

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

**ANÁLISE NUMÉRICA DE VAZAMENTOS ATRAVÉS DE**  
**DANOS EM GEOMEMBRANAS**

**CAIO SOARES CAMARGOS**

**ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-345/2022**

**BRASÍLIA / DF: 23/FEVEREIRO/ 2022**

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

**ANÁLISE NUMÉRICA DE VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS EM  
GEOMEMBRANAS**

**CAIO SOARES CAMARGOS**

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

**APROVADO POR:**

---

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

---

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

---

**IVONNE ALEJANDRA MARIA GUTIÉRREZ GÓNGORA, D.Sc. (UCB)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 23 DE FEVEREIRO DE 2022.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CAMARGOS, CAIO SOARES

**Análise Numérica de Vazamentos Através de Danos em Geomembranas.** Distrito Federal, 2022.

xix, 111 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022).

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

1. Sistemas de Barreira

2. Geomembrana

3. Danos

4. Vazamentos através de Danos

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CAMARGOS, C.S. (2022). **Análise numérica de vazamentos através de danos em geomembranas.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-345/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 111 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Caio Soares Camargos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. **Análise numérica de vazamentos através de danos em geomembranas.**

GRAU/ANO: Mestre/2022

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

---

Caio Soares Camargos

QSF 07 Lote 101, Taguatinga Sul.

CEP: 72025-000 - Brasília/DF

caiocamargos1996@gmail.com

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à Deus. Ele nunca me abandonou nos momentos de necessidade. Também dedico aos meus pais e minhas irmãs, por todo amor e apoio recebido durante o mestrado.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ser meu melhor amigo e também por estar comigo em todos os momentos, me dando saúde, força, fé e esperança.

A minha Mãe, Ana Lúcia, por acreditar em mim, me dar conselhos, me incentivar, me tranquilizar e ser meu porto seguro todos os dias. Ao meu pai, Ronaldo, por me proporcionar segurança e conforto. As minhas irmãs, Ana Clara e Ana Carolina, por compartilharem momentos incríveis ao meu lado e serem as melhores companheiras de vida. Sem o apoio de vocês eu não conseguiria, vocês são minha fonte de amor.

Ao meu orientador, Prof. Ennio, por sempre estar disponível a me ajudar, pela paciência, compreensão, confiança, incentivo e por todos os ensinamentos, a você meu muito obrigado.

Ao professor Leandro, pela ajuda na interpretação das análises da minha pesquisa.

A minha avó, Almerinda, por ser minha fonte de alegria, carinho e paz. Obrigado por ser minha companheira de oração e cozinha. A minha madrinha, Branca, por ser minha segunda mãe, obrigado por ser tão incrível comigo.

A minha prima Lorena, por ser minha amiga desde sempre e por me fazer sentir especial e amado. Os momentos ao seu lado sempre ficam eternizados na memória. A minha prima Luíza, por ser minha ouvinte e conselheira.

A minha amiga Fran, por ser tão companheira. Obrigado pelas conversas diárias, incentivo e carinho. Ao meu querido amigo Leandro, por me animar, apoiar e tornar meus dias mais felizes.

Aos meus queridos amigos: Viviane, Débora, Ivonne, Hellen, Eduardo, Aroldo, Nilton, Vanessa, Ivis, Laís, Michele e Luana. Sei que sempre poderei contar com vocês.

Aos meus colegas/amigos que fiz no mestrado: Ana Carolina, Alexia, Gabi, Gabriel, Juan e Raísia. Obrigado pelo apoio, conversas, risadas.

A CAPES pelo apoio financeiro. A Universidade de Brasília (UnB) e ao programa de pós-graduação em Geotecnia da UnB.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação da Dissertação .....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Estrutura da Dissertação.....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Geossintéticos.....	5
2.2	Utilização de geomembranas em obras hidráulicas e de disposição de resíduos.....	6
2.3	Danos em geomembranas.....	11
2.4	Exemplos de geossintéticos em obras hidráulicas e de disposição de resíduos.....	16
2.5	Metodologias de análise .....	21
2.5.1	Modelagem numérica.....	21
2.5.2	Soluções analíticas para quantificação de vazamentos em geomembranas .....	23
2.5.3	Soluções empíricas.....	24
2.5.3.1	Transmissividade de interface.....	24
2.5.3.2	Intensidade dos vazamentos .....	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
3.1	Análise numérica para a condição de barreira composta por geomembrana e solo.....	28
3.1.1	Influência da dimensão da camada de solo .....	30
3.1.2	Influência do tipo do solo.....	31
3.1.3	Influência do diâmetro do dano.....	32
3.1.4	Influência do refinamento da malha do modelo.....	33
3.2	Comparação entre modelagem numérica, equações analíticas e equações empíricas para a condição sem geotêxtil .....	35
3.2.1	Solução analítica .....	35
3.2.2	Modelagem numérica.....	36
3.2.3	Soluções empíricas.....	36
3.3	Comparação entre modelagem numérica e previsão analítica para a condição com geotêxtil .....	37
3.3.1	Influência do tipo de solo.....	37
3.3.2	Influência do diâmetro do dano.....	37

3.4	Comparação entre modelagem numérica e soluções empíricas para a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo.....	37
3.5	Análise experimental.....	38
3.5.1	Materiais utilizados .....	38
3.5.2	Equipamento.....	39
3.5.2.1	Sistema responsável pela aplicação de pressão de água .....	40
3.5.2.2	Célula de ensaio .....	40
3.5.3	Instrumentação .....	41
3.5.4	Aquisição dos dados.....	42
3.5.5	Execução do dano na geomembrana .....	42
3.5.6	Programa experimental .....	42
3.6	Análise numérica com base nos resultados experimentais.....	43
3.6.1	Análises numéricas iniciais .....	43
3.6.2	Retro-análise para determinação da permeabilidade ao longo do plano da interface necessária para gerar os vazamentos obtidos no ensaio.....	43
3.6.3	Influência do diâmetro do dano.....	44
3.6.4	Influência do diâmetro do cilindro .....	45
3.7	Análise numérica com base no estudo de Cardona (2013) .....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1	Análise numérica para a condição de barreira composta por geomembrana e solo.....	47
4.1.1	Influência da dimensão da camada de solo .....	47
4.1.2	Influência do tipo de solo subjacente à geomembrana.....	51
4.1.3	Influência da carga hidráulica sobre a geomembrana .....	55
4.1.4	Influência do diâmetro do dano.....	59
4.1.5	Influência do refinamento da malha do modelo.....	66
4.2	Comparação entre modelagem numérica, equações analíticas e equações empíricas para a condição sem geotêxtil .....	67
4.2.1	Excelente contato entre solo e geomembrana .....	67
4.2.2	Contato bom entre solo e geomembrana .....	70
4.2.3	Contato ruim entre solo e geomembrana.....	71
4.3	Comparação entre modelagem numérica e solução analítica para a condição com geotêxtil .....	76
4.3.1	Influência do tipo de solo .....	76



4.3.2	Influência do diâmetro do dano.....	79
4.4	Comparação entre modelagem numérica e previsão empírica para a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo .....	80
4.5	Análise experimental.....	83
4.6	Análises numéricas com base nos resultados experimentais .....	84
4.6.1	Análises numéricas iniciais .....	84
4.6.2	Retro-análise para determinação da permeabilidade ao longo do plano da interface necessária para gerar os vazamentos obtidos no ensaio.....	87
4.6.3	Influência do diâmetro do dano.....	88
4.6.4	Influência do diâmetro do cilindro .....	89
4.7	Análise com base no estudo de Cardona (2013) .....	96
4.7.1	Retro-análise para determinação do diâmetro equivalente que gera o mesmo vazamento de um dano linear .....	96
4.7.2	Influência do formato do dano .....	103
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>105</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Migração de líquido em sistemas de revestimento composto (Giroud, 1997). .....	6
Figura 2.2 - Reabilitação da face de montante de uma barragem com geomembrana (Giroud, 2016).....	7
Figura 2.3 - Tipos de barragens que utilizam geomembranas como barreira (Cazzuffi, 2010). 8	
Figura 2.4 - Esquema de revestimento com geomembrana em barragem (Giroud, 2016). .....	9
Figura 2.5 - Exemplo de configuração de um <i>liner</i> duplo (Giroud, 2016). .....	11
Figura 2.6 - Dano causado por perfurações durante a colocação do material sobrejacente (Beck, 2019).....	12
Figura 2.7 - Danos em Geomembranas: entalhe, indentação, danos visíveis e furo (Rebelo, 2008). .....	12
Figura 2.8 - Danos causados por equipamento durante a colocação do material de cobertura (Beck, 2019). .....	13
Figura 2.9 - Orifício localizado em solda por extrusão (Beck, 2019).....	14
Figura 2.10 - Contatos de agregados em geomembranas (1mm), submetidas a uma tensão vertical de 500 kPa: (a) geomembrana de PEAD e (b) geomembrana de PVC (Ruiz-Gómez, 2014).....	16
Figura 2.11 - Possíveis utilizações de geomembranas em barragens, onde (1) representa geomembrana sob colchão de argila a montante da barragem, (2) geomembrana sob capa de concreto, (3) geomembrana como barreira em núcleo e fundação de barragem de terra (Fonte: Palmeira, 2018). .....	17
Figura 3.1 - Resultados modelagem numérica simulando um ensaio de permeabilidade de carga constante.....	29
Figura 3.2 - Modelagem numérica camada de solo com dimensão de 20 x 5 m: a) toda a camada de solo e b) região próxima ao dano. ....	31
Figura 3.3 - Modelagem com a aplicação de uma malha global.....	34
Figura 3.4 - Modelagem com refinamento da malha na região da interface, geomembrana e dano. ....	34
Figura 3.5 - Modelagem com refinamento da malha na região da interface, geomembrana, dano e camada de solo com 2 cm de espessura.....	34

Figura 3.6 - Modelagem com refinamento da malha na região da interface, geomembrana, dano, camada de solo com 2 cm de espessura, seguida de uma camada de solo com 23 cm de espessura.....	35
Figura 3.7 - Modelagem numérica barreira composta por Geomembrana, GCL e solo. ....	38
Figura 3.8 - Geomembrana.....	39
Figura 3.9 - Equipamento utilizado para análise de vazamentos através de danos em geomembranas (Cardona, 2013). ....	39
Figura 3.10 - Esquema de funcionamento do sistema de responsável pela aplicação de pressão na água (Cardona, 2013). ....	40
Figura 3.11 - Célula de ensaio (Cardona, 2013). ....	41
Figura 3.12 - Instrumentação: (a) célula de carga e (b) transdutor de pressão. ....	41
Figura 3.13 - Vazador com diâmetro interno de 20 mm. ....	42
Figura 3.14 - Modelagem numérica que simula o ensaio realizado: (a) modelagem completa e (b) região próxima ao dano. ....	44
Figura 3.15 - Modelagem numérica que simula uma barreira com uma camada de argila de 5 cm de espessura.....	45
Figura 4.1 - Resultados modelagem numérica (dimensão 4 m x 1 m) para todo o modelo e na região próxima ao dano, onde: a) representa uma barreira composta por geomembrana e solo com $k_s = 10^{-7}$ m/s, b) $k_s = 10^{-9}$ m/s, c) $k_s = 10^{-11}$ m/s.....	48
Figura 4.2 - Resultados modelagem numérica (dimensão 20 m x 5 m) para todo o modelo e na região próxima ao dano, onde: a) representa uma barreira composta por geomembrana e solo com $k_s = 10^{-7}$ m/s, b) $k_s = 10^{-9}$ m/s, c) $k_s = 10^{-11}$ m/s.....	49
Figura 4.3 - Resultados modelagem numérica (dimensão 100 m x 50 m) para todo o modelo e na região próxima ao dano, onde: a) representa uma barreira composta por geomembrana e solo com $k_s = 10^{-7}$ m/s, b) $k_s = 10^{-9}$ m/s, c) $k_s = 10^{-11}$ m/s.....	50
Figura 4.4 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão, referentes a variação da dimensão da camada de solo e coeficiente de permeabilidade do solo.....	51
Figura 4.5 - Resultados modelagem numérica para a condição sem interface e solo argiloso com coeficiente de permeabilidade de $10^{-9}$ m/s: (a) vetores de velocidade do fluxo e (b) caminho percorrido pelo fluxo.....	52
Figura 4.6 - Fluxo através de uma barreira devido a um defeito na geomembrana: fluxo radial fornecendo um limite superior da taxa de vazamento (Giroud & Bonaparte, 1989b). ....	52

Figura 4.7 - Resultados modelagem numérica para a condição com interface e solo argiloso com coeficiente de permeabilidade de $10^{-9}$ m/s. ....	53
Figura 4.8 - Fluxo através de uma barreira devido a um defeito na geomembrana: solução correta (Giroud & Bonaparte, 1989b). ....	54
Figura 4.9 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão, referentes a influência do tipo de solo nos vazamentos através de danos em geomembrana. ....	55
Figura 4.10 - Poropressão no solo para 2 m de água sobre a geomembrana: (a) profundidade de 2 m e (b) região próxima ao dano. ....	56
Figura 4.11 - Poropressão no solo para 10 m de água sobre a geomembrana: (a) profundidade de 2 m e (b) região próxima ao dano. ....	57
Figura 4.12 - Poropressão no solo para 20 m de água sobre a geomembrana: (a) camada de 2 m e (b) região próxima ao dano. ....	57
Figura 4.13 - Poropressão no solo para 40 m de água sobre a geomembrana: (a) camada de 2 m e (b) região próxima ao dano. ....	58
Figura 4.14 - Poropressão no solo para 80 m de água sobre a geomembrana: (a) camada de 2 m e (b) região próxima ao dano. ....	58
Figura 4.15 - Poropressões no solo (argila) para 10 m de água sobre a geomembrana: (a) dano com 5 mm de diâmetro, (b) dano com 20 mm de diâmetro e (c) dano com 100 mm de diâmetro. ....	60
Figura 4.16 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão referentes à influência da variação do diâmetro do dano em barreiras compostas por geomembrana e solo argiloso. ....	61
Figura 4.17 - Comparação resultados em termos de vazão obtidos por modelagem numérica e soluções empíricas para danos com 5 mm de diâmetro. ....	62
Figura 4.18 - Comparação resultados em termos de vazão obtidos por modelagem numérica e soluções empíricas para danos com 20 mm de diâmetro. ....	62
Figura 4.19 - Comparação resultados em termos de vazão obtidos por modelagem numérica e soluções empíricas para danos com 50 mm de diâmetro ....	63
Figura 4.20 - Comparação resultados em termos de vazão obtidos por modelagem numérica e soluções empíricas para danos com 100 mm de diâmetro. ....	63
Figura 4.21 - Aumento da vazão com o aumento do diâmetro do dano. ....	64
Figura 4.22 - Diferenças relativas entre os resultados obtidos pela Equação 2.12 e modelagens numéricas. ....	65

Figura 4.23 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão referentes a influência da variação do diâmetro do dano em barreiras compostas por geomembrana e solo arenoso.....	66
Figura 4.24 - Influência do refinamento da malha do modelo nos resultados de vazão através de danos em geomembrana. ....	67
Figura 4.25 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de excelente contato entre geomembrana e solo e dano com 2,5 mm de diâmetro. .	68
Figura 4.26 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de excelente contato entre geomembrana e solo e dano com 20 mm de diâmetro. .	69
Figura 4.27 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de bom contato entre geomembrana e solo e dano com 2,5 mm de diâmetro. ....	70
Figura 4.28 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de bom contato entre geomembrana e solo e dano com 20 mm de diâmetro. ....	71
Figura 4.29 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de contato ruim entre geomembrana e solo e dano com 2,5 mm de diâmetro.....	72
Figura 4.30 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de contato ruim entre geomembrana e solo e dano com 20 mm de diâmetro.....	72
Figura 4.31 - Aumento da vazão com o aumento do diâmetro do dano. ....	73
Figura 4.32 - Comparação entre modelagens numéricas e equação empírica para condição de contato excelente, bom e ruim.....	74
Figura 4.33 - Diferenças relativas para condição de contato excelente, bom e ruim.....	75
Figura 4.34 - Redes de fluxo: (a) contato excelente, (b) contato bom e (c) contato ruim.....	76
Figura 4.35 - Resultados modelagens numéricas e solução analítica, referentes a influência do tipo do solo em barreiras compostas por geomembrana, geotêxtil e solo.....	77
Figura 4.36 - Resultados da modelagem numérica - poropressão referente à condição com geotêxtil e solo com coeficiente de permeabilidade de: a) 10 – 7 m/s, b) 10 – 9 m/s e c) 10 – 11 m/s.....	78
Figura 4.37 - Influência do diâmetro do dano para a condição com geotêxtil. ....	79
Figura 4.38 - Resultados em termos de poropressões referentes à modelagem que simula uma barreira composta por geomembrana, GCL, solo, 2 m de água sobre a geomembrana e danos com diâmetro de: a) 10 mm e b) 110 mm. ....	80
Figura 4.39 - Resultados em termos de poropressões referentes à modelagem que simula uma barreira composta por geomembrana, GCL, solo, 10 m de água sobre a geomembrana e danos com diâmetro de: a) 10 mm e b) 110 mm. ....	81

Figura 4.40 - Resultados em termos de poropressões referentes à modelagem que simula uma barreira composta por geomembrana, GCL, solo, 40 m de água sobre a geomembrana e danos com diâmetro de: a) 10 mm e b) 110 mm. ....	82
Figura 4.41 - Resultados modelagens numéricas, previsão empírica e experimental (segundo Barroso et al. 2006), referentes a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo. ....	83
Figura 4.42 - Resultados do ensaio realizado com dano de 20 mm de diametro. ....	84
Figura 4.43 - Resultados modelagem numérica em termos de velocidade do fluxo na direção vertical para 2 m de água sobre a geomembrana. ....	85
Figura 4.44 - Resultados modelagem numérica em termos de velocidade do fluxo na direção vertical para 12 m de água sobre a geomembrana. ....	85
Figura 4.45 - Resultados modelagem numérica em termos de velocidade do fluxo na direção vertical para 22 m de água sobre a geomembrana. ....	86
Figura 4.46 - Resultados modelagem numérica em termos de velocidade do fluxo na direção vertical para 42 m de água sobre a geomembrana. ....	86
Figura 4.47 - Rede de fluxo do modelo.....	87
Figura 4.48 - Resultados de retro-análise para determinar a permeabilidade ao longo do plano necessária para gerar os vazamentos obtidos no ensaio. ....	87
Figura 4.49 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão, referentes a influência do diâmetro do dano nos vazamentos. ....	88
Figura 4.50 - Resultados de modelagens numéricas em termos de poropressão, referentes a danos com diâmetro de: a) 5 mm, b) 10 mm, c) 20 mm e c) 50 mm. ....	89
Figura 4.51 - Influência do diâmetro do cilindro nos vazamentos através de danos com 5 mm de diâmetro.....	90
Figura 4.52 - Influência do diâmetro do cilindro nos vazamentos através de danos com 20 mm de diâmetro.....	91
Figura 4.53 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão nos vazios do solo, referentes a influência de cilindros com diâmetro interno de: a) 185 mm e b) 250 mm.....	92
Figura 4.54 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão, referentes a influência de cilindros com diâmetro interno de 500 mm.....	92
Figura 4.55 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão no solo, referentes a influência de cilindros com diâmetro interno de 1000 mm. ....	93

Figura 4.56 - Comparação entre os resultados referentes a condição onde o cilindro é totalmente preenchido por argila e condição de uma camada de argila com 5 cm de espessura: a) vazão ( $m^3/s$ ) e b) vazão específica ( $m/s$ ). .....	94
Figura 4.57 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão: cilindro com diâmetro interno de 185 mm e espessura da camada de argila de 5 cm.....	95
Figura 4.58 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão: cilindro com diâmetro interno de 250 mm e espessura da camada de argila de 5 cm.....	95
Figura 4.59 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão: cilindro com diâmetro interno de 500 mm e espessura da camada de argila de 5 cm.....	96
Figura 4.60 - Resultados de vazão através de danos realizados por estilete (Cardona, 2013).	97
Figura 4.61 - Resultados de vazão através de danos realizados por formão (Cardona, 2013).	97
Figura 4.62 - Retro-análise dano linear 5 mm realizado por estilete. ....	98
Figura 4.63 - Retro-análise dano linear 20 mm realizado por estilete. ....	99
Figura 4.64 - Retroanálise dano linear 50 mm realizado por estilete.....	100
Figura 4.65 - Retro-análise dano linear 5 mm realizado por formão. ....	101
Figura 4.66 - Retro-análise dano linear 20 mm realizado por formão. ....	102
Figura 4.67 - Retro-análise dano linear 50 mm realizado por formão. ....	103
Figura 4.68 - Comparação entre as vazões obtidas através de danos lineares e circulares....	104

## LISTA DE SÍBOLOS E ABREVIACÕES

ICOLD .....	<i>International Commision on Large Dams</i>
IGS .....	<i>International Geosynthetics Society</i>
GCL .....	Geocomposto argiloso
PVC-P .....	Policloreto de Vinila com plastificante
PVC .....	Policloreto de Vinila
PE .....	Polietileno
PEBD .....	Polietileno de baixa densidade
PEAD .....	Polietileno de alta densidade
EVOH .....	Copolímero de Álcool Etileno Vilínico
MEF .....	Método dos Elementos Finitos
Q .....	Vazão
R .....	Raio da área molhada
$K_s$ .....	Coefficiente de permeabilidade do solo
$K_{sAreia}$ .....	Coefficiente de permeabilidade do solo arenoso
$K_{sArgila}$ .....	Coefficiente de permeabilidade do solo argiloso
$h_w$ .....	Carga hidráulica sobre a geomembrana
$\theta$ .....	Transmissividade de interface
d .....	Diâmetro do dano na geomembrana
$r_0$ .....	Raio do dano na geomembrana
$H_s$ .....	Espessura da camada de solo
$C_{q0}$ .....	Fator de condição de contato
$H_{GCL}$ .....	Espessura do GCL
$\rho$ .....	Densidade do líquido
g .....	Aceleração da gravidade
s .....	Espaço entre solo e geomembrana
$\eta$ .....	Viscosidade do líquido
$K_{GCL}$ .....	Coefficiente de permeabilidade do GCL
a .....	Área do dano na geomembrana
h .....	Carga hidráulica
L .....	Comprimento do corpo de prova
A .....	Área do corpo de prova



$k_p$  ..... Permeabilidade ao longo do plano da interface

# ANÁLISE NUMÉRICA DE VAZAMENTOS ATRAVÉS DE DANOS EM GEOMEMBRANAS

## RESUMO

Os geossintéticos vêm exercendo seu papel de forma eficaz, principalmente em termos de facilidade de transporte, manuseio, tempo de instalação, desempenho, redução dos impactos ambientais, custos acessíveis etc. Dentre as obras em que os geossintéticos são utilizados, destacam-se as obras hidráulicas e de disposição de resíduos, onde os geossintéticos usados nessas obras funcionam como barreira para líquidos e gases. As geomembranas são os elementos principais em barreiras sintéticas, funcionando como camada impermeabilizante em canais, barragens, aterros e outros. De forma geral, um sistema de barreira pode estar sujeito a vazamentos, principalmente devido a danos e, por isso, deve-se determinar o nível de vazamento aceitável para a obra. Os danos decorrentes em geomembranas são causados por diversos fatores como, por exemplo, contato com elementos contundentes, tráfego de operários e veículos, falhas de soldagem, entre outros. Sendo assim, a pesquisa foi fundamentada na realização de modelagens numéricas axi-simétricas e um ensaio laboratorial, de modo a estudar vazamentos através de danos em geomembranas. Por meio das modelagens numéricas, foram analisadas a influência da dimensão da camada de solo, tipo de solo, carga hidráulica sobre a geomembrana, dimensão do dano (dano circular) e condição de contato entre solo e geomembrana. Foram avaliadas diferentes condições de barreira hidráulica (geomembrana e solo; geomembrana, geotêxtil e solo; geomembrana, GCL e solo), bem como comparações entre metodologias (modelagens numéricas, soluções empíricas, soluções analíticas e resultados experimentais). Desta forma, verificou-se que o aumento do diâmetro do dano, o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana e a piora na condição de contato, tendem a aumentar o vazamento através de danos em geomembrana. Além disso, foi possível verificar a acurácia das equações empíricas e analíticas, por meio da comparação dos resultados obtidos pelas equações com os resultados numéricos. A transmissividade de interface mostrou-se ser um parâmetro de grande influência nos vazamentos, sendo dependente principalmente do coeficiente de permeabilidade do solo e condição de contato entre solo e geomembrana.

**Palavras-chave:** Sistemas de barreira, Geomembrana, Danos, Vazamentos através de danos.

# NUMERICAL ANALYSIS OF LEAKS THROUGH DAMAGE TO GEOMEMBRANE

## ABSTRACT

Geosynthetics have been playing their role effectively, mainly in terms of affordable costs, easy transportation, handling, installation time, performance, reduction of environmental impacts etc. Among the works in which geosynthetics are used, hydraulic and waste disposal works stand out, where the geosynthetics used in these works act as a barrier to liquids and gases. Geomembranes are the main elements in synthetic barriers, working as a waterproofing layer in canals, dams, embankments and others. In general, a barrier system can be subject to leakage, mainly due to damage, and therefore, the level of leakage acceptable for the work must be determined. Damages to geomembranes can be caused by several factors, such as contact with mechanically aggressive elements, worker and vehicle traffic, welding failures, and others. Thus, this research was based on performing axi-symmetric numerical modelling and a laboratory test, in order to study leaks through damaged geomembranes. Through numerical modelling, the influence of soil layer dimension, soil type, hydraulic load on the geomembrane, damage dimension (circular damage) and condition of contact between soil and geomembrane were analysed. Different hydraulic barrier conditions (geomembrane and soil; geomembrane, geotextile and soil; geomembrane, GCL and soil) were evaluated, as well as comparisons between methodologies (numerical models, empirical solutions, analytical solutions and experimental results). It was found that the larger the damage diameter, the hydraulic load on the geomembrane or the worsening in the contact condition the greater the leakage through the damage in the geomembrane. Furthermore, it was possible to verify the accuracy of the empirical and analytical equations, by comparing the results obtained by the equations with the numerical results. The interface transmissivity was a parameter of great influence on leakage, being mainly dependent on the soil permeability coefficient and the contact condition between soil and geomembrane.

**Keywords:** Barrier systems, Geomembrane, Damage, Leakage through damage.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Com o passar dos anos, o avanço no desenvolvimento de tecnologias inovadoras associadas a diversos setores trazem benefícios múltiplos para a sociedade, o ser humano e o meio ambiente. O setor da engenharia civil, em especial os geossintéticos, vêm exercendo seu papel de forma eficaz, principalmente em termos de custos acessíveis, manuseio, transporte, tempo de instalação, manutenção, disponibilidade de produtos, desempenho, redução dos impactos ambientais, e outros.

A redução dos danos ambientais causados pela utilização de materiais naturais vem sendo priorizada na execução de obras civis. Os geossintéticos, por sua vez, oferecem a possibilidade de substituição total ou parcial destes materiais naturais, como, por exemplo, na utilização de geocompostos para drenagem em substituição a materiais granulares.

Segundo Aguiar & Vertematti (2015), os geossintéticos são definidos como produtos industrializados, onde ao menos um de seus constituintes é fabricado com polímeros naturais ou sintéticos. Podem ser encontrados geralmente em forma de tiras e mantas, tendo por objetivo a aplicação em conjunto com solo ou outros materiais em obras civis (Aguiar & Vertematti, 2015). Os geossintéticos têm sido bastante utilizados em obras de engenharia, dentre elas, destacam-se as obras hidráulicas e de disposição de resíduos. As geomembranas usadas nessas obras possuem o principal objetivo de funcionarem como barreira para líquidos e gases (ICOLD, 2010; IGS, 2018; Aguiar & Vertematti, 2015).

De modo geral, todas as obras que possuem algum sistema de barreira podem estar sujeitas a vazamentos, de modo que é necessário estabelecer o nível de vazamento aceitável para aquele objetivo específico, e a partir disso determinar as soluções a serem aplicadas (Giroud & Bonaparte, 1989a e Giroud, 2016). Dentre as soluções mais empregadas, tem-se a utilização de revestimentos com geomembranas, podendo ser realizada com uma ou mais geomembranas ou com geomembrana associada a outros materiais (GCL, solo de baixa permeabilidade, geotêxtil). Segundo Giroud (1997), para se alcançar o nível de vazamento desejado é incorporado à obra soluções de projeto e na fase de construção.

Giroud (2016) lista uma série de consequências causadas por vazamentos em geomembranas, citadas a seguir:

- Danos econômicos: (i) caracterizados pela perda de água, ou perda de líquidos valiosos presentes em reservatórios industriais e em lagoas de mineração, (ii) redução de energia devido à perda de água por vazamentos em estações de armazenamento, (iii) dificuldade de manter um nível aceitável em casos de reservatórios de recreação ou esportes;
- Danos ambientais, relacionados a inundações causadas por vazamentos e por contaminação de águas, águas subterrâneas e solos, em decorrência dos vazamentos;
- Danos percebidos, compreendendo os vazamentos tecnicamente aceitáveis, mas que são desconfortáveis ao público (como por exemplo vazamentos visíveis na face de jusante de uma barragem de concreto);
- Danos geotécnicos: (i) amolecimento do solo subjacente à geomembrana, causando deformações no mesmo (tais deformações induzem deformações adicionais na geomembrana); (ii) degradação do material localizado abaixo da geomembrana causada por vazamentos como, por exemplo, erosão interna em aterros, erosão do solo subjacente à geomembrana; (iii) degradação do concreto (física e/ou química) em casos de barragens de concreto; e (iv) instabilidade do material subjacente à geomembrana, principalmente devido ao excesso de pressão de água na estrutura.
- Danos no revestimento: (i) danos na geomembrana em decorrência de erosão do revestimento de argila, pelo aumento das dimensões do dano presente na geomembrana, e pela pressão de fluxo do líquido; (ii) ascensão da geomembrana por ação do vento (podendo provocar esforços de tração), degradação devido ao clima, diminuição da capacidade do reservatório (quantidade de água no reservatório).

Nos estudos realizados por Giroud & Bonaparte (1989a) e Giroud (2016), foi observado que um *liner* composto, ou seja, constituído por solo de baixa permeabilidade e geomembrana, possui maior grau de eficiência no controle do fluxo através de danos quando comparado com as soluções realizadas separadamente. Os autores ainda ressaltam que a qualidade de contato entre as camadas (neste caso solo de baixa permeabilidade e geomembrana) tem grande influência na eficiência de tal *liner*.

Equações para se quantificar os vazamentos através de danos em geomembranas foram desenvolvidas por Giroud (1997), Touze-Foltz & Giroud (2003) e Touze-Foltz & Barroso (2006). Danos circulares, retangulares, de comprimento infinito, de comprimento finito, quadrado e rugas danificadas foram avaliados, bem como as condições de contato entre a geomembrana e o material subjacente.

Para cálculos teóricos de vazamentos através de danos em geomembranas, é necessário se estabelecer a quantidade e a dimensão dos danos, bem como as condições de contato entre os componentes do sistema de barreira. Tais informações são obtidas por meio de dados estatísticos publicados (Beck, 2019). O autor ressalva que muitos dados são publicados, porém, não representam bem o que ocorre atualmente em campo, pois incluem dados de casos de obras que tiveram pouca prática de construção e supervisão. Segundo Beck (2019), em casos de suposições (de dados referentes aos danos e condições de contato) feitas de forma errônea, pode-se subestimar os vazamentos através dos danos, e que a frequência dos danos está relacionada aos cuidados que se tem com o projeto, teste de material, construção e supervisão.

Além de ensaios laboratoriais, soluções analíticas e empíricas para se quantificar os vazamentos através de danos em geomembrana e softwares que analisam a movimentação de líquidos em meios porosos são capazes de resolver problemas relacionados a este tema de forma eficaz, como mostra as pesquisas de Saidi et al. (2006) e El-Zein et al. (2012). Além disso, as modelagens numéricas podem estudar problemas mais complexos, como é o caso de fluxo no regime transiente e condição não saturada do solo.

Em estudos experimentais que visam analisar vazamentos através de danos em geomembranas, comumente é avaliado o efeito de danos circulares, como é o caso de Barroso et al. (2006), Cartaud & Touze-Foltz (2004), Touze-Foltz (2002a). Porém, como é mostrado no item 2.3 dessa dissertação, nem sempre os danos em geomembranas são circulares. Rebelo (2008) analisou, em seu estudo camadas de proteção para geomembranas na fase de instalação, a simulação dos danos por meio de um aterro experimental. Os danos observados apresentavam diversos formatos como, por exemplo, os danos com tendência à linearidade.

Como foi dito anteriormente, os revestimentos usados como barreira em obras hidráulicas e de disposição de resíduos podem apresentar diversos arranjos e configurações. A mensuração de vazamentos através de sistemas de barreira, principalmente devido a danos, deve ser estudada de forma criteriosa, para que os resultados sejam usados para avaliação das consequências de vazamentos e no desenvolvimento de soluções a serem adotadas na fase de projeto e operação.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar o vazamento através de danos em geomembranas empregadas em sistemas de barreiras por meio de análises numéricas, soluções

analíticas, soluções empíricas e um ensaio laboratorial. Os objetivos específicos desta pesquisa consistem em:

- Avaliar a influência da dimensão da camada de solo nos resultados obtidos pelas modelagens numéricas;
- Estudar a acurácia de previsões de soluções numéricas, analíticas, empíricas em relação a resultados obtidos em ensaios laboratoriais;
- Analisar a influência da incorporação de um geotêxtil entre a geomembrana e solo subjacente;
- Avaliar a condição de qualidade de contato entre geomembrana e solo;
- Analisar a influência do tipo de solo abaixo da geomembrana;
- Determinar a influência do tipo e dimensão do dano na geomembrana;
- Avaliar a influência da carga hidráulica sobre a geomembrana na intensidade dos vazamentos. Tal avaliação torna-se importante uma vez que os danos podem estar localizados em diferentes locais da obra;
- Determinar o diâmetro de dano equivalente que gera o mesmo vazamento obtido em danos lineares. Esta análise foi realizada com base na pesquisa de Cardona (2013);

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

Esta pesquisa está estruturada em 5 capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a motivação, o objetivo geral, os objetivos específicos e a estruturação da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica da dissertação, dando foco nos tópicos mais relevantes: geossintéticos, utilização de geossintéticos em obras hidráulicas e de disposição de resíduos, danos em geomembranas, exemplos de geossintéticos usados em obras hidráulicas e de disposição de resíduos e métodos de análise.

No Capítulo 3 são mostradas as metodologias usadas para obtenção dos resultados da pesquisa, que se baseia em modelagens numéricas com programa computacional que simula o fluxo de líquidos em meios porosos, soluções analíticas e um ensaio laboratorial, de modo a estudar os vazamentos através de danos em geomembranas.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos pelas diferentes metodologias, bem como as análises, comparações e discussões dos resultados obtidos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas na dissertação e sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Geossintéticos

Os geossintéticos são fabricados com materiais naturais ou sintéticos, sendo os sintéticos mais empregados devido à necessidade de vidas úteis elevadas na maioria das obras (Palmeira, 2018). Polipropileno, poliéster, policloreto de vinila, poliamida e polietileno são os polímeros mais comumente empregados na confecção de geossintéticos. Tais materiais podem desempenhar diversas funções, tais como reforço, barreira, drenagem, filtração, proteção e separação.

Palmeira (2018) e Villar et. al (2015) definem geomembranas como os materiais sintéticos flexíveis e contínuos fornecidos na forma de painéis ou rolos, podendo apresentar diversas cores, e superfícies rugosas ou lisas. Possuem coeficiente de permeabilidade baixíssimo, geralmente entre  $10^{-10}$  a  $10^{-13}$  cm/s. São usadas principalmente como barreiras contra o fluxo de líquidos e gases em canais, barragens, reservatórios e áreas de disposição de resíduos.

Segundo a International Geosynthetic Society (2013), os geossintéticos usados como barreira têm como objetivo principal a contenção de líquidos e gases, e apresentam as seguintes vantagens: redução de perdas devido a infiltração, redução da infiltração e proteção de solos e águas subterrâneas, além de conter locais com solos contaminados, impedindo que a contaminação se alastre. Geomembranas e geocompostos argilosos (GCLs) são os geossintéticos mais usados como barreira.

Em geral, as barreiras sintéticas são dimensionadas de forma a que seus elementos trabalhem em conjunto. Materiais sintéticos e/ou solo podem ser usados juntamente com a geomembrana, de modo a oferecer reforço, proteção e drenagem, permitindo que o sistema de barreira cumpra suas funções durante a vida útil da obra (ICOLD, 2010 e IGS, 2013).

De acordo com IGS (2013), as barreiras sintéticas apresentam uma boa eficiência de desempenho; por isso, sua utilização resulta em projetos mais seguros, mais baratos e mais robustos. Também oferecerem benefícios no quesito sustentabilidade, pois tais sistemas podem reduzir de forma drástica as espessuras das coberturas de solo, diminuindo então a quantidade de emissão de carbono (IGS, 2013).

Segundo Giroud (1997), as geomembranas apresentam uma permeabilidade muito baixa. Por isso, o fluxo relevante de líquido através de geomembranas ou sistemas compostos



pode ocorrer através de danos. O autor ressalva que, caso haja algum dano na geomembrana de um sistema de barreira composto, primeiro o líquido passa pelo dano, em seguida, o líquido escoo lateralmente entre a geomembrana e o solo de baixa permeabilidade (Figura 2.1). Por fim, infiltra no solo de baixa permeabilidade subjacente.

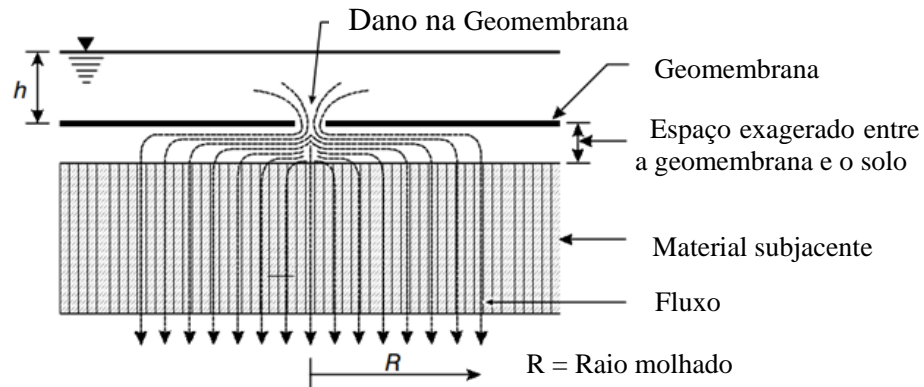


Figura 2.1 - Migração de líquido em sistemas de revestimento composto (Giroud, 1997).

O escoamento entre a geomembrana e o solo de baixa permeabilidade é definido como fluxo de interface, e a área coberta pelo líquido é chamada de área molhada (Giroud, 1997). Além disso, o autor ressalva que a qualidade de contato entre a geomembrana e o solo de baixa permeabilidade subjacente é um fator importante no que tange o fluxo através do sistema de barreira, devido ao fato da qualidade do contato governar o raio da área molhada.

De acordo com IGS (2013), os geossintéticos são submetidos a testes rigorosos de desempenho, em termos de campo e fábrica, o que traz um alto controle de qualidade dos materiais. Em casos de sistemas de barreiras feitas com solos, é difícil se ter alto controle de qualidade, principalmente em termos de compactação e variabilidade do material usado como barreira (IGS, 2013).

## 2.2 Utilização de geomembranas em obras hidráulicas e de disposição de resíduos

As geomembranas têm sido crescentemente utilizadas em obras de barragens. Em casos onde as geomembranas são instaladas na face de montante da barragem, o material presente no maciço não necessariamente precisará ter baixa permeabilidade, e sim apresentar condições de estabilidade (Colmanetti, 2006). A autora destaca que, em barragens de terra ou de enrocamento com núcleo argiloso, as geomembranas devem ser empregadas juntamente com os materiais

finos, visando reduzir ainda mais a permeabilidade da seção de montante do eixo do barramento.

De acordo com ICOLD (2010), Giroud (2016) e Cazzuffi & Gioffrè (2020), geomembranas vêm sendo utilizadas em reabilitação de barragens que apresentam vazamentos. A Figura 2.2 mostra um exemplo de reabilitação da face de montante de uma barragem com geomembrana.



Figura 2.2 - Reabilitação da face de montante de uma barragem com geomembrana (Giroud, 2016).

Em aplicações de geomembrana como barreira na face (montante) de barragens, geralmente utiliza-se uma camada de geotêxtil em conjunto com a geomembrana, visando promover condições de proteção (contra danos, por exemplo) e de drenagem (Cazzuffi & Gioffrè, 2020). Os autores destacam que a reabilitação de barragens usando geossintéticos age de modo a reduzir problemas de estabilidade estrutural (fator importante no que tange a infiltração através da barragem) e deterioração da face da barragem (reduzindo o risco do aumento de vazamentos).

Segundo Rowe et al. (2022), as geomembranas de Polietileno de alta densidade (PEAD) são as mais utilizadas na indústria dos geossintéticos, pois, apresentam um comportamento mais estável com o passar do tempo quando comparadas com as geomembranas de PVC (tendem a ficar mais rígidas com o passar do tempo).

Dentre os principais tipos de barragens, as de terra são as que mais utilizam geomembranas como alternativa de barreira, representando 68% dos casos, concreto/alvenaria cerca de 18% e concreto compactado a rolo cerca de 13%, como mostra a Figura 2.3 (Cazzuffi, 2010).

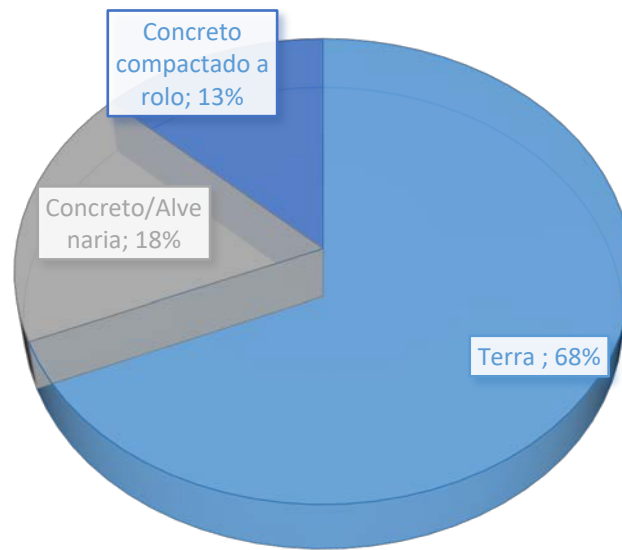


Figura 2.3 - Tipos de barragens que utilizam geomembranas como barreira (Cazzuffi, 2010).

As geomembranas que são enterradas ou cobertas apresentam uma vida útil maior que as expostas. Nos dias atuais, geomembranas de PVC (expostas) aplicadas como barreira em barragens, com idade aproximada de 30 anos, não apresentam a necessidade de reparo ou substituição (ICOLD, 2010). Além disso, a International Commission on Large Dams (2010), ressalva que as geomembranas produzidas atualmente, com técnicas mais sofisticadas de produção, são capazes de apresentar vidas úteis superiores a 100 anos. Em alguns países, como por exemplo a Alemanha, a exigência de vida útil de geomembranas em algumas obras pode não ser tão alta (40 anos), devido à facilidade e reduzido custo de reparo ou substituição (ICOLD, 2010).

A Figura 2.4 mostra um exemplo de revestimento com geomembrana em barragem, destacando-se a coleta do líquido advindo do vazamento (1), a água que flui pela geomembrana (2), a água drenada da barragem (3) e o sistema que conduz a água para a jusante do barramento (4).

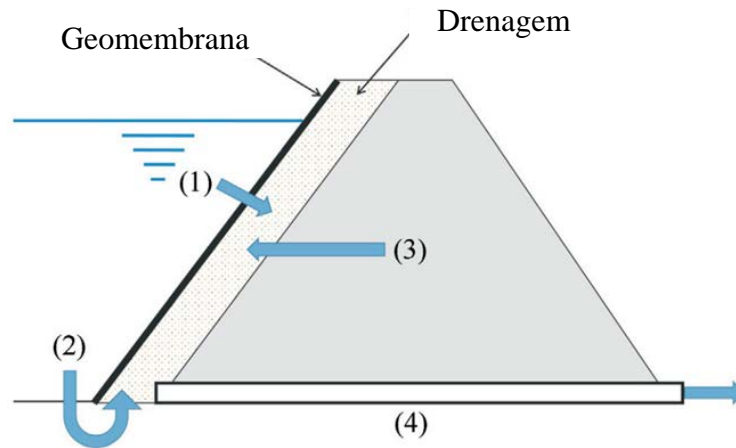


Figura 2.4 - Esquema de revestimento com geomembrana em barragem (Giroud, 2016).

