**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

GABRIEL ORQUIZAS MATTIELO PEDROSO

Avaliação da superfície deformada de geomembrana de PEAD em camadas de proteção por meio do ensaio de compressão estática

**São Carlos - SP
2017**

GABRIEL ORQUIZAS MATTIELO PEDROSO

Avaliação da superfície deformada de geomembrana de PEAD em camadas de proteção por meio do ensaio de compressão estática

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Lins da Silva

VERSÃO CORRIGIDA
ORIGINAL SE ENCONTRA DISPONÍVEL NA UNIDADE QUE ALOJA O
PROGRAMA

**São Carlos - SP
2017**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do
Serviço de Biblioteca – EESC/USP**

P372a Pedroso, Gabriel Orquizas Mattiello
Avaliação da superfície deformada de geomembrana de
PEAD em camadas de proteção por meio do ensaio de
compressão estática / Gabriel Orquizas Mattiello
Pedroso; orientador Jefferson Lins da Silva. São
Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2017.

1. Geomembrana. 2. Stress crack. 3. Funcionamento.
4. Compressão estática. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GABRIEL ORQUIZAS MATTIELO PEDROSO**.

Título da dissertação: " Avaliação da superfície deformada de geomembrana de PEAD sob camadas de proteção por meio do ensaio de compressão estática ".

Data da defesa: 12/04/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Jefferson Lins da Silva**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Delma de Mattos Vidal**
(Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ITA)

APROVADO

Prof. Dr. **Eder Carlos Guedes dos Santos**
(Universidade Federal de Goiás/UFG)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTO

À minha família, em especial minha mãe Edaguimar e meu pai Rubens, que sempre me apoiaram e me motivaram, mesmo nos momentos mais difíceis.

A minha namorada Monique por ser a minha inspiração.

Ao Prof. Jefferson pelas orientações, amizade e paciência durante as etapas do trabalho. E ao Prof. Roberto Hideaki Tsunaki por fornecer e realizar as leituras do lençol de chumbo na Máquina de Leitura de Coordenadas.

Aos amigos de São Carlos Cahio, Yara, Heider e em especial Túlio, pelos momentos descontraídos e divertidos que passamos juntos.

Aos técnicos e estagiários dos Laboratórios de Geotecnia e Geossintéticos, em especial ao Clever e ao Dito por toda a prestatividade, amizade e apoio, sem os quais não seria possível realizar este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

PEDROSO, O. M. G. **Avaliação da superfície deformada de geomembrana de PEAD em camadas de proteção por meio do ensaio de compressão estática.** 2017. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Nos sistemas de revestimento de fundo de aterros sanitários e pilhas de rejeito de mineração, é comum utilizar geotêxtil não-tecido para a proteção ao puncionamento da geomembrana por objetos pontiagudos como a brita. Neste trabalho, realiza-se um estudo experimental a fim de avaliar a superfície deformada de geomembrana de PEAD, com 2 mm de espessura, em camada de proteção sujeita a carregamentos de 600 kPa e 1800 kPa ao longo de 100 h, com o objetivo de simular danos mecânico de operação. Para a leitura da superfície deformada da geomembrana utilizou-se um lençol de chumbo localizado sob a geomembrana e as suas deformações foram estimadas a partir de uma máquina de leitura por coordenadas, com grid de 4 mm. Além deste, foi estimada a superfície deformada da geomembrana para o grid de 1 mm, com a aplicação do método de interpolação chamado de triangulação. Ainda foram utilizados extensômetros elétricos para estimar deformações pontuais na geomembrana. A fim de prevenir o puncionamento da geomembrana e limitar a sua deformação, utilizou-se como camada de proteção quatro geotêxteis não tecidos do tipo PP com massa por unidade de área variando entre 550 e 1300 g/m², e uma camada de 10 cm de argila. Para a carga de 600 kPa, todas as camadas de proteção foram eficientes para evitar o puncionamento da geomembrana e limitar a sua deformação em 6%. Na carga de 1800 kPa, para proteção de geotêxtil, as configurações duplas tiveram melhor desempenho com valores de deformações menores que 6%, e a camada de 10 cm de argila foi ainda mais eficaz. Por fim, o trabalho mostrou que a superfície deformada decorrente do tipo de proteção adotado também é influenciada pelo grau de compactação do solo, o tipo de brita, a carga aplicada e as propriedades físicas do elemento de proteção.

Palavras-chave: geomembrana; puncionamento; compressão estática; *stress crack*

ABSTRACT

PEDROSO, O. M. G. Evaluation of the deformed surface of PEAD geomembrane in protective layers by means of the static compression test. 2017. 146 p. Dissertação (Mestrado) – Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

In landfill backfill systems and mining tailings piles, it is common to use nonwoven geotextiles to protect geomembrane punctures by sharp objects such as gravel. In this work, an experimental study was carried out to evaluate the deformed HDPE geomembrane surface, with a thickness of 2 mm, under a protective layer subjected to loads of 600 kPa and 1800 kPa over 100 h, with the objective of Simulate mechanical damage of operation. To read the deformed surface of the geomembrane was used a sheet of lead located under the geomembrane and its deformations were estimated from a machine of reading by coordinates, with grid of 4 mm. Also, the deformed surface of the geomembrane was estimated for the grid of 1 mm, with the application of the interpolation method called triangulation. Electrical extensometers were also used to estimate point deformations in the geomembrane. In order to prevent the puncture of the geomembrane and to limit its deformation, four non-woven PP-type geotextiles with a mass per unit area ranging from 550 to 1300 g / m² and a layer of 10 cm of clay. At the load of 600 kPa, all the layers of protection were efficient to avoid the puncture of the geomembrane and to limit its deformation in 6%. In the vertical load of 1800 kPa, for geotextile protection, the double configurations had better performance with deformation values lower than 6%, and the 10 cm layer of clay was even more effective. Finally, the work showed that the deformed surface resulting from the type of protection adopted is also influenced by the degree of soil compaction, the type of gravel, the applied load and the physical properties of the protection element.

