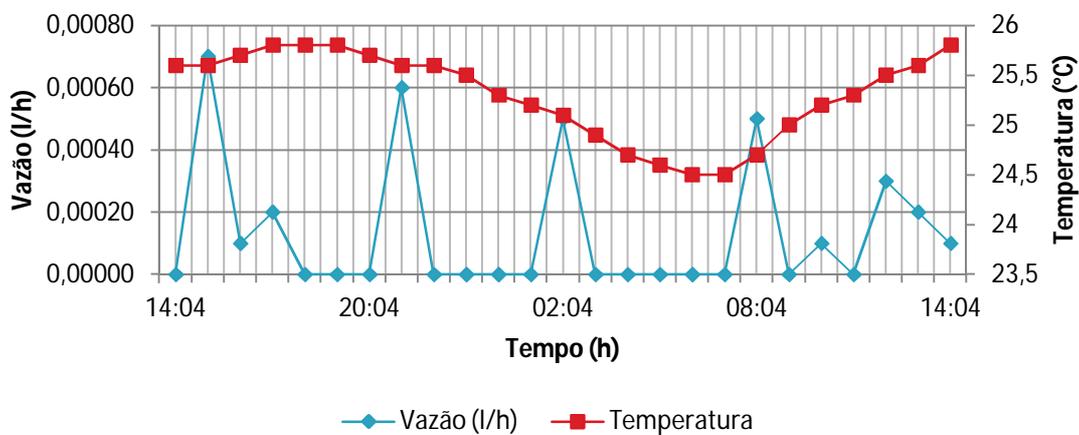


Figura A6. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 100 kPa.

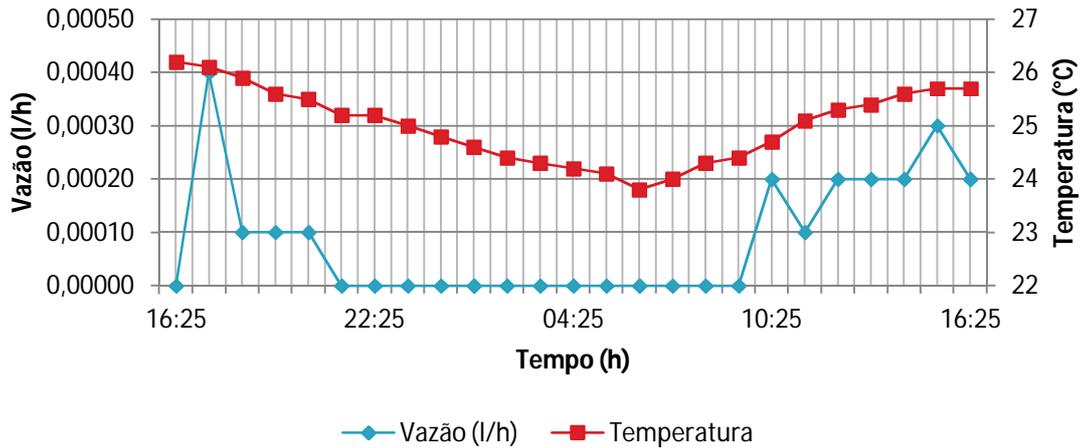


Figura A7. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 200 kPa.