Segundo Giroud (2016), em uma barragem os mecanismos que podem levar à sua instabilidade são: erosão interna, e conseqüente deterioração do corpo do barramento, e altos níveis de poropressão. O autor ainda sugere que utilização de uma única geomembrana como barreira em barragens, de modo a evitar erosão interna e instabilidade, não é confiável. O barramento com face em geomembrana deve ser projetado de modo que não ocorram falhas graves em casos de vazamentos e, caso ocorram, a barragem deve se manter estável até que o problema seja resolvido (Giroud, 2016).

No caso de disposição de resíduos poluentes, mesmo com técnicas que visam reciclar ou reaproveitar os resíduos sólidos, uma certa quantidade de resíduos (restante que não foi reciclado ou reaproveitado) deve ser convenientemente disposta (Rebello, 2008). O autor ressalva que sistemas de barreiras são elementos primordiais em obras de disposição de resíduos, de forma a impedir a contaminação do solo e de águas subterrâneas, além de evitar a saída de gases gerados.

Segundo Giroud (2016), os *liners* compostos são constituídos principalmente por geomembrana e camada de solo de baixa permeabilidade. Tais *liners* apresentam grande eficiência, uma vez que reduzem a taxa de infiltração quando comparada com a aplicação da geomembrana ou do solo sozinhos. Porém, existem alguns riscos a serem avaliados e tais riscos estão relacionados, principalmente, com o ressecamento do solo de baixa permeabilidade e ascensão da geomembrana (Giroud, 2016).

Segundo Beck (2019), os aterros sanitários construídos recentemente apresentam maiores vazamentos na fase inicial de operação, e isso se deve principalmente a dois motivos, o aumento da capacidade de absorção do revestimento e o aumento de pressão causado pelas

consecutivas camadas do aterro. Ao longo do tempo, este aumento de pressão reduz a condutividade hidráulica do GCL e a transmissividade da interface geomembrana/GCL.

Rowe (2005), por meio de cálculos, observou que barreiras compostas em aterros sanitários possuíam maior eficiência em termos de controle de vazamentos do que as barreiras únicas. O autor destaca que os vazamentos em sistemas de barreira compostas são tão baixos que a difusão governará o transporte de contaminantes, onde o contaminante é capaz de se difundir através da geomembrana. Difusão é definido como o processo onde contaminantes tem a capacidade de migrar de locais com maior concentração para locais com menor concentração como, por exemplo, a migração de lixiviados para corpos hídricos limpos (Rowe, 2007).

McWatters et al. (2010) realizaram análises laboratoriais de modo a determinar o comportamento difusivo (foram usados contaminantes) de duas geomembranas coextrudadas, uma com núcleo de poliamida (0,38 mm de espessura) e a outra com núcleo de Álcool Etileno Vinílico (EVOH) (0,53 mm de espessura). De modo geral, ao comparar os resultados relacionados às geomembranas coextrudadas com os resultados referentes à geomembrana padrão de PEBD (0,53 mm de espessura), foi verificado uma redução do fluxo de massa através das geomembranas coextrudadas, quando comparado com a geomembrana de PEBD padrão. As geomembranas com núcleo de EVOH apresentaram valores de coeficiente de permeação na fase aquosa ( $(2-6) \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) mais baixos que as geomembranas com núcleo de poliamida ( $(0,2-2,2) \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ). A geomembrana de PEBD apresentou coeficiente de permeação na faixa de  $(0,6-1,1) \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , ou seja, o coeficiente de permeação da geomembrana de PEBD padrão foi cerca de uma ordem de grandeza maior que a geomembrana coextrudada com núcleo de poliamida e cerca de duas ordens de grandeza maior que a geomembrana coextrudada com núcleo de EVOH.

A temperatura é um fator relevante na vida útil e na migração de contaminantes em sistemas de barreiras em aterros. Em casos de operações normais, a temperatura pode chegar de 30° a 40° C, e em casos de recirculação de lixiviados a temperatura aumenta de forma mais rápida, e pode chegar em temperaturas superiores a 40° C (Rowe, 2005).

Segundo Cazzuffi & Giofrè (2020), as propriedades mecânicas de geomembranas são influenciadas pela temperatura, onde altas temperaturas reduzem o módulo de deformação à tração e provocam um aumento no alongamento. Os autores ressaltam também que a radiação UV é o fator de maior influência na deterioração da geomembrana, devido ao fato desta radiação destruir a estrutura molecular da geomembrana e então reduzir significativamente o conteúdo

de plastificante (isso provoca a redução da flexibilidade, redução do alongamento na ruptura e aumento da rigidez).

Em *liners* duplos (Figura 2.5) têm-se, em geral, que o *liner* primário é composto por uma geomembrana e uma camada de solo de baixa permeabilidade, e o *liner* secundário por uma geomembrana (Giroud, 2016). O autor ainda destaca que em casos onde o *liner* secundário é constituído por uma camada de solo de baixa permeabilidade, o fluxo de líquido que atravessa o *liner* primário (caso atravesse) irá percolar pelo solo, em vez de ser levado para sua correta destinação (Giroud, 2016).

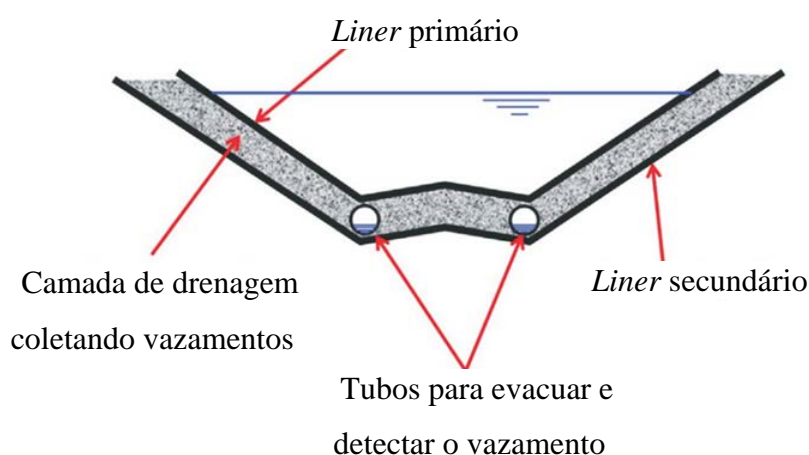


Figura 2.5 - Exemplo de configuração de um *liner* duplo (Giroud, 2016).

De acordo com Beck (2019), as instalações de barreira composta por uma única geomembrana são caracterizadas por apresentar dificuldade na avaliação de seu funcionamento (saber até que ponto estão funcionando), pois não existem maneiras de avaliação de desempenho logo após a instalação, podendo levar até décadas para se detectar a contaminação devido ao vazamento em águas subterrâneas. O autor destaca que a avaliação deste tipo de barreira se dá por meio cálculos teóricos de vazamentos. Como visto na Figura 2.6, sistemas de barreiras compostas por barreira primária e secundária possibilitam medição do vazamento, uma vez que se tem uma camada de detecção entre as barreiras.

### 2.3 Danos em geomembranas

Segundo Ruiz-Gómez (2014), danos mecânicos em geomembranas são todas as alterações que podem ocorrer no material em decorrência de aspectos na fase de fabricação,



construção e operação. Durante a fase de construção, diversos fatores podem provocar danos, tais como: armazenamento, instalação, transporte, soldagem etc. (Rebelo, 2008). O autor destaca que riscos, rasgos, perfurações, orifícios, descolagens e rupturas são os tipos de danos mais comuns na fase de construção. Um dano causado por perfurações durante a colocação do material sobrejacente à geomembrana é mostrado na Figura 2.6 (Beck, 2019).



Figura 2.6 - Dano causado por perfurações durante a colocação do material sobrejacente (Beck, 2019).

Segundo Giroud & Bonaparte (1989a) e Giroud (2016), os vazamentos em geomembranas podem ocorrer devido à permeação de um líquido, que pode ser muito pequeno, visto que a permeabilidade da geomembrana é baixíssima, e os vazamentos através de danos, que, por sua vez, podem ser elevados. Alguns danos em geomembranas são mostrados na Figura 2.7 (Rebelo, 2008).



Figura 2.7 - Danos em Geomembranas: entalhe, indentação, danos visíveis e furo (Rebelo, 2008).

Giroud e Bonaparte (1989a) citam os defeitos típicos que podem ser observados em geomembranas. São eles:

- Falhas na soldagem devido a tensões durante o momento de instalação do revestimento;
- Danos devido ao excesso de tensões ocasionadas pelo tráfego de equipamentos (Figura 2.8);
- Perfuração por pedras durante o tráfego de equipamentos;
- Soldas defeituosas provocadas durante a fabricação ou por fatores de instalação, tais como umidade inadequada ou excessiva, temperatura ambiente, contaminação por poeira e mão de obra inadequada;
- Rupturas por tração devido a tensões provocadas pelo peso do material armazenado ou movimentação dos materiais em contato com o revestimento;
- Rupturas causadas por tensões cisalhantes que crescem lentamente, como, por exemplo, as provocadas por sobrecargas;
- Ruptura por fadiga como, por exemplo, devido a tensões resultantes de contração-expansão térmica;
- Conexões defeituosas entre geomembranas e outros materiais, devido a mão de obra inadequada.

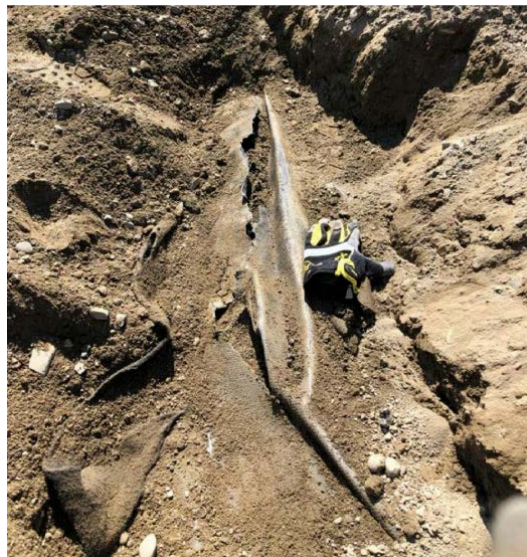


Figura 2.8 - Danos causados por equipamento durante a colocação do material de cobertura (Beck, 2019).

Nosko & Touze-Foltz (2000) analisaram danos em geomembranas após a fase de instalação em cerca de 300 aterros. Foram avaliados danos com dimensões entre 0,5 e 10 cm.



A maioria dos danos observados foram causados por pedras (cerca de 71,17%) e por equipamentos pesados (15,59 %). Em locais como cantos e sistemas de drenagem, foram percebidas maiores quantidades de danos em soldas por extrusão (Figura 2.9) e devido a tráfego de equipamentos pesados.



Figura 2.9 - Orifício localizado em solda por extrusão (Beck, 2019).

Segundo Rollin et al. (1999, apud Cardona, 2013), em casos de geomembranas expostas (não sujeitas a tráfego de veículos), os danos são decorrentes principalmente de soldas (55%), perfurações (25%) e cortes (20%). Quanto à dimensão, foi observado que danos com dimensões maiores que 10 mm<sup>2</sup> representam cerca de 22% dos casos, danos menores que 2 mm<sup>2</sup> cerca de 43% dos casos e danos compreendidos entre 2 mm<sup>2</sup> e 10 mm<sup>2</sup> cerca de 35 %.

Giroud & Bonaparte (1989a) avaliaram 6 casos de obras visando determinar a frequência de defeitos em soldas de geomembranas. Os autores não conseguiram obter conclusões gerais em apenas seis casos, mas com as observações realizadas pôde-se tirar conclusões para fins de análise de projeto, sendo elas: um serviço sem garantia de qualidade realizado por uma empresa e pelo instalador da geomembrana é caracterizado por ter, em média, um defeito por metro de solda. Já em casos onde se tem, em média, um defeito em 300 metros de solda, a instalação da geomembrana pode ser considerada razoavelmente boa (apresenta controle de qualidade adequado).

Giroud & Bonaparte (1989a), a partir de entrevistas feitas com trabalhadores que atuam no controle de qualidade de geomembranas, perceberam que danos circulares com diâmetros entre 1 e 3 mm ainda podem existir em casos onde se teve garantia da qualidade do serviço. Danos com diâmetros de até 5 mm podem ocorrer em áreas especiais, como, por exemplo, em

conexões de geomembranas com outros materiais. Já os furos com diâmetros maiores ou iguais a 10 mm, representam os maiores danos, como os ocorridos de forma acidental.

Segundo Geroto (2008), camadas de materiais como geotêxteis não-tecidos, geocompostos bentoníticos (GCLs), tapetes pneumáticos, georredes, e outros, devem ser empregados juntamente com a geomembrana, de modo a oferecer proteção contra possíveis danos. Entretanto, o autor ressalva que no meio técnico ainda não são bem estabelecidas as condições de avaliação da eficiência dos elementos de proteção. Fatores como nível de tensões, características dos materiais em contato com a geomembrana e propriedades físicas dos elementos de proteção e da geomembrana devem ser avaliados de modo a se escolher o melhor tipo de proteção para a obra (Geroto, 2008).

Os ensaios que visam estudar danos em geomembranas são divididos em dois tipos: ensaios índice, que são usados para controle de qualidade na fabricação e, por esse motivo, são ensaios mais simples e rápidos; e os ensaios de desempenho, que são bastante utilizados em projetos, visando simular as condições em que o geossintético são submetidos em obras e, por isso, são ensaios mais complexos e podem ser demorados (Palmeira, 2018).

Rebello (2008) analisou a incorporação de elementos de proteção para geomembrana. Em relação aos ensaios índice, para os ensaios dinâmicos houve um aumento na resistência à punção, já para os ensaios cíclicos houve redução do diâmetro de perfuração da geomembrana. Quanto às análises em escala de campo, foi percebido que a incorporação de elementos de proteção reduzem a intensidade do dano.

Segundo Giroud (2016) o método elétrico é comumente usado para se avaliar danos que não são percebidos por inspeção visual em uma área com revestimento em geomembrana. O autor destaca que, após a detecção destes danos, são realizados os reparos necessários. Com isso, a área com aplicação de geomembrana ficará relativamente melhorada, uma vez que se elimine ou reduza as quantidades e as dimensões dos danos. Dentre os métodos não destrutivos para detecção de danos em geomembranas, destaca-se o método de faísca elétrica, onde os danos são detectados por meio da passagem de corrente elétrica pela descontinuidade (Rebello, 2008).

Ruiz-Gómez (2014) estudou danos em geomembranas por meio da aplicação de pressão em um sistema composto por geomembrana (PVC e PEAD) e material granular. Foram analisadas simulações em equipamentos de pequena e média escala. Para a análise em pequena escala, em termos de análise visual, não foi possível identificar danos. A pressão normal é um fator que influencia na quantidade de impressões do material granular na geomembrana, ou

seja, com o aumento da pressão as partículas se deslocam para baixo, fazendo com que o contato aumente (maior número de impressões). Para a análise em média escala, os dois tipos de geomembrana se comportaram de maneira diferente, onde as geomembranas de PEAD apresentaram arranhões, entalhes e zonas de indentação, e as geomembranas de PVC apresentaram deformações. Isso se deve a natureza mais rígida das geomembranas de PEAD e a natureza flexível da geomembrana de PVC. A Figura 2.10 mostra geomembranas de PEAD (a) e PVC (b) com espessura de 1 mm após a realização do ensaio de punção em média escala, submetidas a uma tensão vertical de 500 kPa.

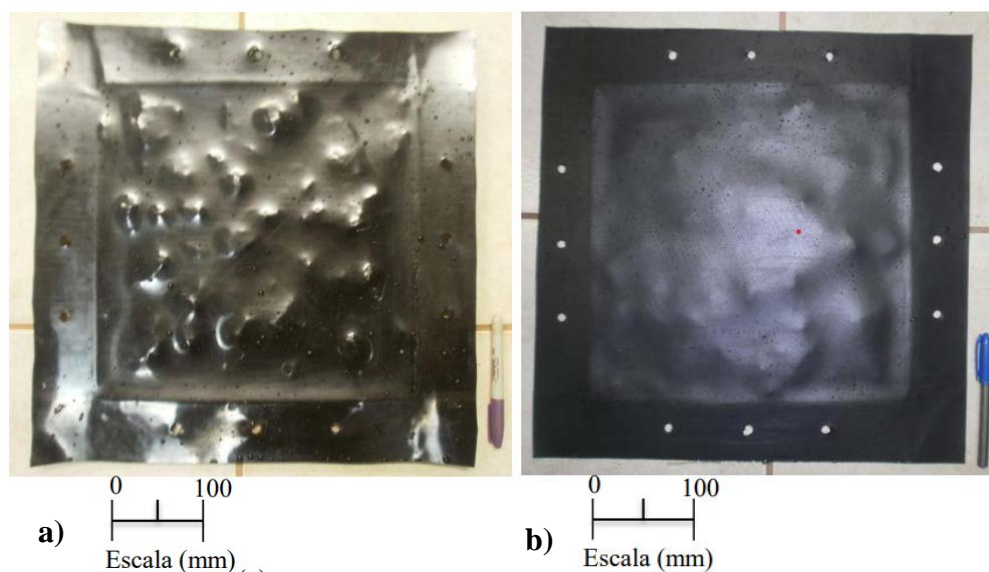


Figura 2.10 - Contatos de agregados em geomembranas (1mm), submetidas a uma tensão vertical de 500 kPa: (a) geomembrana de PEAD e (b) geomembrana de PVC (Ruiz-Gómez, 2014).

## 2.4 Exemplos de geossintéticos em obras hidráulicas e de disposição de resíduos

Como comentado anteriormente, as geomembranas podem ser empregadas principalmente como elementos de barreira em obras hidráulicas e de disposição de resíduos, impedindo que haja excesso de migração de líquido para locais indesejados. A Figura 2.11 mostra as possíveis configurações de aplicação de geomembranas em barragens.

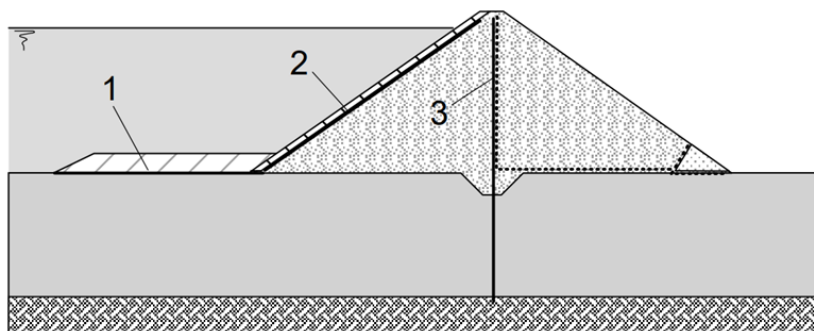


Figura 2.11 - Possíveis utilizações de geomembranas em barragens, onde (1) representa geomembrana sob colchão de argila a montante da barragem, (2) geomembrana sob capa de concreto, (3) geomembrana como barreira em núcleo e fundação de barragem de terra (Fonte: Palmeira, 2018).

Dávila & Palmeira (2016) analisaram em seu estudo vazamentos através de cortes lineares (5, 20 e 50 mm de comprimento) em geomembranas. Os cortes foram realizados com o auxílio de uma lâmina e de formões, visando simular os danos em geomembranas nas fases de instalação e operação. Os cortes feitos com formão apresentaram menores danos nas faces internas do corte quando comparados com os cortes feitos com lâmina. Isso se deve principalmente ao fato dos cortes feitos com lâmina terem uma maior dependência do operador, o que causa grande influência nos resultados. Imperfeições em locais subjacentes à geomembrana também influenciam nos resultados, principalmente em casos onde as imperfeições estão localizadas bem abaixo do dano. De modo geral, percebeu-se que os cortes mais longos, com melhor qualidade de contato e menos imperfeições, apresentaram uma tendência de menor fluxo de água. A pressão também é um fator que influencia nos resultados, uma vez que se existir uma boa qualidade de contato entre geomembrana e o material subjacente, somados com o aumento da pressão na água, a tendência é que o fluxo através do dano diminua (Dávila & Palmeira, 2016). Giroud (1997) observou que um certo nível de tensão confinante garantia boas condições de contato entre geomembrana e solo de baixa permeabilidade, e em casos com a incorporação de GCL, a massa de bentonita que pode sair do GCL quando hidratado melhora o contato entre os materiais.

Bonaparte et al. (1989, apud Giroud, 1997) definem as condições de qualidade de contato entre geomembrana e uma camada de solo de baixa permeabilidade. Quando a geomembrana é instalada sobre uma camada de material bem compactado, apresentando uma superfície plana e com o mínimo possível de rugas, é considerado que a geomembrana apresenta

boa qualidade de contato, caso contrário, é definido que a geomembrana apresenta má qualidade de contato.

Rowe et al. (2016) estudaram vazamentos através de danos circulares em geomembranas (diâmetros de 1,5, 10 e 20 mm). Camadas de cascalho e areia siltosa foram instaladas abaixo da geomembrana, bem como uma camada de rejeitos (65% inicial de sólidos) acima da geomembrana. Fatores como nível de pressão sob os rejeitos, tipos de rejeitos, tipo e espessura da geomembrana, dimensão do dano, introdução de geotêxtil acima e abaixo da geomembrana, e espaço abaixo do dano, foram avaliados. A permeabilidade do material subjacente teve pouca influência nos vazamentos. Já em relação aos rejeitos, com a diminuição da condutividade hidráulica, foi verificada a redução do vazamento através do dano. A incorporação de um geotêxtil na interface (geomembrana-material subjacente), impede a ocorrência de piping. Os danos com diâmetro de 10 e 20 mm resultaram em vazamentos semelhantes. Já para o dano com 1,5 mm de diâmetro, foi observada uma redução de três ordens de grandeza. Não foram verificados grandes efeitos nos resultados em relação ao tipo e espessura da geomembrana, porém, não houve dados suficientes para ter conclusões assertivas. Em termos de pressão sobre os rejeitos, para maiores pressões, fatores como adensamento e migração de finos para ao redor e dentro do dano afetaram o fluxo. Além disso, foram observados finos dos rejeitos e do material subjacente ao redor e dentro do dano. Uma camada de geotêxtil acima da geomembrana aumentou o vazamento. Porém, a migração de rejeitos para o geotêxtil parece reduzir a transmissividade do geotêxtil (cerca de 3 vezes). O geotêxtil para esta finalidade deve obedecer às condições de filtro, de modo a impedir a entrada excessiva de finos (dependerá do tamanho do grão e do teor de sólidos a serem retidos). Por fim, os autores destacam que, o vazamento observado foi menor que 40 L/ha/dia, contendo no máximo 5 danos por ha.

Segundo Rowe et al. (2019), o gradiente de sucção entre o GCL e o material subjacente (subleito) suga a umidade do subleito para o GCL até o momento em que ocorre equilíbrio de sucção. Os autores destacam que, à medida que a umidade do GCL aumenta, a bentonita presente em seu interior começa a sofrer o processo de inchamento. O GCL é um material que pode estar sujeito a danos, porém, apresenta características favoráveis a aplicação como barreira, como, por exemplo, a capacidade de auto-recuperação, e isto está relacionado principalmente à expansão da bentonita por hidratação (Li & Rowe, 2019).

Rowe et al. (2020) estudaram a capacidade de auto-recuperação de danos presentes em um GCL (barreira composta). Esta capacidade está relacionada à absorção de umidade presente

no subleito subjacente. Foi avaliada a influência da incorporação de um geotêxtil abaixo do dano, condições de saturação do solo de fundação e níveis de pressão sobre o GCL (até 100 kPa). Os autores verificaram que o aumento do coeficiente de permeabilidade, e a significativa redução da auto-recuperação do GCL, se deveram à química do líquido presente nos poros do subleito de areia siltosa. Em casos onde a hidratação de um subleito induz troca catiônica, a tendência é que danos circulares maiores que 25 mm de diâmetro e danos quase retangulares com 14 mm de largura não se auto-recuperem. A incorporação de um geotêxtil sob o dano pode apresentar melhora ou piora na auto-recuperação, a depender de fatores como o teor de umidade do subleito e a dimensão do dano. De forma geral, danos com dimensão de 15 mm ou menores não apresentarão impacto no desenvolvimento hidráulico do revestimento. Já para danos com dimensões maiores que 25 mm devem ser tomadas medidas de controle. Os autores ressaltam que a auto-recuperação é um fator altamente depende do subleito, do fluido a ser barrado e do GCL usado.

Barroso et al. (2006) avaliaram o fluxo em barreiras compostas por geomembrana, geomembrana associada a GCL e geomembrana associada a GCL e camada de solo compactado. Furos circulares foram realizados nas geomembranas para se avaliar a eficiência das barreiras. Para isso, foram feitas análises em três escalas diferentes, visando a extrapolação dos resultados para aplicação em campo. Fatores como tensão confinante, altura de coluna de água e condição de saturação do GCL, utilizando GCL não pré-hidratado e GCL pré-hidratado, também foram analisados. De forma geral, verificou-se que a vazão foi afetada de forma diferente em relação ao GCL usado e pela tensão confinante aplicada. A vazão através dos GCLs não pré-hidratados não foi significativamente alterada pelo aumento da pressão. Já para os GCLs pré-hidratados, o aumento da pressão teve maior influência na taxa de vazão. Em termos de altura de coluna de água acima da geomembrana, percebeu-se um aumento na vazão para as maiores alturas de coluna de água. No que diz respeito à comparação dos testes de pequena e média escala e pequena e grande escala, observou-se que os resultados dos testes em pequena escala mostraram-se ser representativos de um limite superior dos valores que seriam obtidos em campo. Os autores sugerem ainda que a transmissividade do contato entre a geomembrana e o GCL não é uniforme. Com isso, análises analíticas existentes para este tipo de sistema de barreira ainda apresentam certas limitações.

Cartaud & Touze-Foltz (2004) avaliaram a influência do geotêxtil na interface de barreiras compostas. Foram analisados fatores como tensão aplicada, tipo de geotêxtil e superfície de revestimento de solo. De forma geral, foi observado que o geotêxtil pode aumentar

o fluxo na interface (principalmente em casos de geotêxteis agulhados espessos) em casos de uma superfície plana de argila compactada. Já em casos de superfície irregular, o geotêxtil age de modo a reduzir a vazão. Além disso, uma camada irregular de argila compactada oferece ao geotêxtil uma espessura de certa forma variável (quando submetida a pressão). Isso ocorre porque em alguns lugares o geotêxtil estará sendo mais comprimido e então ficará com espessura menor. Já em locais não compactados tem-se zonas abertas. Por esse motivo, a tendência é que a espessura do geotêxtil seja próxima à espessura sem a ação da pressão. Também foi visto que o aumento da pressão (50 - 100 kPa) não afetou os resultados de forma significativa.

Cartaud et al. (2005) estudaram a influência de geotêxteis na interface entre geomembrana e solo argiloso compactado. Para isso, foi utilizado um dispositivo com escala de 1 m. Os autores obtiveram informações relevantes para o entendimento do fluxo neste tipo de sistema de barreira, tais como: (i) a presença de geotêxtil na interface geomembrana/solo aumenta a vazão; (ii) parâmetros como espessura e comportamento hidráulico são relevantes na vazão de interface; (iii) geotêxteis considerados parecidos não apresentarão necessariamente vazões semelhantes e os autores relacionaram isso ao comportamento hidrofóbico das fibras presentes nos geotêxteis em relação à água; (iv) o estado não-saturado dos geotêxteis foi considerado o principal motivo de discrepância dos resultados; (v) as propriedades não-saturadas dos geotêxteis devem ser bem conhecidas, de modo a prever corretamente as vazões através de danos em sistemas de barreiras compostas.

Zornberg (2005), por meio de um programa experimental, estudou o fluxo através de danos em geomembranas (sistemas de barreira composta). Foi avaliada a condição de contato entre a geomembrana e o solo subjacente (argila compactada), a densidade do solo, bem como a pressão de água sobre a geomembrana. O autor percebeu que a quantidade de água que fluía para a célula de ensaio era maior que a quantidade de água que saía da célula. Isso se deveu ao estado não saturado do solo, ou seja, inicialmente a água que entra na célula de ensaio vai preenchendo os vazios do solo, aumentando então o armazenamento de água no solo. Os resultados mostraram que para uma mesma densidade de solo e baixa pressão de água sobre a geomembrana, a qualidade de contato é um fator que exerce grande influência nos resultados, onde uma boa qualidade de contato apresentou uma taxa de vazamento menor que o caso com baixa qualidade de contato. Em casos onde a pressão de água sobre a geomembrana é maior, a qualidade de contato não mostrou ser um parâmetro relevante.

## 2.5 Metodologias de análise

### 2.5.1 Modelagem numérica

Dentro dos principais tópicos que a Geotecnia engloba, tem-se a percolação em meios porosos, que descreve a movimentação de um fluido em um solo. Este processo é governado por fatores relacionados ao meio poroso e as características do fluido. Atualmente, com o desenvolvimento tecnológico, as análises de percolação em meios poros realizadas por programas computacionais fornecem resultados em termos de fluxo e distribuição de pressões de forma mais realista e precisa.

Segundo GEO-SLOPE International Ltd (2012), Ribeiro (2004) e Azevedo (2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) é baseado na ideia de dividir um meio contínuo em pequenas partes, de modo a retratar o comportamento individual de cada elemento, para que, posteriormente, todos os elementos sejam reconectados e simulem o comportamento de todo o meio estudado. O processo de divisão do meio por elementos finitos, ou definição da malha, deve ser realizado de modo a obter um resultado o mais realista possível.

O programa usado nesta pesquisa foi o SEEP/W, presente no pacote do GeoStudio. Esse programa utiliza o Método dos Elementos Finitos para simular o fluxo de líquidos em meios porosos na condição saturada ou não saturada. Além disso, o programa consegue simular problemas com regimes de fluxo nas condições transiente ou estacionária. O SEEP/W é formulado de forma que o fluxo de líquido no meio poroso obedeça a lei de Darcy (GEO-SLOPE International Ltd, 2012).

Camargo (2002) define MEF como um procedimento que soluciona problemas por meio de um sistema de equações algébricas que relacionam a variável em um número finito de pontos. Além disso, a autora define os procedimentos para a resolução de problemas pelo MEF:

- O domínio do problema é dividido em um número de subdomínios (denominados elementos finitos), conectados entre si por um número finito de pontos (nós);
- A distribuição da variável cuja solução é procurada nos elementos finitos é aproximada por uma função particular (função de interpolação);
- O valor da variável do problema nos nós de cada elemento (com geometria e propriedades do elemento) é relacionado por meio desta função, dando origem ao sistema de equações do elemento. Este sistema pode ser apresentado na forma matricial, denominada de matriz de comportamento do elemento;



- Com a conexão dos elementos por meio dos nós, é possível associar as equações dos elementos, montando um sistema global de equações;
- Introduce-se as condições de contorno (valores conhecidos da variável no contorno);
- Resolve-se o sistema de equações global, obtendo-se os valores da variável do problema nos nós;
- Um cálculo complementar é feito caso se deseje obter o valor de outras variáveis (variáveis secundárias).

De acordo com Santos (2004), o SEEP/W apresenta algumas limitações: (1) considera o solo como um material homogêneo; (2) sua formulação foi realizada para a condição de pressão total constante; (3) apresenta dificuldade na convergência em problemas de solos com função de condutividade hidráulica com grande declividade, como é o caso de solos arenosos; (4) a mesma dificuldade é vista em casos de nível de água profundo. Santos (2004), define as etapas para a realização das modelagens numéricas realizadas no SEEP/W:

- Definição da origem e sistemas de coordenadas;
- Desenho do problema que se presente estudar;
- Especificação das propriedades dos materiais;
- Definição da malha;
- Resolução por meio de iterações;
- Visualização dos resultados.

Problemas tridimensionais com simetria sobre um eixo vertical de rotação podem ser resolvidos por meio de análises axi-simétrica, onde o problema é definido em duas dimensões, mas, a análise considera a rotação do desenho em torno de um eixo central (vertical) GEO-SLOPE International Ltd (2012). Desta forma, a análise axi-simétrica pode ser usada em modelagens numéricas que simulam vazamentos através de danos circulares em geomembranas presentes em barreiras.

Saidi et al. (2006) analisou em sua pesquisa, por meio de modelagens numéricas, vazamentos através de danos em geomembranas. Foram consideradas barreiras compostas por geomembrana, GCL e solo de baixa permeabilidade. A condição de não saturação do solo também foi estudada. Os autores observaram que os resultados em termos de vazão obtidos pela modelagem numérica e a solução analítica se compararam bem. Já os resultados em termos de área molhada apresentaram maiores diferenças nos resultados. Este fato está relacionado a diferença do estado de saturação para ambos os casos. Além disso, os autores verificaram que

o formato do dano (quadrado ou circular) não teve grande influência na intensidade dos vazamentos.

El-Zein et al. (2012) realizaram análises numéricas 1D, 2D e 3D de modo a verificar o efeito de vazamentos através de danos (retangulares) em geomembranas, acoplado com o transporte de contaminantes (Diclorometano), por meio de um sistema composto por geomembrana, GCL, zona de atenuação e um aquífero delgado. Os autores verificaram que as concentrações de contaminantes podem ser subestimadas em análises 1D e 2D em decorrência da direção do fluxo do aquífero em relação a orientação do dano e a condição de limite de transporte de massa aplicada a jusante do aquífero. O aumento do tamanho do dano provoca um aumento do vazamento e das concentrações de contaminantes. A concentração do contaminante pode ser reduzida em até uma ordem de grandeza em casos em que o fluxo da água subterrânea seja considerado. Aumentos de 30 % e 116 % podem ser verificados se a direção do fluxo do aquífero for normal ou paralelo ao dano. Além disso, os autores verificaram que resultados muito conservadores podem ser obtidos em casos onde o fluxo do aquífero a jusante da condição limite não seja considerado.

### 2.5.2 Soluções analíticas para quantificação de vazamentos em geomembranas

Giroud & Bonaparte (1989b), propõem equações para o cálculo da vazão através de danos em geomembranas (Equação 2.1) e altura de água sobre a geomembrana (Equação 2.2), sendo:

$$Q = \pi R^2 k_s \quad (2.1)$$

$$h_w = \frac{R^2 k_s}{4\theta} \left( 2 \ln \frac{2R}{d} + \left( \frac{d}{2R} \right)^2 - 1 \right) \quad (2.2)$$

Onde:  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) = vazão;  $R$  (m) = raio da área molhada;  $k_s$  (m/s) = coeficiente de permeabilidade do solo;  $h_w$  (m) = carga hidráulica de líquido sobre a geomembrana;  $\theta$  (m<sup>2</sup>/s) = transmissividade da interface entre geomembrana/solo;  $d$  (m) = diâmetro do dano na geomembrana. Tais equações podem ser usadas para a condição de barreira composta por solo/geomembrana e com um geotêxtil entre o solo e a geomembrana.

Para a obtenção da equação 2.2, os autores supuseram que o gradiente hidráulico para o fluxo é igual a 1. Segundo Giroud & Bonaparte (1989b), esta simplificação pode ser atribuída uma vez que a altura de água sobre a geomembrana é pequena em comparação com a espessura da camada de solo. Esta simplificação é aceitável para barreiras inferiores, aceitável na maioria dos casos de barreiras em aterros sanitários e não conservadora para revestimentos superiores de retenção de líquidos (Giroud & Bonaparte, 1989b). Esta solução faz a consideração do fluxo de interface entre geomembrana e solo por meio da variável  $\theta$  (transmissividade de interface).

### 2.5.3 Soluções empíricas

#### 2.5.3.1 Transmissividade de interface

Touze-Foltz & Giroud (2003) apresentam equações para o cálculo da transmissividade de interface para a condição de excelente (Equação 2.3), bom (Equação 2.4) e ruim (Equação 2.5) contato entre solo e geomembrana, respectivamente.

$$\log \theta = -1,7476 + 0,7155 \log k_s \quad (2.3)$$

$$\log \theta = -1,3564 + 0,7155 \log k_s \quad (2.4)$$

$$\log \theta = -0,5618 + 0,7155 \log k_s \quad (2.5)$$

Além das equações mostradas acima, abaixo são apresentadas equações propostas por Rowe (1998), referentes a contatos bom (Equação 2.6) ou ruim (Equação 2.7) entre solo e geomembrana.

$$\log \theta = 0,07 + 1,036 \log k_s + 0,018(\log k_s)^2 \quad (2.6)$$

$$\log \theta = 1,15 + 1,092 \log k_s + 0,0207(\log k_s)^2 \quad (2.7)$$

Segundo Rowe (1998), cargas hidráulicas de 30 m podem ser verificadas em casos onde exista falha no sistema de coleta de lixiviado. Além disso, geomembranas usadas como barreira em reservatórios e barragens podem estar sujeitas a cargas hidráulicas elevadas.

Observa-se que as equações propostas por Touze-Foltz & Giroud (2003) e Rowe (1998) levam em consideração apenas o coeficiente de permeabilidade do solo, enquanto a equação proposta por Giroud & Bonaparte (1989b) depende da espessura da interface e das características do líquido analisado. Tais equações foram determinadas para baixas cargas hidráulicas sobre a geomembrana.

Touze-Foltz & Barroso (2006) apresentam uma equação (2.8) para o cálculo da transmissividade de interface (geomembrana/GCL) para a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo de baixa permeabilidade.

$$\log \theta = -2,2322 + 0,7155 \log k_{GCL} \quad (2.8)$$

Onde:  $k_{GCL}$  = Coeficiente de permeabilidade do GCL.

### 2.5.3.2 Intensidade dos vazamentos

As equações apresentadas a seguir foram determinadas à partir de estudos empíricos, de modo a calcular vazamentos através de danos em geomembranas. As equações mostradas a seguir foram propostas por Giroud & Bonaparte (1989b) (Equação 2.9), Rowe (1998) (Equações 2.10 e 2.11), Giroud et al. (1989) (Equação 2.12), Touze-Foltz & Giroud (2003) (Equação 2.13), Giroud (1997) (Equação 2.14).

$$Q = 0,7a^{0,1}k_s^{0,88}h_w \quad (2.9)$$

$$Q = 0,785r_0^{0,2}k_s^{0,1}h_w \quad (2.10)$$

$$Q = 1,12C_{q0}[1 + 0,1(h_w/H_s)^{0,95}]r_0^{0,2}k_s^{0,74}h_w^{0,9} \quad (2.11)$$

$$Q = 0,785C_{q0}r_0^{0,2}k_s^{0,74}h_w^{0,9} \quad (2.12)$$

$$Q = 0,096h_w^{0,9}a^{0,1}k_s^{0,74}[1 + 0,1(h_w/H_s)^{0,95}] \quad (2.13)$$

$$Q = 0,976C_{q0}[1 + 0,1(h_w/H_s)^{0,95}]d^{0,2}h_w^{0,9}k_s^{0,74} \quad (2.14)$$

Onde:  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) = vazão;  $C_{q0}$  (adimensional) = fator de condição de contato;  $h_w$  (m) = carga hidráulica sobre a geomembrana;  $H_s$  (m) = espessura da camada de solo;  $d$  (m) = diâmetro do dano na geomembrana;  $k_s$ (m/s) = coeficiente de permeabilidade do solo;  $a$  (m<sup>2</sup>) = área do dano na geomembrana;  $r_0$  (m) = raio do dano na geomembrana. São considerados fatores de condição de contato ( $C_{q0}$ ) iguais a 0,096 para a condição de contato excelente, 0,21 para contato bom e 1,15 para contato ruim.

As Equações 2.9, 2.10 e 2.12 consideram basicamente as mesmas variáveis (diâmetro ou raio do dano, coeficiente de permeabilidade do solo e carga hidráulica sobre a geomembrana), exceto pelo fator de condição de contato apresentado na Equação 2.12. Já a Equações 2.11, 2.13 e 2.14 consideram, além das variáveis citadas anteriormente, a razão entre a carga hidráulica acima da geomembrana e a espessura da camada de solo.

A equação proposta por Giroud (1997) apresenta certas limitações: (1) diâmetros de danos compreendidos entre 0,5 e 25 mm; (2) carga hidráulica sobre a geomembrana menor que 3 m; e (3) coeficiente de permeabilidade do solo subjacente a geomembrana deve ser menor que o valor dado pela Equação 2.15:

$$k_s < k_i = \{1,355r_0^{1,8} / [C_{q0} \left(1 + 0,1 \left(\frac{h_w}{H_s}\right)^{0,95} h_w^{0,4}\right)]\}^{1/0,74} \quad (2.15)$$

Segundo Rowe (1998), a última condição provavelmente será satisfeita se as condições 1 e 2 forem atendidas e o  $k_s \leq 7 * 10^{-9}$  m/s.

Touze-Foltz & Giroud (2003) desenvolveram uma série de equações empíricas para vazamentos em sistemas de barreira (neste caso, geomembrana e solo de baixa permeabilidade). Foram consideradas três condições de contato entre geomembrana e solo (ruim, boa e excelente), e três tipos de danos (circulares, de comprimento infinito e rugas danificadas). Para danos circulares (90% dos casos), a diferença relativa entre os resultados das equações desenvolvidas no estudo com as soluções analíticas foi de 17% para ruins e boas condições de contato, e de 22% para excelentes condições de contato. Para danos de comprimento infinito, cerca de 97% dos casos apresentaram diferença relativa em torno de 10% (para as três condições de contato).

Touze-Foltz & Barroso (2006) apresentam em seu estudo equações para se quantificar vazamentos através de danos em sistemas de barreira constituídos por geomembrana e GCL. Foram mostradas equações empíricas para danos circulares com diâmetros compreendidos

entre 2 e 20 mm (Equação 2.16) e diâmetros compreendidos entre 100 e 600 mm (Equação 2.17). Também foram previstas equações semi-empíricas para danos de comprimento finito (largo e estreito), onde foi considerado que o dano possui o formato de um retângulo com um semicírculo em cada extremidade. Os autores verificaram que as equações para danos circulares representam um limite superior para os resultados experimentais (danos circulares) de Barroso (2005).

$$Q = 2,4 \times 10^{-3} a^{0,1} h_w^{0,9} k_{GCL}^{0,74} [1 + 0,1(h_w/H_{GCL})^{0,95}] \quad (2.16)$$

$$Q = 0,078 a^{0,18} h_w^{0,84} k_{GCL}^{0,77} [1 - 0,1(h_w/H_{GCL})^{0,027}] \quad (2.17)$$

Onde:  $k_{GCL}$  = coeficiente de permeabilidade equivalente do GCL e  $H_{GCL}$  = espessura do GCL.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia apresentada nesta pesquisa compreende uma breve análise experimental e modelagens numéricas computacionais de modo a analisar vazamentos através de danos em geomembranas empregadas em sistemas de barreira. As modelagens numéricas computacionais foram realizadas por meio do módulo SEEP/W presente no GeoStudio/2012. Este programa utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular fluxo de líquidos em meios porosos. Foi adotado um modelo axi-simétrico, devido a necessidade de simular vazamentos através de danos circulares em um determinado volume do solo. As análises numéricas foram realizadas adotando-se o regime de fluxo estacionário. Adotou-se uma malha global nas modelagens numéricas realizadas nesta pesquisa. Uma análise com o refinamento da malha nas regiões mais relevantes do problema mostrou que a diferença entre as duas análises é pequena, cerca de 5 %.

#### 3.1 Análise numérica para a condição de barreira composta por geomembrana e solo

De modo a verificar se a condição axi-simétrica estava sendo usada corretamente, realizou-se uma modelagem numérica simulando um ensaio de permeabilidade de carga constante, onde a amostra de solo é cilíndrica (condição axi-simétrica). Foi considerado um solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-3}$  m/s, diâmetro do corpo de prova de 0,157 m, altura do corpo de prova de 0,15 m e carga hidráulica de 0,5 m.

O procedimento para realização de uma análise axi-simétrica se difere de uma análise 2D. Para a condição axi-simétrica, é considerado no desenho o raio do corpo de prova, uma vez que os resultados serão obtidos a partir da rotação deste elemento em um ângulo central de 360°. As demais características geométricas são consideradas de forma convencional. Condições de contorno foram inseridas na parte superior do corpo de prova de modo a simular a carga hidráulica do sistema e na parte inferior do corpo de prova de modo a permitir o fluxo de água descendente.

Para a carga hidráulica de 0,5 m, o resultado da modelagem numérica foi comparado com o resultado de vazão calculado manualmente pela Lei de Darcy (Equação 3.1).

$$Q = k_s \frac{h}{L} A \quad (3.1)$$

Onde:  $k_s$  = coeficiente de permeabilidade do solo;  $h$  = carga hidráulica;  $L$  = comprimento do corpo de prova e  $A$  = área do corpo de prova. Realizando os cálculos para as condições descritas anteriormente, tem-se:

$$Q = 0,001 * \frac{0,5}{0,15} * \pi * 0,0785^2 = 6,45 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

A Figura 3.1 mostra o resultado da modelagem numérica que simula o ensaio de permeabilidade de carga constante. Observa-se que os resultados de vazão obtidos pela Lei de Darcy e pela modelagem numérica se comparam muito bem, comprovando que a análise axi-simétrica foi usada corretamente.