Key words: geomembrane; puncture; static compression; stress crack

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema resumido do efeito da cristalinidade no polímero.	24
Figura 2 – Comportamento tensão x deformação de diferentes geomembranas.....	25
Figura 3 - Utilização de geossintéticos em um aterro sanitário.	28
Figura 4 - Exemplo de revestimento simples. Sendo que GBR-P é barreira geossintética polimérica.	31
Figura 5 – Exemplo de revestimento composto. Onde: GBR-P - a barreira geossintética polimérica; e GBR-C - a barreira geossintética argilosa.....	31
Figura 6 – Exemplo de revestimento duplo. Onde GBR-P - a barreira geossintética polimérica.....	32
Figura 7 – Evolução da tensão versus tempo em um geossintético.....	33
Figura 8 – Fluxograma do programa de ensaios de danos de instalação	36
Figura 9 – Ensaio de punção hidroestática	40
Figura 10 – Configuração do ensaio de compressão estática.....	42
Figura 11 – Método alongamento de arco.....	43
Figura 12 – Método de cálculo por diferenças finitas	44
Figura 13 – Curva de distribuição granulométrica	50
Figura 14 – Curva de compactação	51
Figura 15 – Curva de distribuição granulométrica da brita	52
Figura 16 – Gráfico de frequência da forma dos agregados graúdos	52
Figura 17 – Sessão da caixa de ensaio, mostrando configurações de 1 a 10	57
Figura 18 – Base de solo compactado e colocação da geomembrana na lateral interna da caixa.....	59
Figura 19 – Colocação do lençol de chumbo e geomembrana	60
Figura 20 – Preenchimento com material granular e detalhe final da caixa	60
Figura 21 – Instalação dos extensômetros elétricos	61
Figura 22 – Local de instalação dos extensômetros elétricos	62
Figura 23 – Detalhe da Ponte de Wheatstone utilizada	63
Figura 24 – Calibração dos EE.....	63
Figura 25 – Calibração do extensômetro elétrico	63
Figura 26 – Esquema da área de leitura do lençol de chumbo	64
Figura 27 – Máquina de Leitura por Coordenadas	65
Figura 28 – Esquema da análise das deformações	66

Figura 29 – Gráfico obtido pelo fissuramento sob tensão constante	68
Figura 30 – Esquema da apresentação dos resultados.....	71
Figura 31 – Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 1	73
Figura 32 – Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 5	74
Figura 33 – Superfície deformada da geomembra: Ensaio 1.....	75
Figura 34 – Superfície deformada da geomembra: Ensaio 5.....	75
Figura 35 – Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 1 ...	76
Figura 36 – Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 1 ...	77
Figura 37 – Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 5 ...	77
Figura 38 – Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 5.....	78
Figura 39 – Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 2	80
Figura 40 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 6	81
Figura 41 – Superfície deformada da geomembra: Ensaio 2.....	82
Figura 42 – Superfície deformada do Ensaio 6.....	82
Figura 43 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 2....	83
Figura 44 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 2....	84
Figura 45 - Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 2.....	84
Figura 46 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 6....	85
Figura 47 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 6....	85
Figura 48 - Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 6.....	86
Figura 49 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 3	87
Figura 50 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 7	88
Figura 51 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 3	89
Figura 52 – Superfície deformada da geomembrana Ensaio 7.....	90
Figura 53 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 3....	90
Figura 54 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 3....	91
Figura 55 - Comparação EE 4 e leitura lençol de chumbo do Ensaio 3.....	91
Figura 56 – Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 3.....	92
Figura 57 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 7....	92
Figura 58 - Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 7.....	93
Figura 59 - Gráfico de frequência para o Ensaio 4	94
Figura 60 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 8	95
Figura 61 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 4	96
Figura 62 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 8	97

Figura 63 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 4	97
Figura 64 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 4	98
Figura 65 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 4	98
Figura 66 - Análise pontual da deformação: EE 4 x lençol de chumbo - Ensaio 4	99
Figura 67 - Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 4	99
Figura 68 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 8 ..	100
Figura 69 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 8 ..	100
Figura 70 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 8 ..	101
Figura 71 - Comparação EE 4 e leitura lençol de chumbo do Ensaio 8	101
Figura 72 - Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 8	102
Figura 73 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 11.....	103
Figura 74 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 12.....	104
Figura 75 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 11	105
Figura 76 - Superfície deformada do Ensaio 12	106
Figura 77 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 11	106
Figura 78 - Análise pontual da deformação: EE 4 x lençol de chumbo - Ensaio 11	107
Figura 79 - Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 11	107
Figura 80 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 12	108
Figura 81 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 12	108
Figura 82 – Curva <i>strain</i> x tempo do Ensaio 12	109
Figura 83 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 9.....	110
Figura 84 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 10.....	111
Figura 85 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 09.....	112
Figura 86 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 10.....	113
Figura 87 – Locais dos corpos de prova para ensaio pós-dano da geomembrana.	113
Figura 88 – Comparação da variação da força máxima do pós-dano com a geomembrana virgem	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos principais tipos de geomembranas.....	23
Tabela 2 – Valores típicos de cristalinidade para diferentes polímeros de geomembrana.	24
Tabela 3 – Propriedades e ensaios requeridos para utilização de geotêxtil como proteção	26
Tabela 4 – Recomendações alemãs para o uso de geomembranas em aterros de resíduos	29
Tabela 5 – Propriedades mínimas recomendadas para a sobrevivência de geomembranas às operações de instalação	35
Tabela 6 – Fatores de modificação para a escolha do geotêxtil.....	39
Tabela 7 – Fatores de redução para escolha do geotêxtil.....	39
Tabela 8 – Valores de RF_{CR} revisados.....	41
Tabela 9 – Recomendações de ensaio	42
Tabela 10 – Propriedades geotécnicas do solo utilizado	50
Tabela 11 – Ensaio de caracterização da brita.....	51
Tabela 12 – Ensaio de caracterização da geomembrana	53
Tabela 13 – Ensaio de caracterização do geotêxtil 1	55
Tabela 14 – Ensaio de caracterização do geotêxtil 2	56
Tabela 15 – Configurações dos ensaios de compressão estática.....	58
Tabela 16 – Valores limitantes de deformação da geomembrana	67
Tabela 17 – Resultado do fissuramento sob tensão constante	67
Tabela 18 – Tipos de dano na geomembrana.....	69
Tabela 19 – Resumo dos deslocamentos observados nos ensaios com o GTX-N 1	72
Tabela 20 – Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 1	72
Tabela 21 – Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 5	73
Tabela 22 - Resumo dos deslocamentos nos ensaios com o 2 x GTX-N1 duplo.....	79
Tabela 23 – Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 2	79
Tabela 24 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 6.....	80
Tabela 25 - Resumo dos deslocamentos observados nos ensaios com o GTX-N 2	86
Tabela 26 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 3	87
Tabela 27 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 7	88
Tabela 28 - Resumo dos deslocamentos nos ensaios com o GTX-N 2 duplo	93