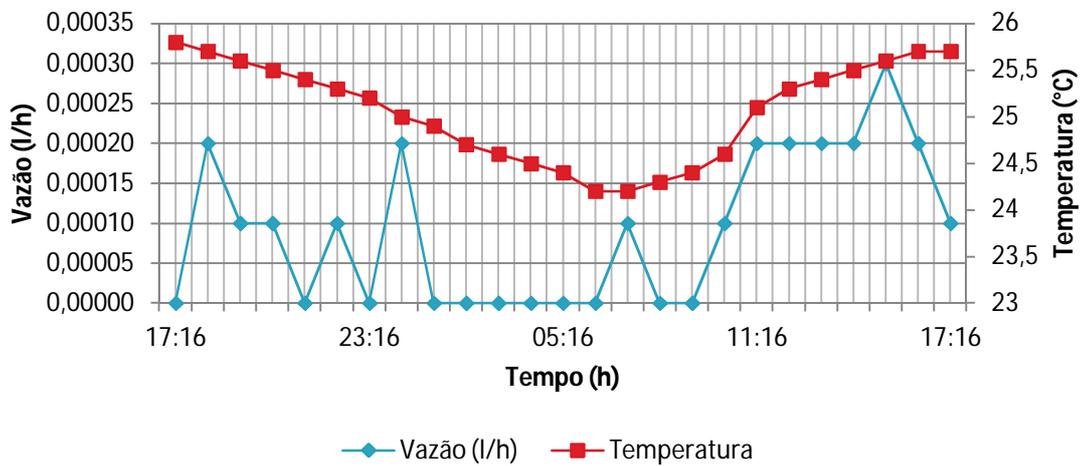


Figura A8. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 400 kPa.

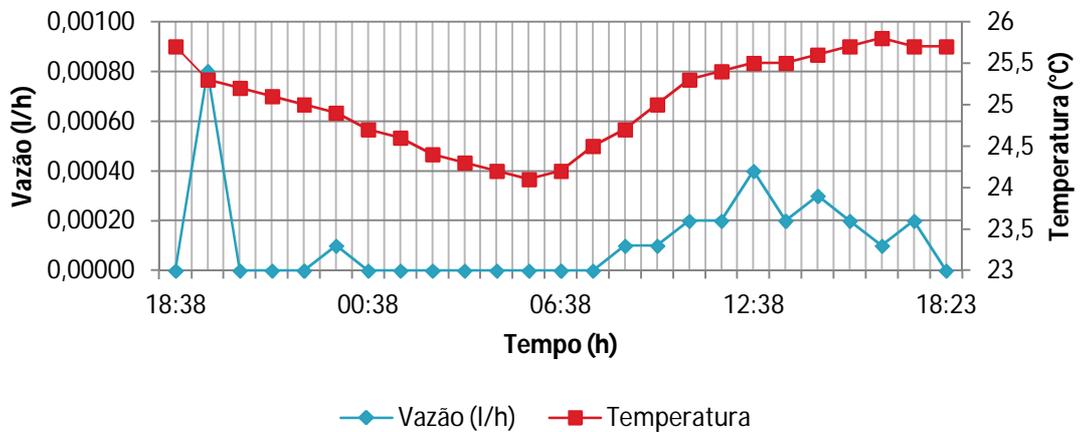


Figura A9. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com estilete, pressão de 800 kPa.

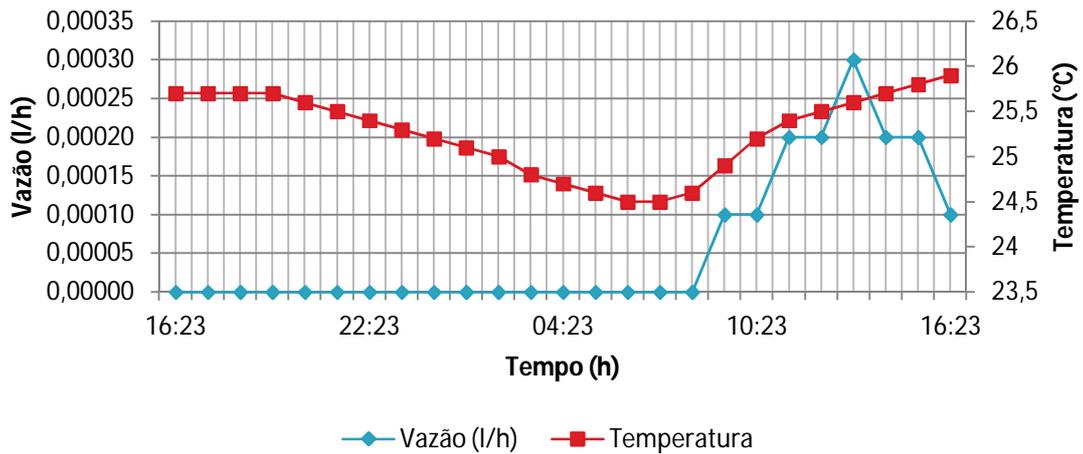


Figura A10. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 20 kPa.