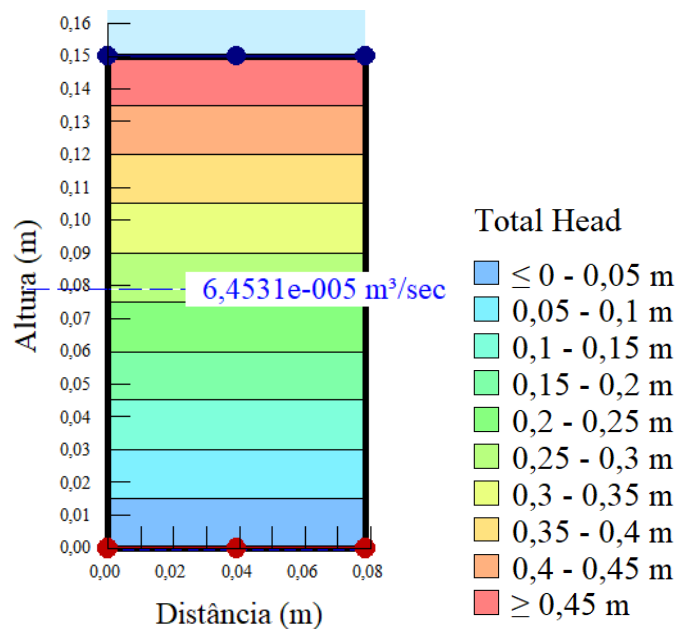


Figura 3.1 - Resultados modelagem numérica simulando um ensaio de permeabilidade de carga constante.

Como foi discutido anteriormente, os vazamentos através de danos em geomembranas empregadas em barreira apresentam um comportamento onde o líquido que atravessa o dano escoar lateralmente entre a geomembrana e o solo subjacente e em seguida infiltra no solo. Por esse motivo, as modelagens numéricas foram realizadas com a inserção de uma interface permeável entre a geomembrana e solo.

Ao inserir a interface no SEEP/W, é possível analisar a influência da permeabilidade normal, permeabilidade tangencial (permeabilidade ao longo do plano da interface) e espessura



da interface, nos resultados obtidos. Neste caso, a influência da permeabilidade normal da interface é baixa, visto que a espessura da interface é relativamente pequena (menos de 1 mm). Já a permeabilidade ao longo do plano da interface terá grande influência nos resultados, uma vez que ocorre o fluxo horizontal na interface entre geomembrana e solo. A permeabilidade ao longo de um plano pode ser determinada por meio da divisão da transmissividade da interface pela sua espessura (Equação 3.2).

$$k_p = \frac{\theta}{s} \quad (3.2)$$

Onde:  $k_p$ (m/s) = permeabilidade ao longo do plano,  $\theta$  (m<sup>2</sup>/s) = transmissividade de interface e  $s$  (m) = espessura da interface.

Sabe-se que o fluxo através de geomembranas pode ocorrer por difusão. Porém, neste estudo, a geomembrana foi considerada como um material praticamente impermeável, de modo a determinar apenas a influência de vazamentos através de danos.

### 3.1.1 Influência da dimensão da camada de solo

Este item é destinado a analisar a influência da dimensão da camada de solo nos resultados obtidos. Para isso, foram consideradas camadas de solo com dimensões (diâmetro x espessura) de 4 x 1 m, 20 x 5 m e 100 x 50 m, bem como solos com coeficientes de permeabilidade de  $10^{-7}$ ,  $10^{-9}$  e  $10^{-11}$  m/s, dano com diâmetro de 20 mm e cargas hidráulicas de 2, 10, 20, 40 e 80 m de água sobre a geomembrana. Foram inseridas condições de contorno acima da geomembrana de modo a simular a altura de água sobre a geomembrana e na parte inferior da camada de solo, de modo a permitir o fluxo de água descendente. As dimensões das camadas de solo foram baseadas em trabalhos com temas semelhantes ao desta dissertação.

Visando determinar as características da interface entre solo e geomembrana, foi calculada a transmissividade da interface pela Equação 2.3, segundo Touze-Foltz & Giroud (2003). Essa equação admite a condição de excelente contato entre geomembrana e solo. A influência da condição de contato entre solo e geomembrana será discutida no item 3.2. A espessura da interface foi determinada em função do coeficiente de permeabilidade do solo de fundação (foi usada a espessura de 0,08 mm para  $k_s = 10^{-7}$  m/s e 0,02 mm para  $k_s = 10^{-9}$  m/s e  $k_s = 10^{-11}$  m/s), segundo a metodologia de Giroud & Bonaparte (1989b).

Ao se inserir a interface na modelagem numérica, além da permeabilidade tangencial (ao longo do plano), é necessário inserir o valor da permeabilidade normal da interface. Foi verificado nas modelagens numéricas que a permeabilidade normal ao plano tem pouca influência nos resultados de vazão, visto que a espessura da interface é pequena. Por esse motivo, foi arbitrado o valor de 0,001 m/s em todas as modelagens desta pesquisa.

A Figura 3.2 mostra a modelagem realizada de modo a se determinar a influência da dimensão da camada de solo (subjacente à geomembrana) nos resultados obtidos, onde a Figura 3.2(a) mostra toda a camada de solo e a Figura 3.2(b) destaca a região próxima ao dano. Ao final da camada de solo foi inserida uma condição de contorno com pressão igual a 0, de modo a possibilitar o fluxo através do dano.

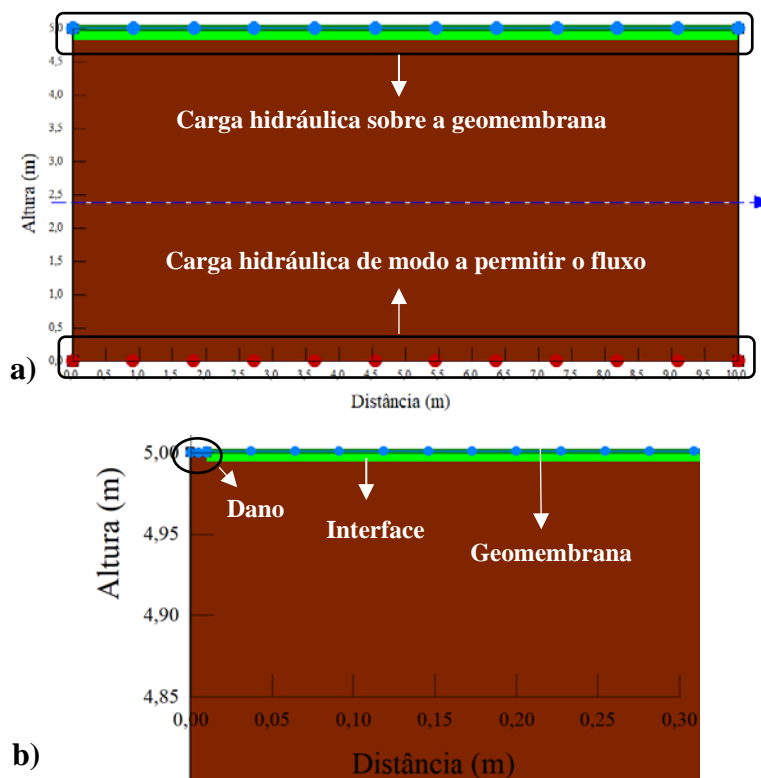


Figura 3.2 - Modelagem numérica camada de solo com dimensão de 20 x 5 m: a) toda a camada de solo e b) região próxima ao dano.

Como os resultados referentes as modelagens numéricas realizadas com camadas de solo de 4 x 1 m, 20 x 5 m e 100 x 50 m não apresentaram diferenças significativas, optou-se em utilizar nas demais modelagens camadas de solo com dimensão de 20 x 5 m.

### 3.1.2 Influência do tipo do solo

De modo a analisar a influência do tipo de solo subjacente à geomembrana nos vazamentos através de danos circulares com 20 mm de diâmetro, foram realizadas modelagens numéricas simulando barreiras compostas por geomembrana e solo argiloso ( $k_{sArgila} = 10^{-9}$  m/s) e geomembrana e solo arenoso ( $k_{sAreia} = 10^{-3}$  m/s). Também foi avaliada a influência da carga hidráulica de água sobre a geomembrana (2, 10, 20, 40 e 80 m).

Além disso, visando-se analisar a influência da interface em barreiras com diferentes tipos de solo, foram consideradas as seguintes condições: (i) uma interface entre geomembrana e solo, cuja espessura foi determinada segundo Giroud & Bonaparte (1989b), apresentando permeabilidade ao longo do plano determinada por meio da Equação 2.3 (foi considerada uma interface com espessura de 0,02 mm), proposta por Touze-Foltz & Giroud (2003); (ii) uma interface com transmissividade tendendo a 0 e (iii) sem interface.

Optou-se por utilizar os valores de transmissividade de interface obtidos pela Equação 2.3 nas modelagens feitas com argila, devido ao fato dos resultados de transmissividade terem se comparado bem com os resultados obtidos pela Equação 3.3, proposta por Giroud & Bonaparte (1989b), que considera a espessura da interface e as características do líquido analisado.

$$\theta = \frac{\rho g s^3}{12\eta} \quad (3.3)$$

Onde:  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) = densidade do líquido;  $g$  (m/s<sup>2</sup>) = aceleração da gravidade;  $s$  (m) = espaço entre a geomembrana e o solo e  $\eta$  (kg/m.s) = viscosidade do líquido.

### 3.1.3 Influência do diâmetro do dano

Este item é destinado a estudar a influência da variação do diâmetro do dano (5, 10, 20, 50 e 100 mm) em geomembranas sobrejacentes a um solo arenoso ( $K_{sAreia} = 10^{-3}$  m/s) e a um solo argiloso ( $K_{sArgila} = 10^{-9}$  m/s), nos resultados obtidos por modelagens numéricas. Foram avaliadas cargas hidráulicas de 2, 10, 20, 40 e 80 m de água sobre a geomembrana. Para a condição de barreira composta por geomembrana e areia, não foi considerado o fluxo de interface, visto que o solo arenoso apresenta um coeficiente de permeabilidade relativamente alto. Para a condição de barreira composta por geomembrana e argila, adotou-se uma interface com as mesmas características do item 3.1.2.

Os resultados referentes a danos com diâmetros de 5, 50 e 100 mm foram comparados com resultados obtidos pelas equações empíricas apresentadas no item 2.5.3.2. A equação empírica proposta por Giroud (1997) é limitada para diâmetros de danos compreendidos entre 0,5 e 25 mm. Desta forma, foi investigado se as equações podem ser estendidas para situações com diâmetros de danos maiores. A comparação entre as previsões obtidas pelo SEEP/W pode indicar se esta extensão é razoável ou não.

#### 3.1.4 Influência do refinamento da malha do modelo

Este item é destinado a analisar a influência do refinamento da malha do modelo nos resultados de vazamentos através de danos em geomembrana, visto que, inicialmente, as modelagens foram realizadas aplicando-se uma malha global em todos os elementos do modelo (Figura 3.3). Para isso, foram realizadas análises com a aplicação de uma malha mais refinada nos elementos de maior interesse do modelo.

Foram realizadas modelagens com o refinamento da malha na região da interface, dano e geomembrana, como mostra a Figura 3.4. Além disso, foram realizadas modelagens numéricas com o refinamento da malha na região da interface, dano, geomembrana e uma camada de solo com 2 cm de espessura, como mostra a Figura 3.5. E, por fim, foram realizadas modelagens numéricas com o refinamento da malha na região da interface, dano, geomembrana, camada de solo com 2 cm de espessura, seguida de uma camada de solo com 23 cm de espessura, como mostra a Figura 3.6. Foi considerado um solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s, camada de solo com dimensão de 20 x 5 m, dano circular com 20 mm de diâmetro, excelente contato entre geomembrana e solo, cargas hidráulicas de 2, 10, 20, 40 e 80 m. As características da interface foram determinadas conforme o item 3.1.1.

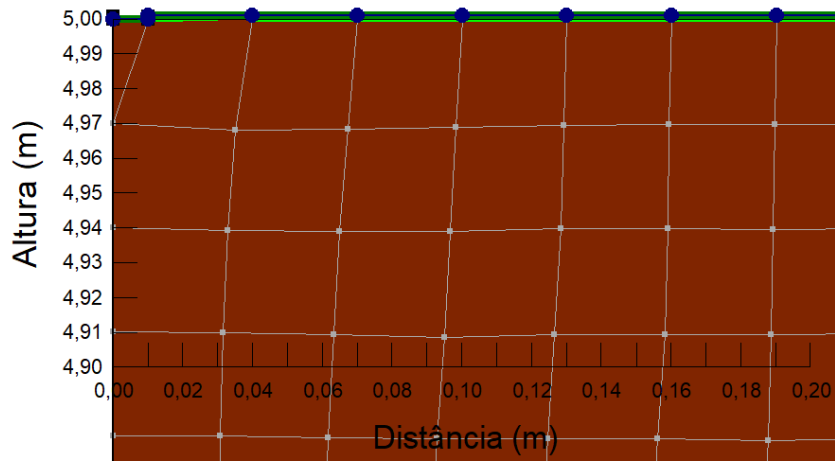


Figura 3.3 - Modelagem com a aplicação de uma malha global.

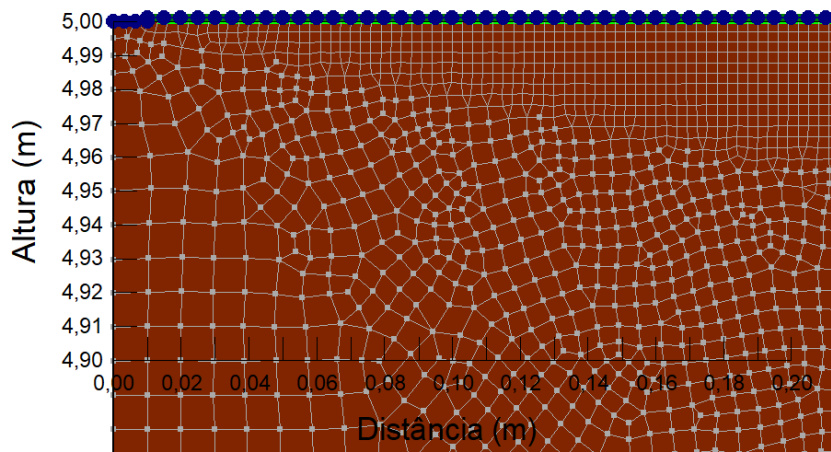


Figura 3.4 - Modelagem com refinamento da malha na região da interface, geomembrana e dano.

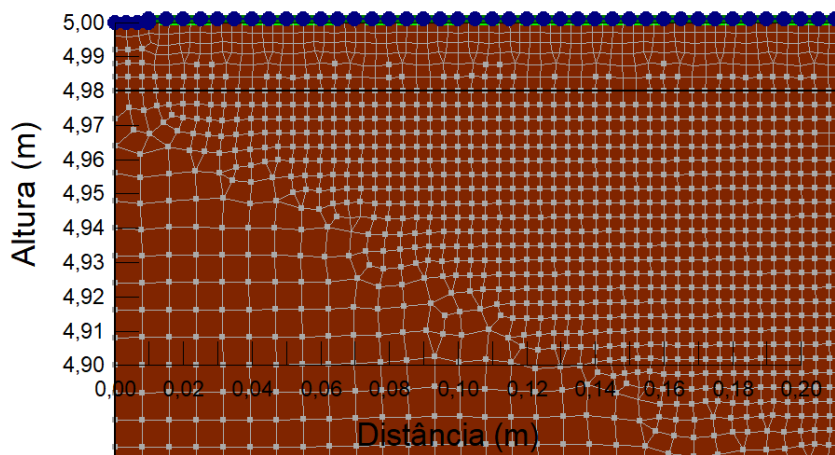


Figura 3.5 - Modelagem com refinamento da malha na região da interface, geomembrana, dano e camada de solo com 2 cm de espessura.

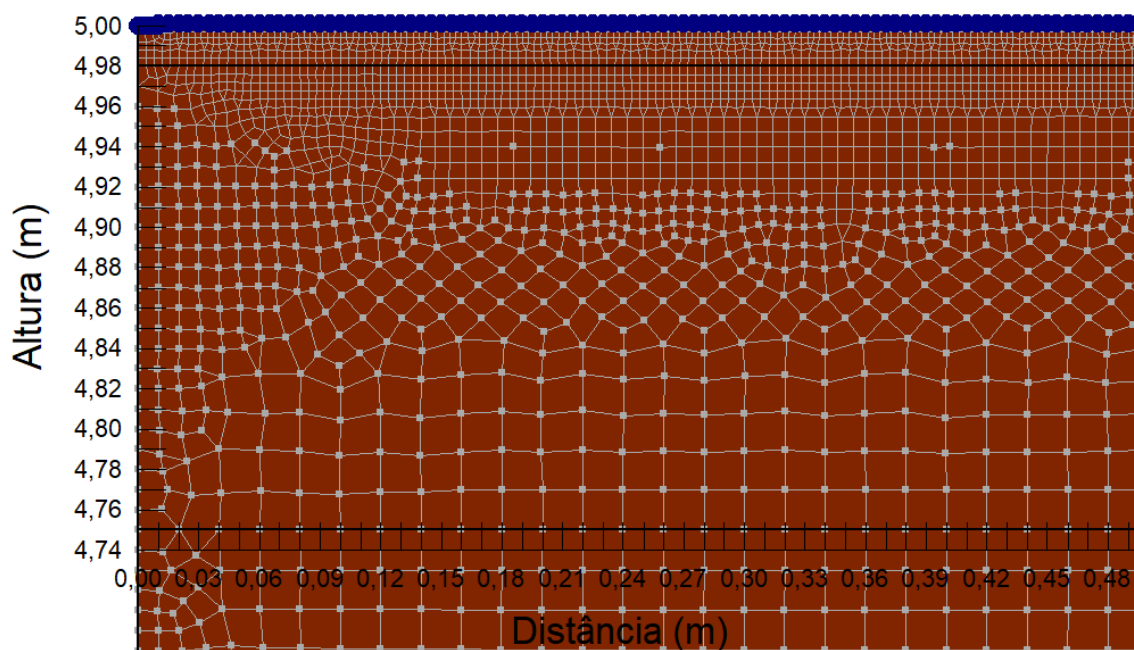


Figura 3.6 - Modelagem com refinamento da malha na região da interface, geomembrana, dano, camada de solo com 2 cm de espessura, seguida de uma camada de solo com 23 cm de espessura.

### 3.2 Comparação entre modelagem numérica, equações analíticas e equações empíricas para a condição sem geotêxtil

#### 3.2.1 Solução analítica

As Equações 2.3, 2.4 e 2.5 foram utilizadas no cálculo da transmissividade de interface para as modelagens numéricas e solução analítica, considerando um solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s. Os resultados obtidos pelas Equações 2.7 e 2.8 foram comparados com os resultados de transmissividade obtidos pelas Equações 2.4 e 2.5. Foi observado que, os resultados obtidos pelas equações propostas por Touze-Foltz & Giroud (2003) e Rowe (1998), referentes a contato bom e ruim, se compararam bem.

As equações propostas por Touze-Foltz & Giroud (2003) e Rowe (1998) foram desenvolvidas para baixas cargas hidráulicas sobre a geomembrana. Como não foram encontradas outras equações que considerem a influência da carga hidráulica no cálculo da transmissividade de interface, as equações apresentadas neste item também foram utilizadas para maiores cargas hidráulicas sobre a geomembrana, visando avaliar a acurácia da extensão de suas utilizações nestas condições.

Foram consideradas cargas hidráulicas de 0,25, 0,5, 1, 2, 3, 10 e 20 m, bem como danos com diâmetro de 2,5 e 20 mm. Após o cálculo da transmissividade, foi calculado o raio da área molhada a partir da Equação 2.2 para cada carga hidráulica sobre a geomembrana. Em seguida, foi calculada a vazão por meio da Equação 2.1.

Mesmo que a metodologia proposta por Giroud & Bonaparte (1989b) tenha sido desenvolvida para cargas hidráulicas relativamente baixas, foi investigado se a solução poderia ser estendida para situações de cargas hidráulicas mais elevadas (10 e 20 m). A comparação com as previsões obtidas pelo SEEP/W e soluções empíricas podem indicar se esta extensão é razoável ou não.

### 3.2.2 Modelagem numérica

As condições utilizadas no item 3.2.1 em relação a carga hidráulica sobre a geomembrana, diâmetro do dano, transmissividade de interface e coeficiente de permeabilidade do solo também foram utilizadas neste item, de modo a comparar os resultados da previsão analítica, modelagem numérica e soluções empíricas. A espessura da interface foi determinada segundo a metodologia proposta por Giroud & Bonaparte (1989b), cujo valor é de 0,02 mm (valor referente ao coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s). A permeabilidade ao longo do plano foi calculada por meio da divisão da transmissividade pela espessura da interface.

### 3.2.3 Soluções empíricas

As equações apresentadas no item 2.5.3.2 foram utilizadas para o cálculo do vazamento através de danos em geomembranas. Foram considerados fatores de condição de contato ( $C_{q0}$ ) iguais a 0,096 para a condição de contato excelente, 0,21 para contato bom e 1,15 para contato ruim. As condições utilizadas nos itens 3.2.1 e 3.2.2 em relação a carga hidráulica sobre a geomembrana, diâmetro do dano, transmissividade de interface e coeficiente de permeabilidade do solo também foram utilizadas neste item, de modo a comparar os resultados da previsão analítica, modelagem numérica e soluções empíricas.

Foi também investigado se as soluções empíricas podem ser estendidas para situações de maiores cargas hidráulicas sobre a geomembrana e danos com maiores diâmetros. A comparação com as previsões pelo SEEP/W podem confirmar se essa extensão é razoável ou não.

### **3.3 Comparação entre modelagem numérica e previsão analítica para a condição com geotêxtil**

#### **3.3.1 Influência do tipo de solo**

Neste item, foram adotadas as características de um geotêxtil (G1) usado por Gardoni (2000), cuja gramatura é de 200 g/cm<sup>2</sup>. Utilizaram-se valores de transmissividade, permeabilidade normal e espessura do geotêxtil para pressões de 7,5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa. Foram considerados solos com coeficiente de permeabilidade de 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-7</sup>, 10<sup>-9</sup> e 10<sup>-11</sup> m/s. Como a ideia é simular o geotêxtil como uma interface, as características da interface não foram variadas com a mudança do tipo do solo abaixo da geomembrana. A partir destes dados, foram realizadas as modelagens numéricas e os cálculos referentes a solução analítica, conforme a metodologia descrita no item 3.2.1.

Assim como discutido no item 3.2.1, mesmo que a solução analítica proposta por Giroud & Bonaparte (1989b) considere que a carga hidráulica sobre a geomembrana seja insignificante em relação a espessura da camada de solo, foram avaliadas alturas de água variando até 80 m. Desta forma, a comparação com as previsões obtidas pelo SEEP/W indicarão se a solução analítica é viável ou não para estes casos.

#### **3.3.2 Influência do diâmetro do dano**

Neste item, foi avaliada a influência da variação do diâmetro de danos em geomembrana (5, 20, 50 e 100 mm), para um solo com permeabilidade de 10<sup>-7</sup> m/s. Foram adotadas as mesmas características de interface do item anterior para a realização das modelagens numéricas.

### **3.4 Comparação entre modelagem numérica e soluções empíricas para a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo**

A Equação 2.9 foi utilizada para o cálculo da transmissividade de interface usada nas modelagens numéricas. Foi considerado um solo com coeficiente de permeabilidade de  $3 \times 10^{-10}$  m/s e espessura de 5 m (representando o subleito), um GCL com coeficiente de permeabilidade de  $5 \times 10^{-11}$  m/s e espessura de 6 mm. Foram avaliados danos com diâmetro



de 10 e 110 mm, cargas hidráulicas de 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 10, 20, 40 e 80 m. Tais características foram adotadas segundo a pesquisa de Barroso et al. (2006). Os resultados obtidos pelas modelagens numéricas foram comparados com os resultados do estudo experimental de Barroso et al. (2006) e os resultados obtidos por meio da Equação 2.16. A Figura 3.7 mostra a modelagem numérica que simula um sistema de barreira composta por geomembrana, GCL e solo de baixa permeabilidade.

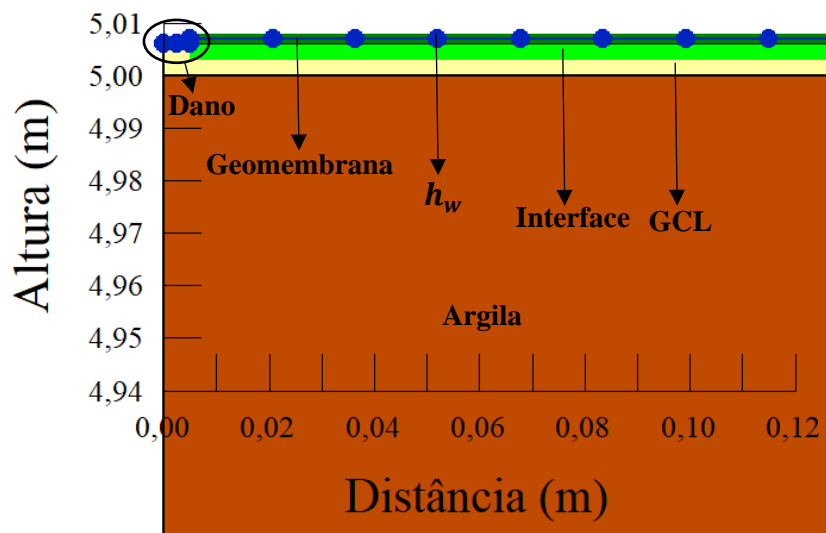


Figura 3.7 - Modelagem numérica barreira composta por Geomembrana, GCL e solo.

### 3.5 Análise experimental

O objetivo inicial desta pesquisa era realizar um programa experimental de modo a analisar os vazamentos através de danos em geomembranas, porém, devido a pandemia, não foi possível explorar esta análise. Contudo, foi realizado um ensaio antes que as atividades presenciais fossem paralisadas. O procedimento do ensaio é descrito a seguir.

#### 3.5.1 Materiais utilizados

Uma geomembrana de PCV com espessura de 1 mm (Figura 3.8) foi utilizada nesta pesquisa, visando-se analisar os vazamentos através de danos circulares. A geomembrana foi cortada em um formato de circular com diâmetro de 20 cm.



Figura 3.8 - Geomembrana.

### 3.5.2 Equipamento

O equipamento responsável pelo fluxo através de danos em geomembranas é mostrado na Figura 3.9. Tal equipamento consiste principalmente em um sistema responsável pela aplicação das pressões na água e uma célula de ensaio. A instrumentação (transdutores de pressão e célula de carga) necessária para medição dos parâmetros, bem como os materiais usados como barreira, são instalados na célula de ensaio.

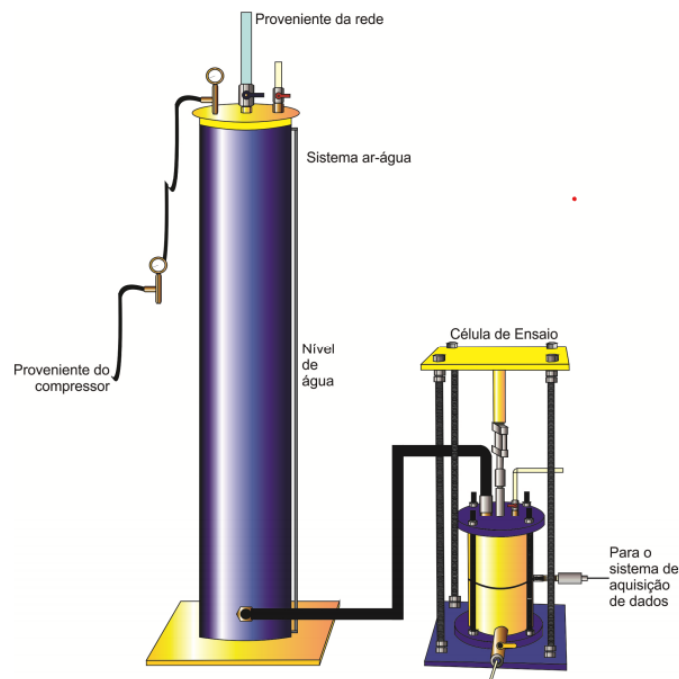


Figura 3.9 - Equipamento utilizado para análise de vazamentos através de danos em geomembranas (Cardona, 2013).

### 3.5.2.1 Sistema responsável pela aplicação de pressão de água

Na parte superior do equipamento tem-se a entrada de água, ladrão e entrada de ar comprimido (Figura 3.10). A água necessária para o enchimento do tanque que possui 2 m de altura provém do sistema de abastecimento de água do laboratório de Geotecnia. A pressão de ar comprimido é fornecida por um compressor com capacidade nominal de 1200 kPa. A pressão de ar aplicada é controlada por um manômetro.

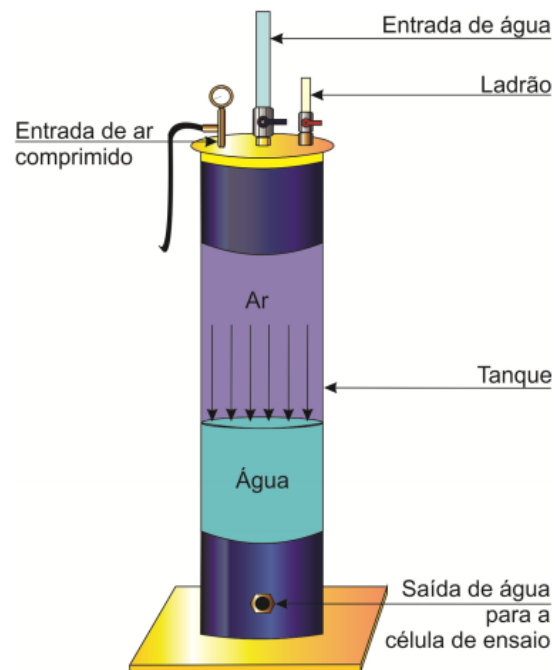


Figura 3.10 - Esquema de funcionamento do sistema responsável pela aplicação de pressão na água (Cardona, 2013).

### 3.5.2.2 Célula de ensaio

Este equipamento é semelhante a um permeâmetro (Figura 3.11) e é composto por dois cilindros (18,5 cm de diâmetro e 1,7 cm de espessura). No cilindro superior tem-se o dispositivo para entrada de água pressurizada. Já o cilindro inferior apresenta uma saída para se medir a vazão que atravessa o dano. Transdutores de pressão são instalados em ambos os cilindros, de modo a permitir a obtenção da variação de carga hidráulica.

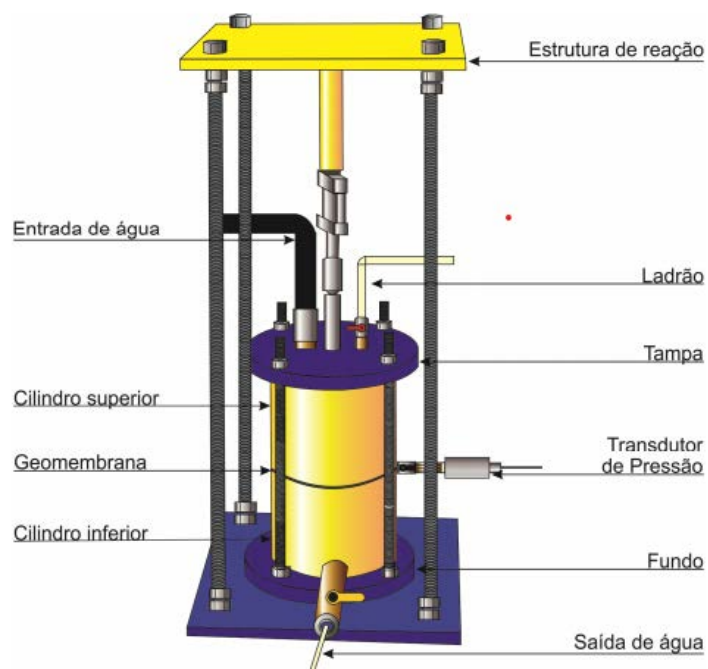


Figura 3.11 - Célula de ensaio (Cardona, 2013).

### 3.5.3 Instrumentação

Uma célula de carga com capacidade de 20 kN (Figura 3.12(a)) é acoplada na célula de ensaio, visando-se obter-se a pressão aplicada na geomembrana, caso haja camada de solo sobre a geomembrana. Os transdutores de pressão utilizados (Figura 3.12(b)) são do modelo MTS-2 15, possuindo capacidade de 1500 kPa. Os instrumentos foram devidamente calibrados.

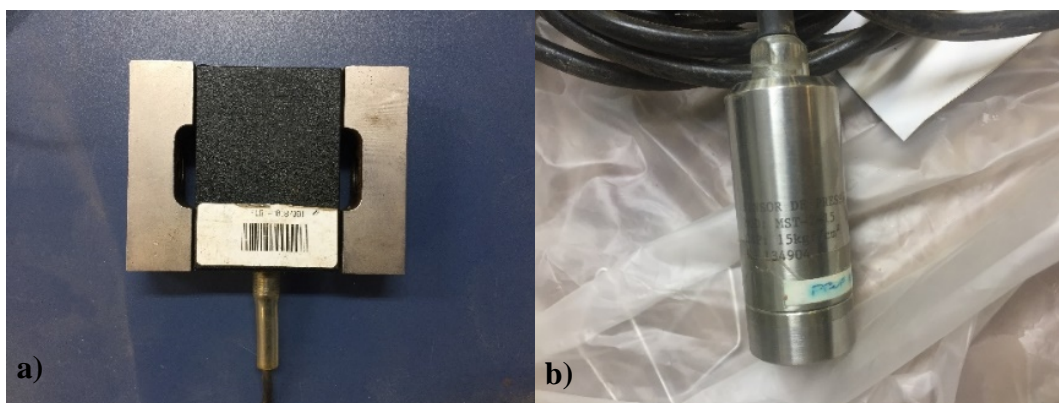


Figura 3.12 - Instrumentação: (a) célula de carga e (b) transdutor de pressão.

#### 3.5.4 Aquisição dos dados

O processo de aquisição de dados é realizado por um aquisitor modelo Spider 8. Tal aquisitor é ligado a um computador com o programa Catman, responsável pela obtenção dos resultados do ensaio.

#### 3.5.5 Execução do dano na geomembrana

O dano circular foi realizado por meio de um vazador com diâmetro de 20 mm (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Vazador com diâmetro interno de 20 mm.

#### 3.5.6 Programa experimental

O sistema de barreira considerado no ensaio foi constituído por apenas uma geomembrana. Neste ensaio não foi incorporado uma camada de solo abaixo da geomembrana e, por isso, uma placa de metal serviu de base sob a geomembrana. Foram avaliados vazamentos através de um dano circular com diâmetro de 20 mm, para pressões de 20, 100, 200, e 400 kPa (pressões também usadas por Cardona, 2013). O vazamento através do dano é controlado por um registro localizado no final da célula de ensaio, este registro é acionado no início e no final de cada estágio do ensaio. A massa de água que saía da célula de ensaio foi medida em intervalos de tempo de 5 segundos. Foram verificadas variações mínimas entre as medições de massa de água, por isso, foram feitas 5 medições para cada nível de pressão. Provavelmente, estas pequenas variações estejam associadas a imprecisões na medição do intervalo do tempo (acionamento do registro). Por meio da massa específica da água foi encontrado o volume de água que fluía pelo dano. As vazões foram calculadas pela divisão da média do volume de água medido em cada intervalo de tempo (5 segundos).

### 3.6 Análise numérica com base nos resultados experimentais

#### 3.6.1 Análises numéricas iniciais

Inicialmente, existiam dúvidas se as modelagens realizadas conseguiriam realmente simular o caminho percorrido pela água. O fluxo de interface já havia sido analisado anteriormente, então, restava-se verificar se este fluxo era devidamente conduzido para o espaço lateral entre a parede do cilindro externo e interno. Para isso, tentou-se apresentar resultados para este trecho (espaço lateral entre cilindro externo e interno) em termos de velocidade do fluxo, porém, devido ao fato da espessura deste espaço ser muito pequena (cerca de 2 milímetros), não foi possível ter uma boa visualização dos resultados.

Foi realizada uma modelagem numérica aplicando um fator de ampliação de 10x. Todas as dimensões geométricas (dimensões do cilindro, diâmetro do furo, altura de água sobre a geomembrana, espessura da geomembrana, espessura da interface) foram multiplicadas pelo fator de escala. Os coeficientes de permeabilidade da geomembrana, cilindros interno e externo, e placa de aço, não foram alterados, devido a consideração desses materiais como praticamente impermeáveis (permeabilidades inferiores a  $10^{-20}$  m/s). Os valores de permeabilidade ao longo do plano foram alterados de forma que dividindo a vazões encontradas nas modelagens por  $10^3$  (devido ao fato da unidade de medida ser em  $\text{m}^3/\text{s}$ ), resultem nos mesmos resultados obtidos no ensaio.

#### 3.6.2 Retro-análise para determinação da permeabilidade ao longo do plano da interface necessária para gerar os vazamentos obtidos no ensaio

Este item é destinado a realizar retro-análises de modo a determinar as permeabilidades ao longo do plano necessárias para gerar os mesmo vazamentos encontrados no ensaio feito com dano circular de 20 mm (resultados do item 4.3). A pressão sobre a geomembrana foi inserida na modelagem numérica por meio de uma condição de contorno que simula uma certa carga hidráulica. A modelagem numérica que simula o ensaio é mostrada na Figura 3.14: (a) mostra toda a modelagem e (b) região próxima ao dano.

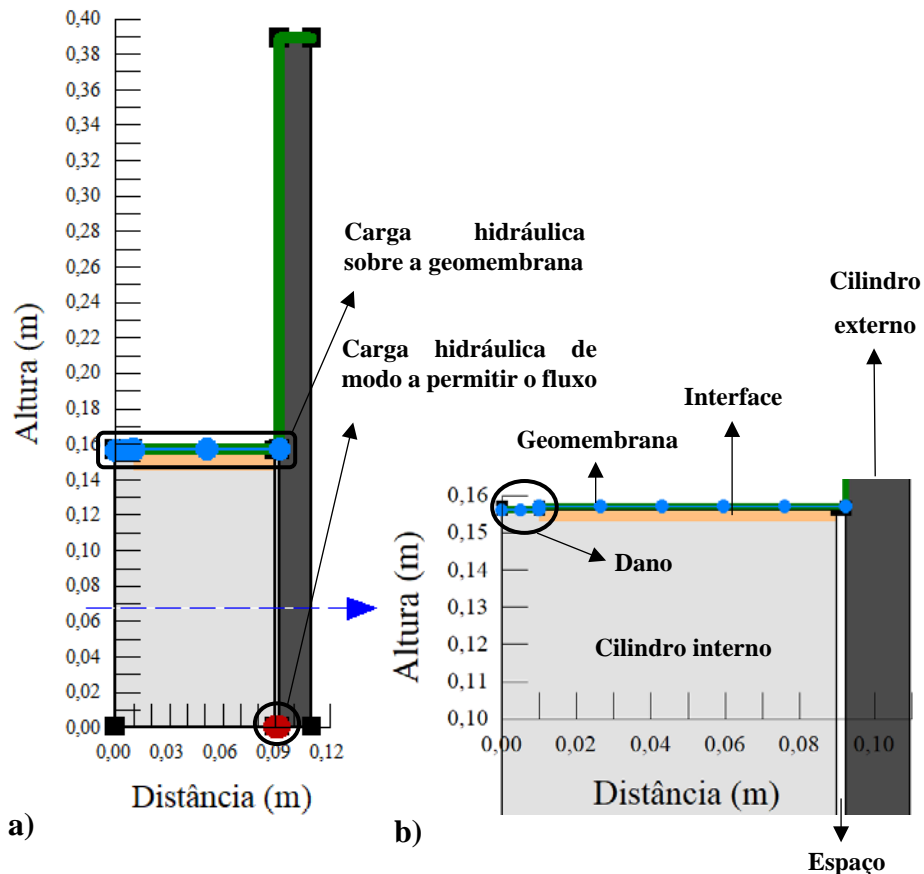


Figura 3.14 - Modelagem numérica que simula o ensaio realizado: (a) modelagem completa e (b) região próxima ao dano.

A influência da pressão exercida pelos 2 m de água presente no cilindro responsável pela aplicação de pressão na geomembrana foi considerada nas modelagens numéricas referentes aos níveis de pressão de 100, 200, 400 kPa. A pressão sobre a geomembrana foi inserida no SEEP/W por meio de carga hidráulica, então foram consideradas cargas de 2, 12, 22, 42 m.

### 3.6.3 Influência do diâmetro do dano

Mantendo os valores de permeabilidade ao longo do plano da interface entre geomembrana e solo, variou-se o diâmetro do dano em 5, 10, 20 e 50 mm, de modo a determinar a influência do diâmetro do dano nos resultados obtidos pelas modelagens numéricas.

### 3.6.4 Influência do diâmetro do cilindro

Este item é destinado a avaliar a influência da restrição causada pelas paredes laterais do equipamento mostrado no item 3.4.2, no fluxo através de danos em geomembrana. O cilindro em questão apresenta diâmetro interno de 185 mm, espessura de 17 mm, altura de 156 mm.

Foram analisados, por meio de modelagens numéricas, diâmetros internos de 185, 250, 500 e 1000 mm, danos com diâmetros de 5 e 20 mm, cargas hidráulicas de 2, 12, 22, 42 e 82 m de água sobre a geomembrana. Foi utilizado um solo de fundação com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s. As características da interface foram determinadas segundo a metodologia descrita no item 3.1.1. Foi inserida ao fim da camada de solo uma condição de contorno com pressão na água igual a 0, de modo a possibilitar o fluxo de água através do sistema.

Também foi avaliada a influência da variação do diâmetro do cilindro para a uma camada de solo com 5 cm de espessura, como mostra a Figura 3.15. Foi considerada uma camada de 1 cm de areia ( $k_{areia} = 10^{-3}$  m/s) abaixo da camada de argila, diâmetro do cilindro variando em 185, 250 e 500 mm.

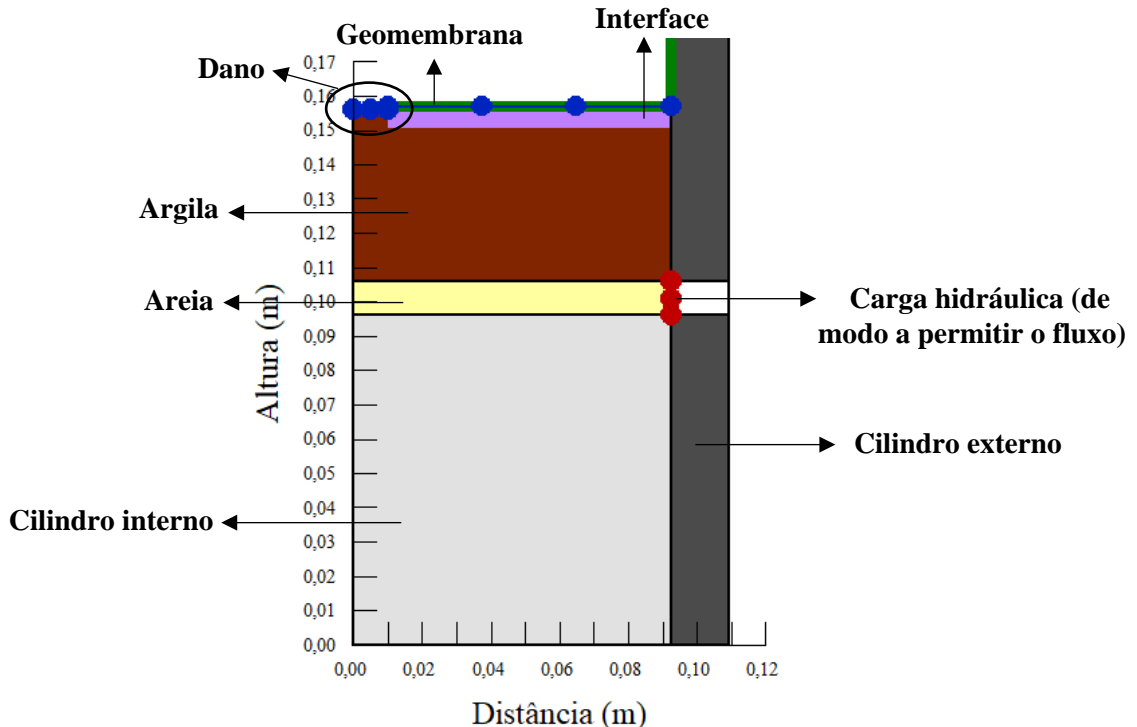


Figura 3.15 - Modelagem numérica que simula uma barreira com uma camada de argila de 5 cm de espessura.



### **3.7 Análise numérica com base no estudo de Cardona (2013)**

Cardona (2013) analisou em seu estudo vazamentos através de danos lineares provocados por estilete e formão para madeira, com dimensões de 5, 20 e 50 mm. Foram avaliadas pressões de 20, 100, 200, 400 e 800 kPa sobre a geomembrana. Como Cardona (2013) utilizou o mesmo equipamento da análise experimental desta pesquisa, foi usada a mesma geometria das modelagens numéricas apresentadas no item 3.6.2.