Tabela 29 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 4	94
Tabela 30 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 8	95
Tabela 31 - Resumo dos deslocamentos nos ensaios com camada de solo.....	102
Tabela 32 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 11 .	103
Tabela 33 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 12 .	104
Tabela 34 - Resumo dos deslocamentos nos ensaios sem proteção.....	109
Tabela 35 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 09 .	110
Tabela 36 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 10 .	111
Tabela 37 – Resumo dos resultados do ensaio pós-dano	114
Tabela 38 - Resumo dos resultados dos ensaios realizados.....	116

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	Aspectos gerais e terminologias.....	23
2.1.1	Geomembrana	23
2.1.2	Geotêxtil	25
2.1.3	Aplicações da geomembrana	27
2.2	Composição do SRF com geossintéticos	30
2.3	Mecanismo de degradação	33
2.4	Danos mecânicos.....	34
2.4.1	Danos de instalação	34
2.4.2	Danos de operação	37
2.4.3	Metodologia Koerner (1996).....	38
2.4.4	Metodologia BAM	41
2.5	Fatores que influenciam as deformações da geomembrana.....	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Caracterização dos materiais	49
3.1.1	Solo	49
3.1.2	Brita.....	51
3.1.3	Geomembrana	52
3.1.4	Geotêxtil	54
3.2	Configuração do ensaio de compressão estática	56
3.2.1	Montagem da caixa	59
3.2.2	Instrumentação.....	60
3.3	Leitura da deformação por meio do lençol de chumbo.....	64
3.4	Fissuramento sob tensão constante.....	66
3.5	Ensaio de Pós dano: Puncionamento estático	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71

4.1	Ensaio 1 e 5: GTX-N 1	72
4.1.1	Superfície deformada.....	72
4.1.2	Análise pontual da deformação	76
4.2	Ensaio 2 e 6: 2 x GTX-N 1	78
4.2.1	Superfície deformada.....	79
4.2.2	Análise pontual da deformação	83
4.3	Ensaio 3 e 7: GTX-N 2.....	86
4.3.1	Superfície deformada.....	86
4.3.2	Análise pontual da deformação	90
4.4	Ensaio 4 e 8: 2 x GTX-N 2	93
4.4.1	Superfície deformada.....	93
4.4.2	Análise pontual da deformação	97
4.5	Ensaio 11 e 12: Proteção com camada de solo.....	102
4.5.1	Superfície deformada.....	103
4.5.2	Análise pontual da deformação	106
4.6	Ensaio 9 e 10: Sem proteção.....	109
4.6.1	Superfície deformada.....	109
4.6.2	Análise pontual da deformação	113
4.7	PÓS DANO DA GEOMEMBRANA	113
4.8	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	115
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
	REFERÊNCIAS.....	128
	APÊNDICE A	133
	APÊNDICE B	139

1 INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas ocasionam diversos problemas ambientais, especificamente nas obras de mineração e aterro sanitário, com a realização de pilhas de rejeito e a geração de lixiviado e chorume, respectivamente. Nessas obras, as geomembranas exercem a função de barreira de fluídos e, assim, quando bem executas e projetadas, evitam que o chorume e o lixiviado contaminem o solo subjacente e as águas subterrâneas. No entanto, há casos em que a geomembrana ao entrar em contato com o elemento drenante pode ser puncionada ou apresentar deformações excessivas, o que pode levar a ruptura e perda da função impermeabilizante.

O confinamento dos resíduos e rejeitos em aterros sanitários e pilhas de rejeito de mineração deve ser realizado de maneira adequada, para isto, recomenda-se o uso de um sistema de barreiras de controle e desvio de fluxo, evitando a contaminação do solo e das águas subterrâneas. As geomembranas são componentes essenciais neste sistema devido à sua função de impermeabilização.

As barreiras de controle e desvio de fluxo mais utilizadas em sistema de revestimento de fundo (SRF) consistem em uma camada drenante, elemento de proteção, geomembrana de PEAD (polietileno de alta densidade) sobre uma camada de geossintético com argila (GCL) e uma camada de argila compactada (CCL). Segundo Rowe *et al.* (2004), esta barreira é eficiente contra o transporte de contaminantes, devido a seu baixo valor de permeabilidade, normalmente abaixo de 10^{-12} cm/s. Vale ressaltar que, as geomembranas de PEAD têm uma boa estabilidade química e resistência à corrosão.

Por conta da função desempenhada pela geomembrana nas barreiras de controle e desvio de fluxo, o controle de qualidade durante a sua instalação é muito importante. Giroud e Touze – Foltz (2003) chamam a atenção para o fato de que a geomembrana apresenta maiores riscos de danos após a instalação, ou seja, durante o preenchimento das camadas de solo e resíduos. Considerando esse potencial dano da geomembrana após a instalação, Koerner *et al.* (1996), Tognon *et al.* (2000), Branchman e Gudina (2008) estudaram a proteção ao puncionamento da geomembrana utilizando geotêxtil, areia, geocompostos, GCL e georede. Tais estudos enfatizam que há a necessidade de utilizar um elemento de proteção a geomembrana para evitar o seu puncionamento.

As formas de degradação da geomembrana de PEAD, conforme Allen e Edge (1992) são: intempéries, elevadas temperaturas, lixiviados, danos mecânicos - devido ao contato com materiais agressivos em sua superfície - e danos na sua instalação. Com o intuito de cumprir com os objetivos desta dissertação, avaliou-se a forma de degradação por danos mecânicos suportado pela geomembrana e pelas camadas inferiores. Para a geomembrana de PEAD atuar efetivamente como uma barreira de controle e desvio de fluxo, a sua deformação deve ser limitada e se deve evitar o seu puncionamento. Nesta direção, Koerner *et al.* (1996) recomendam uma camada de proteção acima da geomembrana.