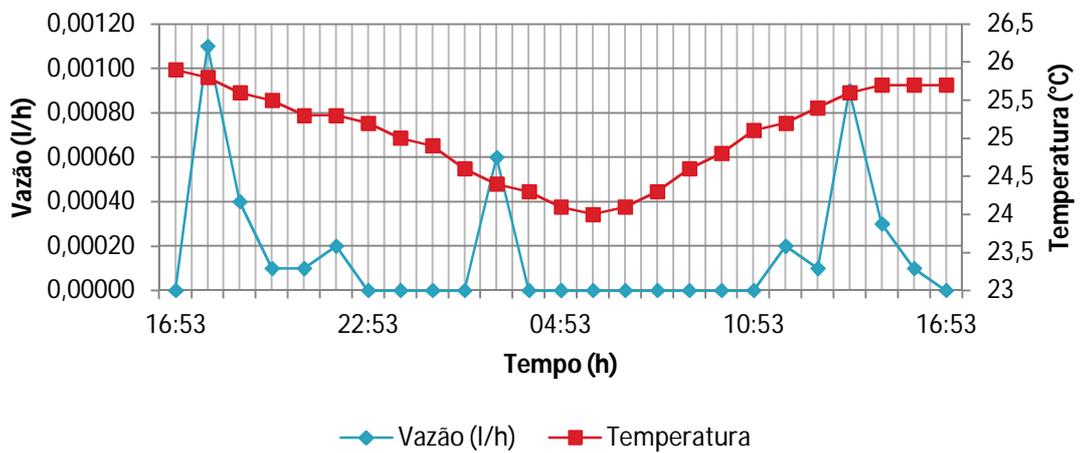


Figura A11. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 100 kPa.

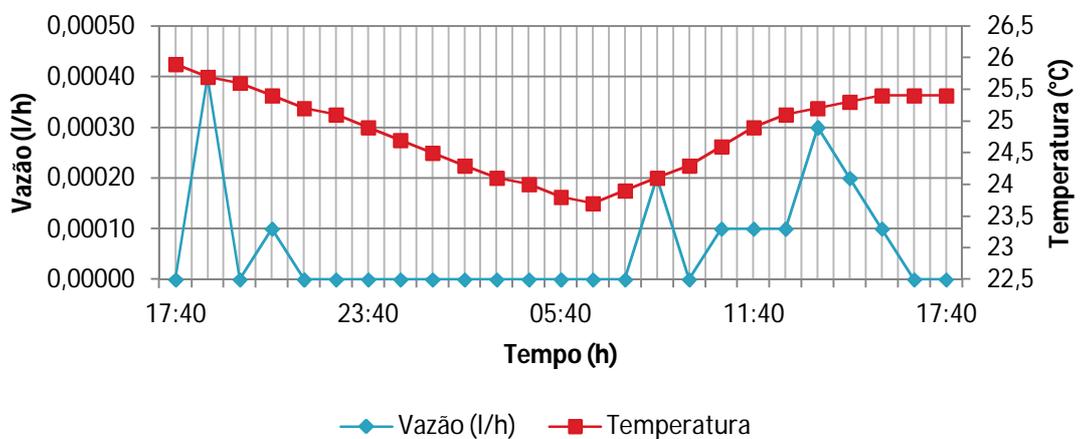


Figura A12. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 200 kPa.