A partir da divisão dos valores de volume total de água medido em cada ensaio pelo tempo de realização do ensaio, obteve-se os valores de vazão usados na retro-análise. Para cada ensaio, foi possível obter as vazões referentes as cargas hidráulicas de 2, 12, 22, 42 e 82 m de água sobre a geomembrana. O diâmetro do dano foi variado em 1, 2,5, 5, 10, 15, 20, 50 mm, deste modo, foi possível determinar quais os valores de permeabilidade ao longo do plano necessários para gerar os mesmos valores de vazão obtidos pela autora. Apesar da espessura da interface exercer influência nos vazamentos, optou-se por fixar essa variável, de modo a avaliar a influência da permeabilidade ao longo do plano e o diâmetro do dano. Foram adotadas nas modelagens numéricas interfaces com espessura a mínima (0,02 mm), conforme Giroud & Bonaparte (1989b).

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio das modelagens numéricas, solução analítica, equações empíricas e ensaio laboratorial.

Em relação as modelagens com barreiras compostas por geomembrana e solo, foi verificado que, a partir de certos valores, as dimensões da massa de solo localizada abaixo da geomembrana deixam de ter influências relevantes nos resultados. Ou seja, a partir de um certo ponto, mesmo que se aumente a massa de solo, os resultados obtidos na modelagem não são significativamente alterados.

### 4.1 Análise numérica para a condição de barreira composta por geomembrana e solo

#### 4.1.1 Influência da dimensão da camada de solo

As Figuras 4.1(a), 4.1(b) e 4.1(c) mostram os resultados em termos de poropressões no solo, referentes a uma modelagem numérica que simula uma barreira composta por geomembrana acima de uma camada de solo com dimensão de 4 m x 1 m, dano circular com diâmetro de 20 mm, carga hidráulica de 10 m e coeficientes de permeabilidade do solo de  $10^{-7}$ ,  $10^{-9}$  e  $10^{-11}$  m/s, respectivamente. Foram realizadas modelagens numéricas com a inserção de uma interface entre geomembrana e solo (as características da interface foram definidas no item 3.1.1), de modo a possibilitar o fluxo horizontal ao longo da interface. As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam os resultados para as dimensões de 20 m x 5 m e 100 m x 50 m, respectivamente. Os resultados são apresentados para toda a camada de solo, dando-se ênfase à região próxima ao dano.

Observa-se a predominância do fluxo horizontal entre a geomembrana e o solo de fundação por meio da concentração das setas que representam o fluxo de água na região entre estes dois materiais. Foi observado que os maiores valores de poropressão estão localizados na região próxima ao dano e que esses valores diminuem com o aumento da profundidade da camada de solo. Este mesmo comportamento foi observado nas demais modelagens numéricas mostradas neste item.

Além disso, foi observado que solos com menores coeficientes de permeabilidade apresentam maiores valores de poropressão na região próxima ao furo para uma mesma

diferença de carga hidráulica total. Isso se deve à maior perda de carga hidráulica no solo para menores valores de coeficiente de permeabilidade.

De forma geral, foi verificado que as modelagens feitas com camadas de solo com dimensões de 4 x 1 m, 20 m x 5 m e 100 m x 50 m apresentaram um comportamento de distribuição de poropressão semelhante. Entretanto, em termos de valores poropressão para uma dada profundidade, as modelagens apresentaram certas diferenças. Provavelmente, estas diferenças nos resultados estão relacionadas ao refinamento da malha usada em cada análise, uma vez que não foi possível utilizar a mesma malha em todas as modelagens deste item (devido a limitações computacionais).

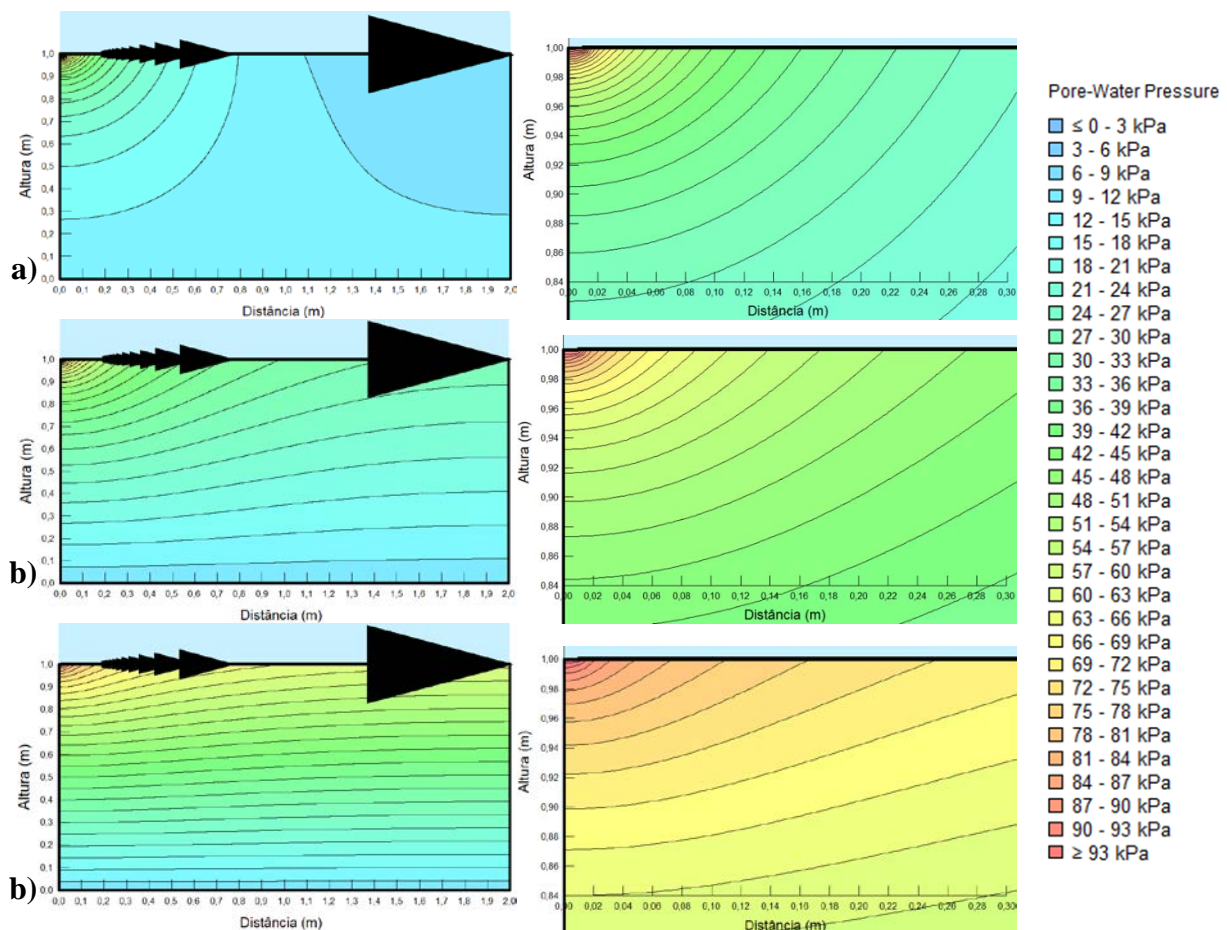


Figura 4.1 - Resultados modelagem numérica (dimensão 4 m x 1 m) para todo o modelo e na região próxima ao dano, onde: a) representa uma barreira composta por geomembrana e solo com  $k_s = 10^{-7}$  m/s, b)  $k_s = 10^{-9}$  m/s, c)  $k_s = 10^{-11}$  m/s.

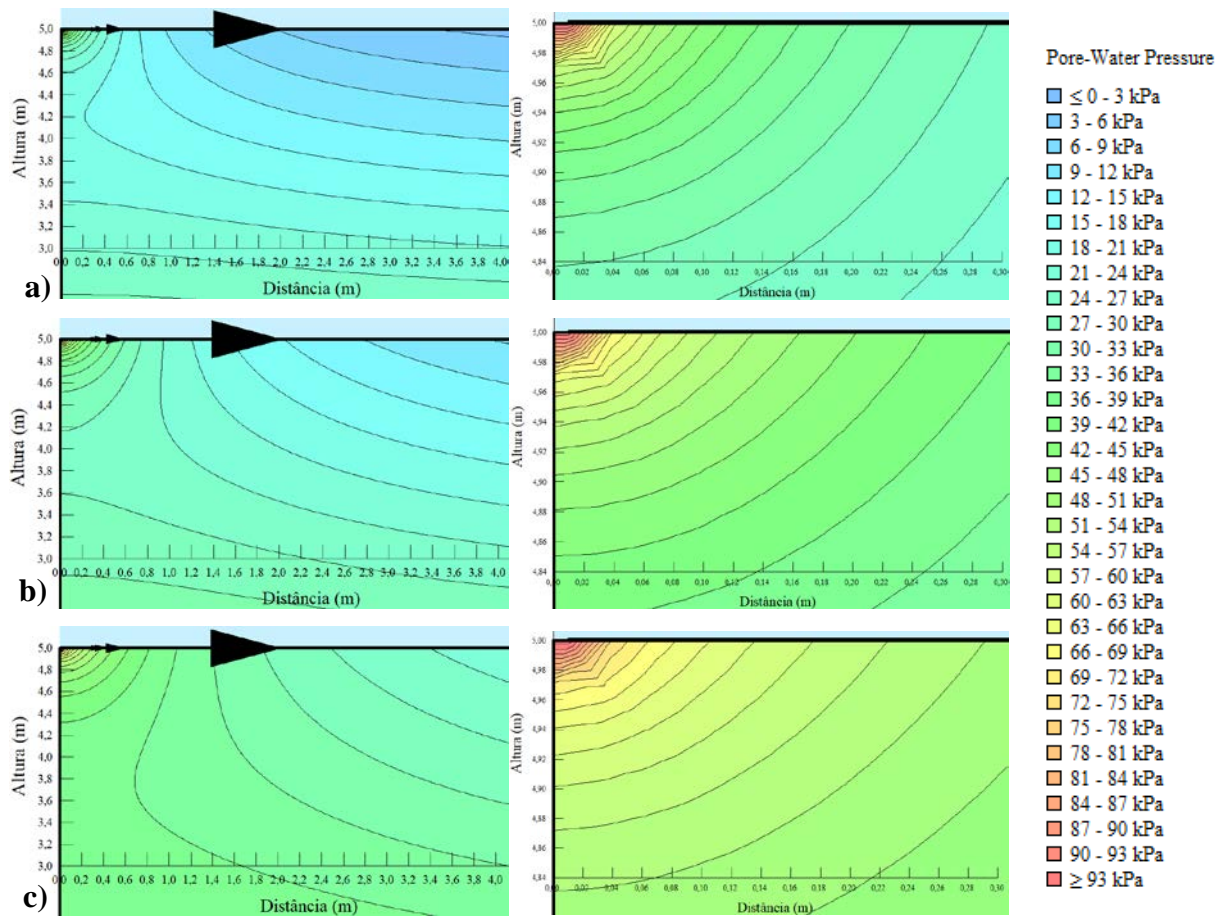


Figura 4.2 - Resultados modelagem numérica (dimensão 20 m x 5 m) para todo o modelo e na região próxima ao dano, onde: a) representa uma barreira composta por geomembrana e solo com  $k_s = 10^{-7}$  m/s, b)  $k_s = 10^{-9}$  m/s, c)  $k_s = 10^{-11}$  m/s.

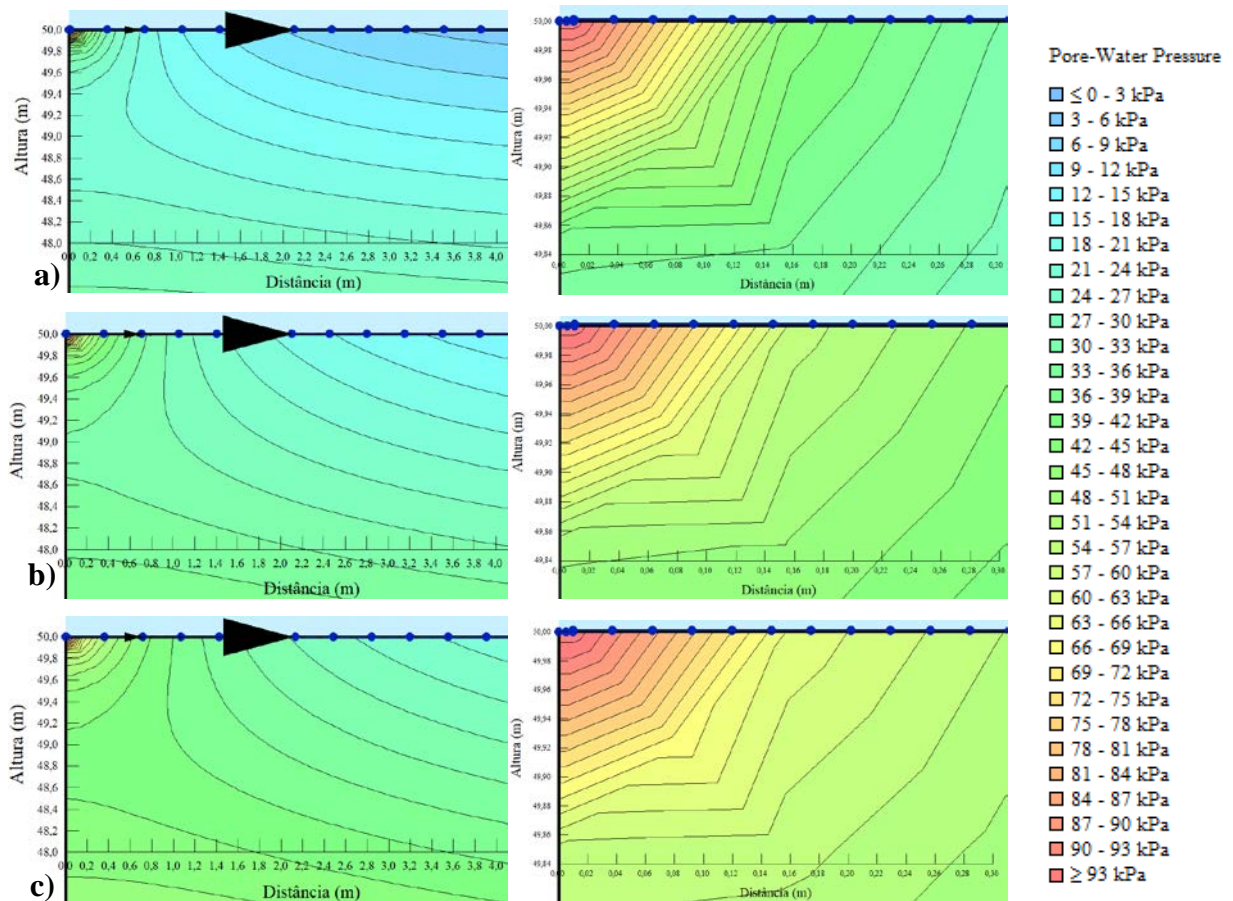


Figura 4.3 - Resultados modelagem numérica (dimensão 100 m x 50 m) para todo o modelo e na região próxima ao dano, onde: a) representa uma barreira composta por geomembrana e solo com  $k_s = 10^{-7}$  m/s, b)  $k_s = 10^{-9}$  m/s, c)  $k_s = 10^{-11}$  m/s.

Os resultados das modelagens numéricas em termos de vazões referentes à influência da dimensão da camada de solo (4 m x 1 m, 20 m x 5 m e 100 m x 50 m) e do coeficiente de permeabilidade do solo ( $10^{-7}$ ,  $10^{-9}$  e  $10^{-11}$  m/s) nos vazamentos através de danos em geomembranas são mostrados na Figura 4.4.

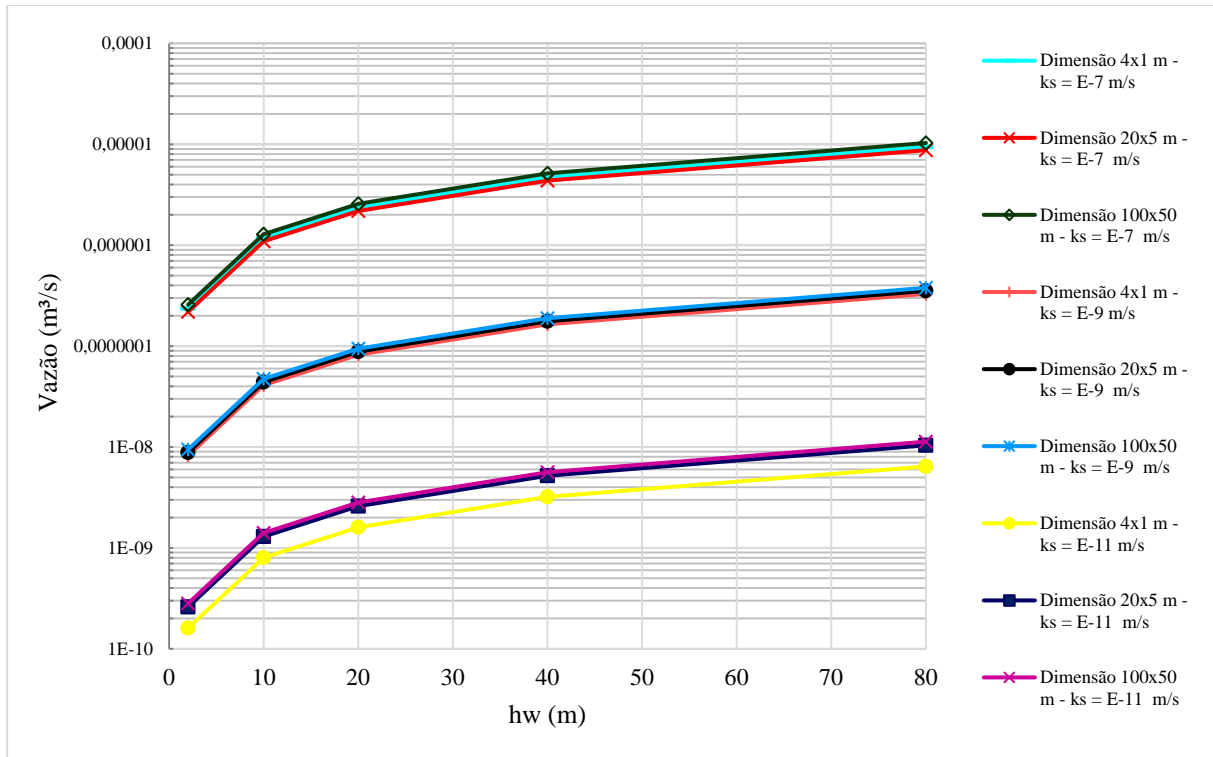


Figura 4.4 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão, referentes a variação da dimensão da camada de solo e coeficiente de permeabilidade do solo.

Observa-se que a variação da vazão devido ao aumento da dimensão da camada de solo é baixa para ambos os coeficientes de permeabilidade do solo. Como os resultados para as três dimensões de solo se compararam bem, principalmente para a camada com dimensão intermediária, optou-se em utilizar camadas de solo com dimensão de 20 m x 5 m

#### 4.1.2 Influência do tipo de solo subjacente à geomembrana

A Figura 4.5 mostra os resultados da modelagem numérica em termos de propressão no solo referentes à condição de barreira com solo argiloso com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s, sem interface e carga hidráulica de 10 m de água sobre a geomembrana, onde se apresentam os vetores de velocidade do fluxo (Figura 4.5(a)) e as linhas que representam o caminho percorrido pelo fluxo (Figura 4.5(b)). Observa-se que as setas maiores estão localizadas nas regiões próximas ao dano, o que indica maior intensidade de vazamento nessa região. A intensidade do fluxo é reduzida de acordo com o aumento da profundidade. A rede de fluxo mostrada na Figura 4.5(b) se assemelha com o fluxo radial através de dano em geomembrana mostrado na Figura 4.6, segundo Giroud & Bonaparte (1989b).



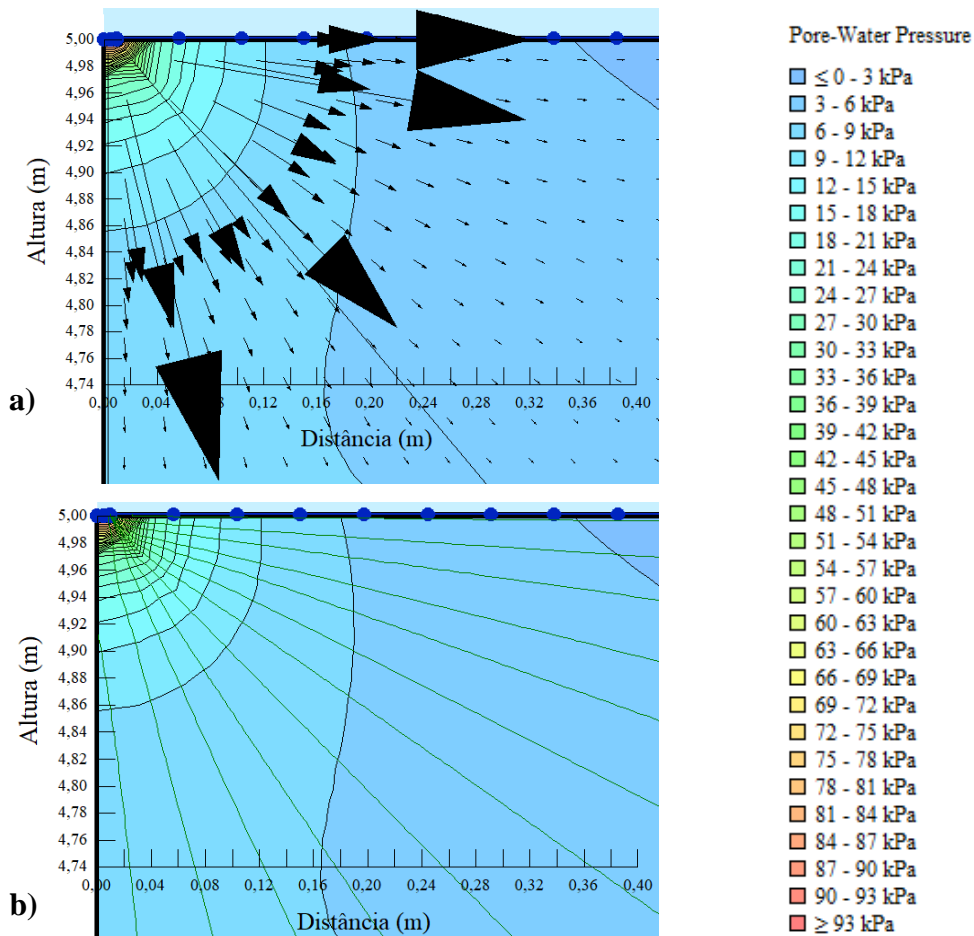


Figura 4.5 - Resultados modelagem numérica para a condição sem interface e solo argiloso com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s: (a) vetores de velocidade do fluxo e (b) caminho percorrido pelo fluxo.

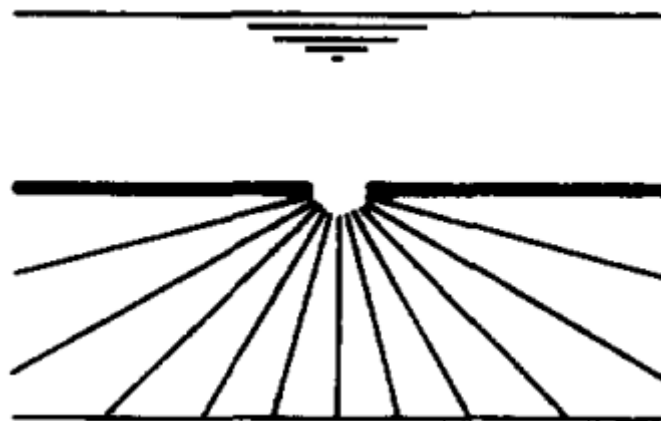


Figura 4.6 - Fluxo através de uma barreira devido a um defeito na geomembrana: fluxo radial fornecendo um limite superior da taxa de vazamento (Giroud & Bonaparte, 1989b).

A Figura 4.7 mostra os resultados da modelagem numérica em termos de poropressão no solo referentes à condição de barreira com solo argiloso com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s, com interface que simula o espaço entre solo e geomembrana e carga hidráulica de 10 m de água sobre a geomembrana. Observa-se a predominância do fluxo horizontal entre geomembrana e solo, visto que as setas que representam o fluxo estão localizadas na região entre os dois materiais. Isso mostra a marcante influência de um meio permeável entre a geomembrana e solo subjacente. Também foi observado que a inserção da interface altera o comportamento das linhas de fluxo, fazendo com que o líquido escoe horizontalmente entre geomembrana e solo e por fim infiltre no solo. Desta forma, a rede de fluxo mostrada na Figura 4.7 se assemelha com o fluxo através de uma barreira devido a um defeito na geomembrana (Figura 4.8), conforme Giroud & Bonaparte (1989b).

De forma geral, percebe-se que as modelagens sem a interface entre geomembrana e solo não representam bem o comportamento do fluxo em barreiras compostas, uma vez que não conseguem simular o fluxo horizontal entre a geomembrana e o solo. Já as modelagens com a inserção de uma interface entre solo e geomembrana conseguem simular o fluxo horizontal de forma adequada.

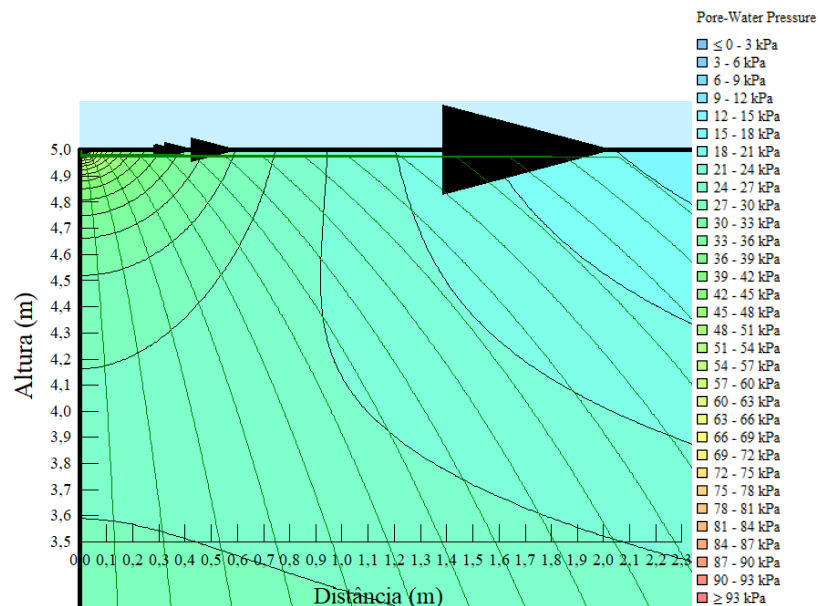


Figura 4.7 - Resultados modelagem numérica para a condição com interface e solo argiloso com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s.



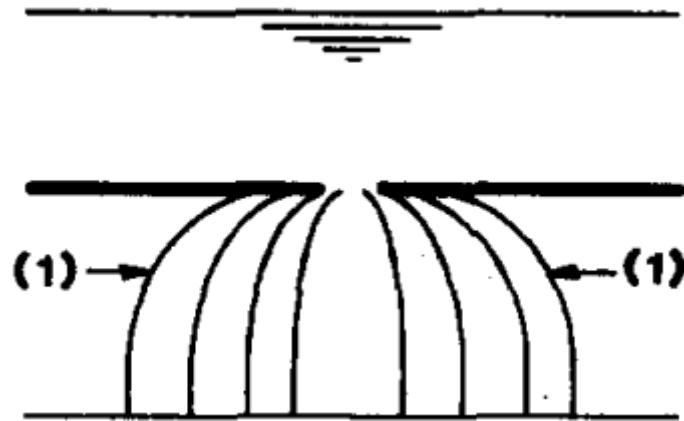


Figura 4.8 - Fluxo através de uma barreira devido a um defeito na geomembrana: solução correta (Giroud & Bonaparte, 1989b).

Os resultados das modelagens numéricas em termos de vazão referentes à influência do tipo de solo de fundação nos vazamentos através de danos em geomembrana são mostrados na Figura 4.9. Observa-se que as curvas referentes à condição de barreira com transmissividade de interface tendendo à zero e a condição sem interface encontram-se sobrepostas para ambas os tipos de solo (areia e argila). Já as curvas referentes à condição de barreira (argila) com transmissividade de interface calculada apresentam valores de vazão superiores que as demais condições. Ou seja, para se simular o fluxo através de danos em geomembranas de forma correta é necessário introduzir uma interface que permita o fluxo horizontal entre a geomembrana e solo de fundação.

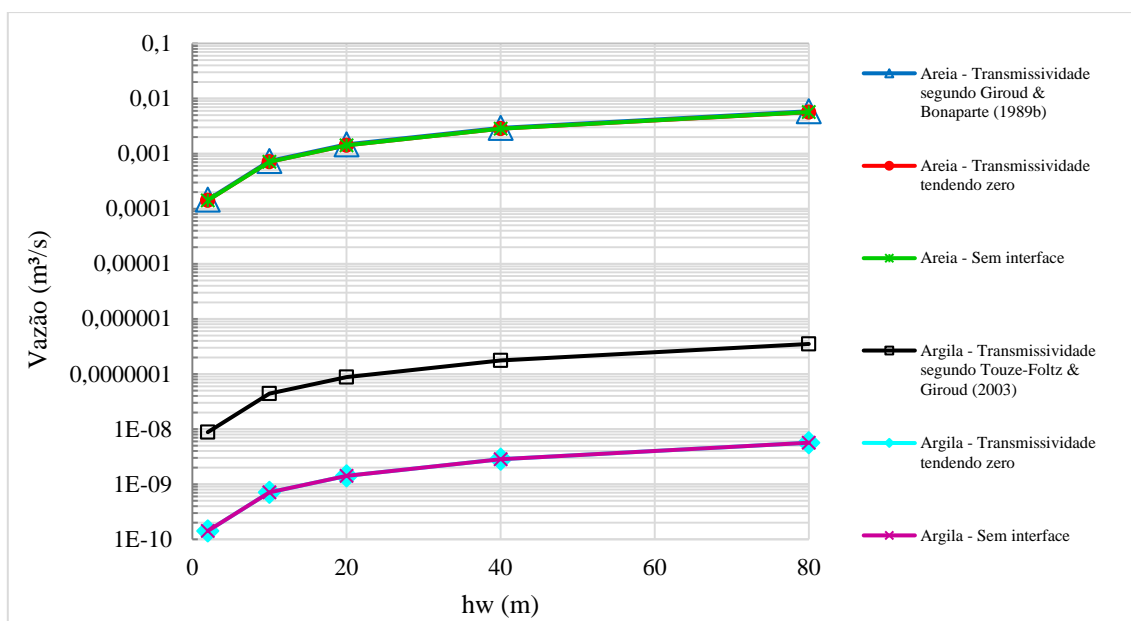


Figura 4.9 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão, referentes a influência do tipo de solo nos vazamentos através de danos em geomembrana.

O fluxo horizontal na interface entre geomembrana e solo apresenta maior influência nos vazamentos para as modelagens realizadas com solo argiloso. O fluxo horizontal ocorre quando o solo subjacente à geomembrana não tem a capacidade de absorver o vazamento que atravessa o dano, por isso, é mais fácil o fluxo ocorrer lateralmente entre a geomembrana e o solo. Ao se compararem os resultados de vazão referentes às condições de barreira com solo argiloso, nota-se que a contribuição do fluxo horizontal na interface entre a geomembrana e o solo nos vazamentos através dos danos é extremamente relevante, visto que as modelagens com a inserção de uma interface apresentam valores de vazão maiores (aproximadamente duas ordens de grandeza) que os valores de vazão para as modelagens sem interface.

#### 4.1.3 Influência da carga hidráulica sobre a geomembrana

Este tópico é destinado a avaliar a influência da carga hidráulica sobre a geomembrana na intensidade dos vazamentos e na distribuição da poropressão no solo. Foram consideradas análises numéricas com danos de 20 mm de diâmetro em geomembranas, solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s e interface com características definidas no item 3.1.1. As Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 mostram os resultados das modelagens numéricas em termos de poropressão no solo para 2, 10, 20, 40 e 80 m de água sobre a geomembrana,

respectivamente, onde se representam os resultados para uma maior profundidade da camada de solo (2 m) e os resultados dando-se ênfase na região próxima ao dano.

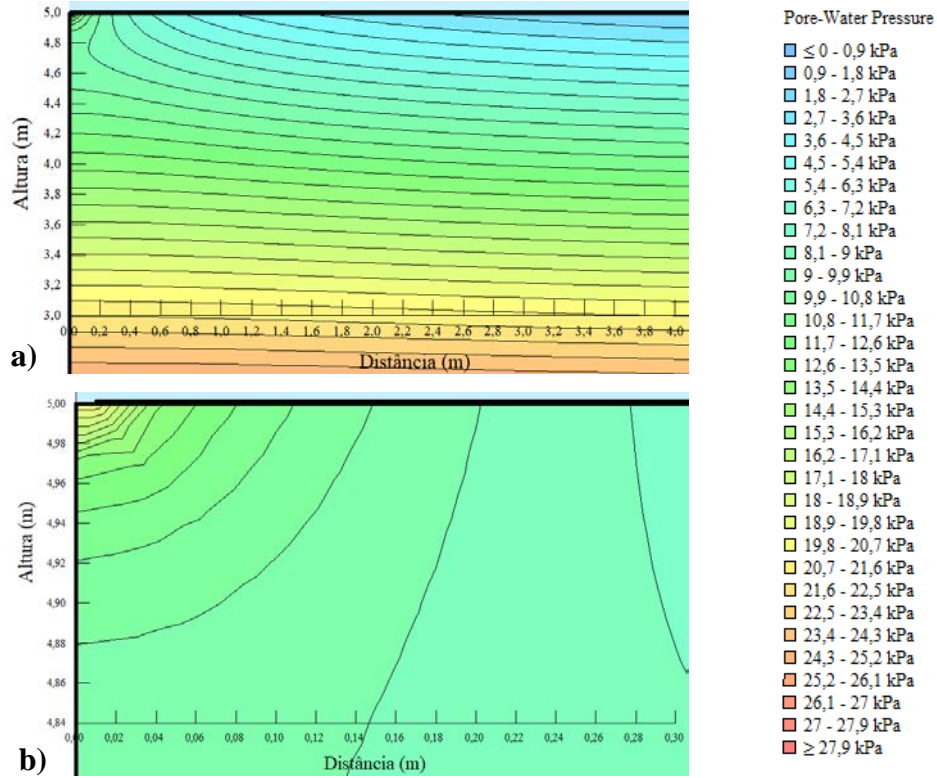


Figura 4.10 - Poropressão no solo para 2 m de água sobre a geomembrana: (a) profundidade de 2 m e (b) região próxima ao dano.

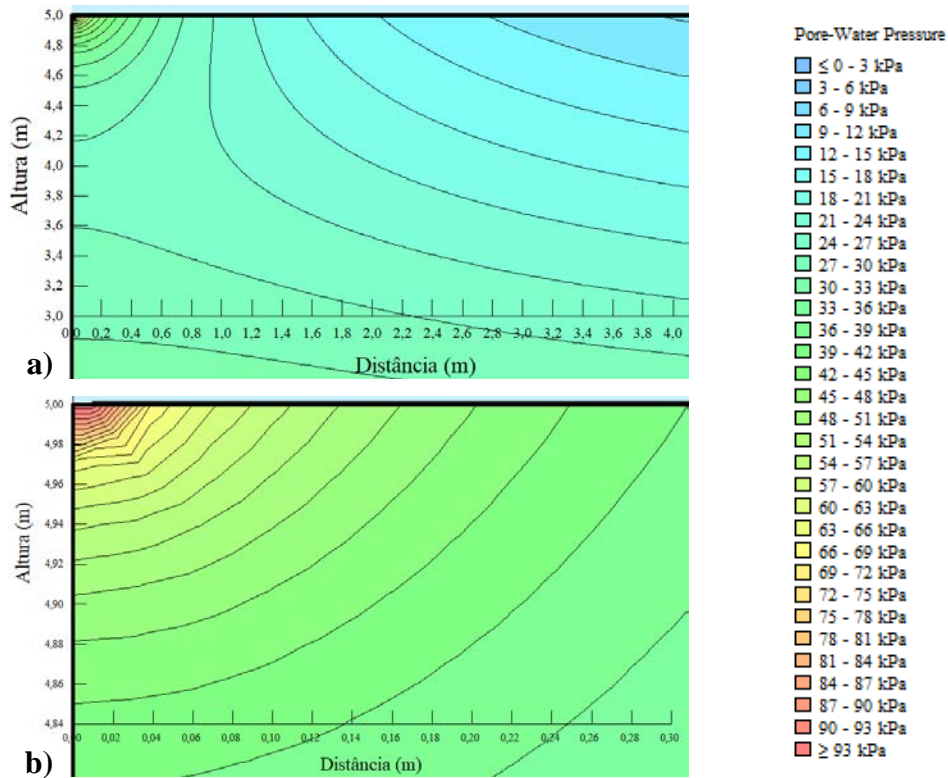


Figura 4.11 - Poropressão no solo para 10 m de água sobre a geomembrana: (a) profundidade de 2 m e (b) região próxima ao dano.

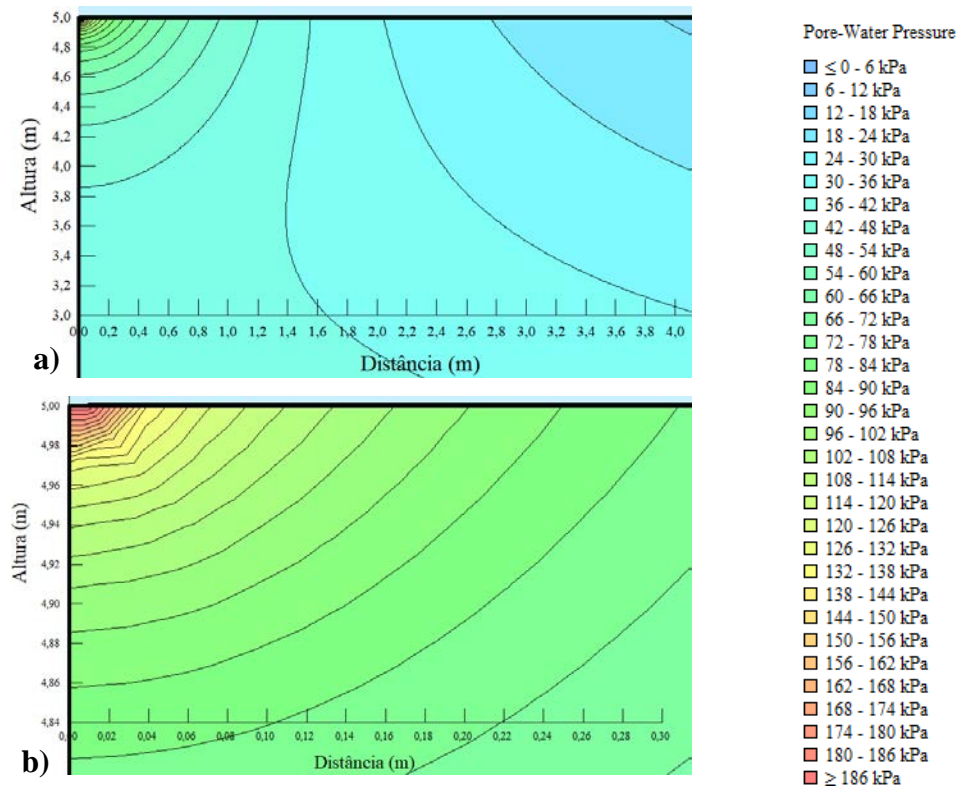


Figura 4.12 - Poropressão no solo para 20 m de água sobre a geomembrana: (a) camada de 2 m e (b) região próxima ao dano.

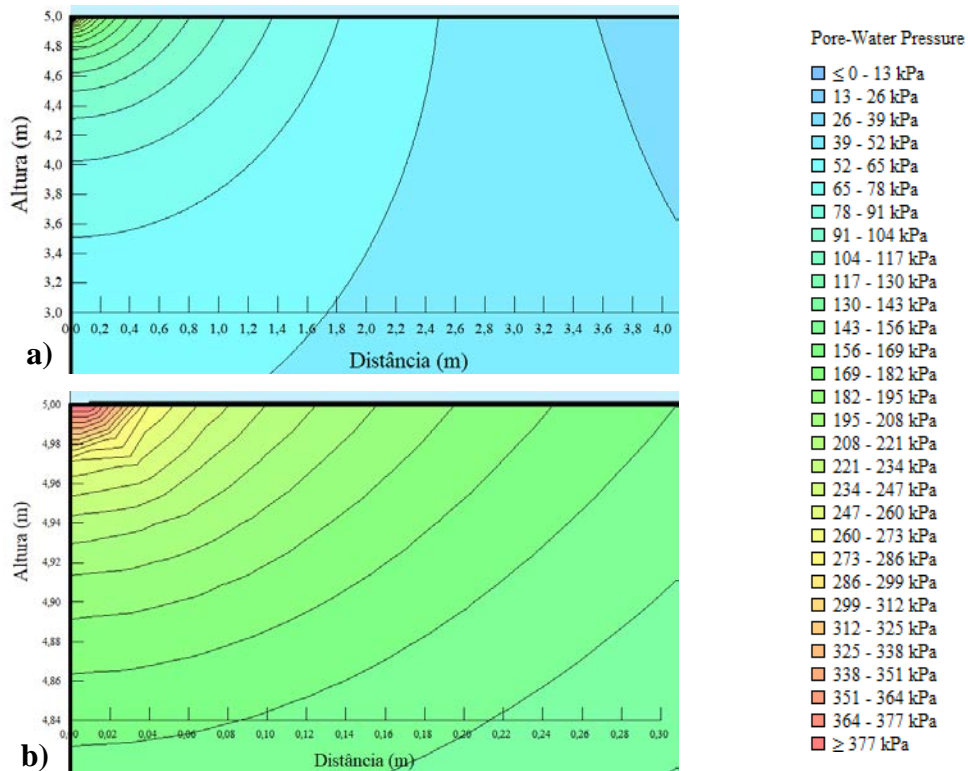


Figura 4.13 - Poropressão no solo para 40 m de água sobre a geomembrana: (a) camada de 2 m e (b) região próxima ao dano.

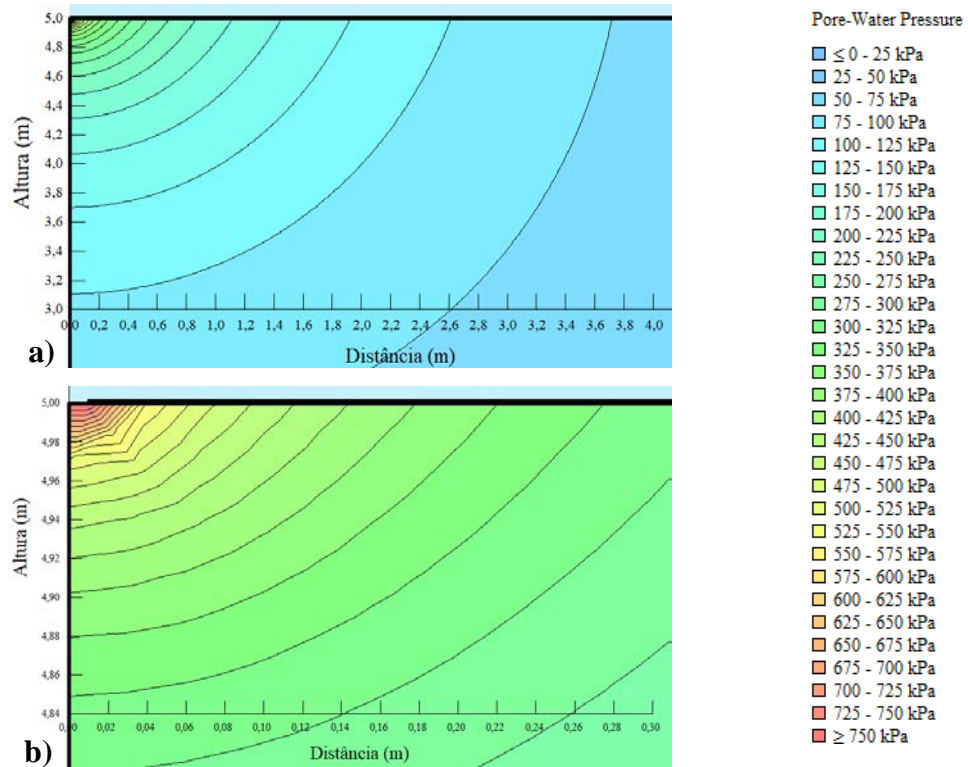


Figura 4.14 - Poropressão no solo para 80 m de água sobre a geomembrana: (a) camada de 2 m e (b) região próxima ao dano.

Como esperado, observa-se que, as cargas hidráulicas de 2, 10, 20, 40 e 80 m de água sobre a geomembrana exercem influência na distribuição das poropressões no solo, sendo que as maiores poropressões no solo são verificadas nas regiões próximas aos danos. Ou seja, as poropressões no solo provocada pela altura de água sobre a geomembrana vão sendo dissipadas com a profundidade. Também foi observado que, maiores alturas de água sobre a geomembrana geram poropressões no solo mais elevadas. A presença da interface também influencia de forma marcante o fluxo e a distribuição de perdas de poropressão ao longo da profundidade.