Atualmente, há duas alternativas para o dimensionamento das camadas de proteção. A primeira tem como objetivo evitar o puncionamento da geomembrana. Dependendo do tipo de obra a ser realizada, há um nível aceitável de deformação da geomembrana, ou seja, quanto mais crítica a sua aplicação, menor será a tolerância de sua deformação. A segunda alternativa consiste no critério adotado para avaliar o desempenho a longo prazo, visando limitar as deformações que ocasionem rupturas por *stress cracking* (fissuramento sob tensão) (SAGEOS, 2003).

Neste contexto, verifica-se que há uma preocupação em tornar eficiente o uso adequado de geossintéticos como barreiras de controle e desvio de fluxo, bem como o de definir as condições de projeto e a eficiência da camada de proteção. Diante deste cenário, este trabalho apresenta um estudo sobre a determinação da superfície deformada de geomembrana de PEAD em camadas de proteção por meio de ensaios de compressão estática, simulando as fases de construção de um aterro sanitário ou pilha de rejeito de mineração, com o objetivo de evitar o fissuramento sob tensão. Para tanto, empregou-se a técnica de interpretação e análise dos valores de deformação obtidos em decorrência da utilização de um lençol de chumbo por meio da máquina de leitura de coordenadas e de extensômetros elétricos. Desta forma, discute-se diversos aspectos das camadas de proteção, como a massa por unidade de área de geotêxteis não tecidos, o tipo de brita, o carregamento utilizado, a instrumentação utilizada, entre outros. Assim, os resultados orientam na escolha de camadas de proteção para sistema de barreiras de controle e desvio de fluxo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a superfície deformada de geomembrana de PEAD em camadas de proteção a partir da realização do ensaio de compressão estática. Os objetivos específicos são:

- Avaliação de quatro configurações de camadas de proteção com geotêxteis não tecidos do tipo PP, com massa por unidade de área de 550, 650, 1100 e 1300 g/m²;
- Avaliação de uma configuração de camadas de proteção com 100 mm de solo argiloso e configuração sem nenhuma proteção;
- Avaliação de compressão estática de 600 kPa e 1800 kPa aplicada por 100 h na condição de ambiente (22±2 °C) para todas as configurações com ou sem proteção;
- Estimativa da superfície deformada da geomembrana por meio do lençol de chumbo disposto sob a geomembrana e utilização da máquina de leitura de coordenada para definir as deformações em Grid de 4 mm, considerando a metodologia de Horsey e Wishaw (2012);
- Estimativa da superfície deformada com Grid de 1 mm a partir do método de interpolação denominado de triangulação realizado pelo *software Surfer 8*;
- Análise pontual da deformação com a utilização de extensômetros elétricos e comparação com a superfície deformada;
- Realização de ensaio de fissuramento sob tensão constante na geomembrana virgem; e
- Realização de ensaio de puncionamento estático da geomembrana na condição virgem e pós-dano (após a realização do ensaio de compressão estática).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GERAIS E TERMINOLOGIAS

2.1.1 Geomembrana

Segundo Vertematti (2015), geomembranas são: “mantas poliméricas flexíveis que apresentam permeabilidades extremamente baixas, da ordem de 10^{-12} cm/s, e são utilizadas como barreiras de líquidos e de vapores”.

Existem diversas geomembranas disponíveis no mercado, a sua escolha leva em conta o seu desempenho para uma determinada aplicação. Sendo assim, é essencial considerar nos projetos geotécnicos, não somente o custo das geomembranas, mas também as propriedades mecânicas (módulos de elasticidade, resistência ao puncionamento e resistência à tração) e químicas que interferem na sua vida útil.

As propriedades e o comportamento das geomembranas são distintos e dependem do tipo do polímero, aditivos utilizados, cristalinidade, espessura e cor. A Tabela 1, apresenta as principais vantagens e desvantagens de alguns tipos de geomembranas.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos principais tipos de geomembranas.

Tipo de Geomembrana	Vantagens	Desvantagens
PEAD (polietileno de alta densidade)	<ul style="list-style-type: none"> - Boa resistência química; - Bom desempenho a baixas temperaturas; e - Boas características de resistência mecânica 	<ul style="list-style-type: none"> - Sujeita a <i>stress cracking</i>; - Baixa resistência ao puncionamento; - Alto coeficiente termal; - Relativamente rígida; e - Formação de rugas ao instalar;
PELBD (Polietileno linear de baixa densidade)	<ul style="list-style-type: none"> - Mais flexível que a PEAD; e - Mais fácil de instalar que a PEAD; 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência a ultravioleta menor que PEAD; e - Menor resistência química que PEAD;
PVC (Polivinil clorado)	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil instalação e trabalhabilidade (flexível); - Fácil de soldar; - Bom atrito de interface; e - Boas características de resistência mecânica; 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa resistência química a algumas substâncias(dependente do aditivo); - Baixa resistência à ultravioleta e ozônio (dependente do aditivo); e - Fraco desempenho a baixas e altas temperaturas (dependente do aditivo);

Fonte: Vertematti (2015).

Segundo Vertematti (2015), um aspecto importante relacionado ao polímero que compõe a geomembrana é o seu grau de cristalinidade, pois este determina várias características de comportamento. Scheirs (2009), diz que o termo “cristalinidade” refere-se a “[uma região cristalina com cadeias moleculares estáveis e densas]”, portanto, quanto maior a cristalinidade melhor a resistência química. As regiões amorfas correspondem às cadeias moleculares desordenadas. Desta forma, os polímeros mais utilizados na fabricação de geossintéticos são classificados como semicristalinos, cada qual exibindo diferentes graus de cristalinidade.

O grau da cristalinidade explica o comportamento das geomembranas poliméricas, especialmente com relação à sua resistência mecânica e química, por exemplo, a cristalinidade variando entre 55 e 70% para PEAD cria uma região densa com alta coesão intermolecular, atribuindo alta resistência química. Em contraste, a região amorfa ou com pouca cristalinidade, variando de 0 a 30% para PVC, faz com que tenham menor resistência química. A Tabela 2, apresenta os valores de cristalinidade para as principais geomembranas (SCHEIRS, 2009).