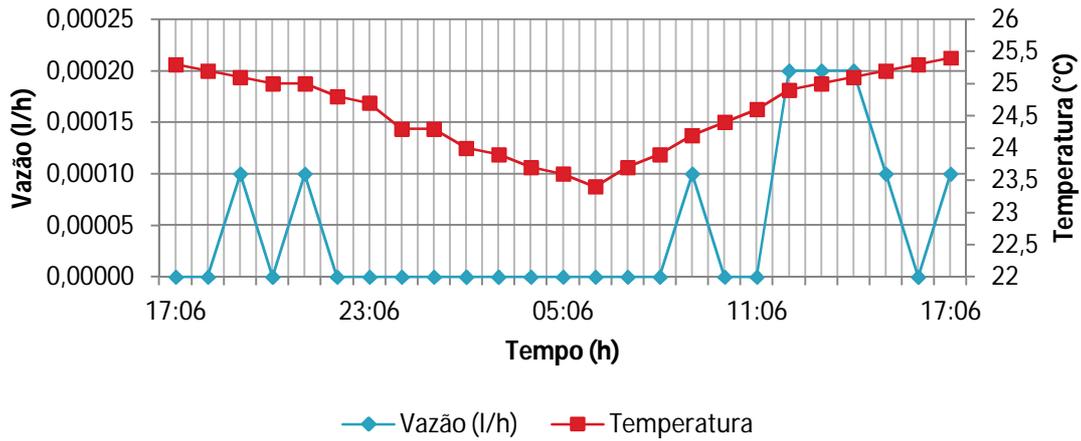
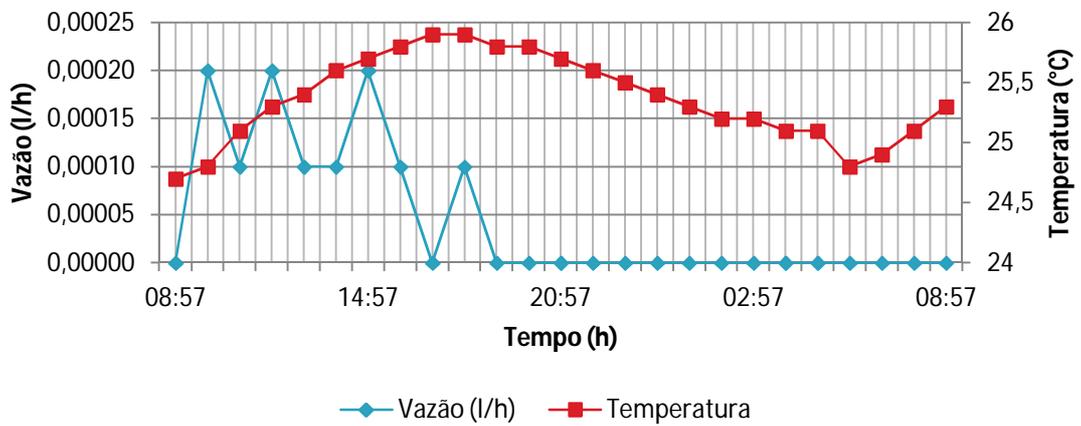


Figura A13. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 5 mm provocado com formão, pressão de 400 kPa.