#### 4.1.4 Influência do diâmetro do dano

Este item é destinado a análise da influência do diâmetro do dano nas análises numéricas que simulam vazamentos através de geomembranas. Foi investigada a influência do tipo de solo subjacente à geomembrana (areia e argila), bem como a carga hidráulica sobre a geomembrana. As Figuras 4.15(a), 4.15(b) e 4.15(c) mostram os resultados em termos de distribuição de poropressão no solo referentes à carga hidráulica de 10 m de água sobre a geomembrana, para danos com diâmetros de 5, 20 e 100 mm, respectivamente. Foi considerado um solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s e uma interface (entre geomembrana e solo) com características apresentadas no item 3.1.1. Observa-se que o aumento do diâmetro do dano provoca um aumento na poropressão ao longo da profundidade, visto que ocorre a expansão das isolinhas de poropressão com o aumento do diâmetro do dano. A Figura 4.16 mostra os resultados em termos de vazão referentes às modelagens numéricas que analisaram a influência do diâmetro no dano em barreiras compostas por geomembrana e argila. Observa-se que os valores de vazão tendem a aumentar com o aumento no diâmetro do dano. O aumento do diâmetro do furo de 5 mm para 10 mm (2 vezes), 20, mm (4 vezes), 50 mm (10 vezes) e 100 mm (20 vezes), aumenta a vazão em cerca de 4,7, 13,1, 32,8 e 56,3 %, respectivamente. Este aumento percentual da vazão é verificado para todas as cargas hidráulicas sobre a geomembrana.



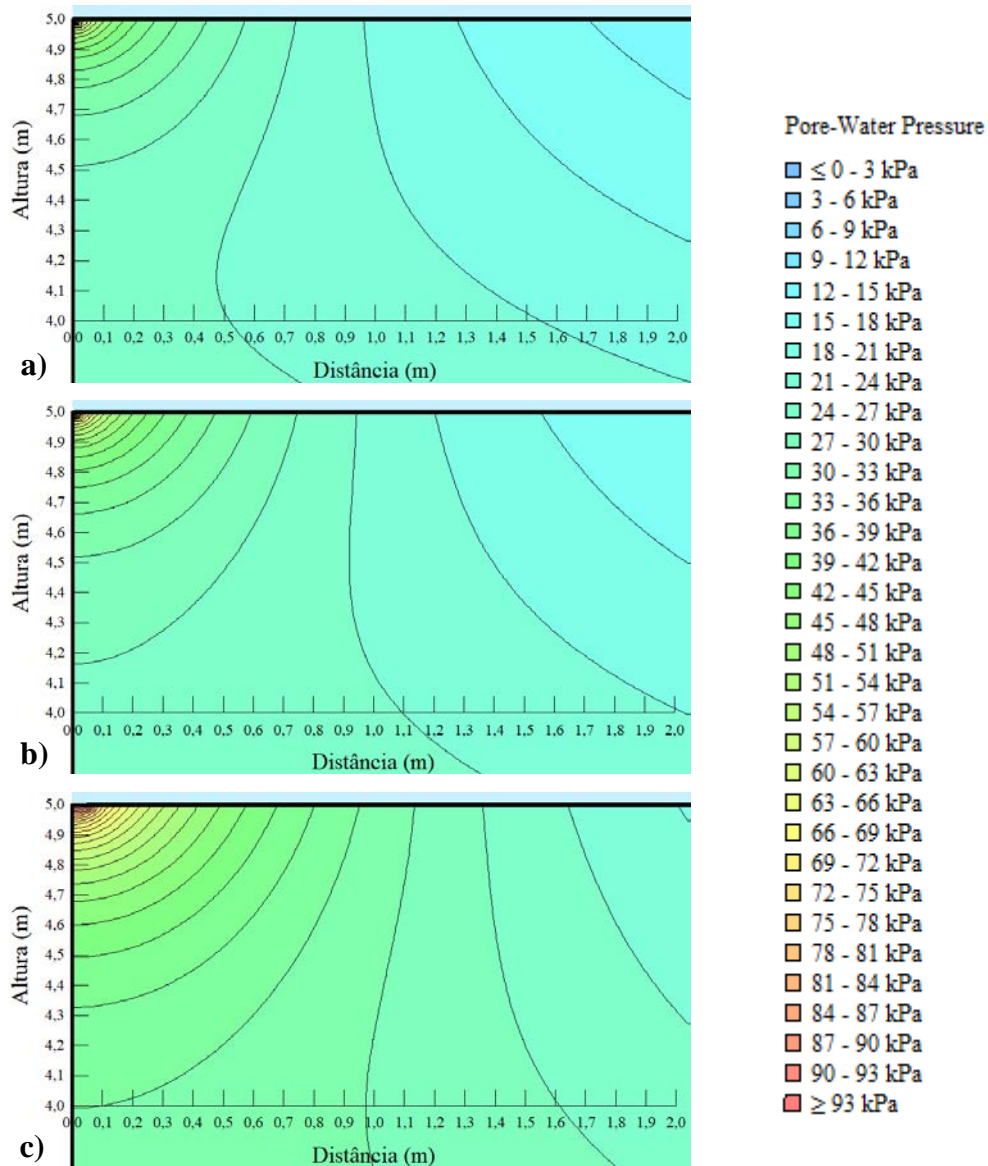


Figura 4.15 - Poropressões no solo (argila) para 10 m de água sobre a geomembrana: (a) dano com 5 mm de diâmetro, (b) dano com 20 mm de diâmetro e (c) dano com 100 mm de diâmetro.

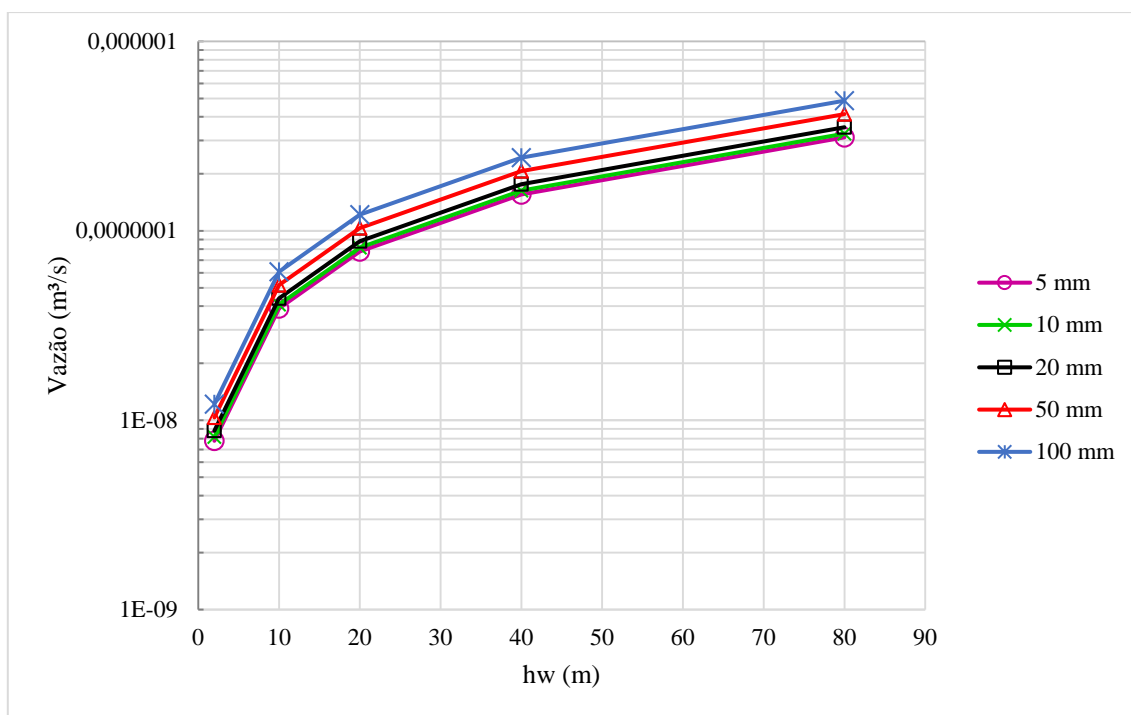


Figura 4.16 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão referentes à influência da variação do diâmetro do dano em barreiras compostas por geomembrana e solo argiloso.

As Figura 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 mostram os resultados em termos de vazão obtidos por modelagens numéricas e soluções empíricas referentes a danos com 5, 20, 50 e 100 mm de diâmetro, respectivamente. De forma geral, foi observado que os resultados obtidos pelo SEEP/W se comparam bem com os resultados obtidos pelas Equações 2.9, 2.10 e 2.12, propostas por Giroud & Bonaparte (1989b), Rowe (1998) e Giroud et al. (1989). Dentre estas, a Equação 2.12 foi a que apresentou resultados mais próximos dos resultados numéricos. Isso se deve ao fato desta equação considerar o coeficiente de fator de contato entre solo e geomembrana.



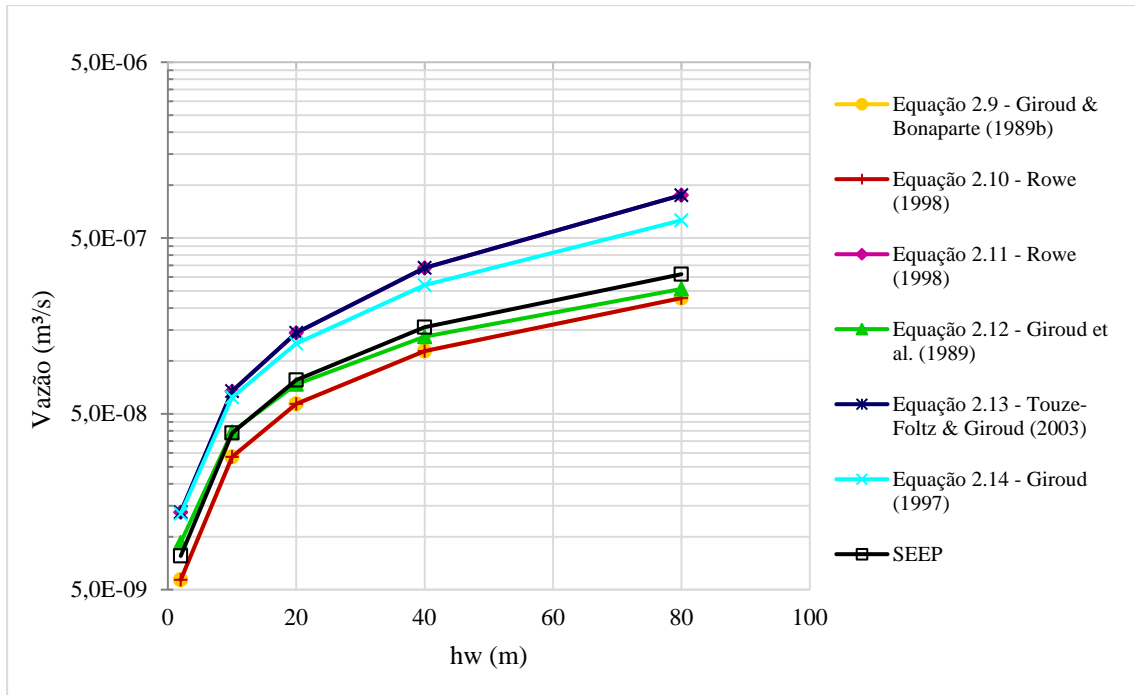


Figura 4.17 - Comparação resultados em termos de vazão obtidos por modelagem numérica e soluções empíricas para danos com 5 mm de diâmetro.

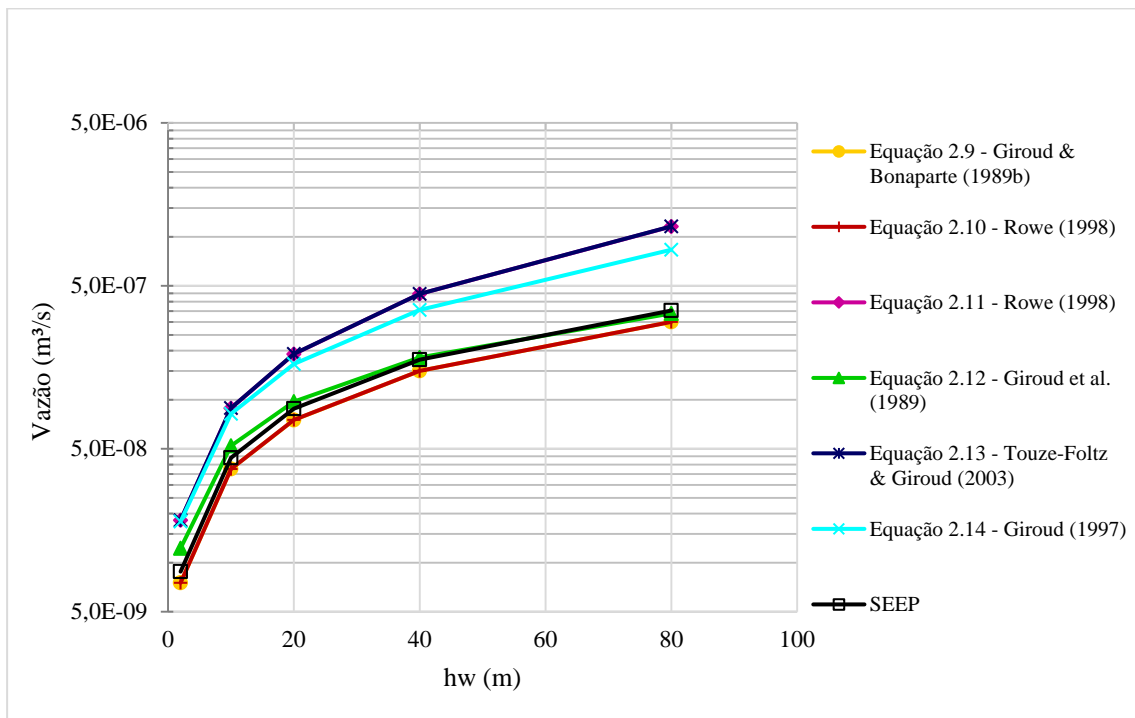


Figura 4.18 - Comparação resultados em termos de vazão obtidos por modelagem numérica e soluções empíricas para danos com 20 mm de diâmetro.

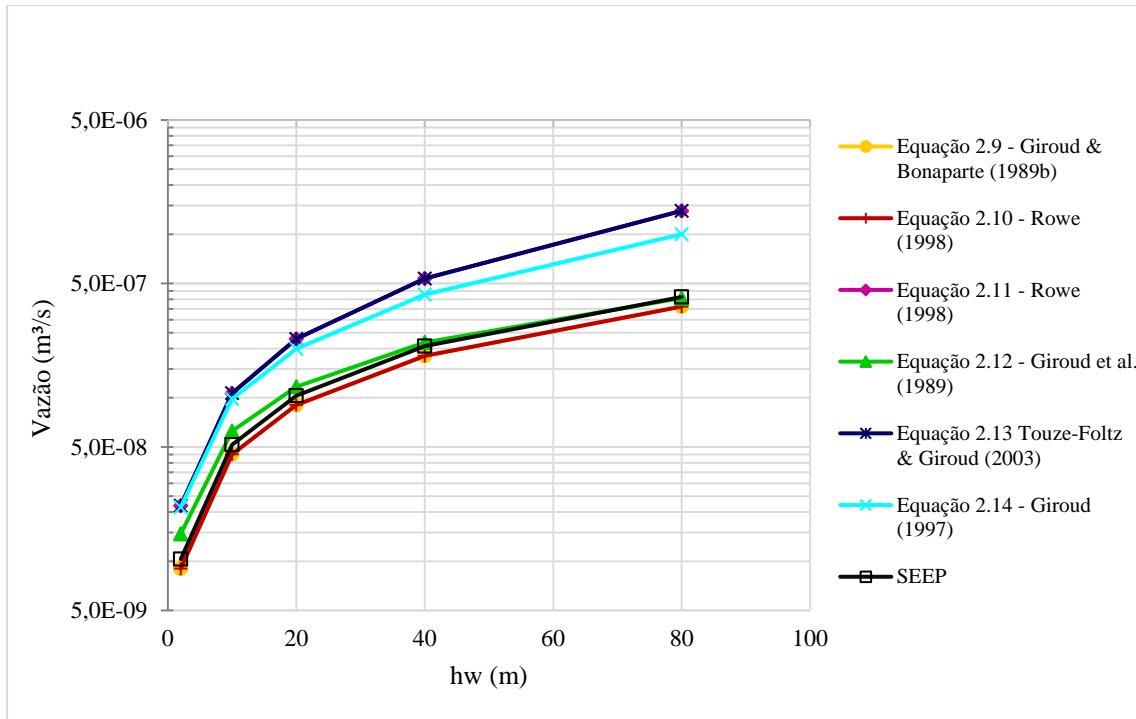


Figura 4.19 - Comparação resultados em termos de vazão obtidos por modelagem numérica e soluções empíricas para danos com 50 mm de diâmetro

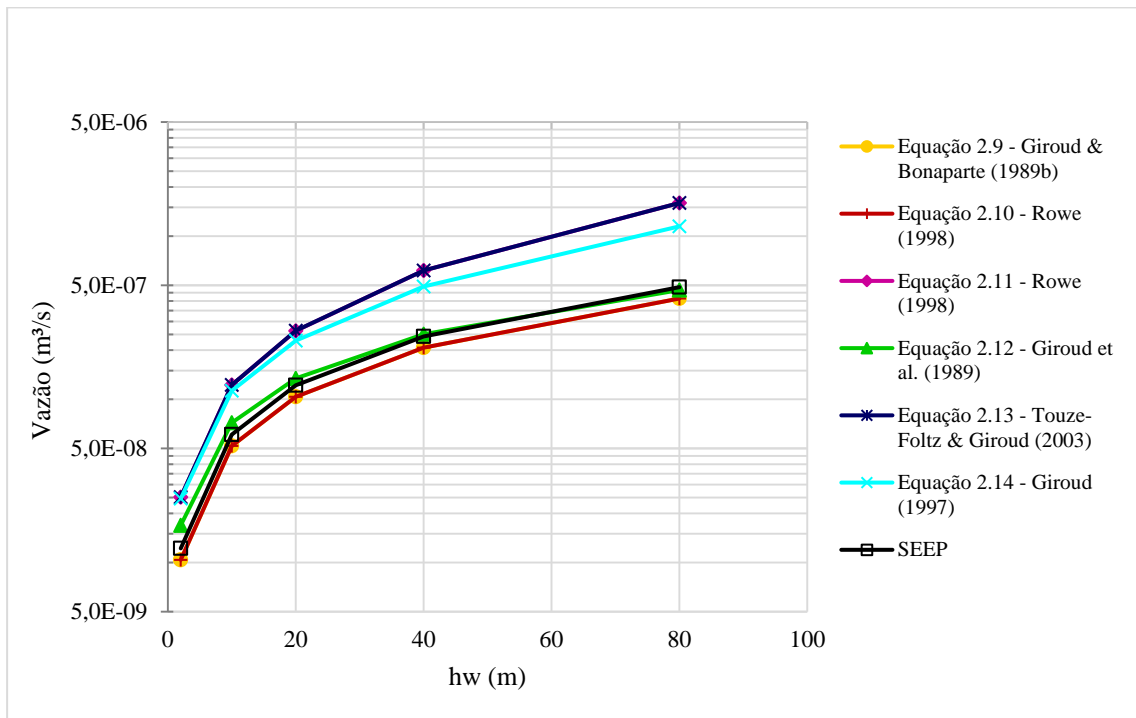


Figura 4.20 - Comparação resultados em termos de vazão obtidos por modelagem numérica e soluções empíricas para danos com 100 mm de diâmetro.

A Figura 4.21 mostra os aumentos (%) na intensidade dos vazamentos devido ao aumento do diâmetro do dano na geomembrana, referentes as modelagens numéricas e Equação empírica 2.12, proposta por Giroud et al. (1989). Observa-se um aumento gradativo da vazão com o aumento do diâmetro do dano, para ambas as análises, porém, percebe-se um aumento mais acentuado nos resultados obtidos pela Equação 2.12.

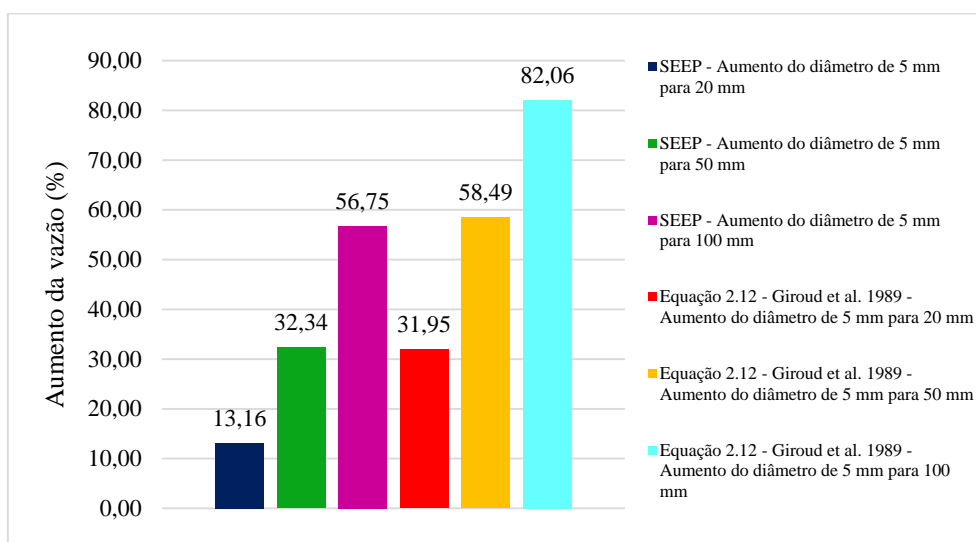


Figura 4.21 - Aumento da vazão com o aumento do diâmetro do dano.

A Figura 4.22 mostra as diferenças relativas entre os resultados obtidos pela Equação 2.12 e os resultados obtidos pelas modelagens numéricas. Mesmo que as equações empíricas considerem danos com diâmetros relativamente pequenos (entre 0,5 e 25 mm), foi verificado que a extensão destas equações (2.9, 2.10 e 2.12) para maiores diâmetros de dano (50 e 100 mm) é viável, uma vez que as diferenças relativas entre os resultados da previsão empírica e os resultados obtidos pelo SEEP/W não são afetadas de forma errônea pelo aumento do diâmetro do dano. Também foi verificado que a extensão das equações cujos resultados se compararam bem com os resultados das modelagens numéricas, para maiores cargas hidráulicas sobre a geomembrana (maiores que 3 m) é viável, pois, as diferenças relativas entre os resultados obtidos pelas equações não são significativamente afetadas pelo aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana.

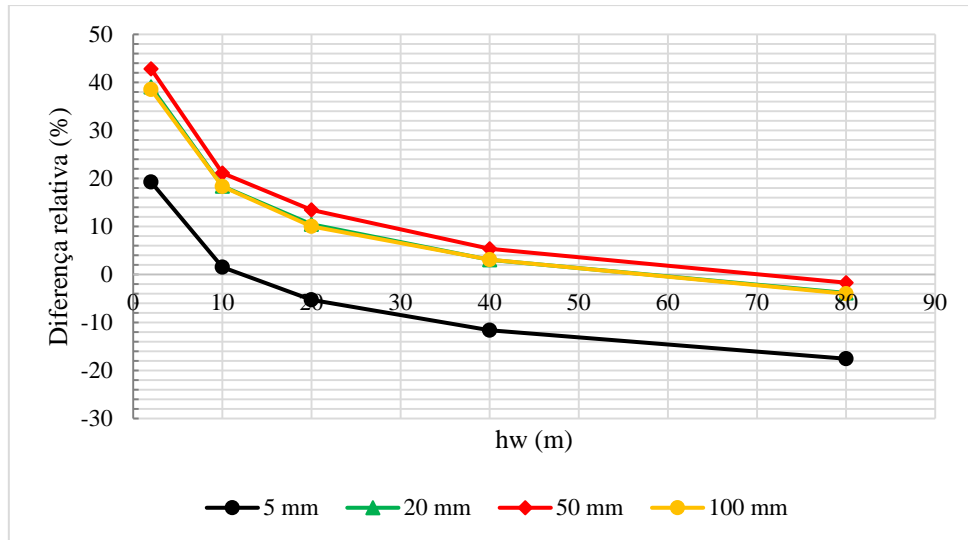


Figura 4.22 - Diferenças relativas entre os resultados obtidos pela Equação 2.12 e modelagens numéricas.

A Figura 4.23 mostra os resultados de vazões das modelagens numéricas que analisaram a influência do diâmetro do dano em barreiras compostas por geomembrana e areia. Para este caso, não foi considerada a inserção de uma interface, visto que o fluxo horizontal de interface geralmente não é significativo em solos mais permeáveis. Como esperado, os valores de vazão tendem a aumentar com o aumento no diâmetro do dano. O aumento no diâmetro do furo de 5 mm para 10 mm (2 vezes), 20 mm (4 vezes), 50 mm (10 vezes) e 100 mm (20 vezes), aumenta o vazamento em cerca de 16,57 %, 53,10 %, 180,35 % e 392,76 %, respectivamente. A variação do diâmetro do dano exerce maior influência na intensidade dos vazamentos para solos arenosos, uma vez que as curvas encontram-se mais distantes umas das outras quando comparadas com as curvas referentes ao solo argiloso. Isso se deve à maior capacidade de passagem de água por danos maiores e maior permeabilidade do solo subjacente.

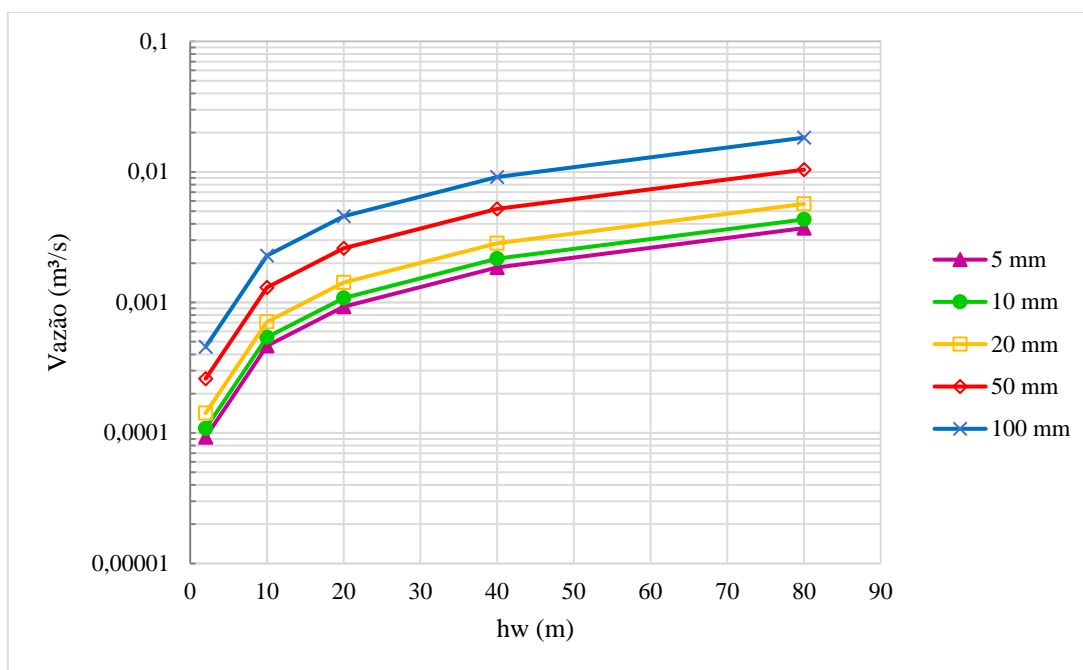


Figura 4.23 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão referentes a influência da variação do diâmetro do dano em barreiras compostas por geomembrana e solo arenoso.

#### 4.1.5 Influência do refinamento da malha do modelo

A Figura 4.24 mostra uma comparação entre os resultados de modelagens numéricas com diferentes refinamentos de malha: (i) malha global aplicada em todo o modelo, (ii) refinamento da malha na interface, geomembrana e dano, (iii) refinamento da malha na interface, geomembrana, dano e uma camada de solo com 6 cm de espessura e (iv) refinamento da malha na interface, geomembrana, dano, camada de solo com 6 cm de espessura, seguida de uma camada de solo com 23 cm de espessura (menos refinada que a camada de 6 cm). Foi considerado um solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s, interface com características descritas no item 3.1.1, dano com 20 mm de diâmetro, cargas hidráulicas de 2, 10, 20, 40 e 80 m de água sobre a geomembrana. Ao se comparar os resultados para as 4 condições citadas acima, foi observado que o refinamento da malha nas regiões mais relevantes do modelo (geomembrana, interface e dano), não afeta os resultados de vazão de forma significativa, uma vez que a diferença máxima entre uma condição e outra foi na ordem de 5 %.

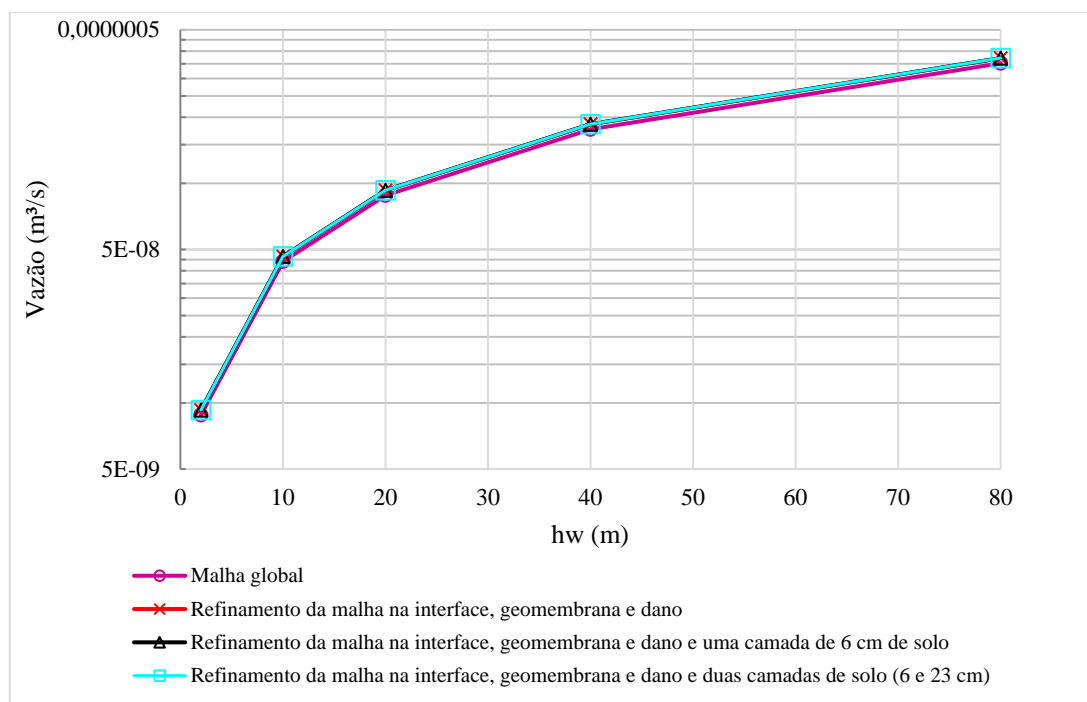


Figura 4.24 - Influência do refinamento da malha do modelo nos resultados de vazão através de danos em geomembrana.

## 4.2 Comparação entre modelagem numérica, equações analíticas e equações empíricas para a condição sem geotêxtil

Este item apresenta comparações entre os resultados obtidos pela solução analítica, equações empíricas e modelagens numéricas para as condições de contato entre o solo e a geomembrana excelente, bom e ruim.

### 4.2.1 Excelente contato entre solo e geomembrana

As Figuras 4.25 e 4.26 mostram comparações entre os resultados obtidos pela previsão analítica, equações empíricas e modelagem numérica simulando uma barreira composta por geomembrana acima de uma argila com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s, interface simulando a condição de contato excelente entre solo e geomembrana (condição de menor fluxo horizontal de interface), cuja transmissividade foi calculada por meio da Equação 2.3, proposta por Touze-Foltz & Giroud (2003), dano com diâmetro de 2,5 e 20 mm, respectivamente. Observa-se que para danos de 2,5 mm os resultados obtidos pelas modelagens numéricas e pela equação 2.12 se comparam muito bem. Já para danos com 20 mm de diâmetro, os resultados

referentes as modelagens numéricas se comparam bem com os resultados obtidos pelas equações 2.9 e 2.10. Mesmo que as equações empíricas e analítica tenham sido desenvolvidas para baixas cargas hidráulicas sobre a geomembrana, foi verificado que a extensão destas equações para maiores cargas hidráulicas é viável, uma vez que as diferenças relativas entre os resultados das previsões empíricas e analítica e os resultados obtidos pelo SEEP/W não são afetadas de forma significativa pelo aumento da carga hidráulica. Este comportamento também foi observado nas demais condições de contato mostradas neste item.

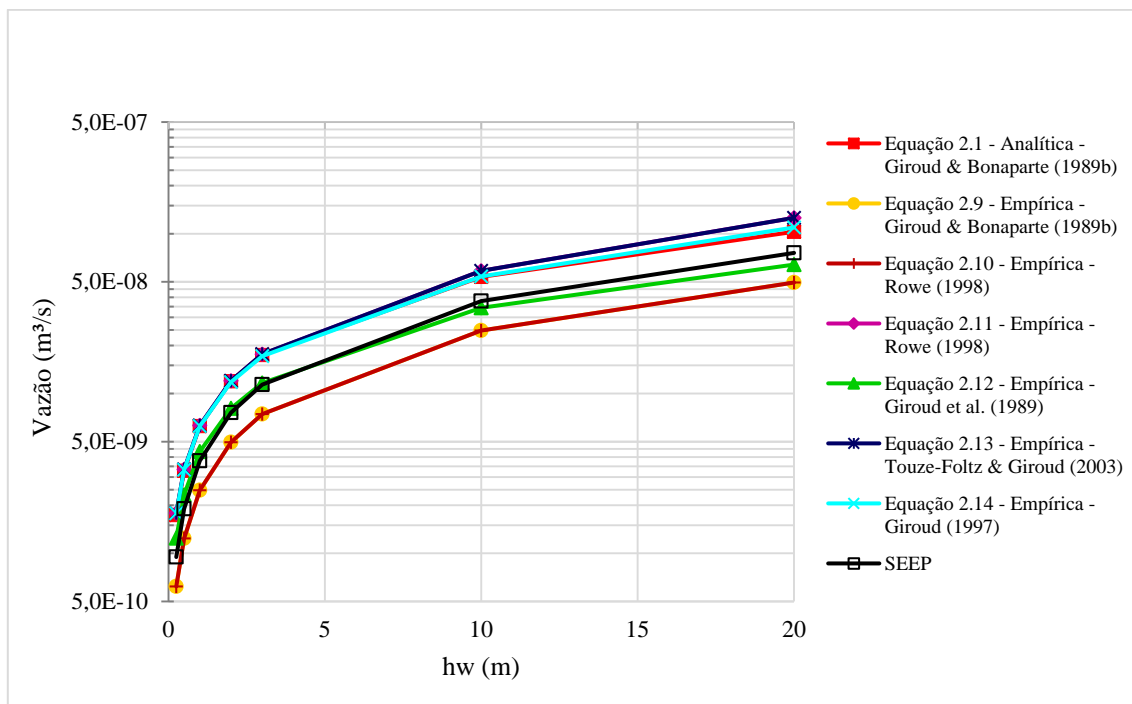


Figura 4.25 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de excelente contato entre geomembrana e solo e dano com 2,5 mm de diâmetro.

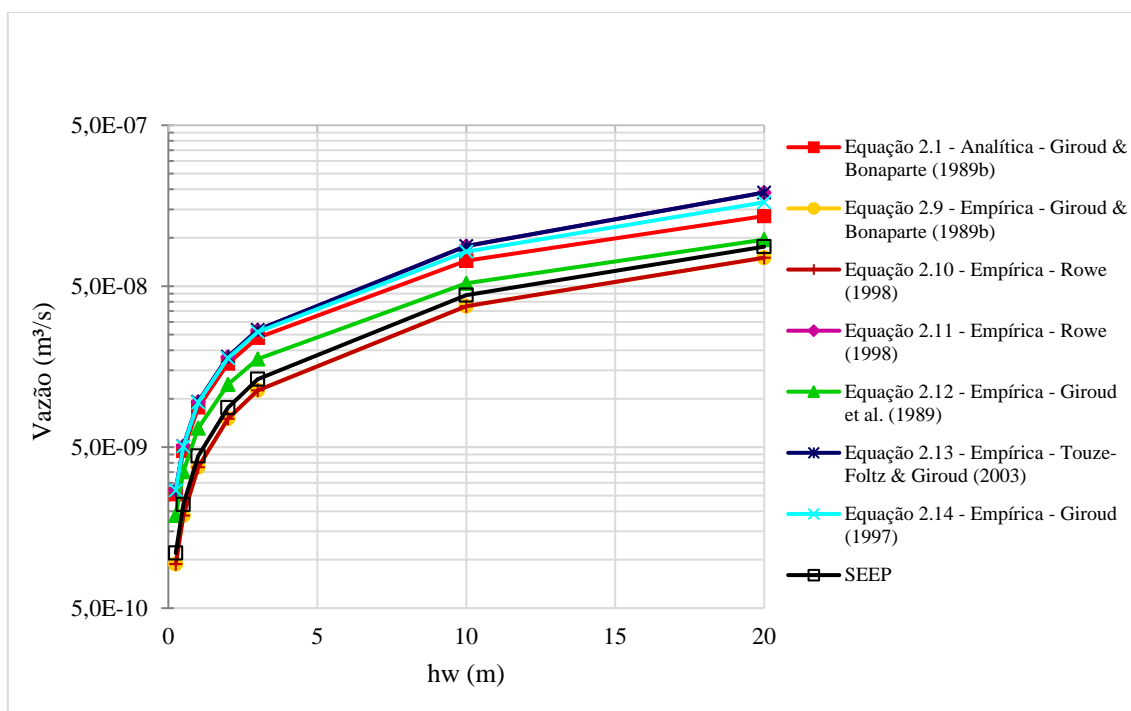


Figura 4.26 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de excelente contato entre geomembrana e solo e dano com 20 mm de diâmetro.

Mesmo que as equações utilizadas para a determinação dos valores de transmissividade de interface usados nas modelagens numéricas sejam desenvolvidas para baixas cargas hidráulicas sobre a geomembrana, observa-se uma coerência no padrão dos resultados para maiores cargas. Ou seja, mesmo que as equações para cálculo da transmissividade de interface apresentem limitações, sua utilização para casos de maiores cargas hidráulicas sobre a geomembrana mostrou-se viável. Este comportamento também foi observado nas demais condições de contato mostradas neste item.

As diferenças significativas entre os resultados da previsão analítica e modelagem numérica podem estar relacionadas a diferença entre as metodologias empregadas. A solução analítica não leva em consideração a espessura da interface entre solo e geomembrana, apenas a transmissividade da interface, coeficiente de permeabilidade do solo, diâmetro do dano, raio da área molhada e carga hidráulica sobre a geomembrana. A modelagem numérica faz a consideração de todas as características relevantes do sistema de barreira como, por exemplo, a espessura da interface e a permeabilidade ao longo do plano da interface. Deste modo, a modelagem numérica permite uma simulação mais realista do problema.



#### 4.2.2 Contato bom entre solo e geomembrana

As Figuras 4.27 e 4.28 mostram as comparações entre os resultados obtidos pela previsão analítica, equações empíricas e modelagem numérica referentes à condição de bom contato entre solo e geomembrana e danos com diâmetros de 2,5 e 20 mm, respectivamente. As figuras mostram que os resultados referentes a Equação 2.11 proposta por Rowe (1998), os resultados obtidos pela Equação 2.14 proposta por Giroud (1997) e os resultados obtidos pela Equação 2.1 analítica proposta por Giroud & Bonaparte (1989b) se comparam bem. Os resultados obtidos pelas modelagens numéricas se compararam bem com os resultados obtidos pela Equação 2.12, proposta por Giroud et al. (1989), principalmente para o dano com menor diâmetro.

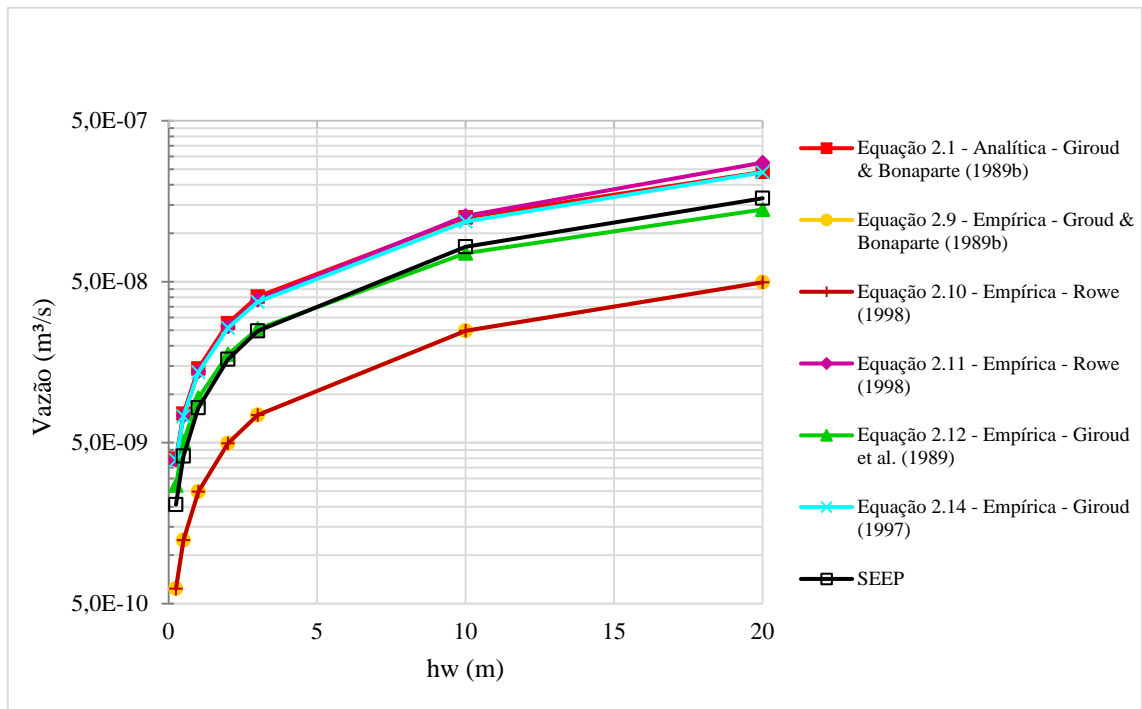


Figura 4.27 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de bom contato entre geomembrana e solo e dano com 2,5 mm de diâmetro.

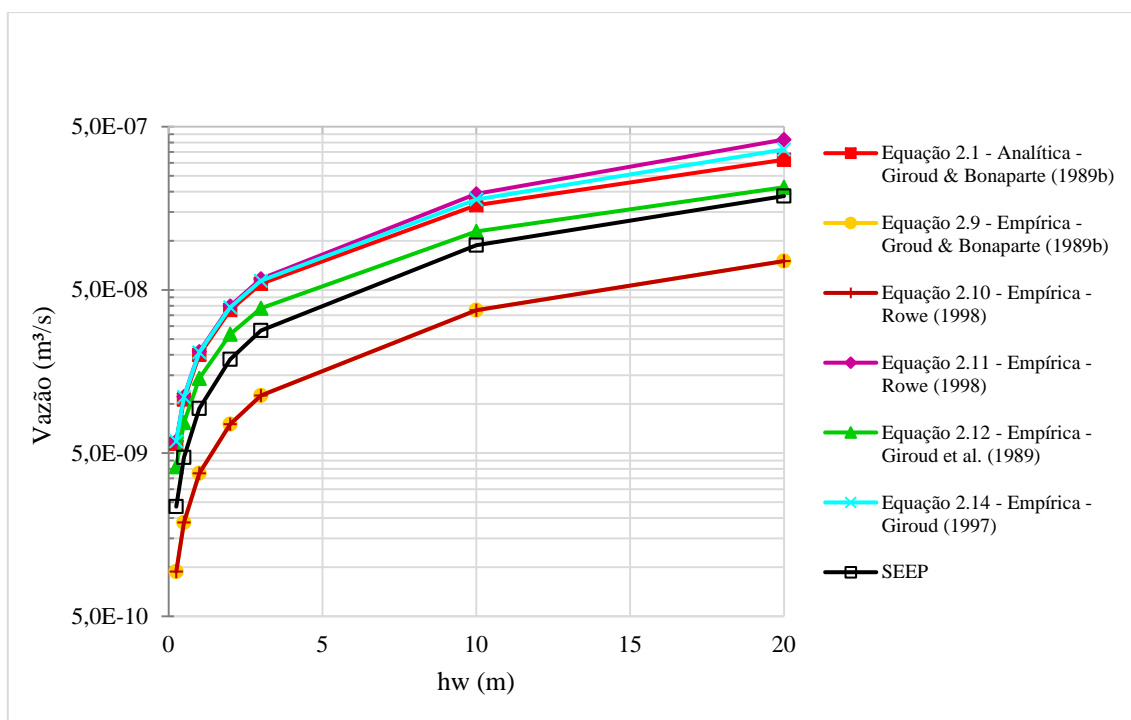


Figura 4.28 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de bom contato entre geomembrana e solo e dano com 20 mm de diâmetro.