Tabela 2 – Valores típicos de cristalinidade para diferentes polímeros de geomembrana.

Polímero	Cristalinidade (%)
PEAD	55 - 70
PELBD	15 - 40
PVC	0 - 30

Fonte: Scheirs (2009).

A Figura 1 apresenta os efeitos do aumento ou diminuição da cristalinidade do polímero nas propriedades da geomembrana.

Figura 1 – Esquema resumido do efeito da cristalinidade no polímero.

O comportamento mecânico das geomembranas é determinado pelas propriedades de cristalinidade, peso molecular e densidade, por esse motivo as geomembranas apresentam diferentes curvas tensão x deformação (Figura 2).

Figura 2 – Comportamento tensão x deformação de diferentes geomembranas.

Fonte: Scheirs (2009).

Por meio da Figura 2, observa-se que a geomembrana de PVC (curva 4) não apresenta um limite de escoamento bem definido, ou seja, é difícil definir a deformação plástica antes do seu ponto de ruptura. Diferentemente da geomembrana de PVC, a geomembrana de PEAD e PP (curva 6 e 5, respectivamente) apresenta um pico de resistência bem definido para pequenas deformações (em torno de 15%), após esse ponto ela sofre uma alta deformação plástica para um pequeno aumento de tensão. Segundo Peggs *et al.* (2005), deve-se limitar a deformação da geomembrana para que ela não apresente uma deformação plástica a ponto de perder as suas características e consequentemente a função de barreira de fluidos.

2.1.2 Geotêxtil

De acordo com Vertematti (2015):

Geotêxtil é um produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que

desempenhe várias funções numa obra geotécnica. (Vertematti, 2015).

Em uma obra de engenharia, diversas são as funções dos geotêxteis, entre as principais, pode-se citar: i) controle de erosão; ii) drenagem; iii) filtração; iv) proteção; v) reforço; e vi) separação. Segundo a recomendação (IGS, 2014), para reduzir os danos mecânicos na geomembrana utiliza-se um geotêxtil não tecido bastante espesso ou um geotêxtil não tecido mais uma camada de material granular (areia fina), dependendo do tipo de obra e do tipo de revestimento adotado.

Para Holtz *et al.* (1997), os geotêxteis não tecido são importantes para proteger e garantir o desempenho na instalação das geomembranas, e também como proteção mecânica a longo prazo contra os esforços de puncionamento. Quando dispostos acima da geomembrana resistem ao puncionamento do agregado utilizado para drenagem; e aos danos de instalação. Quando utilizados abaixo da geomembrana evitam o puncionamento devido à presença de materiais pontiagudos no solo. Holtz *et al.* (1997), também comentam que a escolha e a eficiência do geotêxtil depende de diversos fatores como: i) massa por unidade de área; ii) tipo de fibra (filamento contínuo ou fibra cortada); iii) tipo do polímero; iv) tipo da geomembrana; e v) tipo do geotêxtil.

A GRI - GT-12(a) (2016), recomenda os ensaios e as propriedades mínimas para utilização do geotêxtil como proteção. A Tabela 3, apresenta essas recomendações mínimas.

Tabela 3 – Propriedades e ensaios requeridos para utilização de geotêxtil como proteção

Propriedade	Norma ASTM	Unidade	Massa/ unidade de área (g/m ²)					
Massa por unidade de área	D5261	g/m ²	340	406	542	815	1080	2000
Resistência à tração tipo Grab	D4632	kN	1,02	1,33	1,64	2,00	2,25	2,80
Deformação	D4632	%	50	50	50	50	50	50
Puncionamento CBR	D6241	kN	3,11	3,56	4,00	4,90	7,56	10,60
Resistência ultra violeta	D7238	%	70	70	70	70	70	70
Resistência ao rasgo	D4533	kN	0,42	0,51	0,64	0,89	0,96	1,27

Fonte: GRI - GT-12(a)(2016).

Segundo ICOLD (1991), a utilização do geotêxtil sobre a geomembrana, além de proteger contra danos mecânicos, também proporciona os benefícios de eliminar a acumulação imediata de poropressão sobre a geomembrana, pois atua como uma camada drenante, e melhora a distribuição de tensões.

2.1.3 Aplicações da geomembrana

Segundo Vertematti (2015), as geomembranas vem sendo utilizadas como barreiras de fluidos, com a função de: i) impedir a migração de umidade e vapores; ii) reter a água; e iii) conter rejeitos de mineração e resíduos sólidos urbanos e industriais. Devido a essas funções, a geomembrana é utilizada com a função de barreira de fluidos em diversos tipos de obras e estruturas:

- aterros de resíduos domésticos e industriais;
- lagoas de contenção e de tratamento de resíduos industriais;
- revestimento de túneis;
- bases encapsuladas de estradas;
- tanques e silos subterrâneos de armazenamento;
- lagoas para piscicultura, esporte e lazer;
- coberturas e solos de edificações;
- caixas d'água elevadas ou enterradas;
- canais de adução e irrigação ; e
- confinamento de áreas contaminantes.

Devido a extrema responsabilidade social, ambiental e econômica, deve-se dar um destaque especial às aplicações das geomembranas em obras de controle ambiental, com ênfase em aterros sanitários e pilhas de lixiviação de rejeitos de mineração.

Aterro sanitário é definido de acordo com a NBR 8419 (1996), como:

Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos é a técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área e volume possíveis, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (NBR 8419, 1996).

A Figura 3 exemplifica o potencial uso dos geossintéticos em diversas aplicações, como drenagem, reforço, separação, proteção e impermeabilização. No entanto nem todos estes tipos de geossintéticos estarão presentes nos aterros sanitários, devido às escolhas de projetos, que se baseiam em critérios técnicos e econômicos.

Segundo Aversch e Schicketanz (2000), as recomendações para projeto e construção de aterros sanitários descritas pelas normas alemãs são as mais conservadoras do mundo. Exige-se uma camada de argila compactada de 750 mm abaixo da geomembrana para aterros sanitários domésticos, e uma camada de 1500 mm para aterros sanitários de resíduos perigosos, juntamente com a instalação de uma geomembrana de PEAD com espessura maior que 2,5 mm. Também deve-se utilizar um geotêxtil não tecido de proteção com 3000 g/m² ou a combinação de um geotêxtil não tecido de 1200 g/m² com uma camada de areia com espessura de 150 mm. A Tabela 4 apresenta um resumo de outras especificações exigidas pelas Normas Alemãs.