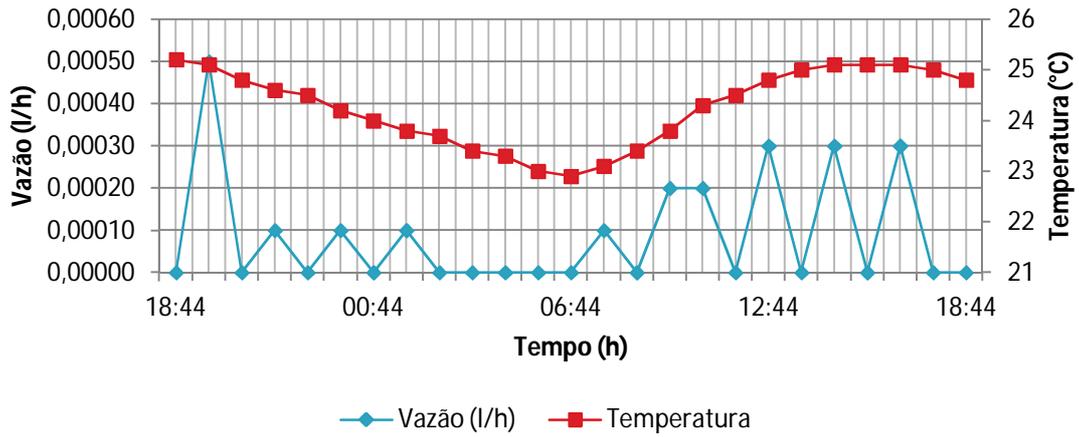


Figura A16. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com formão, pressão de 100 kPa.

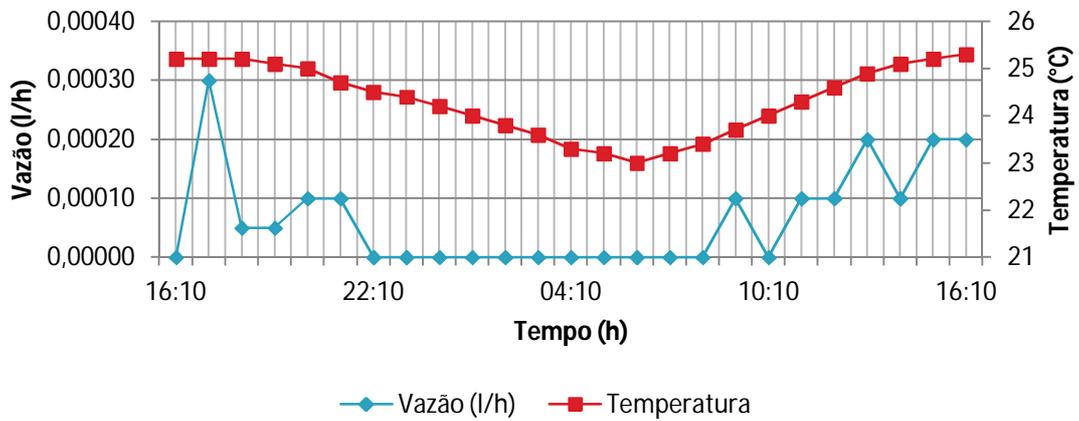


Figura A17. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com formão, pressão de 200 kPa.

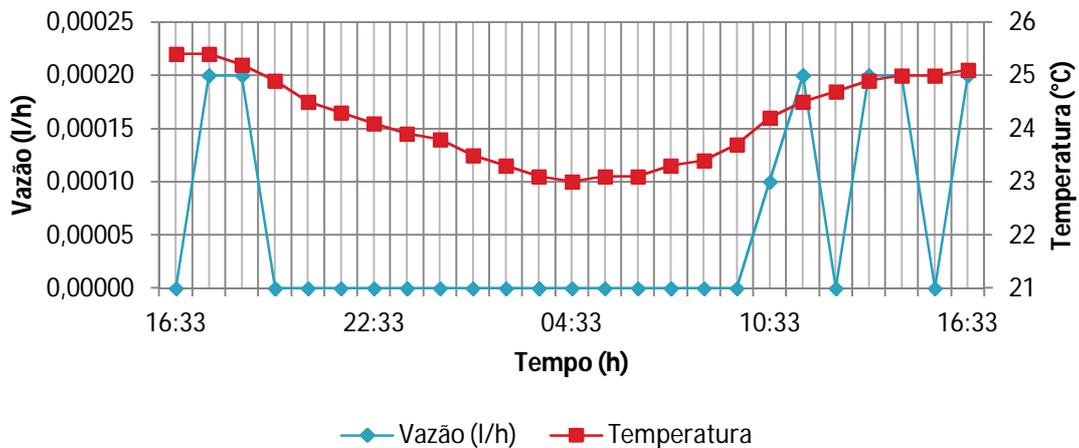


Figura A18. Influência da temperatura na vazão no ensaio com dano de 50 mm provocado com formão, pressão de 400 kPa.