#### 4.2.3 Contato ruim entre solo e geomembrana

As Figuras 4.29 e 4.30 mostram as comparações entre os resultados da previsão analítica, previsões empíricas e modelagens numéricas referentes à condição de contato ruim entre solo e geomembrana e danos com diâmetros de 2,5 e 20 mm. Observa-se que os resultados referentes a Equação 2.11 proposta por Rowe (1998), os resultados obtidos pela Equação 2.14 proposta por Giroud (1997) e os resultados obtidos pela Equação 2.1 analítica proposta por Giroud & Bonaparte (1989b) se comparam bem. Os resultados obtidos pelas modelagens numéricas se compararam bem com os resultados obtidos pela Equação 2.12, proposta por Giroud et al. (1989).

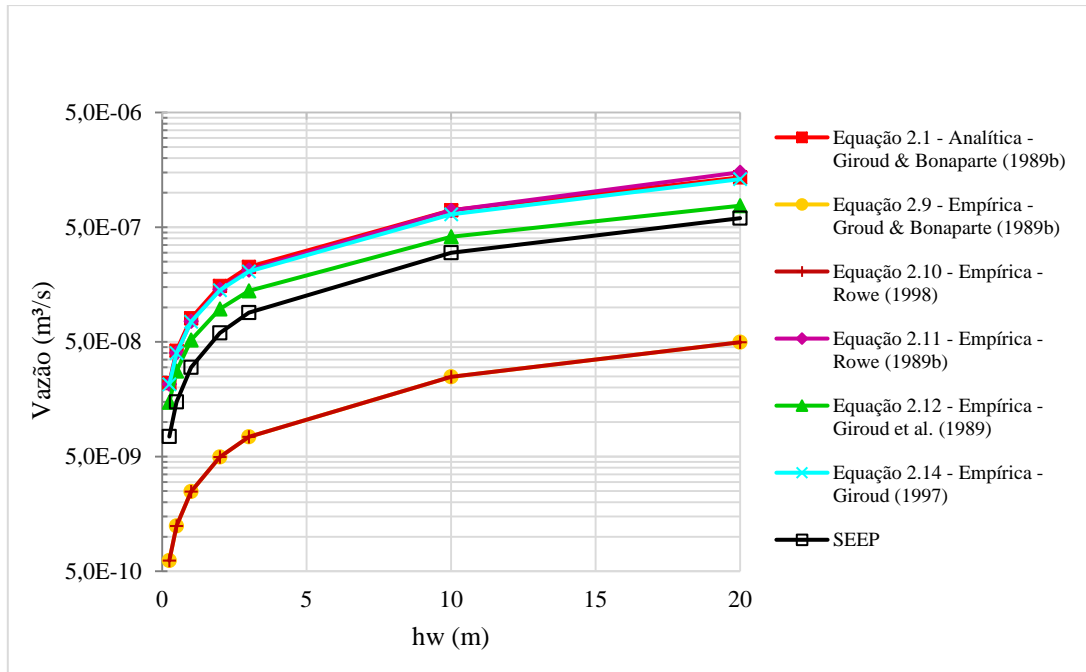


Figura 4.29 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de contato ruim entre geomembrana e solo e dano com 2,5 mm de diâmetro.

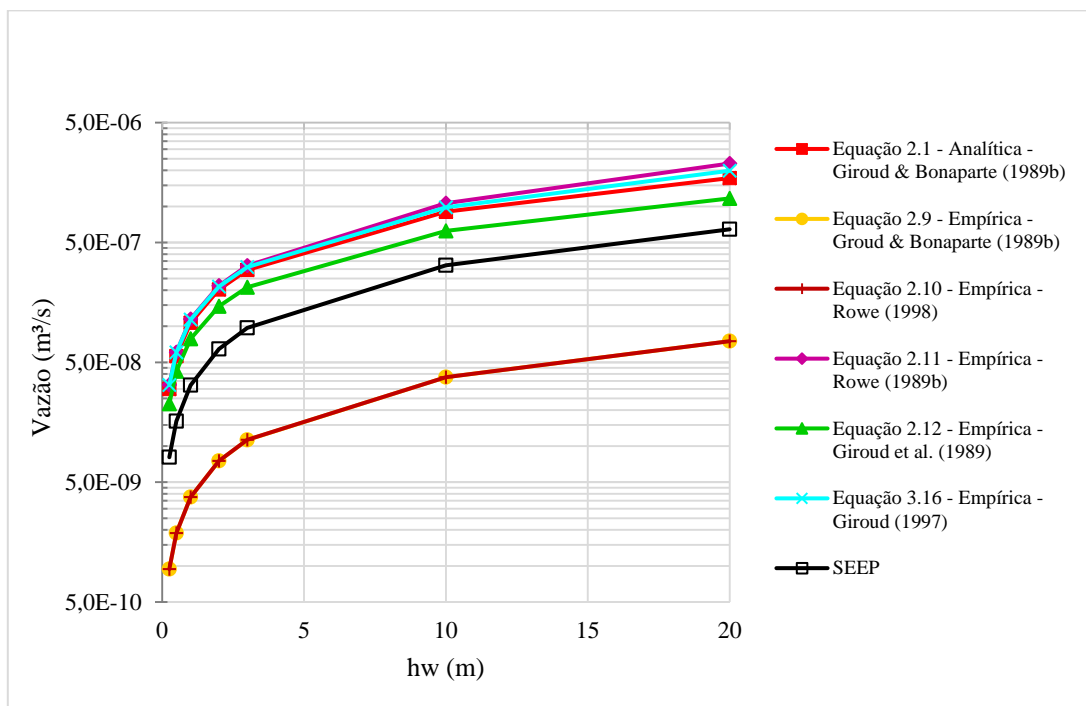


Figura 4.30 - Resultados modelagens numéricas, soluções empíricas e analítica, referentes a condição de contato ruim entre geomembrana e solo e dano com 20 mm de diâmetro.

A Figura 4.31 mostra os aumentos (%) das intensidades dos vazamentos devido ao aumento do diâmetro do dano na geomembrana, para as três condições de qualidade de contato. O aumento do diâmetro (de 2,5 mm para 20 mm) gerou um aumento de 51,57 % nos vazamentos, para as três condições de qualidade de contato simuladas pela Equação 2.12. Em relação as modelagens numéricas, foi observado um aumento da vazão mais acentuado para a condição de contato excelente, seguido de contato bom e ruim.

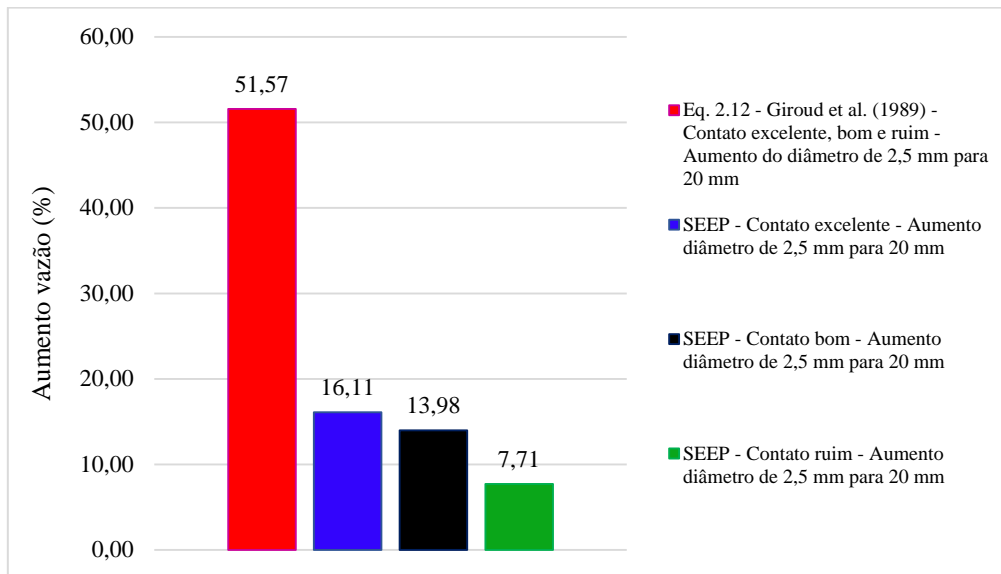


Figura 4.31 - Aumento da vazão com o aumento do diâmetro do dano.

A Figura 4.32 mostra os resultados em termos de vazão obtidos pelas modelagens numéricas e Equação 2.12, referentes as três condições de qualidade de contato entre geomembrana e solo, diâmetro de dano de 2,5 mm, e cargas hidráulicas de 0,25, 0,5, 1, 2, 3, 10 e 20 m. Observa-se que os maiores vazamentos são verificados para a condição de contato ruim, seguido de contato bom e contato excelente. Também foi observado que a Equação 2.12 apresenta maior dificuldade de simular a condição de contato ruim, visto que, existe uma maior diferença entres os resultados obtidos pela equação empírica e pelas modelagens numéricas para a condição de contato ruim quando comparadas com as demais condições de contato. Em relação as modelagens numéricas, a piora na condição de contato de excelente para bom gera um aumento na vazão de 117,33 %, já a piora na condição de contato excelente para ruim gera um aumento na vazão 689,72 %. Em relação aos resultados obtidos pela Equação 2.12, a piora na condição de contato de excelente para bom gera um aumento na vazão de 118,75 %, já a piora na condição de contato excelente para ruim gera um aumento na vazão 1097,91 %.

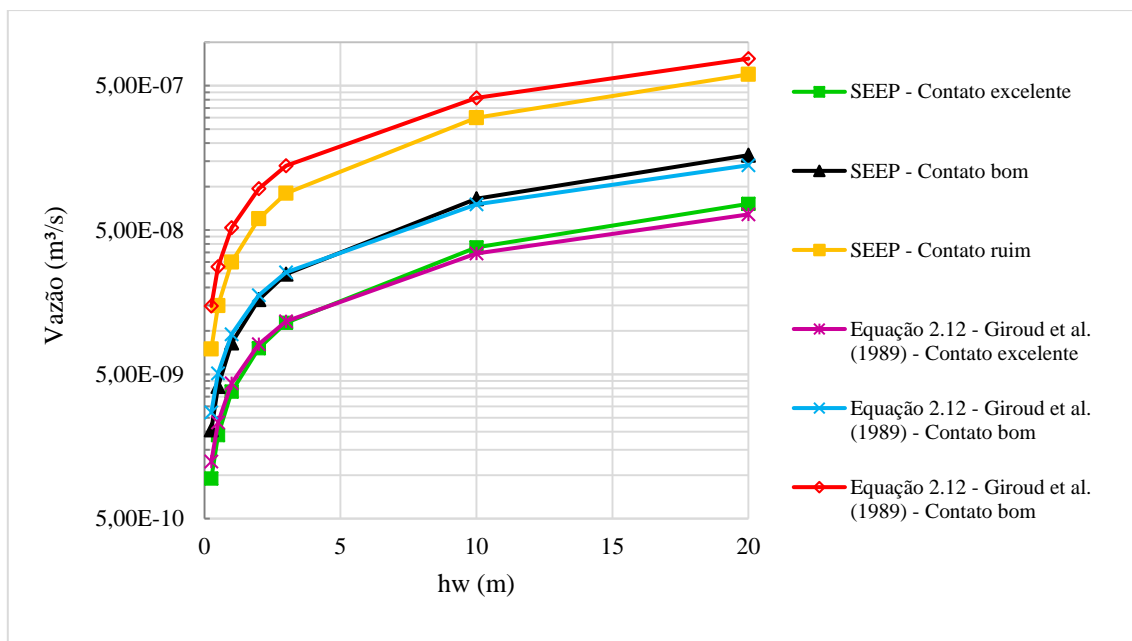


Figura 4.32 - Comparação entre modelagens numéricas e equação empírica para condição de contato excelente, bom e ruim.

A Figura 4.33 mostra as diferenças relativas entre os resultados obtidos pela Equação 2.12 e os resultados obtidos pelas modelagens numéricas, para as três condições de contato entre geomembrana e solo. Foi verificado que a condição de contato ruim apresentou maiores diferenças relativas com o aumento do diâmetro do dano, enquanto as demais condições de contato apresentaram valores de diferenças relativas próximos para os dois diâmetros de danos (as curvas tendem a ficar sobrepostas).

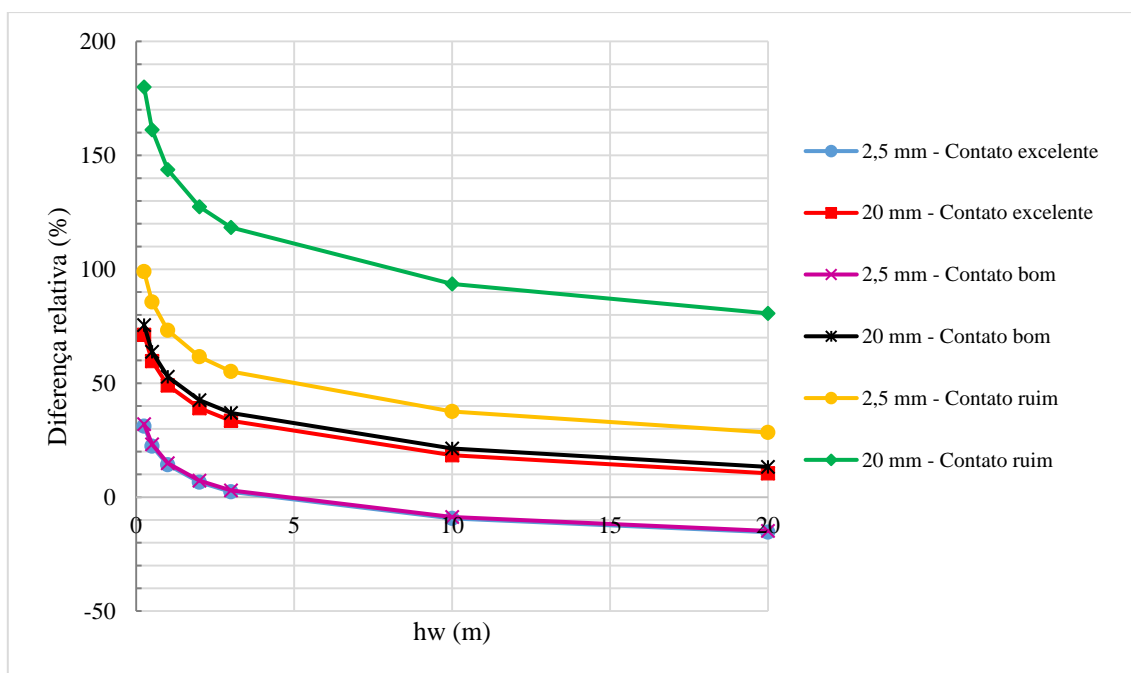


Figura 4.33 - Diferenças relativas para condição de contato excelente, bom e ruim.

A Figura 4.34 mostra os resultados em termos de poropressão no solo referentes às modelagens numéricas que simulam as condições de contato excelente, bom e ruim entre geomembrana e solo. Ao se comparar os resultados em termos de poropressão para as três condições de contato, observa-se que a condição de contato ruim apresenta maiores poropressões no solo ao longo da profundidade da camada. Isso se deve a maior intensidade de fluxo de interface devido ao contato ruim entre solo e geomembrana.

Também são apresentadas as redes de fluxo das modelagens numéricas. Observa-se que a mudança na condição de contato altera o comportamento das linhas de fluxo. O aumento da transmissividade de interface causada pela piora no contato entre geomembrana e solo tende a verticalizar a infiltração da água no solo. Também foi observado que a rede fluxo do modelo que simula o contato ruim (Figura 4.34(c)) assemelha-se à rede de fluxo mostrada na Figura 2.1, proposta por Giroud (1997).

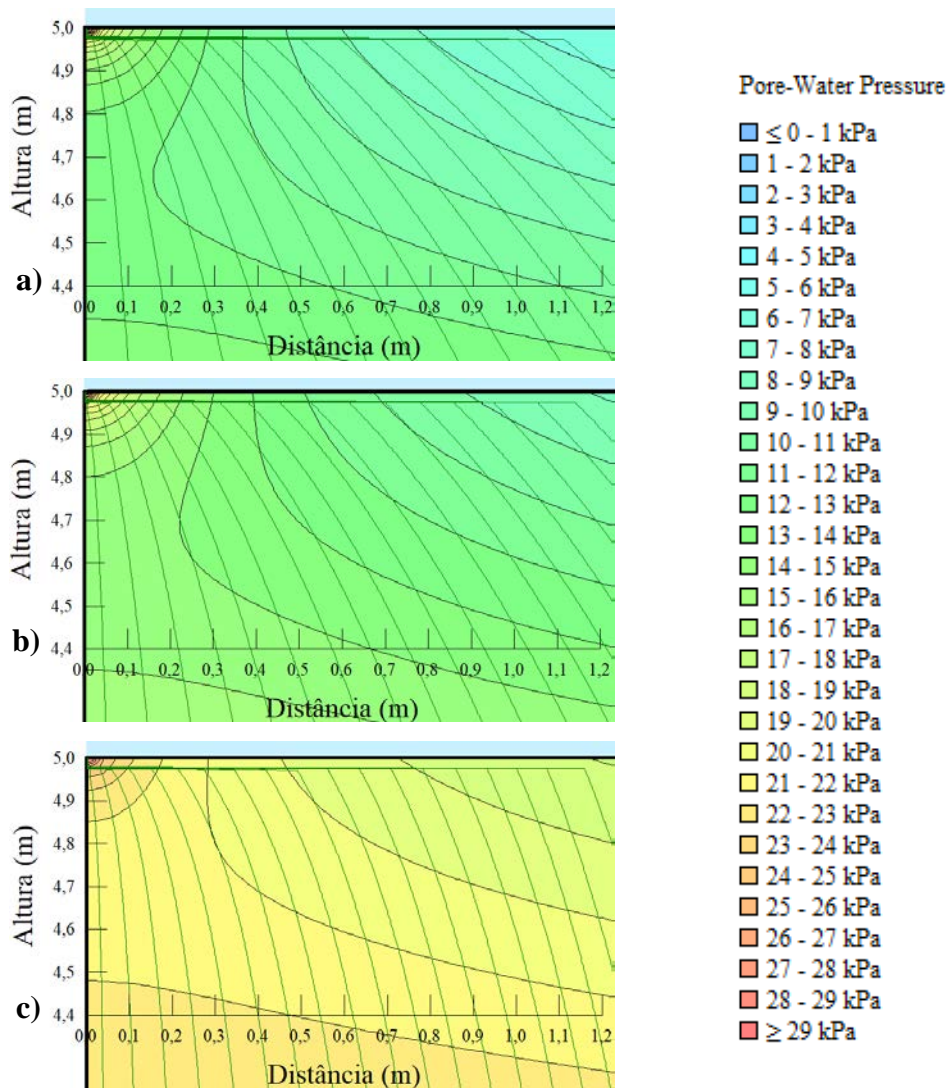


Figura 4.34 - Redes de fluxo: (a) contato excelente, (b) contato bom e (c) contato ruim.

### 4.3 Comparação entre modelagem numérica e solução analítica para a condição com geotêxtil

#### 4.3.1 Influência do tipo de solo

A Figura 4.35 mostra os resultados das modelagens numéricas e da solução analítica para as condições de barreira (geotêxtil simulando a interface) compostas por geomembrana e solos com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-7}$ ,  $10^{-9}$  e  $10^{-11}$  m/s. Por meio dos resultados das análises de Gardoni (2000), foi verificado que o aumento do nível de pressão sobre a geomembrana causa redução da transmissividade do geotêxtil, o que é coerente. A redução da transmissividade de interface exerce grande influência nos resultados da solução analítica, uma

vez que os valores de raio da área molhada e vazão não apresentam grandes variações com o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana, como pode ser visto na Figura 4.46.

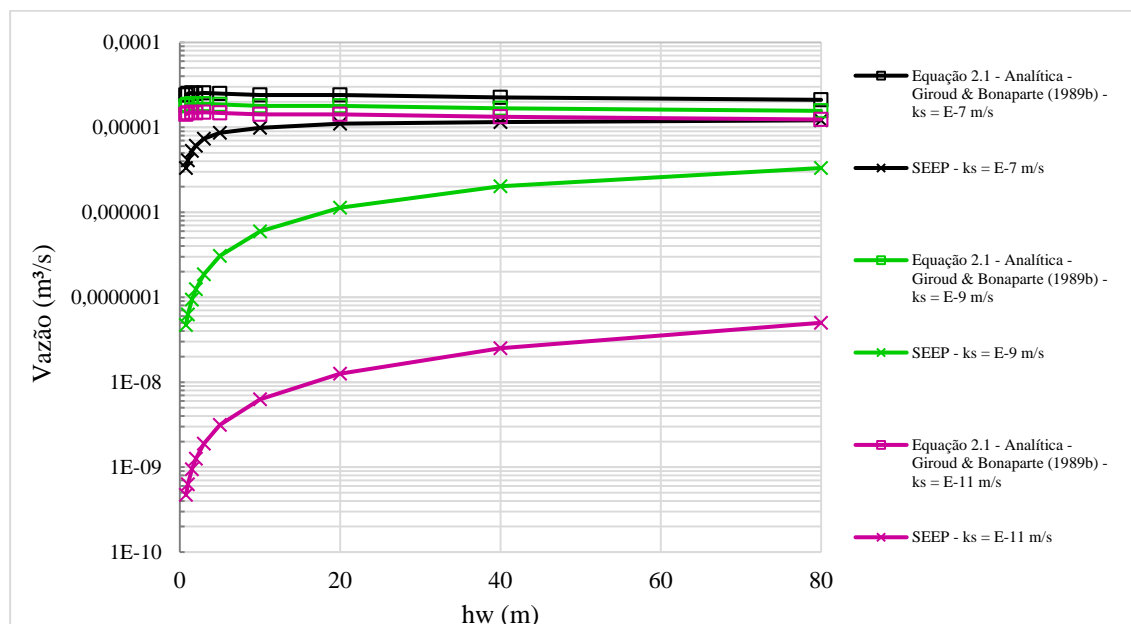


Figura 4.35 - Resultados modelagens numéricas e solução analítica, referentes a influência do tipo do solo em barreiras compostas por geomembrana, geotêxtil e solo.

Em relação à comparação entre as análises numéricas e a solução analítica, observa-se que as curvas referentes à condição de barreira composta por geomembrana e solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-7}$  m/s encontram-se mais próximas uma da outra. Também foi observado que a solução analítica apresenta menor capacidade de prever vazamentos através de danos em geomembranas sobre solos com coeficientes de permeabilidade menores, visto que a maior diferença entre curvas (modelagem numérica e solução analítica) foi verificada para a condição de barreira composta por geomembrana e solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-11}$  m/s (porém, os resultados analíticos foram a favor da segurança). Em casos em que o fluxo horizontal na interface geomembrana/solo é mais intenso, a modelagem numérica torna-se a ferramenta mais recomendável para a solução do problema.

A suposição adotada por Giroud & Bonaparte (1989b) na formulação da solução analítica, de que o gradiente hidráulico do fluxo vertical é igual a 1, é refletida nos resultados apresentados na Figura 4.35. Os resultados de vazão não são devidamente influenciados pelo aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana.

A diferença entre solução analítica e modelagem numérica já foi discutida anteriormente para a condição de barreira sem geotêxtil. Contudo, a análise com geotêxtil mostrou-se ser mais



sensível às diferentes metodologias, uma vez que foram observadas maiores diferenças nos comportamentos das curvas. Os resultados em termos de poropressão, referentes à modelagem numérica simulando uma barreira composta por geomembrana, geotêxtil e solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-7}$  m/s,  $10^{-9}$  m/s,  $10^{-11}$  m/s são mostrados nas Figuras 4.36(a), 4.36(b) e 4.36(c), respectivamente. Foi considerado um dano circular com diâmetro de 20 mm e 3 m de água sobre a geomembrana.

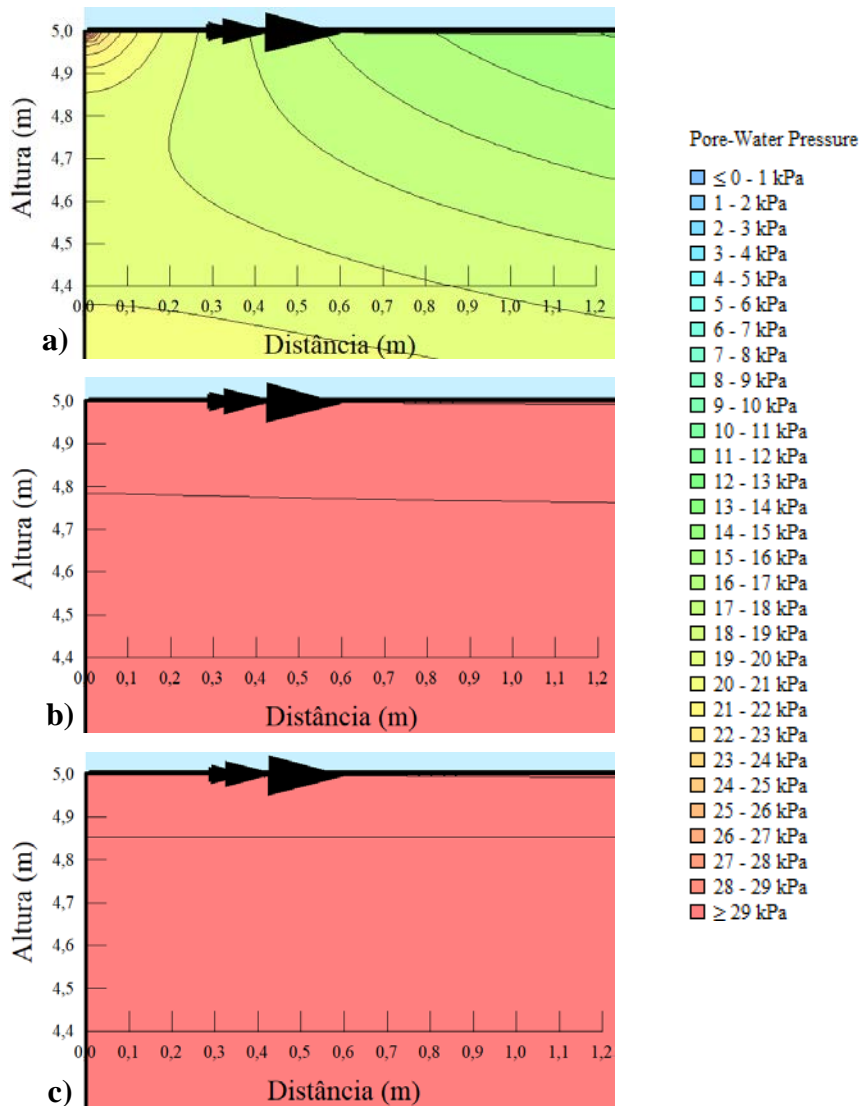


Figura 4.36 - Resultados da modelagem numérica - poropressão referente à condição com geotêxtil e solo com coeficiente de permeabilidade de: a)  $10^{-7}$  m/s, b)  $10^{-9}$  m/s e c)  $10^{-11}$  m/s.

De forma geral, foi observado a predominância do fluxo horizontal na interface entre geomembrana e solo. Como as características da interface (espessura e permeabilidade ao longo do plano da interface) foram fixadas em todas as modelagens deste tópico, foi possível analisar de forma eficaz a influência do tipo de solo nos resultados. Observa-se a tendência de aumento da poropressão na região próxima ao furo com a redução do coeficiente de permeabilidade do solo. Porém, observa-se uma mudança no comportamento da distribuição da poropressão para os coeficientes de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s e  $10^{-11}$  m/s, onde os maiores valores de poropressão são verificados em toda a distância horizontal e em profundidades maiores.

#### 4.3.2 Influência do diâmetro do dano

Os resultados referentes à influência da variação do diâmetro do dano para a condição de barreira composta por geomembrana e solo com permeabilidade de  $10^{-7}$  m/s são mostrados na Figura 4.37. Como esperado, o aumento do diâmetro do dano gera aumento no vazamento através de danos em geomembranas. Além disso, foi observado que a influência do diâmetro do dano nos vazamentos é maior para maiores cargas hidráulicas sobre a geomembrana.

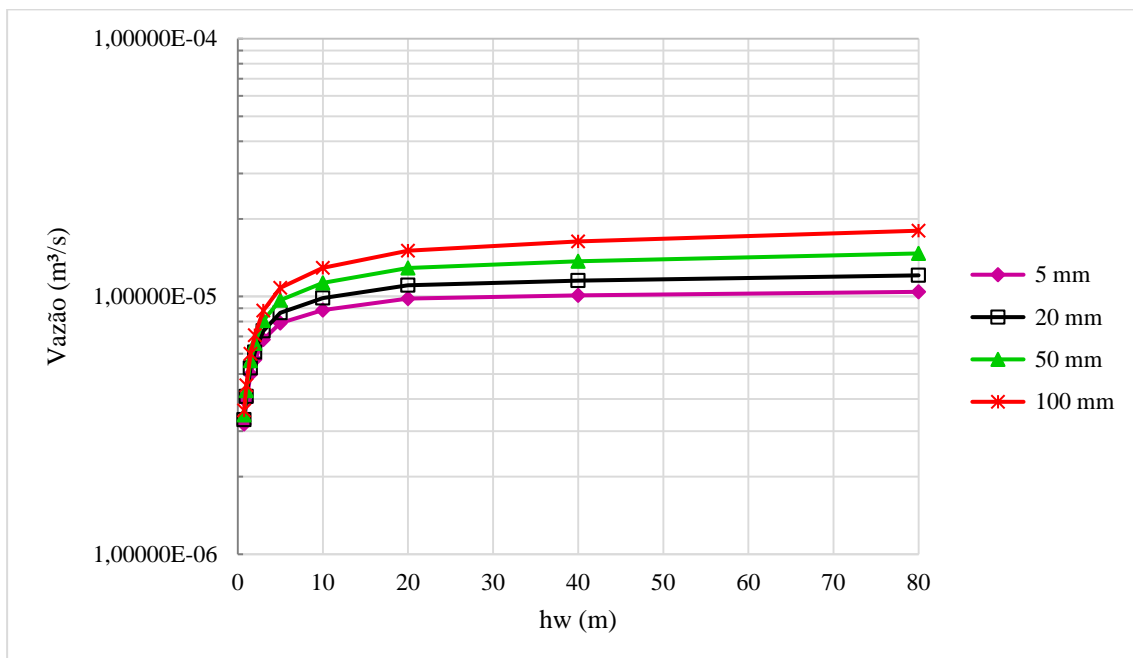


Figura 4.37 - Influência do diâmetro do dano para a condição com geotêxtil.

#### 4.4 Comparação entre modelagem numérica e previsão empírica para a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo

Este item é destinado a comparação entre modelagem numérica, previsão empírica e resultados experimentais para a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo de baixa permeabilidade. Foram consideradas análises numéricas com as características definidas no item 3.4. As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 mostram os resultados das modelagens numéricas em termos de poropressões no solo para 2, 10 e 40 m de água sobre a geomembrana, respectivamente, onde se representam os resultados para danos de 10 e 110 mm de diâmetro, respectivamente.

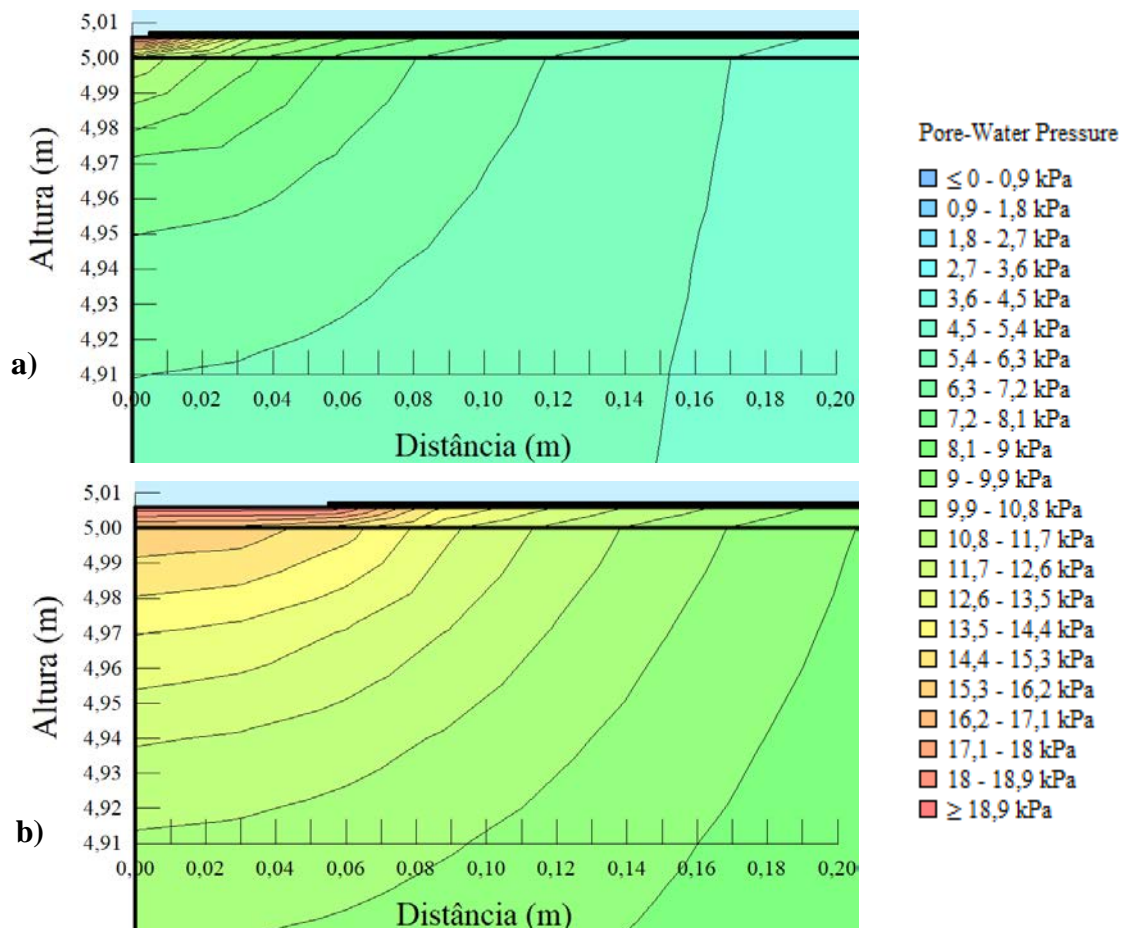


Figura 4.38 - Resultados em termos de poropressões referentes à modelagem que simula uma barreira composta por geomembrana, GCL, solo, 2 m de água sobre a geomembrana e danos com diâmetro de: a) 10 mm e b) 110 mm.

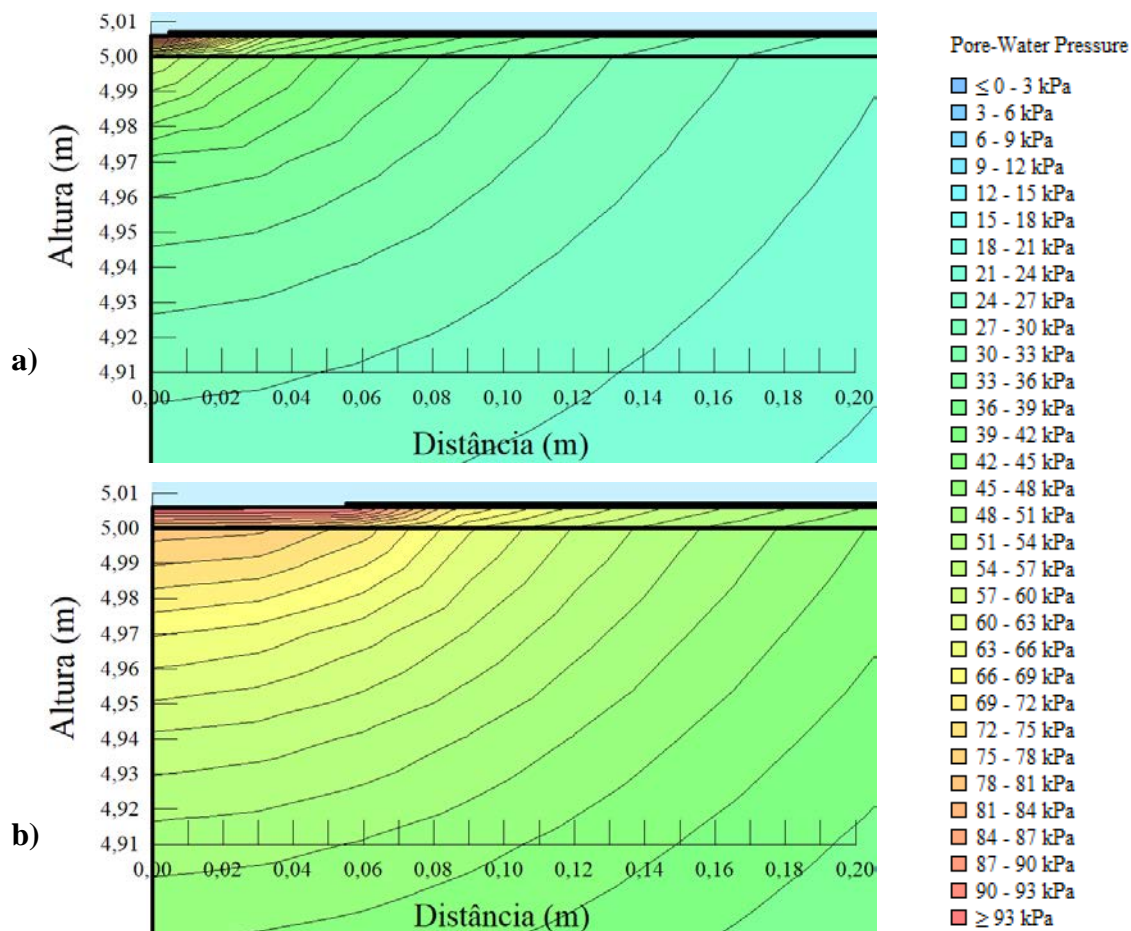


Figura 4.39 - Resultados em termos de poropressões referentes à modelagem que simula uma barreira composta por geomembrana, GCL, solo, 10 m de água sobre a geomembrana e danos com diâmetro de: a) 10 mm e b) 110 mm.

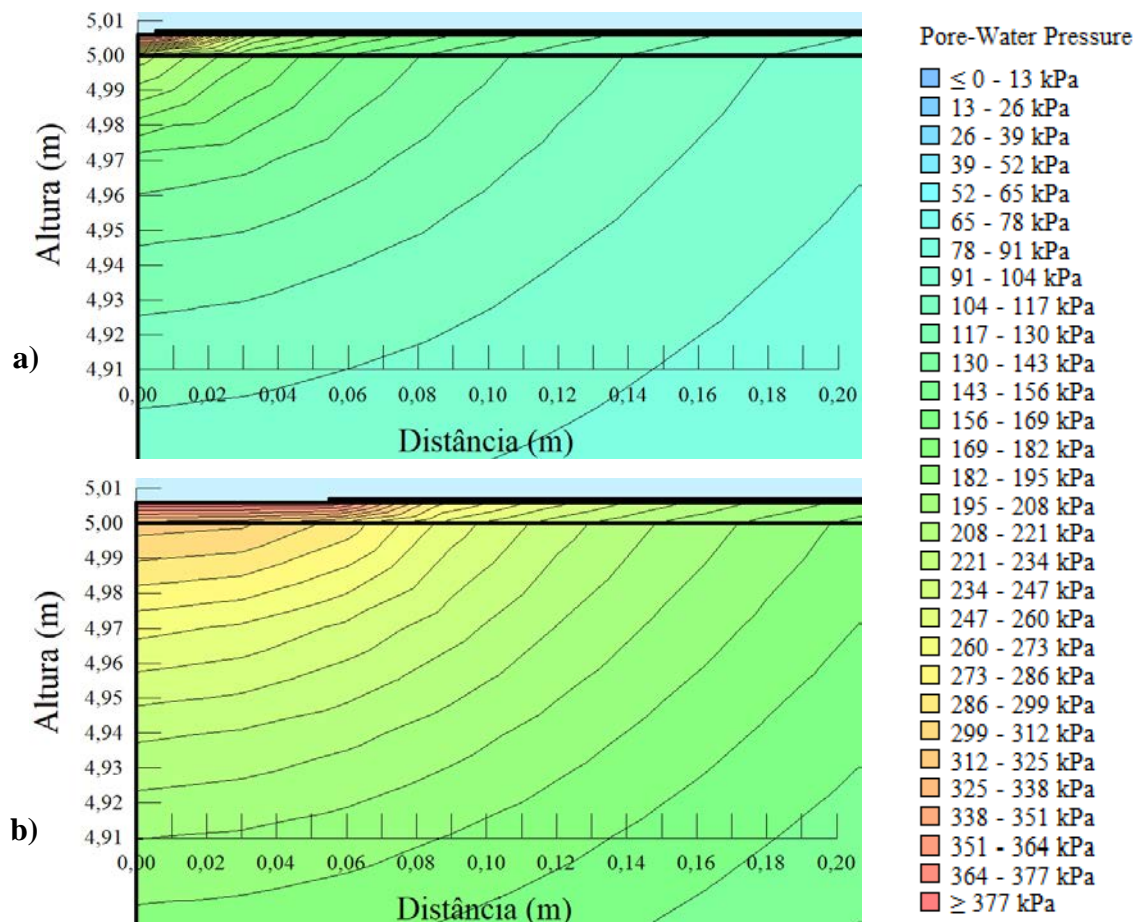


Figura 4.40 - Resultados em termos de poropressões referentes à modelagem que simula uma barreira composta por geomembrana, GCL, solo, 40 m de água sobre a geomembrana e danos com diâmetro de: a) 10 mm e b) 110 mm.

Observa-se uma concentração de elevados valores de poropressão na região do GCL localizado abaixo do dano. Isso se deve ao fato do GCL apresentar um coeficiente de permeabilidade menor que o solo de fundação. Além disso, foi observado que o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana e aumento do diâmetro do dano provocam aumento nos valores de poropressão. A Figura 4.41 mostra os resultados obtidos pelas modelagens numéricas, previsão empírica e resultados experimentais segundo Barroso et al. (2006).

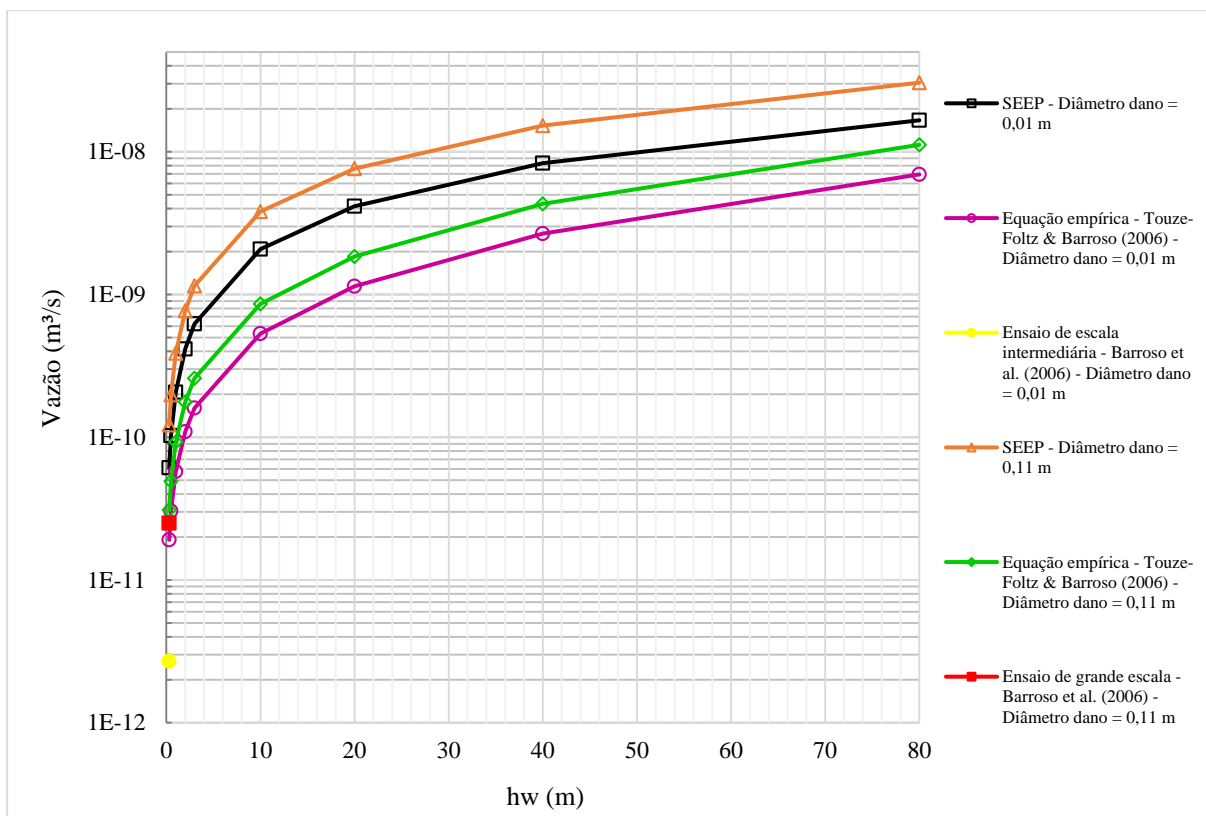


Figura 4.41 - Resultados modelagens numéricas, previsão empírica e experimental (segundo Barroso et al. 2006), referentes a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo.