Tabela 4 – Recomendações alemãs para o uso de geomembranas em aterros de resíduos

Recomendações modelo Alemão	Motivos
Somente PEAD é permitido	Ampla resistência química e comprovada resistente a longo prazo
Espessura mínima 2,0 mm	Espessuras menores são suscetíveis a danos de instalação
Uso de uma camada de argila compactada abaixo da geomembrana	Para assegurar um base com mínimas irregularidades
Camada de proteção acima da geomembrana	Com a finalidade de limitar as deformações da geomembrana
A camada de drenagem deve ser uma brita arredondada com 16/32 mm de diâmetro	Materiais granulares anguloso poderiam puncionar a geomembrana
Deve-se garantir um contato completo entre a geomembrana e a camada de argila compactada durante a instalação	Para garantir um contato íntimo durante a instalação
A soldagem da geomembrana é feita somente com uma operação rigorosa	Com a finalidade de garantir que não haja ambientes com alta/baixa temperaturas, umidade, sujeira e outros fatores que podem afetar a qualidade da solda

Fonte: Scheirs (2009).

Como citado acima, as geomembranas também podem ser utilizadas em pilhas de resíduos de mineração, evitando a contaminação causada por processos de lixiviação. Neste caso as geomembranas são instaladas sobre uma camada de solo compactado e abaixo do sistema de drenagem, onde são dispostos em seguida os rejeitos de mineração. Estes rejeitos podem ser potencialmente tóxicos, ocasionando diversos tipos de problemas ambientais (SCHEIRS, 2009).

As pilhas de rejeitos de mineração possuem condições específicas que não existem em nenhum outro tipo de aplicação das geomembranas, tais como altas pressões de contato e substâncias ácidas. Normalmente apresentam volumes e peso específico elevados, como exemplo, cita-se os rejeitos provenientes da mineração de ouro, que possui peso específico de 22 kN/m^3 e pilhas de 150 m de altura, que geram altas tensões sobre a camada drenante e a geomembrana. Além disso, podem ter carga hidráulica maior que 60 m, liquefação e temperaturas em torno de 70°C (THIEL e SMITH, 2004).

As pilhas de rejeito de mineração normalmente são construídas utilizando geomembranas de PEAD (para concentrações ácidas mais altas) ou geomembranas de PVC (para concentrações ácidas mais baixas). A composição dos *liners* normalmente é de uma camada simples, a qual consiste de uma geomembrana acima de uma camada de solo e um elemento de proteção, ou menos comum um sistema de *liners* com camada dupla, o qual consiste de duas geomembranas separadas por uma camada de drenagem. O sistema composto normalmente é utilizado em minas que tem uma alta carga hidráulica (SCHEIRS, 2009).

2.2 COMPOSIÇÃO DO SRF COM GEOSSINTÉTICOS

Na NBR ABNT 16199: 2013, as barreiras impermeabilizantes de geossintéticos são divididas em três tipos de revestimentos, conforme as diferentes obras geotécnicas e de saneamento ambiental. Sendo eles:

- Revestimento simples: constituído por uma única barreira, como exemplificado na Figura 4, e recomendado somente para obras que não causam danos ambientais, como, por exemplo, canais de irrigação e adução.

Figura 4 - Exemplo de revestimento simples. Sendo que GBR-P é barreira geossintética polimérica.

Fonte: NBR ABNT 16199: 2013.

Para reduzir os danos causados à geomembrana utiliza-se um geotêxtil não-tecido ou uma camada de material granular. Os geotêxteis de proteção são definidos em função do tipo de elemento contundente e das solicitações mecânicas. Para a proteção com material granular é recomendável que seja utilizada uma camada de areia fina, não submetida a esforços de compactação, com espessura inferior a 200 mm, sendo que as camadas de proteção e drenante sejam projetadas e executadas com os cuidados necessários para que a carga hidráulica sobre a geomembrana seja sempre inferior a 300 mm (NBR ABNT 16199: 2013).

- Revestimento composto: constituído por duas ou mais barreiras atuando solidariamente em toda a extensão do sistema, como exemplificado na Figura 5, em que o elemento de drenagem corresponde à brita e o elemento de proteção ao geotêxtil não tecido. Pode-se utilizar uma camada de GCL (barreira geossintética argilosa) entre a interface da geomembrana com o solo argiloso, para garantir uma melhor aderência.

Figura 5 – Exemplo de revestimento composto. Onde: GBR-P - a barreira geossintética polimérica; e GBR-C - a barreira geossintética argilosa.

Fonte: NBR ABNT 16199: 2013.

Outra função da camada de GCL é reduzir a quantidade de vazamento, caso haja passagem de líquido pela geomembrana, por conta de um furo ou alto gradiente de carga hidráulica, devido a sua característica de ser expansivo ao contato com um líquido.

- Revestimento duplo: constituído de no mínimo duas barreiras sintéticas (geomembranas) com um sistema drenante interposto, como ilustrado na Figura 6, em que o elemento de drenagem corresponde à brita, o elemento de proteção ao geotêxtil não tecido, e o elemento separador pode ser um geotêxtil não tecido ou um geocomposto.

Figura 6 – Exemplo de revestimento duplo. Onde GBR-P - a barreira geossintética polimérica.

Fonte: NBR ABNT 16199: 2013.

Os revestimentos duplos normalmente são utilizados para prevenir vazamentos em aplicações críticas. O seu funcionamento baseia-se em ter uma alta carga hidráulica na geomembrana primária, uma camada intermediária como elemento de drenagem; devido a estas condições a geomembrana secundária terá uma baixa carga hidráulica atuando sobre ela. Este sistema de revestimento não é muito utilizado em pilhas de rejeitos de mineração, pois os geossintéticos estão sujeitos a ter interfaces instáveis (baixo atrito entre as faces).