Observa-se que a comparação entre os resultados obtidos por meio das modelagens numéricas e solução empírica apresentam um comportamento semelhante para os dois diâmetros de dano. Em relação à comparação com os resultados experimentais obtidos por Barroso et al. (2006), observa-se uma melhor comparação entre metodologias para a condição de ensaio de grande escala, principalmente entre os resultados experimentais e solução empírica. Ou seja, a escala do ensaio exerce grande influência na obtenção de resultados que sejam representativos.

#### 4.5 Análise experimental

Os resultados em termos de vazão obtidos por meio do ensaio que simula vazamentos através de um dano com diâmetro de 20 mm em geomembrana são mostrados na Figura 4.42. Tais resultados representam a condição onde existe apenas o fluxo horizontal de interface, visto que, o material que dá suporte a geomembrana possui um permeabilidade baixíssima. Pode-se

observar que a carga hidráulica sobre a geomembrana apresenta influência na intensidade dos vazamentos. A tendência é que a vazão aumente com o aumento da carga hidráulica. Também foi observado que a taxa de aumento da vazão maior para menores cargas hidráulicas, visto que os trechos iniciais da curva apresentam inclinações maiores que a do trecho final.

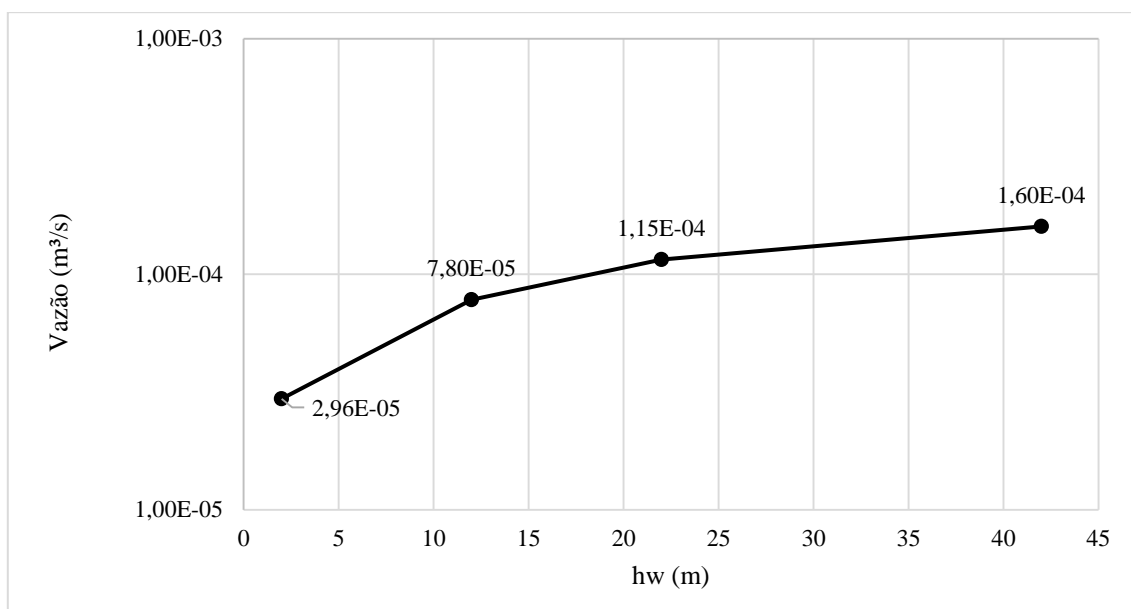


Figura 4.42 - Resultados do ensaio realizado com dano de 20 mm de diâmetro.

## 4.6 Análises numéricas com base nos resultados experimentais

### 4.6.1 Análises numéricas iniciais

As Figuras 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46 mostram os resultados em termos de velocidade do fluxo na direção vertical referentes as modelagens numéricas com a aplicação de um fator de escala (10x), para 2, 12, 22, 44 m de água sobre a geomembrana. Como foi aplicado um fator de escala nas modelagens numéricas, os valores de velocidade na direção vertical mostrados nas figuras devem ser divididos por 10 para que representem as condições do ensaio. Observe, por meio dos resultados em termos de velocidade do fluxo na direção vertical, que a água realmente escoava pelo espaço vazio entre o cilindro externo e interno. De fato, a modelagem numérica proposta consegue simular as condições do ensaio realizado. Além disso, foi observado que a velocidade do fluxo no espaço entre o cilindro externo e interno tende a aumentar com o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana.



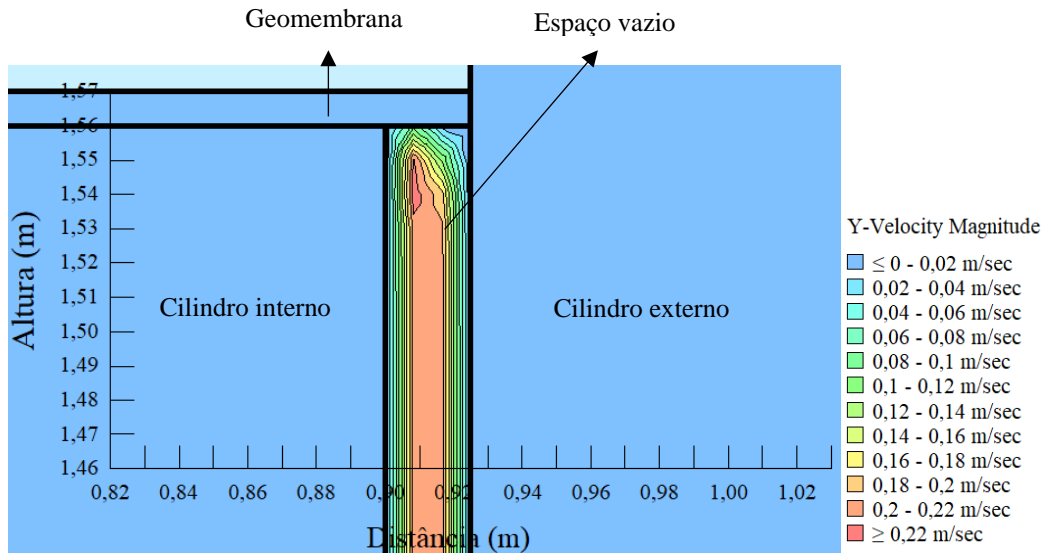


Figura 4.43 - Resultados modelagem numérica em termos de velocidade do fluxo na direção vertical para 2 m de água sobre a geomembrana.

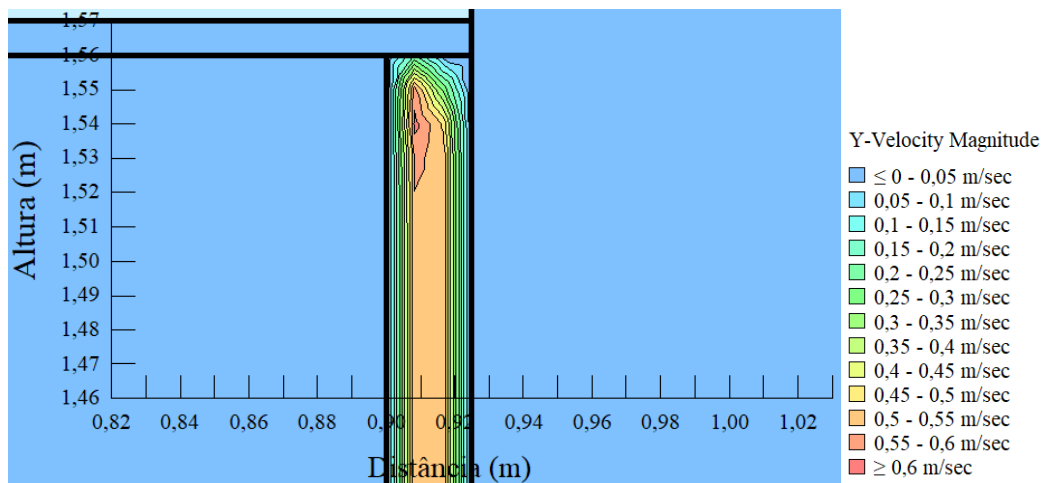


Figura 4.44 - Resultados modelagem numérica em termos de velocidade do fluxo na direção vertical para 12 m de água sobre a geomembrana.



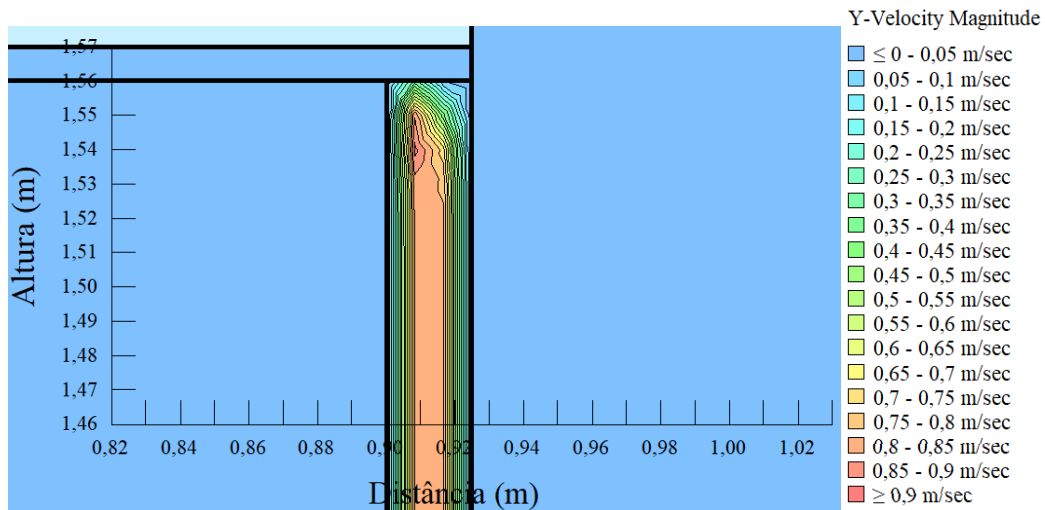


Figura 4.45 - Resultados modelagem numérica em termos de velocidade do fluxo na direção vertical para 22 m de água sobre a geomembrana.

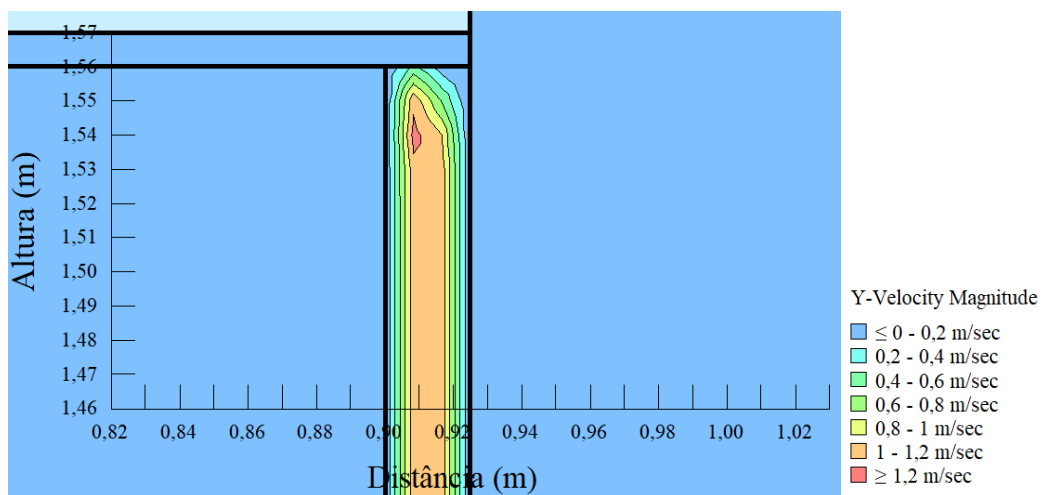


Figura 4.46 - Resultados modelagem numérica em termos de velocidade do fluxo na direção vertical para 42 m de água sobre a geomembrana.

A Figura 4.47 mostra as linhas que representam o caminho percorrido pelo líquido. Observa-se que o fluxo de água que atravessa o dano, escoar horizontalmente na interface geomembrana/placa de aço e em seguida, escoar verticalmente no espaço entre os cilindros interno e externo.

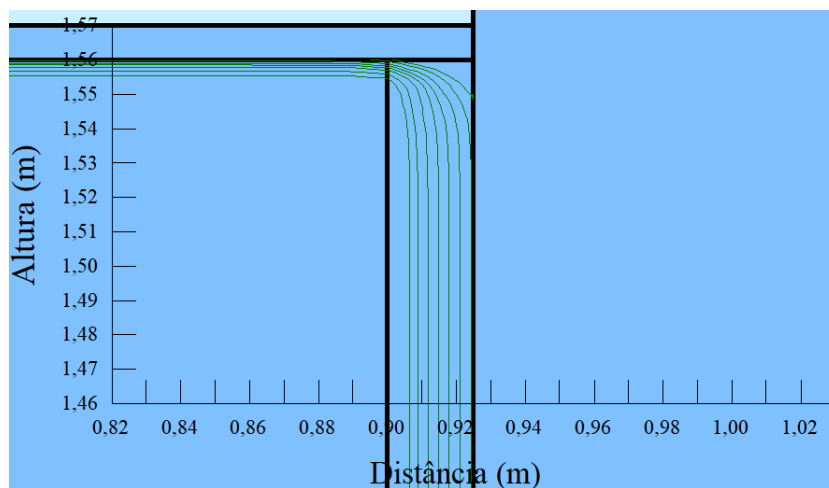


Figura 4.47 - Rede de fluxo do modelo.

#### 4.6.2 Retro-análise para determinação da permeabilidade ao longo do plano da interface necessária para gerar os vazamentos obtidos no ensaio

À partir dos resultados de vazão obtidos no ensaio, foi possível realizar uma retro-análise de modo a determinar a permeabilidade ao longo do plano (Figura 4.48) necessária para causar as vazões obtidas no ensaio. Observa-se que os valores de permeabilidade ao longo do plano diminuem com o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana. Ao se aumentar a carga hidráulica sobre a geomembrana, a tendência é que a espessura do espaço entre geomembrana e material subjacente diminua, reduzindo então a permeabilidade ao longo da interface.

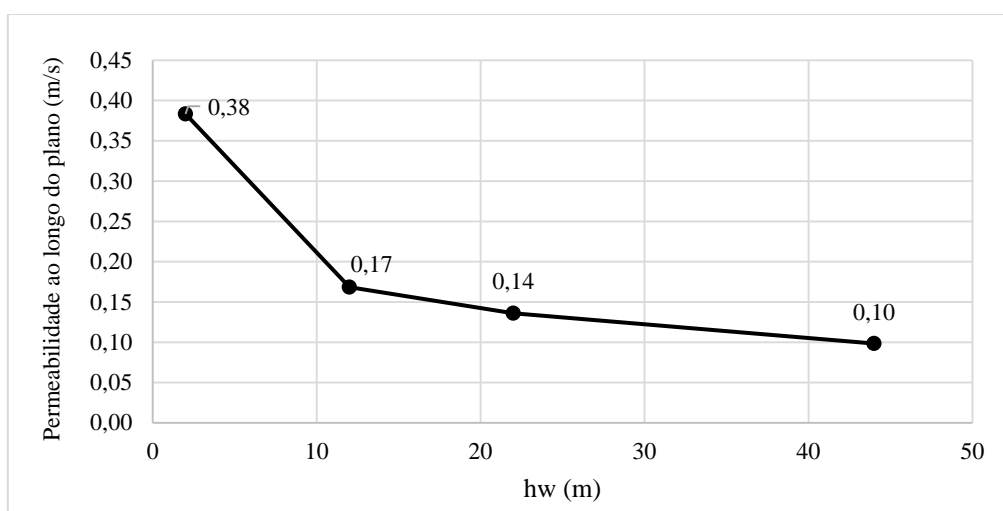


Figura 4.48 - Resultados de retro-análise para determinar a permeabilidade ao longo do plano necessária para gerar os vazamentos obtidos no ensaio.

#### 4.6.3 Influência do diâmetro do dano

Também foram realizadas modelagens numéricas mantendo-se os valores de permeabilidade ao longo do plano da interface encontrados na retro-análise e variando-se o diâmetro do dano na geomembrana. Os resultados das modelagens em termos de vazão são mostrados na Figura 4.49. O aumento diâmetro do furo de 5 mm para 10 mm (2 vezes), 20, mm (4 vezes), 50 mm (10 vezes) e 100 mm (20 vezes), aumentou a vazão em cerca de 26,65 %, 69,14 %, 192,41 % e 540,94 %, respectivamente (este aumento percentual da vazão foi observado para todas cargas hidráulicas). Sendo assim, a influência da variação do diâmetro do dano nos vazamentos através de danos em geomembrana é maior nas modelagens numéricas que simulam o ensaio realizado nesta pesquisa (as curvas estão mais distantes umas das outras) quando comparadas com as modelagens numéricas sem restrições laterais. Como as paredes laterais do cilindro estarão limitando o raio da área molhada, o aumento do diâmetro do dano tem maior impacto na intensidade dos vazamentos.

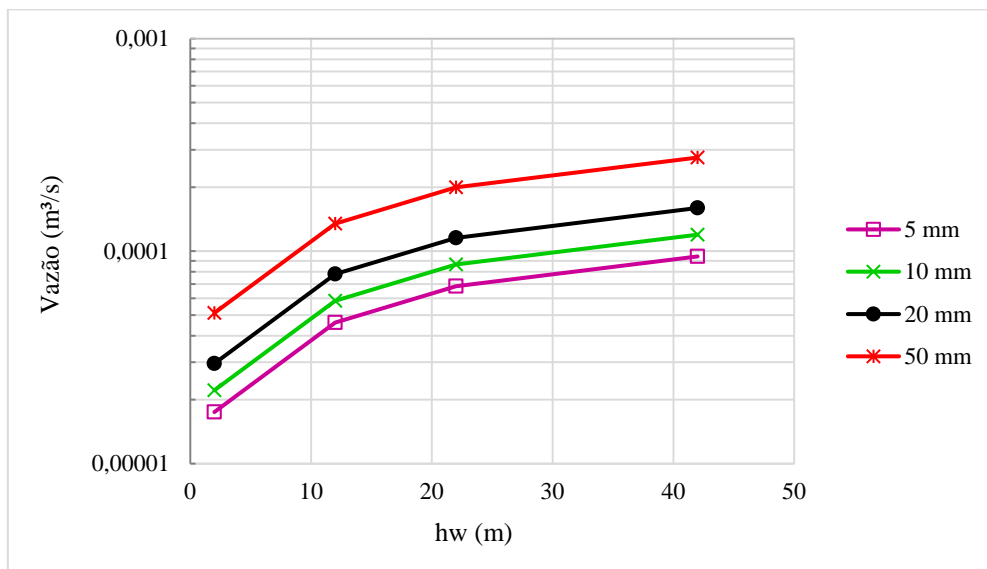


Figura 4.49 - Resultados modelagens numéricas em termos de vazão, referentes a influência do diâmetro do dano nos vazamentos.

A Figura 4.50 mostra os resultados em termos de poropressão referentes à influência da variação do diâmetro do dano nos resultados das modelagens numéricas, onde: a) representa a modelagem feita com diâmetro de dano de 5 mm, b) 10 mm, c) 20 mm e c) 50 mm. Observe-se que o aumento do diâmetro do dano gera um aumento nos valores de poropressão na região do dano.

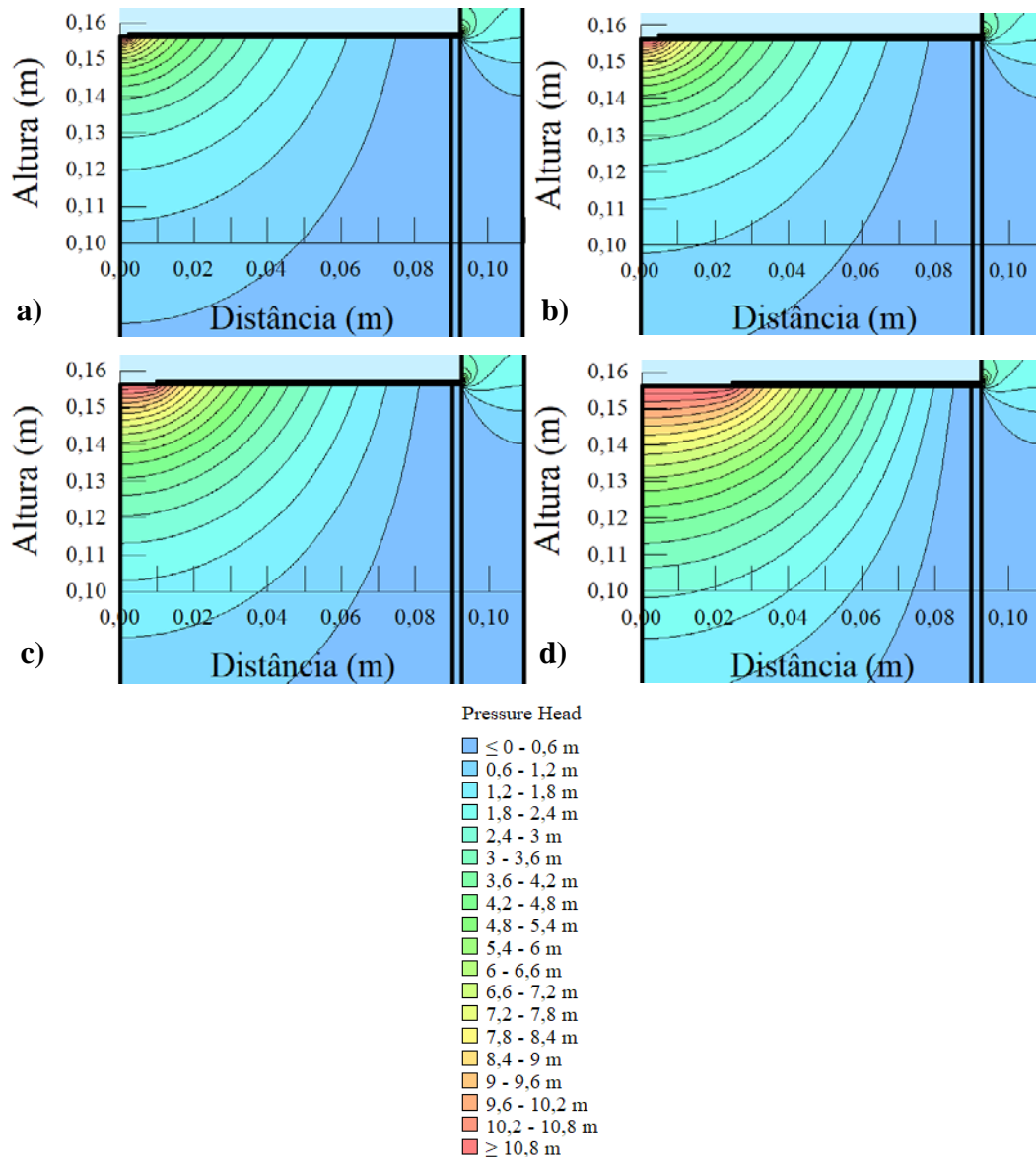


Figura 4.50 - Resultados de modelagens numéricas em termos de propressão, referentes a danos com diâmetro de: a) 5 mm, b) 10 mm, c) 20 mm e c) 50 mm.

#### 4.6.4 Influência do diâmetro do cilindro

A Figura 4.51 mostra uma comparação entre os resultados obtidos por modelagens numéricas que avaliaram a influência da variação do diâmetro do cilindro, solução analítica proposta por Giroud & Bonaparte (1989b) e modelagem numérica sem restrições laterais (camada de solo com dimensão de 20 x 5 m). Foi considerado um solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s, dano circular com diâmetro de 5 mm.

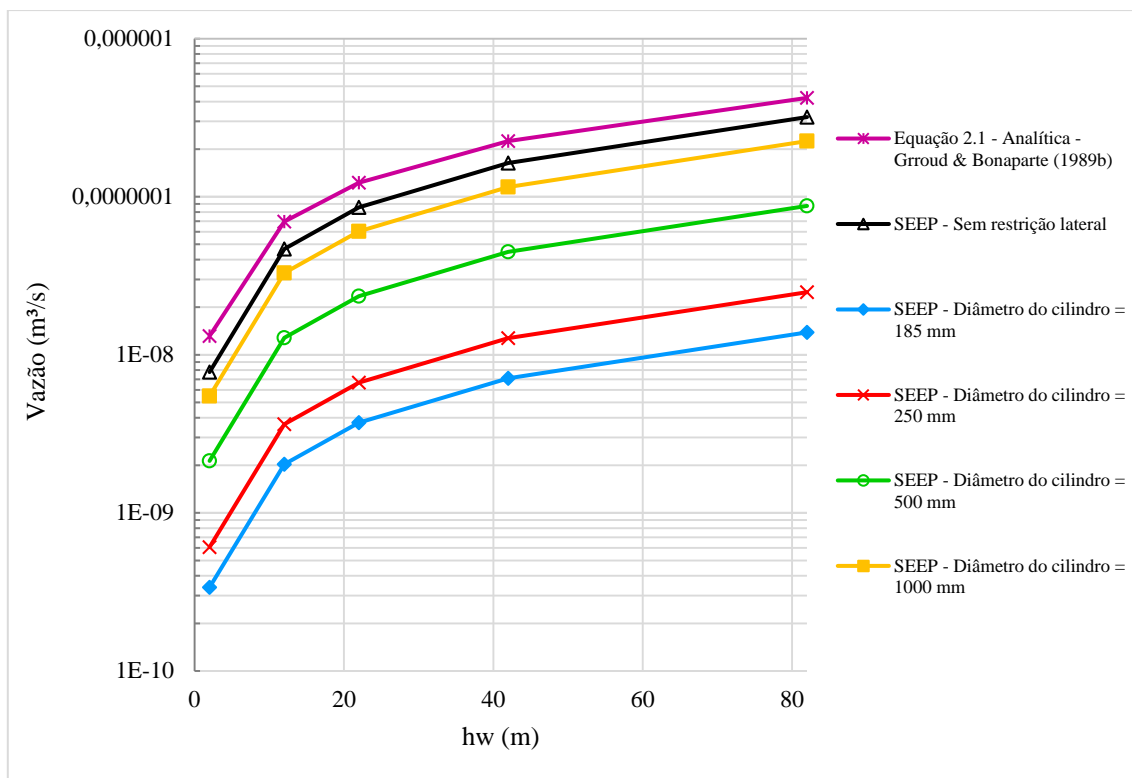


Figura 4.51 - Influência do diâmetro do cilindro nos vazamentos através de danos com 5 mm de diâmetro.

A Figura 4.52 mostra uma comparação entre os resultados obtidos por modelagens numéricas que avaliaram a influência da variação do diâmetro do cilindro, solução analítica proposta por Giroud & Bonaparte (1989b) e modelagem numérica sem restrições laterais (camada de solo com dimensões de 20 m x 5 m). Foi considerado um solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s, dano circular com diâmetro de 20 mm.

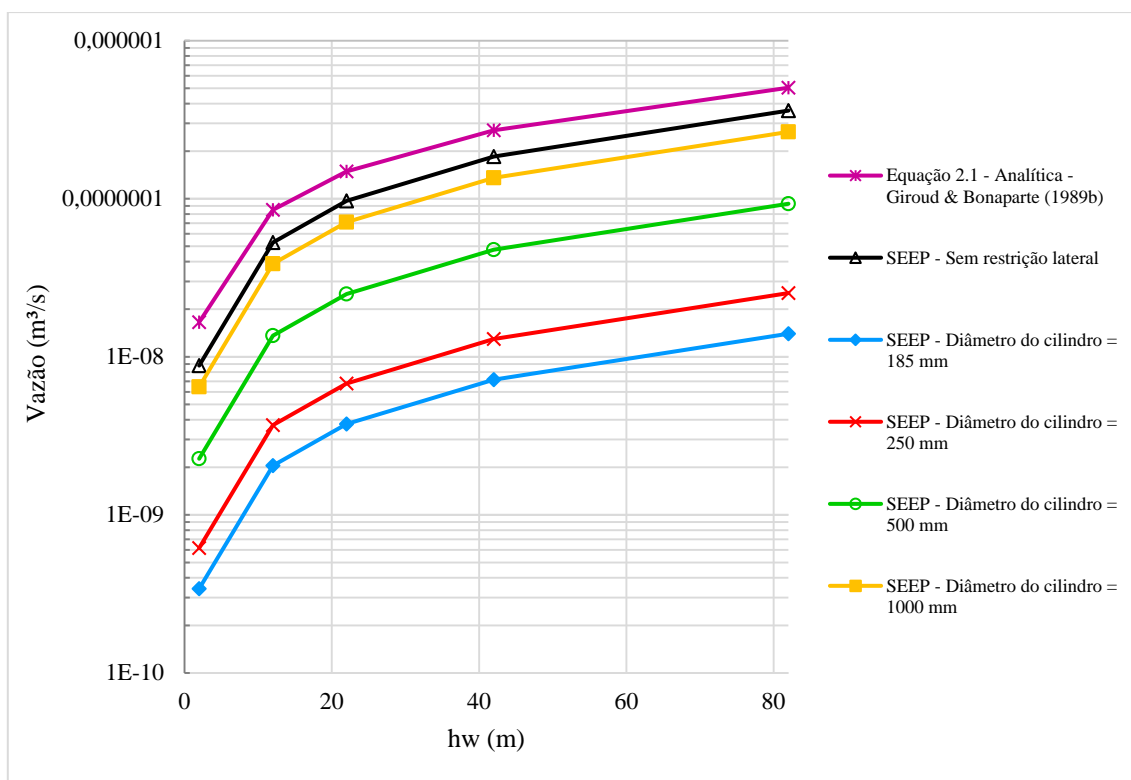


Figura 4.52 - Influência do diâmetro do cilindro nos vazamentos através de danos com 20 mm de diâmetro.

De modo geral, observa-se uma certa diferença entre os resultados da previsão analítica e a modelagem feita sem restrições laterais, para ambos os diâmetros dos danos. Este fato está relacionado às diferenças nas metodologias usadas na solução analítica e na modelagem numérica. Foi observado por meio das modelagens numéricas que, o aumento do diâmetro do dano de 5 mm para 20 mm gera um aumento na vazão de 13,16 %. Em relação a variação do diâmetro do cilindro. Foi observado que, para diâmetros maiores que 1000 mm a tendência é que as paredes do cilindro tenham menores influências no fluxo d'água no sistema. Para o diâmetro de dano igual a 185 mm, as paredes do cilindro restringem os vazamentos em torno de 2479 %, diâmetro de 250 mm cerca de 1327 %, diâmetro de 500 mm cerca de 288 % e 1000 mm cerca de 36 %.

As Figuras 4.53(a) e 4.53(b) mostram os resultados em termos de poropressão nos vazios do solo referentes às modelagens com cilindro interno de 185 mm e 250 mm, respectivamente. Foram considerados danos circulares com diâmetro de 20 mm, 12 m de água sobre a geomembrana e solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s.

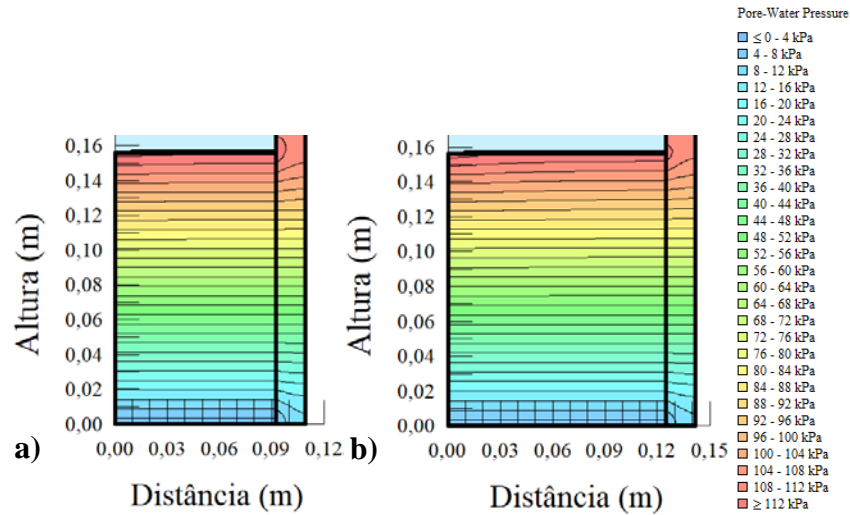


Figura 4.53 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão nos vazios do solo, referentes a influência de cilindros com diâmetro interno de: a) 185 mm e b) 250 mm.

Observa-se que, os resultados para cilindros com diâmetro interno de 185 e 250 mm apresentaram uma distribuição de poropressão semelhante. Os resultados em termos de poropressão referentes à influência de cilindros com diâmetros internos de 500 mm e 1000 mm são mostrados nas Figuras 4.54 e 4.55, respectivamente.

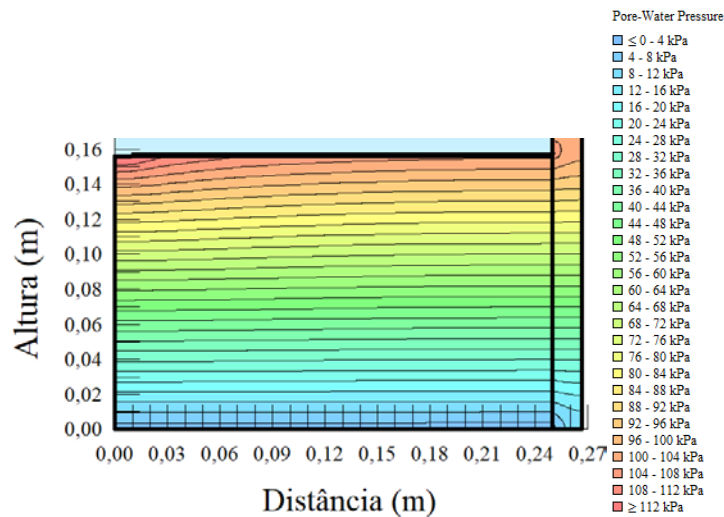


Figura 4.54 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão, referentes a influência de cilindros com diâmetro interno de 500 mm.

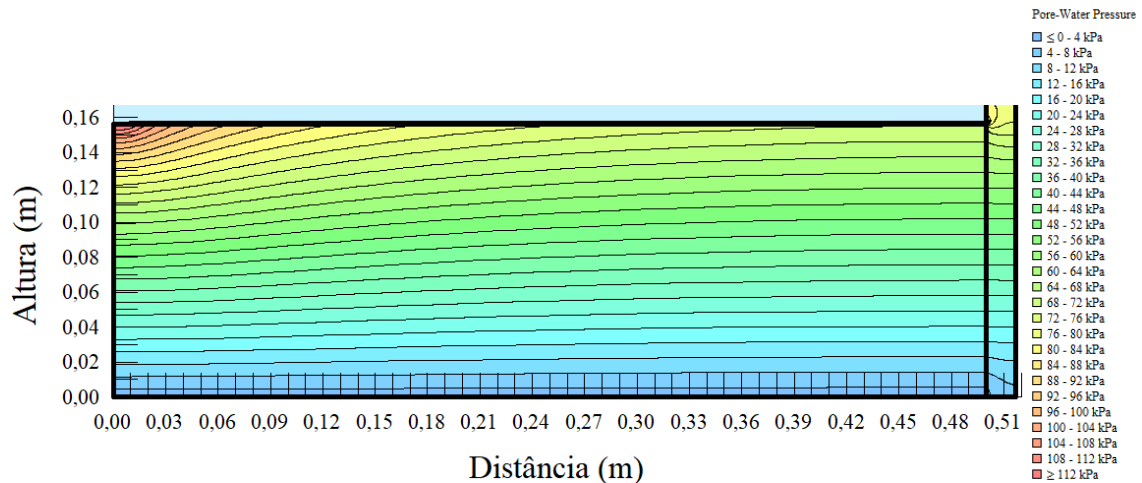


Figura 4.55 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão no solo, referentes a influência de cilindros com diâmetro interno de 1000 mm.

A Figura 4.56(a) mostra a comparação entre os resultados referentes à condição em que o cilindro interno do equipamento é totalmente preenchido por argila e a condição onde a camada de argila possui uma espessura de 5 cm. Em relação a variação do diâmetro do cilindro para o diâmetro de 185 mm, as paredes do cilindro restringem os vazamentos em torno de 742 %, diâmetro de 250 mm cerca de 376 %, diâmetro de 500 mm cerca de 50 %. Os resultados são coerentes, uma vez que aumento do diâmetro do cilindro favorece o fluxo ao longo da interface e maior área para infiltração na superfície do solo subjacente. Observa-se também que, com a redução da espessura da camada de solo, a influência das paredes do cilindro nos vazamentos é menor.

Os resultados de vazão específica (vazão/área do cilindro interno) são mostrados na Figura 4.56(b). Foi observado que, os resultados obtidos para a condição de 5 cm de espessura de argila foram maiores que os resultados para a condição em que todo o cilindro foi preenchido por argila. De forma geral, as curvas encontram-se mais próximas umas das outras, mas foi observada uma tendência de redução da vazão específica com o aumento do diâmetro do cilindro.



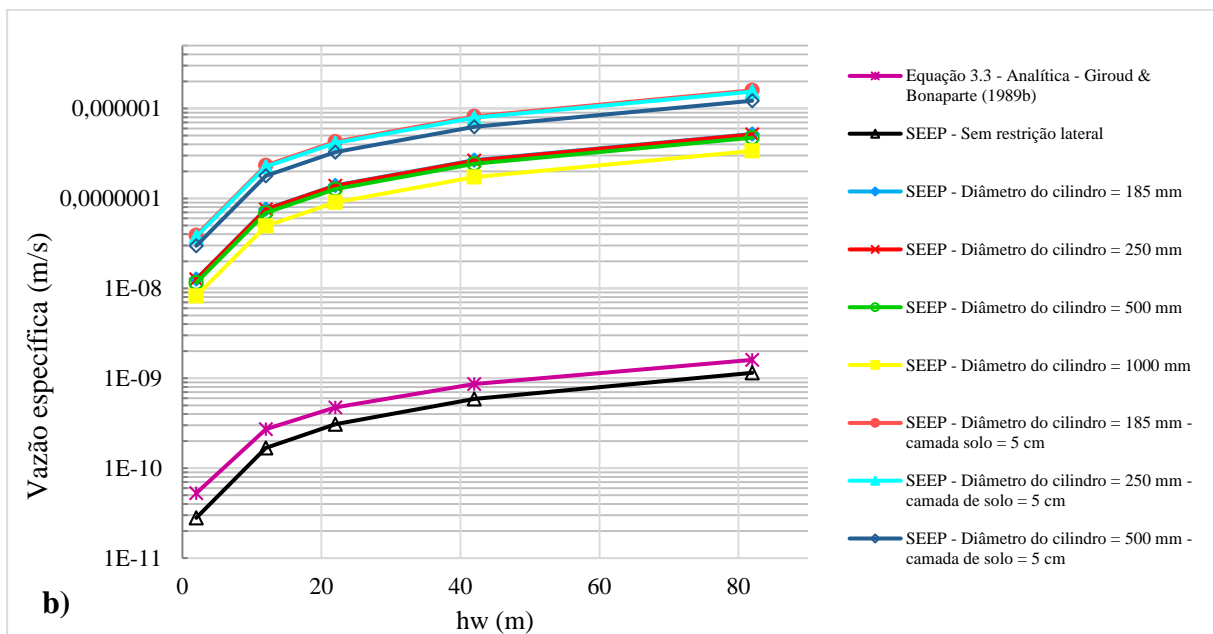
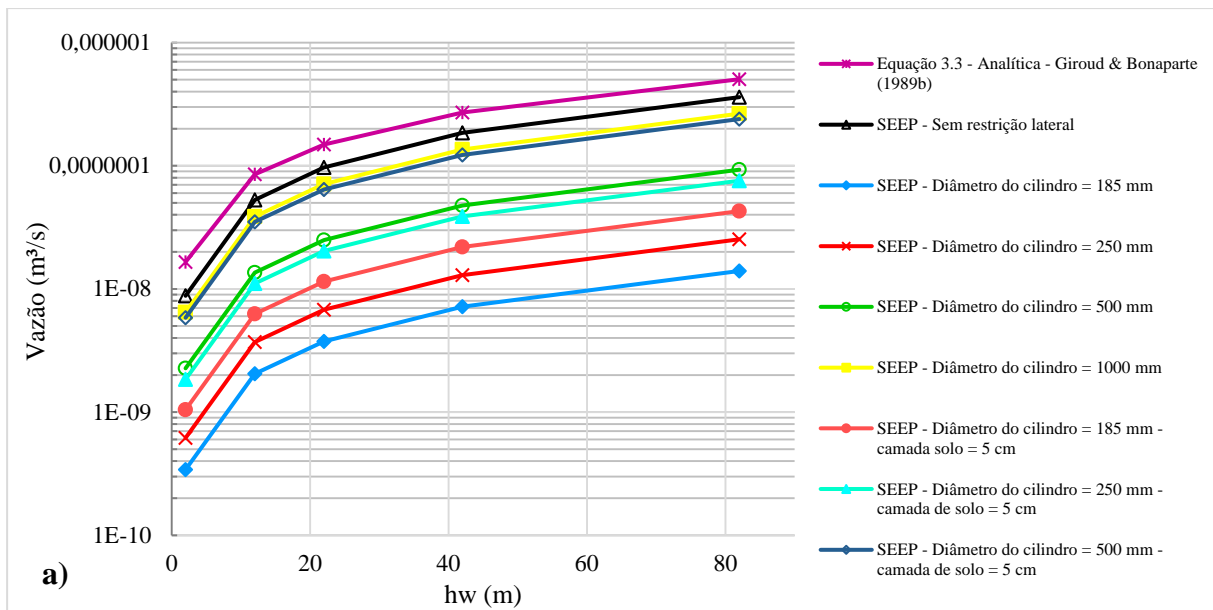


Figura 4.56 - Comparação entre os resultados referentes a condição onde o cilindro é totalmente preenchido por argila e condição de uma camada de argila com 5 cm de espessura: a) vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e b) vazão específica (m/s).

As Figuras 4.57, 4.58 e 4.59 mostram os resultados em termos de poropressão no solo referentes às modelagens com uma camada de argila de 5 cm de espessura, cilindro interno de 185 mm, 250 mm e 500 mm, respectivamente. Foram considerados danos circulares com diâmetro de 20 mm, 12 m de água sobre a geomembrana e solo com coeficiente de permeabilidade de  $10^{-9}$  m/s.

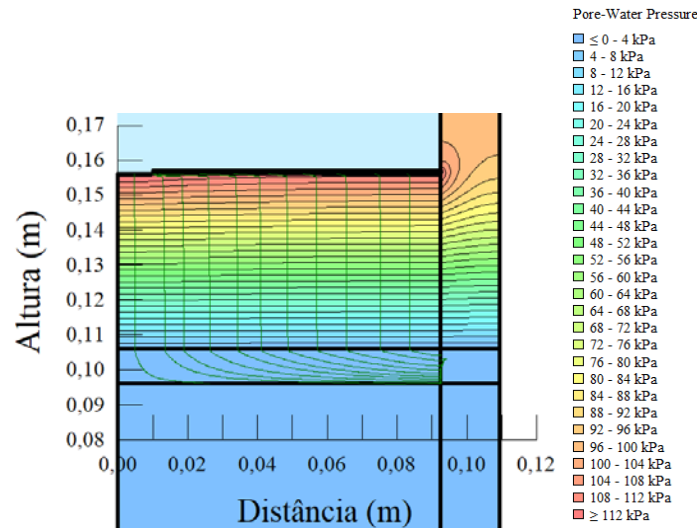


Figura 4.57 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão: cilindro com diâmetro interno de 185 mm e espessura da camada de argila de 5 cm.

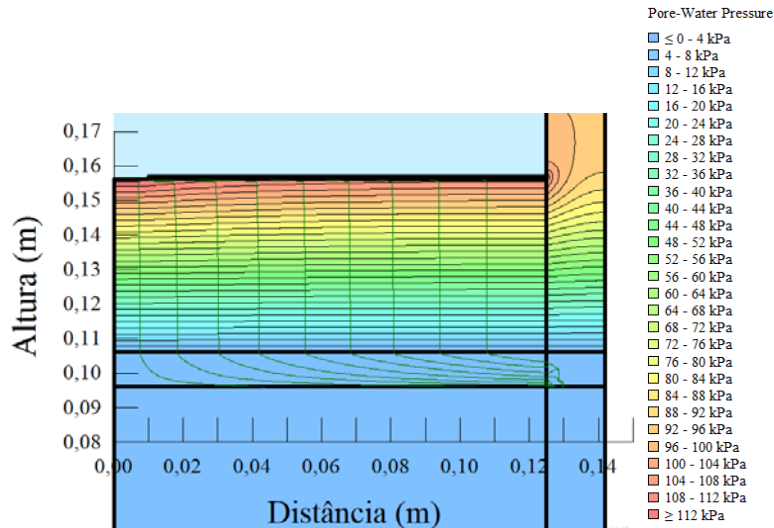


Figura 4.58 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão: cilindro com diâmetro interno de 250 mm e espessura da camada de argila de 5 cm.

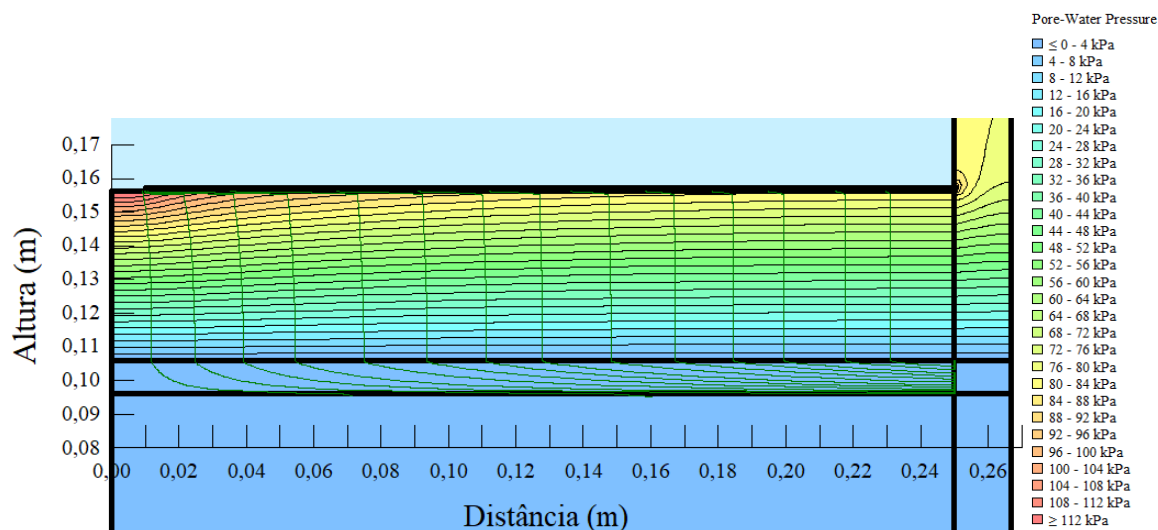


Figura 4.59 - Resultados modelagens numéricas em termos de poropressão: cilindro com diâmetro interno de 500 mm e espessura da camada de argila de 5 cm.

Foi observado por meio das Figuras 4.57, 4.58 e 4.59 que, a parede interna do cilindro restringe o fluxo da água que atravessa o dano. Diferentemente da rede de fluxo comum em vazamentos através de danos em geomembrana sem a existência de restrição (Figura 4.14), as linhas de fluxo apresentadas acima, mostram que a água que atravessa o dano e escoo horizontalmente na interface geomembrana/solo tende a infiltrar no solo verticalmente.

#### 4.7 Análise com base no estudo de Cardona (2013)

##### 4.7.1 Retro-análise para determinação do diâmetro equivalente que gera o mesmo vazamento de um dano linear

Cardona (2013) analisou vazamentos através de danos lineares provocados por estilete e formão para madeira. De forma geral, a autora verificou que os danos provocados por estilete apresentam maiores vazamentos que os danos realizados com formão. Este comportamento está relacionado ao fato do estilete provocar maiores danos nas paredes internas dos cortes. A partir da divisão dos valores de volume total de água medido nos ensaios pelo tempo de realização dos ensaios, foi possível obter os resultados em termos de vazão. As Figuras 4.60 e 4.61 mostram os resultados em termos de vazão, referentes aos danos feitos com estilete e formão, respectivamente. Observa-se que os resultados referentes aos danos feitos com formão apresentam uma tendência de comportamento, onde o pico de vazão ocorre entre as pressões

de 0 a 200 kPa, seguido de redução da vazão com o aumento da pressão. Já para os resultados referentes aos danos feitos com estilete, não houve um comportamento comum para todos os tamanhos de danos lineares na geomembrana.

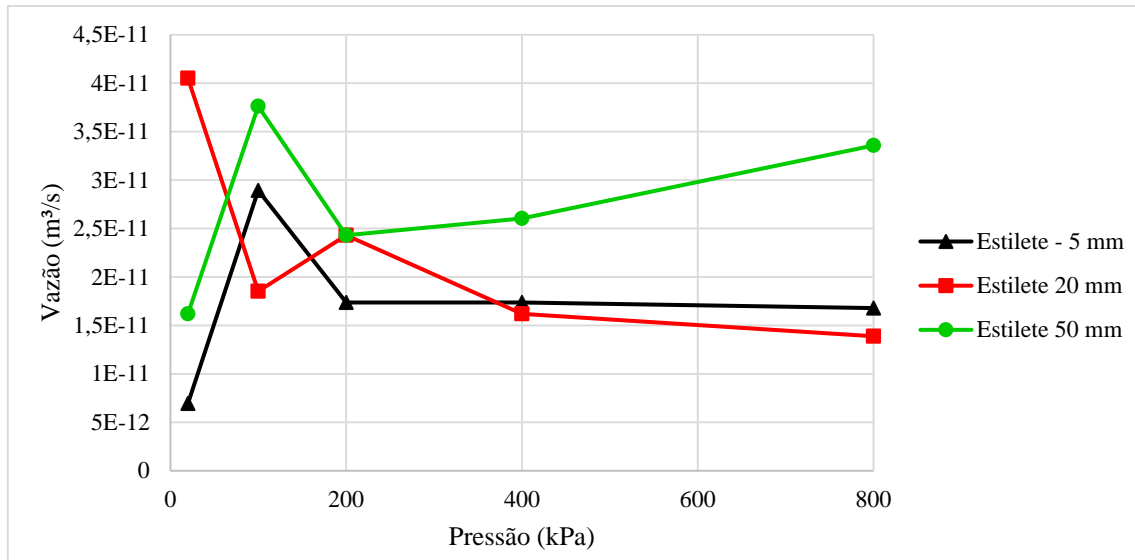


Figura 4.60 - Resultados de vazão através de danos realizados por estilete (Cardona, 2013).

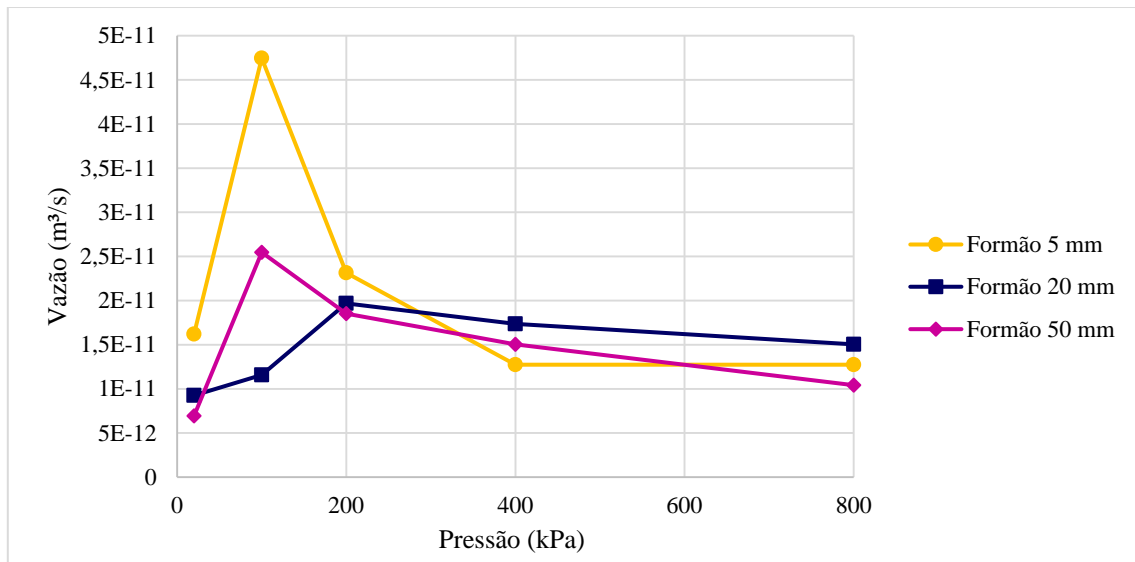


Figura 4.61 - Resultados de vazão através de danos realizados por formão (Cardona, 2013).

Cada ponto das curvas mostradas acima representa uma condição de ensaio (comprimento de dano e tipo de instrumento usado para causar o dano) para um certo nível de pressão (carga hidráulica sobre a geomembrana). Como o diâmetro do dano e a transmissividade de interface são desconhecidas neste problema, as duas variáveis foram

analisadas na retro-análise. O diâmetro do furo foi variado nas modelagens numéricas em 1, 2,5, 5, 10, 15, 20 e 50 mm, de modo a determinar qual seria a permeabilidade ao longo do plano necessária para gerar um dado valor de vazão (resultados dos ensaios de Cardona, 2013). Então, para cada ensaio realizado por Cardona (2013) (dano linear de 5 mm feito com estilete, por exemplo) foi possível determinar curvas permeabilidade ao longo do plano versus diâmetro do dano, referentes as pressões de 20, 100, 200, 400 e 800 kPa.

A Figura 4.62 mostra os resultados obtidos por meio da retro-análise de modo a determinar o diâmetro do dano equivalente que gera o mesmo vazamento para o caso com dano linear com comprimento de 5 mm provocado por estilete. Os resultados deste item são apresentados em termos de diâmetro do dano (abscissa) e permeabilidade ao longo do plano (ordenada), para uma dada pressão sobre a geomembrana.

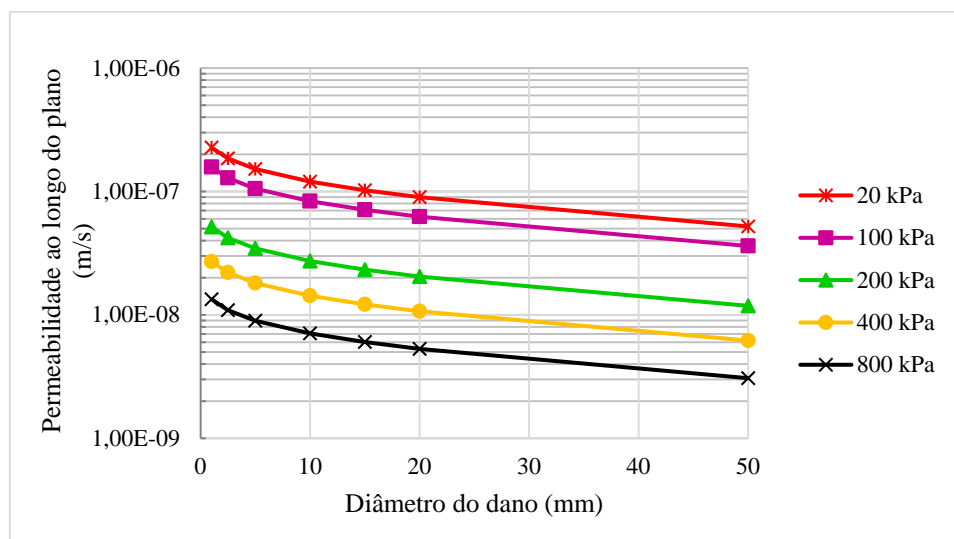


Figura 4.62 - Retro-análise dano linear 5 mm realizado por estilete.

No ensaio realizado por Cardona (2013) referente ao dano com comprimento de 5 mm feito com estilete, foi observada uma vazão de  $6,94 \cdot 10^{-12}$  m<sup>3</sup>/s para a pressão de 20 kPa, seguido de um pico de  $2,89 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para a pressão de 100 kPa, após o pico os valores de vazão não apresentaram grandes variações com o nível de pressão sobre a geomembrana. Como os valores de vazão obtidos por Cardona (2013) para as pressões de 200, 400 e 800 kPa foram próximos, foi possível avaliar com maior clareza a influência da pressão nas retro-análises.

Ao se analisar cada curva (permeabilidade ao longo do plano versus diâmetro do dano) separadamente, observa-se que a permeabilidade ao longo do plano é reduzida de acordo com o aumento do diâmetro do dano. De fato, este comportamento era esperado. Como a vazão é

fixa para uma dada condição de ensaio (comprimento do dano e ferramenta usada para provocar o dano) e nível de pressão sobre a geomembrana, a redução da permeabilidade ao longo do plano é necessária, uma vez que o aumento do diâmetro do dano implica em uma maior quantidade de água que passa pelo dano.

De forma geral, foi observada a tendência de redução da permeabilidade ao longo do plano da interface com o aumento da pressão sobre a geomembrana. Embora exista uma certa diferença entre os valores de vazão obtidas no ensaio de Cardona (2013) referente ao dano linear de 5 mm realizado com estilete para as pressões de 20 e 100 kPa, as curvas obtidas por meio da retro-análise (permeabilidade ao longo do plano versus diâmetro do dano) para as mesmas pressões encontram-se relativamente próximas. Provavelmente, houve uma compensação nos resultados da retro-análise devido à diferença do nível de pressão, visto que, 100 kPa é 5 vezes maior que 20 kPa e a intensidade dos vazamentos obtidos nos ensaios para danos lineares. A Figura 4.63 mostra os resultados obtidos por meio da retro-análise de modo a determinar o diâmetro do dano equivalente que gera o mesmo vazamento para o caso com dano linear com comprimento de 20 mm provocados por estilete.

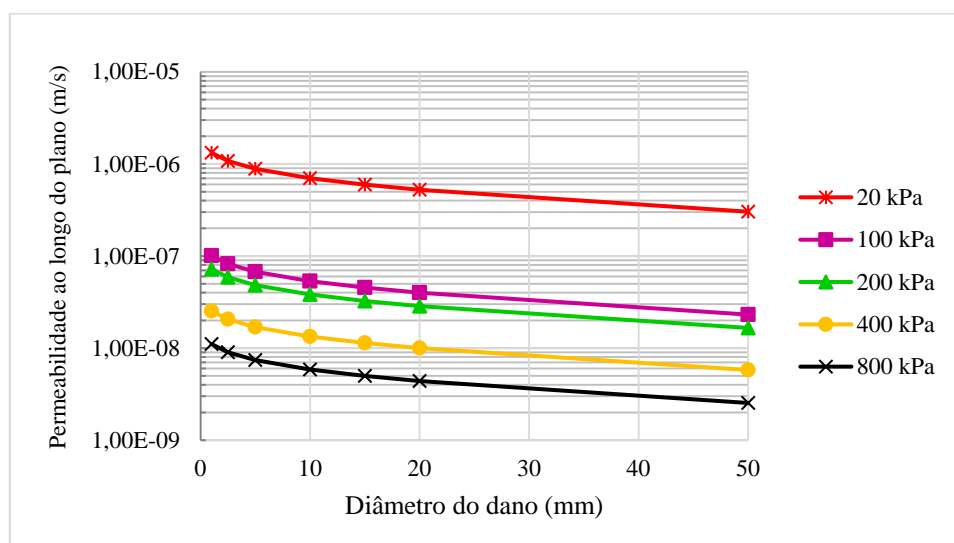


Figura 4.63 - Retro-análise dano linear 20 mm realizado por estilete.

No ensaio realizado por Cardona (2013) referente ao dano com comprimento de 20 mm feito com estilete, foi observada uma vazão de  $4,05 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para a pressão de 20 kPa,  $1,85 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para pressão de 100 kPa,  $2,43 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para pressão de 200 kPa, após a pressão de 200 kPa, houve uma tendência de redução da vazão com o aumento no nível de pressão sobre a geomembrana.

De forma geral, observa-se a tendência de redução da permeabilidade ao longo do plano da interface com o aumento do nível de pressão sobre a geomembrana. Diferentemente do que foi visto para o ensaio realizado com dano linear de 5 mm feito com estilete, a vazão encontrada no ensaio realizado com dano linear de 20 mm feito com estilete para pressão de 20 kPa foi superior que a vazão para 100 kPa, por isso, as curvas obtidas por meio da retro-análise referentes as pressões de 20 e 100 kPa encontram-se mais distantes uma da outra, quando comparadas com as curvas referentes ao ensaio realizado com dano linear de 5 mm feito com estilete. Ao se comparar as curvas obtidas pelas retro-análises referentes aos ensaios feitos com danos lineares (feitos com estilete) de 5 e 20 mm para pressão de 20 kPa, observa-se que, para uma mesma pressão, maiores vazões induzem maiores valores de permeabilidade ao longo do plano da interface.

Mesmo que a vazão encontrada no ensaio de Cardona (2013) referente ao dano linear de 20 mm realizado com estilete para a pressão de 200 kPa seja maior que a vazão para a pressão de 100 kPa, os valores de permeabilidade ao longo do plano obtidos pela retro-análise para pressão de 100 kPa foram superiores. Ou seja, uma compensação nos resultados da retro-análise foi verificada devido ao nível de pressão sobre a geomembrana e a intensidade dos vazamentos obtidos nos ensaios para danos lineares. A Figura 4.64 mostra os resultados obtidos por meio da retro-análise de modo a determinar o diâmetro equivalente do dano que gera o mesmo vazamento para o caso com dano linear com comprimento de 50 mm provocado por estilete.

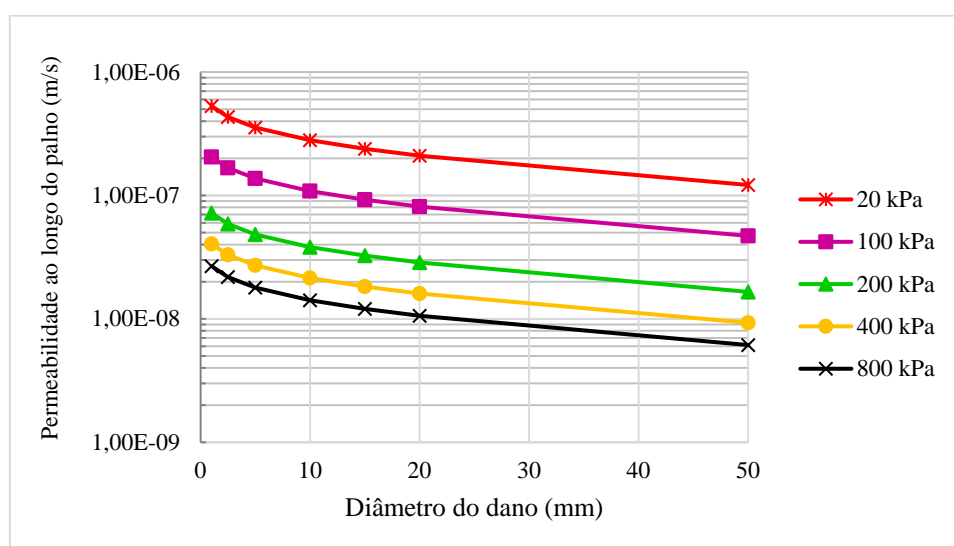


Figura 4.64 - Retroanálise dano linear 50 mm realizado por estilete.

No ensaio realizado por Cardona (2013) referente ao dano com comprimento de 50 mm feito com estilete, foi observada uma vazão de  $1,62 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para a pressão de 20 kPa,  $3,76 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para pressão de 100 kPa,  $2,43 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para pressão de 200 kPa. A partir de 200 kPa foi verificado um aumento da vazão com o aumento do nível de pressão sobre a geomembrana.

Mesmo que os resultados obtidos no ensaio ensaio de Cardona (2013) referente ao dano linear de 50 mm realizado com estilete tenham apresentado a tendência de aumento da vazão com o aumento da pressão a partir de 200 kPa (olhar curva verde da Figura 4.60), os resultados da retro-análise mostram que o aumento do nível de pressão causa redução da permeabilidade ao longo do plano da interface. Neste caso, o nível de pressão sobre a geomembrana teve maior influência nas retro-análises do que a intensidade dos vazamentos obtidos no ensaio. A Figura 4.65 mostra os resultados obtidos por meio da retroanálise para determinar o diâmetro equivalente do dano que gera o mesmo vazamento para o caso com dano linear com comprimento de 5 mm provocado com formão.

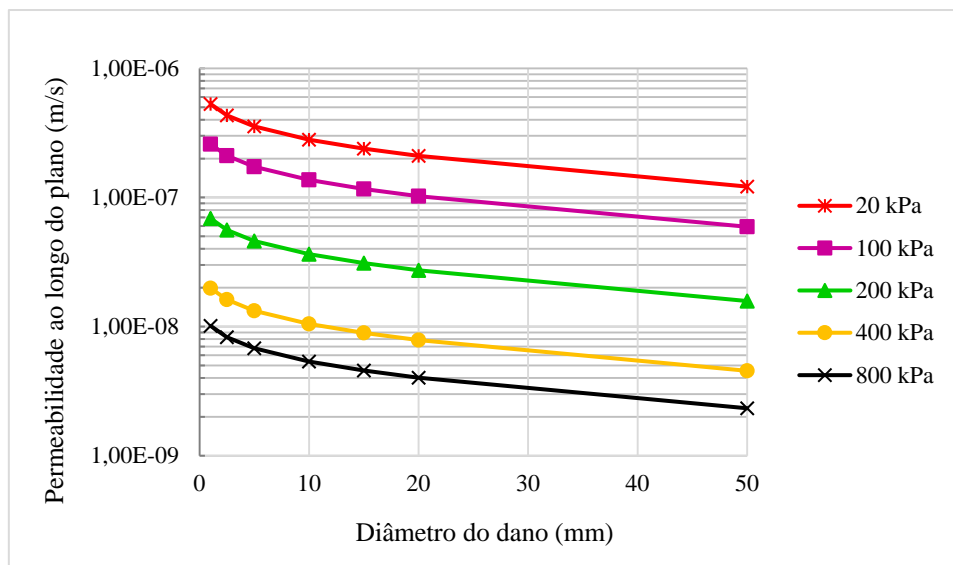


Figura 4.65 - Retro-análise dano linear 5 mm realizado por formão.

No ensaio realizado por Cardona (2013) referente ao dano com comprimento de 5 mm feito com formão, foi observada uma vazão de  $1,62 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para a pressão de 20 kPa,  $4,74 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s (pico) para pressão de 100 kPa, em seguida, redução da vazão com o aumento da pressão sobre a geomembrana, exceto para 800 kPa (apresentou o mesmo valor de vazão que 400 kPa). Mesmo que a vazão de pico encontrada no ensaio Cardona (2013) referente ao dano



linear de 50 mm realizado com estilete tenha sido verificada a 100 kPa, observa-se que as curvas apresentaram um comportamento em comum, com tendência de redução da permeabilidade ao longo do plano com o aumento da pressão sobre a geomembrana. A Figura 4.66 mostra os resultados obtidos por meio da retroanálise para determinar o diâmetro do dano equivalente que gera o mesmo vazamento para o caso com dano linear com comprimento de 20 mm provocado por formão.

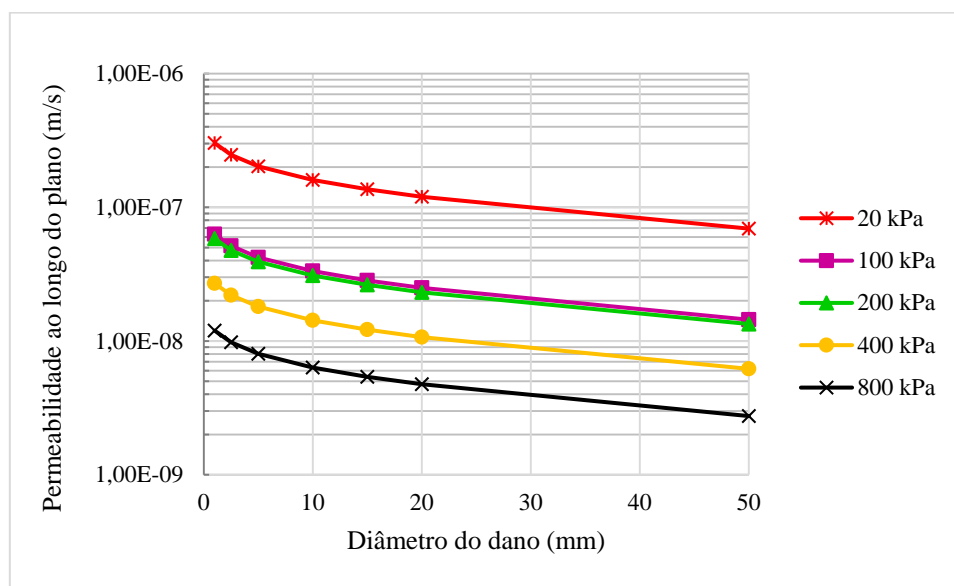


Figura 4.66 - Retro-análise dano linear 20 mm realizado por formão.

No ensaio realizado por Cardona (2013) referente ao dano com comprimento de 20 mm feito com formão, foi observada uma vazão de  $9,26 \cdot 10^{-12}$  m<sup>3</sup>/s para a pressão de 20 kPa,  $1,16 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para pressão de 100 kPa,  $1,97 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s (pico) para a pressão de 200 kPa. Em seguida, redução da vazão com o aumento da pressão sobre a geomembrana.

Observa-se que, as curvas obtidas pela retroanálise referente as pressões de 100 e 200 kPa encontram-se próximas uma da outra. Esperava-se que, para um dado diâmetro de dano, o valor permeabilidade ao longo do plano da interface para 200 kPa fosse significativamente menor que o valor para a pressão de 100 kPa. Porém, foi verificada uma compensação nos resultados (permeabilidade ao longo do plano) devido ao fato do vazamento obtido no ensaio feito com dano linear de 20 mm ter sido maior para a pressão de 200 kPa, fazendo com que os resultados das retroanálises para as pressões de 100 e 200 kPa sejam próximos.

A Figura 4.67 mostra os resultados obtidos por meio da retro-análise de modo a determinar o diâmetro equivalente do dano que gera o mesmo vazamento para o caso de dano

linear com comprimento de 50 mm provocados por formão. No ensaio realizado por Cardona (2013) referente ao dano com comprimento de 50 mm feito com formão, foi observada uma vazão de  $4,94 \cdot 10^{-12}$  m/s para a pressão de 20 kPa,  $2,55 \cdot 10^{-11}$  m/s (pico) para pressão de 100 kPa. Em seguida, redução da vazão com o aumento da pressão sobre a geomembrana. Observa-se a tendência de redução da permeabilidade ao longo do plano da interface com o aumento da pressão.

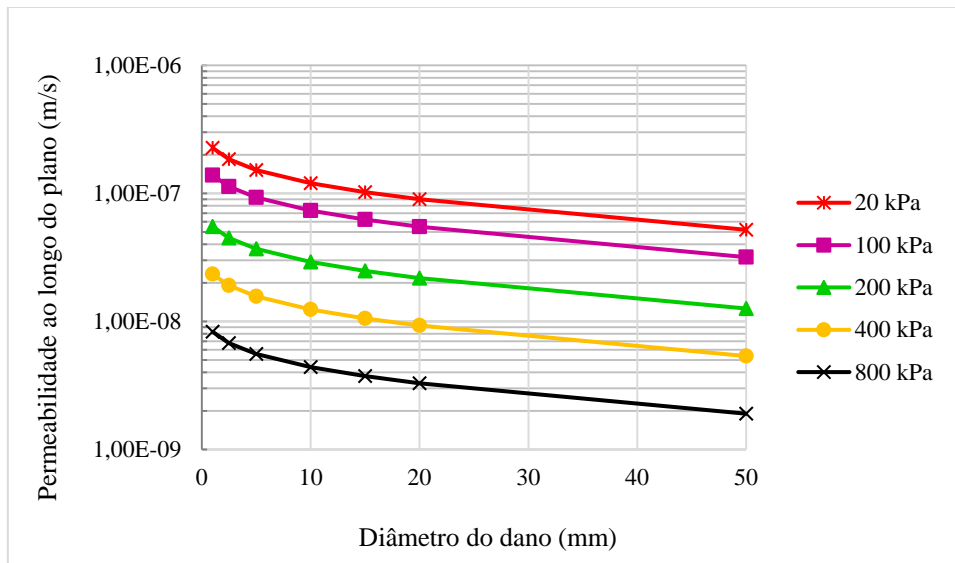


Figura 4.67 - Retro-análise dano linear 50 mm realizado por formão.

#### 4.7.2 Influência do formato do dano

Visando-se comparar os vazamentos através de danos circulares e lineares, são apresentados na Figura 4.68 os resultados em termos de vazão obtidos por Cardona (2013) referentes á danos lineares com 20 mm de comprimento e os resultados de vazão referentes ao ensaio feito com dano circular com 20 mm de diâmetro.

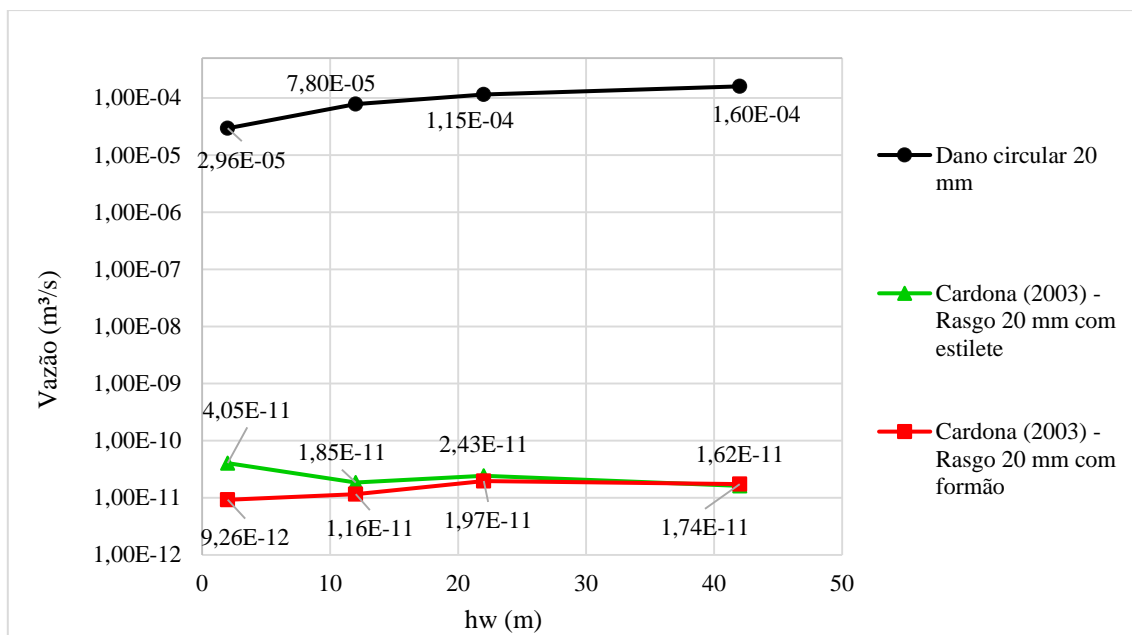


Figura 4.68 - Comparação entre as vazões obtidas através de danos lineares e circulares.

Observa-se que, o formato do dano exerce grande influência nos resultados de vazão, onde os resultados referentes a condição com dano circular foram bem superiores que os resultados obtidos por danos lineares. Apesar da grande diferença entre os valores de vazão, percebe-se que a curva referente aos vazamentos através danos lineares feitos com formão e a curva referente aos vazamentos através de danos circular apresentaram um comportamento semelhante (até 200 kPa), com tendência de aumento da vazão com o aumento da pressão sobre a geomembrana.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação investigou numericamente a intensidade de vazamentos através de danos mecânicos em geomembranas. Além do estudo numérico, compararam-se previsões numéricas com resultados de diferentes soluções analíticas presentes na literatura. Neste item são mostradas as conclusões obtidas por meio dos resultados e análises apresentadas nesta pesquisa.

Nas análises numéricas que simulam a condição de barreira composta por geomembrana e solo, foi concluído que:

- A dimensão da camada de solo exerce pouca influência nos vazamentos através de danos em geomembranas, pois a variação da vazão devido ao aumento da dimensão da camada de solo (4 m x 1 m, 20 m x 5 m e 100 m x 50 m) foi pequena para os coeficientes de permeabilidade do solo investigados.
- A contribuição do fluxo horizontal na interface entre a geomembrana e o solo nos vazamentos através dos danos é relevante para solos argilosos, visto que as modelagens com a inserção de uma interface apresentaram valores de vazão maiores (aproximadamente duas ordens de grandeza) que os valores de vazão para as modelagens sem interface.
- A variação da carga hidráulica sobre a geomembrana exerce influência na distribuição das poropressões no solo, sendo que as maiores poropressões foram verificadas nas regiões próximas ao dano. O aumento no diâmetro do dano e o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana geraram um aumento nos vazamentos através dos danos, assim como foi observado por Barroso et al. (2006).

Por meio da comparação entre metodologias (numérica, analítica e empírica) para a condição sem geotêxtil, foi possível concluir que:

- Para as três condições de contato entre geomembrana e solo subjacente, os resultados obtidos pela Equação empírica 2.12, proposta por Giroud et al. (1989), se comparam bem com os resultados obtidos pelas modelagens numéricas.
- A piora na condição de contato (modelagens numéricas) de excelente para bom, gera um aumento na vazão de 117,33 %, já a piora na condição de contato excelente para ruim, gera um aumento na vazão de 689,72 %. Além disso, a condição de contato ruim apresenta maiores poropressões ao longo da profundidade da camada, isso se deve a maior intensidade de fluxo de interface.

Por meio da comparação entre metodologias (numérica, analítica) para a condição com geotêxtil, foi possível concluir que:

- A redução da transmissividade de interface do geotêxtil (gerada pelo aumento da pressão sobre a geomembrana) exerceu pouca influência nos resultados obtidos pela solução analítica proposta por Giroud & Bonaparte (1989b), uma vez que os valores de raio da área molhada e vazão não apresentaram grandes variações com o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana.
- Foi observado que a solução analítica proposta por Giroud & Bonaparte (1989b) apresentou menor capacidade de prever vazamentos através de danos em geomembrana presentes em barreiras sobre solos com coeficientes de permeabilidade menores. Desta forma, em casos em que o fluxo horizontal na interface geomembrana/solo é intenso, a modelagem numérica torna-se a ferramenta mais recomendável para a solução do problema

Por meio da comparação entre metodologias (numérica, empírica e experimental) para a condição de barreira composta por geomembrana, GCL e solo, foi possível concluir que:

- A comparação entre os resultados obtidos por meio das modelagens numéricas e solução empírica (Equação 2.16), proposta por Touze-Foltz & Barroso (2006) apresentam um comportamento semelhante para os dois diâmetros de dano (10 mm - ensaio de média escala e 110 mm - ensaio de grande escala).
- Em relação à comparação com os resultados experimentais obtidos por Barroso et al. (2006), observou-se uma melhor comparação entre metodologias para a condição de ensaio de grande escala, principalmente entre os resultados experimentais e a solução empírica proposta por Touze-Foltz & Barroso (2006) (Equação 3.16). Ou seja, a escala do ensaio exerce grande influência na obtenção de resultados que sejam representativos.

Por meio dos resultados obtidos pelo ensaio experimental foi possível concluir que:

- A vazão tende a aumentar com o aumento da carga hidráulica. Além disso, a taxa de aumento da vazão foi maior para menores cargas hidráulicas.

Por meio dos resultados obtidos nas retro-análises (levando em consideração os resultados experimentais), conclui-se que:

- Os valores de permeabilidade ao longo do plano da interface geomembrana/solo diminuem com o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana.
- Nas análises referentes a influência das paredes do cilindro de ensaios com geomembranas danificadas, foi observado que, com a redução da espessura da camada de solo a influência das paredes do cilindro nos vazamentos foi menor.

Por meio dos resultados obtidos nas retro-análises (levando em consideração os resultados de Cardona (2013)), foi concluído que:

- A permeabilidade ao longo do plano é reduzida de acordo com o aumento do diâmetro do dano. Para uma mesma vazão foi determinada a permeabilidade ao longo do plano da interface referente a um diâmetro de dano, para se obter a mesma vazão em que o dano era um corte. Desta forma, a redução da permeabilidade ao longo do plano da interface é necessária, uma vez que o aumento do diâmetro do dano implica em uma maior quantidade de água que passa pelo dano.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Avaliar por meio de ensaios laboratoriais vazamentos através de danos em geomembrana. Para tanto, sugere-se analisar: (1) influência do tipo e dimensão do dano (linear e circular); (2) pressão sobre a geomembrana; (3) diferentes configurações de barreira - geomembrana e solo, geomembrana, geotêxtil e solo e geomembrana GCL e solo; (4) tipo de solo subjacente à geomembrana; (5) condição de saturação do solo;

Realizar retro-análises levando em consideração os resultados obtidos nos estudos experimentais, de modo a determinar parâmetros relevantes como, por exemplo, a transmissividade de interface;

Realizar modelagens numéricas 3D, de modo a estudar vazamentos através de danos lineares em geomembrana;

Resolver analiticamente as condições de barreiras citadas anteriormente, visando avaliar a eficiência da solução;

Desenvolver experimentos de grande escala, de modo a determinar a influência do fator de escala nos vazamentos através de danos em geomembrana.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, P. R. & VERTEMATTI, J. C. (2015). Manual Brasileiro de Geossintéticos, Editora Blucher, São Paulo, SP, 2. Ed., p. 17-30.
- AZEVEDO, A. F. M. Método dos Elementos Finitos. (2003). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.
- BARROSO, M., TOUZE-FOLTZ, N., VON MAUBEUGEK, 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*. v. 24, p. 139-155.
- CAMARGO, F. E. (2002). Estados limites de fundações considerando a resposta da superestrutura. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre.
- 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.
- CARTEAUD, F. & TOUZE-FOLTZ, N. (2004). Influence of Geotextiles at the Interface of Landfill Bottom Composite Liners. Paper presented at the Eurogeo 3, Third European Conference on Geosynthetics.
- 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*, vol.23, issue.2, p.27.
- CAZZUFFI, D. A., GIROUD, J. P., SCUERO, A. & VASCHETTI, G. (2010). Geosynthetic barriers systems for dams. 9th International conference on geosynthetics, Guarujá, Brasil, Vol. 1, p. 115-163.
- CAZZUFFI, D., GIOFFRÈ, D. 2020. Lifetime assessment of exposed PVC-P geomembranes installed on Italian dams. *Geotextiles and Geomembranes* 48:2, p. 130-136
- COLMANETTI, J.P. (2006). Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento. Tese de doutorado, Publicação nº G.TD-037/2006, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 272 p.
- DÁVILA, L.I., PALMEIRA, E. M. (2016). A Study on Some Factors Affecting Leakage Through Mechanical Damages in Geomembranes Subjected to High Hydraulic Heads. Em: 3rd Panamerican Conference on Geosynthetics - GeoAmericas 2016, v. 2, p. 1830-1838.
- EL-ZIEN, A., MCCARROLL, I., & TOUZE-FOLTZ, N. (2012). Three-Dimensional finite element analyses of seepage and contaminant transport through composite geosynthetic clay liners with multiple defects. *Geotextiles and Geomembranes*, 33, 34-42.

- GEO-SLOPE International Ltd. (2012). Seepage Modeling with SEEP/W. Canada.
- GEROTO, R.E. (2008). Desempenho de camadas de Proteção para Geomembranas. Dissertação de Mestrado-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 188p.
- GILSON-BECK, A. (2019). Controlling leakage through installed geomembranes using electrical leak location. *Geotextiles and Geomembranes*.
- GIROUD, J. P. (2016). Leakage Control using Geomembrane Liners. *Soils and Rocks*, São Paulo, 39 (3): 213-235.
- GIROUD, J.P. & BONAPARTE, R. (1989). Leakage through Liners Constructed with Geomembranes, Part I: Geomembrane Liners. *Geotextiles & Geomembranes*. v. 8, n. 1, p. 27-67.
- GIROUD, J.P. & BONAPARTE, R. (1989). Leakage through Liners Constructed with Geomembranes, Part II: Composite Liners. *Geotextiles & Geomembranes*. v. 8, n. 2, p. 71-111.
- GIROUD, J.P., KHATAMI, A., BADU-TWENEBOAH, K. (1989). Evaluation of the Rate Leakage Through Composite Liners. *Geotextiles and Geomembranes*. v. 8, n. 4, p. 337-340.
- GIROUD, J.P. (1997). Equations for Calculating the Rate of Liquid Migration Through Composite Liners Due to Geomembrane Defects. *Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Migration Control Using Geosynthetic Liner Systems*, v. 4, n. 3-4, p. 335-348.
- GIROUD, J.P. (2017). Leakage Control using Geomembrane Liners. The Victor de Mello Lecture, *Soils and Rocks*, São Paulo, Brazil, v. 39, n. 3, p. 213-235.
- GIROUD, J.P., KING, T.D., SANGLERAT, T.R., HADJ-HAMOU, T., KHIRE, M.V. (1997). Rate of Liquid Migration Through Defects in a Geomembrane Placed on a Semi-Permeable Medium. *Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Migration Control Using Geosynthetic Liner Systems*, v. 4, n. 3-4, p. 349-372.
- ICOLD (2010). Geomembrane sealing systems for dams - Design principles and review of experience. Bulletin 135 of the International Commission on Large Dams, Paris, 464 p.
- IGS - BRASIL. (2018). Os Geossintéticos. Disponível em:< <http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>>. Acesso em: 01 de jan. de 2020.
- INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY. (2013). *Geosynthetic Barriers: Applications & Benefits*.
- LI, T.-K., & ROWE, R. K. (2019). GCL Self-healing: fully penetrating hole/slit hydrated with RO water and 10 mM Na solution. *Geosynthetics International*.



- MCWATTERS, R. S., & ROWE, R. K. (2010). Diffusive Transport of VOCs through LLDPE and Two Coextruded Geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(9), 1167–1177.
- 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, v. 2, p. 557-560*
- PALMEIRA, E. M. (2018). *Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 1. Ed. v. 1, p. 294.*
- 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.*
- RIBEIRO, F. L. B. (2005). *Introdução ao Método dos Elementos Finitos - Notas de Aula. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.*
- ROWE, R. K. (2005). Long-term performance of contaminant barrier systems. *Géotechnique*, 55(9), 631–678. doi:10.1680/geot.2005.55.9.631
- ROWE, R. K., JEFFERIS, S., ABDELAA. F. B., DOMINIJANNI. A., LEGGE. K., PALMEIRA. E. M., SCHEIRS. J., SHACKELFORD. C. D., SCALIA. J., ZHAN. T. LT., BENSON. C. H., BOUAZZA. A., DI EMIDIO. G., EVANS. J. C., FRATALOCCHI. E., GARDONI. M. G., KATSUMI. T., MANASSERO. M., PARRA. D. (2022). Protecting the environment from contamination with barrier systems: advances and challenges. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney, Austrália, 108 p. (no prelo).*
- ROWE, R. K., JOSHI, P., BRACHMAN, R. W. I., & MCLEOD, H. (2017). Leakage through Holes in Geomembranes below Saturated Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(2), 04016099.
- ROWE, R. K., LI, T.-K. (2020). Self-healing of circular and slit defects in GCLs upon hydration from silty sand under applied stress. *Geotextiles and Geomembranes*.
- ROWE, R.K., GARCIA, J.D., BRACHMAN, R.W.I., HOSNEY, M.S. (2019). Hydraulic and chemical performance of geosynthetic clay liners isothermally hydrated from silty sand subgrade. *Geotext. Geomembranes* 47 (6), 740-754.
- RUIZ-GÓMEZ, C. (2014). *Análise de Danos em Geomembranas por meio de Ensaio de Laboratório em Diferentes Escalas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM246/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.*
- SAIDI, F., TOUZE-FOLTZ, N., GOBLET, P. (2006). 2D and 3D Numerical modelling of flow through composite liners involving partially saturated GCLs. *Geosynthetics International*. 13 (6), 265– 276.

- SANTOS, C. R. 2004. Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado. 104 f. Dissertação de mestrado. Escola de engenharia de São Carlos. São Carlos.
- TOUZE-FOLTZ, N. & BARROSO, M. (2006). Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through GCL-geomembrane composite liners. *Geosynthetics International*, 13(2), 73-82.
- 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, n. 6, p. 215–233.
- TOUZE-FOLTZ, N. (2002A). Evaluation of the Hydraulic Transmissivity in Soil Liner-Geomembrane Interfaces. *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, vol. 2. Balkema, Nice, France, 22–27 September, pp. 799–804.
- VILAR, O. M., BUENO, B. DS. & BENVENUTO. C. (2015). Aplicações em barreiras impermeabilizantes. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. Vertematti, José Carlos (ed.), Edgar Blücher, São Paulo, Brasil, p. 457-404
- ZORNBERG, J. G. (2005). Advances on the use of geosynthetics in hydraulic systems. *Nineteenth Geosynthetic Research Institute Conference (GRI)*, Geosynthetics Institute, Las Vegas, NV, p. 1-17.