2.3 MECANISMO DE DEGRADAÇÃO

A degradação dos polímeros sintéticos é comum e está relacionada com o tempo e as condições de exposição do material. Allen e Edge (1992) resumiram os tipos de degradação em sete tipos:

- Térmica: Elevadas temperaturas podem causar degradação ou oxidação do material;
- Mecânica: Ocorre devido à aplicação de uma força ou esforço no material;
- Ultrassônico: Devido a uma determinada frequência que induz a vibração e fraturamento;
- Hidráulica: Em polímeros que contém algum grupo funcional sensível ao efeito da água;
- Químico: Elementos corrosivos e gases, como ozônio, que afetam a estrutura polimérica do material;
- Biológica: Micro-organismos que atacam alguns tipos de polímeros;
- Radiação: Quando exposto a radiação solar ou algum tipo de energia radioativa alta, resulta na perda de suas propriedades características.

Desta forma, no dimensionamento do SRF com geossintéticos deve-se levar em conta a perda de suas propriedades em função do tempo, considerando as modificações da tensão (Figura 7).

Figura 7 – Evolução da tensão versus tempo em um geossintético.

Fonte: Huefenus *et al.* (2005).

Na Figura 7, T_{ult} representa a propriedade índice, ou seja, a propriedade do geossintético determinada em laboratório, sem levar em consideração a sua interação

com o meio ambiente, e a curva tensão resistente requerida representa a propriedade calculada ou adotada de projeto, ou seja, a mínima necessária para que o geossintético desempenhe determinada função (HUFENUS *et al.*, 2005).

A curva tensão resistente T em função do tempo, representa a propriedade funcional do geossintético considerando as condições de campo e o tempo de atuação frente as solicitações às quais foi submetido. Essa propriedade é dada em função do T_{ult} e os fatores de reduções (IGSBR: 003, 2014).

Como ilustrado na Figura 7, a vida útil de projeto indica o ponto em que a propriedade funcional estimada para o geossintético não satisfaz mais a propriedade requerida.

2.4 DANOS MECÂNICOS

Barreiras sintéticas de geomembranas são materiais de construção, que estão suscetíveis ao dano em todas as etapas de sua vida de serviço. Os danos mecânicos causados na geomembrana considerando seu punçãoamento podem ocorrer de três formas: i) durante a construção, ou também chamados de danos de instalação; ii) devido aos esforços durante a operação; e iii) devido à escolha inadequada da proteção. As duas primeiras causas de punçãoamento podem ser solucionadas inspecionando de maneira apropriada a instalação e a operação, já a terceira causa está relacionada com o tipo de proteção escolhida.

2.4.1 Danos de instalação

Os danos antes da fase de operação, são chamados de danos de instalação, os quais dependem do peso, tipo e número de passadas do maquinário na fase de construção; operações de remoção do solo; preparação da superfície; manuseio e colocação dos geossintéticos; e a compactação do solo.

A escolha do valor da espessura da geomembrana não depende somente dos esforços que serão aplicados na fase de operação, mas também dos requisitos de sobrevivência à instalação, pois determinadas condições de instalação podem ser desfavoráveis. Por exemplo, em solos residuais, pode ocorrer a perfuração devido os detritos de rocha remanescentes; cargas elevadas; resíduos com pontas cortantes; ausência de qualificação dos instaladores e condições climáticas inadequadas, dentre outros fatores. Desta forma estas condições determinam que a geomembrana

apresente valores mínimos de suas propriedades para garantir a sua integridade (ZUQUETTE, 2015).

A Tabela 5, apresenta uma recomendação das propriedades mínimas requeridas para a sobrevivência à instalação de geomembranas adaptado de (KOERNER, 1994).

Tabela 5 – Propriedades mínimas recomendadas para a sobrevivência de geomembranas às operações de instalação

Propriedades e método de ensaio (ASTM)	Grau requerido para sobrevivência de instalação			
	Baixo ^(*)	Médio ^(*)	Alto ^(*)	Muito Alto ^(*)
Espessura (D5193) (mm)	0,63	0,75	0,88	1,00
Tração (D882) (kN/m)	7	9	11	13
Rasgo (D1004 – Molde C) (N)	33	45	67	90
Punção (D4833) (N)	110	140	170	200
Impacto (D3998 modificada) (J)	10	12	15	20

Fonte: Koerner (1994).

*Baixo - refere-se à colocação manual cuidadosa em subleito bem-graduado, muito uniforme, com cargas leves de natureza estática, típicas de barreiras de vapor abaixo de lajes de piso.

*Média - refere-se à colocação manual ou mecânica em subleitos com cargas médias, típicas de revestimento de canais.

*Alta - refere-se à colocação manual ou mecânica em subleitos de textura pobre com cargas altas, típicas de barreiras e coberturas de aterros.

*Muito Alto - refere-se à colocação manual ou mecânica em subleitos de textura muito pobre com cargas muito altas, típicas de barreiras para pilhas de lixo e coberturas de reservatórios.

Com a finalidade de representar em laboratório o dano de instalação, foi introduzida a norma ENV ISO 10722: 2007, que padroniza o ensaio para avaliação do grau de degradação mecânica por carga repetida. De acordo com essa norma a amostra de geossintético é submetida a um carregamento dinâmico e após o final do ensaio a amostra é ensaiada para avaliar o grau de degradação.

Em um programa de pesquisa Pinho-Lopes *et al.* (2000), Pinho-Lopes *et al.*, (2002) e Pinho-Lopes *et al.* (2006), realizaram uma série de ensaios de acordo com a

norma ENV ISO 10722: 2007, variando o tipo de solo confinante, geotêxtil e material granular. Após o término do ensaio de danificação da amostra, foram avaliados o comportamento mecânico de curto prazo com ensaios de tração, e longo prazo com ensaios de *stress cracking*. E por fim, foram calculados os fatores de redução: RF_{ID} , que corresponde ao dano de instalação; e os fatores devido ao *creep* RF_{CR} . Desta forma, foi possível avaliar a influência do solo confinante, geotêxtil e material granular na redução da tensão admissível na geomembrana. A Figura 8, mostra um fluxograma de como foram realizados os ensaios.

Figura 8 – Fluxograma do programa de ensaios de danos de instalação

Fonte: Pinho-Lopes *et al.* (2000).

Pinho-Lopes *et al.* (2015), realizou uma comparação dos danos apresentados pela amostra quando submetida ao ensaio de laboratório pela norma ENV ISO 10722: 2007, e ao ensaio *in situ*. Chegou-se a conclusão de que os danos apresentados pela amostra em campo tendem a ser maiores do que as danificadas em laboratório, mesma conclusão apresentada por Rebelo (2008).

Para calcular a tensão requerida de projeto (T_{al}) utiliza-se tradicionalmente a Equação 01, que utiliza os fatores de redução determinados pelo ensaio da norma ENV ISO 10722: 2007.

$$T_{al} = \frac{T_{ult}}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_D} \quad (1)$$

Onde:

T_{al} : Tensão permitida por um geossintético a longo prazo;

T_{ul} : Tensão última de resistência;

RF_{ID} : Fator de redução para danos de instalação;

RF_{CR} : Fator de redução para *creep*;

RF_D : Fator de redução para degradação química/biológica.

(Barthurst *et al*, 2012), propôs uma forma diferente de calcular os fatores de redução RF_{ID} e RF_{CR} , onde ao invés de usar uma equação determinística, utiliza-se a da Equação 2 envolvendo probabilidade.

$$T_{al,meas} = \frac{T_{ult}}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_D} = \left(\frac{T_{ult}}{RF_{ID}} \right) \cdot X_{ID} \cdot \left(\frac{1}{RF_{CR}} \right) \cdot X_{CR} \cdot \left(\frac{1}{RF_D} \right) \cdot X_D \quad (2)$$

Onde:

X_{ID} : Valor estatístico relacionado a instalação;

X_{CR} : Valor estatístico relacionado a *creep*;

X_D : Valor estatístico relacionado a durabilidade.

2.4.2 Danos de operação

Os danos de operação são os que causam o puncionamento da geomembrana após a sua instalação, devido à sobrecarga da disposição dos resíduos e do maquinário utilizado para a compactação das camadas de resíduo.

Sageos (2003), dividiu os parâmetros que controlam o puncionamento de geomembranas de PEAD em:

- Tensão normal atuante: um valor alto de tensão irá induzir uma tensão localizada na geomembrana;
- Distribuição granulométrica da camada granular de drenagem: uma partícula pontiaguda ou mesmo muito grande pode favorecer a concentração de esforços em um ponto;
- Propriedades da camada de proteção: um material mais resistente irá ajudar a dissipar ou absorver o nível de tensões atuantes na geomembrana.

Segundo Bouazza *et al*. (2002), duas metodologias vêm sendo utilizadas para o dimensionamento do sistema de prevenção ao puncionamento da geomembrana, o

critério analítico desenvolvido por Koerner (1996) nos Estados Unidos e o dimensionamento experimental Alemão desenvolvido por Seeger e Muller (1995).

2.4.3 Metodologia Koerner (1996)

A metodologia foi desenvolvida para simular melhor os esforços aos quais geomembrana está sujeita em campo. O ensaio consiste em avaliar a geomembrana quanto à prevenção de danos, tais como rasgos profundos, alongamento além do ponto de escoamento ou perfurações. Foi realizada na Universidade de Drexel (EUA), como objeto de pesquisa de três trabalhos: teoria desenvolvida por Wilson-Fahmy *et al.* (1996), experimental por Narejo *et al.* (1996) e exemplos de projeto por Koerner *et al.* (1996).

A metodologia consiste na limitação de 0,25% da deformação da geomembrana pelo método de “*arc elongation*”. Ou seja, correlaciona-se o tamanho do material granular, a tensão normal no topo do sistema, a massa por unidade de área do geotêxtil e vários fatores de segurança parcial e de modificação, descritos na Equação 3. Os valores dos fatores de redução e modificação são apresentados nas Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente.

$$\rho_{allow} = \left(\frac{1}{FS}\right) \cdot \left(450 \frac{M_A}{H^2}\right) \cdot \left(\frac{1}{FM_S \cdot FM_{PD} \cdot FM_A}\right) \cdot \left(\frac{1}{FS_{CR} \cdot FS_{DBQ}}\right) \quad (3)$$

Onde:

ρ_{allow} : Pressão permitida no geossintético;

FS: Fator global de segurança;

H: Altura do cone;

M_A : Massa por unidade de área do geotêxtil;

FM_S : Fatores de modificação parcial para a forma da protuberância;

FM_{PD} : Fator de modificação parcial para a densidade de ocorrência da protuberância;

FM_A : Fator de modificação parcial para o arqueamento do solo;

FS_{CR} : Fator de redução parcial para o *creep*;

FS_{DBQ} : Fator de redução parcial para degradação química/ biológica.

Tabela 6 – Fatores de modificação para a escolha do geotêxtil

Fatores de modificação (todos $\leq 1,0$)					
Tipo	FM _s	Densidade	FM _{PD}	Arqueamento do solo	FM _A
Angular	1,0	Isolado	1,0	Hidrostática	1,0
Sub – arredondado	0,5	Densa, 38 mm	0,83	Geostática, rasa	0,75
Arredondada	0,25	Densa, 25 mm	0,67	Geostática, mod.	0,5
		Densa, 12 mm	0,50	Geostática, prof.	0,25

Fonte: Koerner (2008).

Tabela 7 – Fatores de redução para escolha do geotêxtil

Fatores de redução (todos $\geq 1,0$)					
		FS _{CR}			
Degradação química/biológica	FS _{CBD}	Massa por unidade de área (gm/m ²)	Altura da protuberância (mm)		
			38	12	25
Lixiviado leve	1,0	Geomembrana sozinha	N/R	N/R	N/R
Lixiviado moderado	1,3	270	N/R	>1,5	N/R
Lixiviado pesado	1,5	550	N/R	1,3	1,5
		1100	1,3	1,1	1,2
		>1100	1,2	1,0	1,1

Fonte: Koerner (2008).

Geroto (2008) desenvolveu sua pesquisa com base nos procedimentos experimentais de Narejo *et al.* (1996). O autor realizou ensaios de carregamento hidrostático, de acordo com a norma ASTM D5514: 2014, com cones truncados, material granular e geomembranas de PEAD e PVC, com ou sem camadas de proteção de geotêxteis não tecido. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geossintéticos da EESC-USP, utilizando o equipamento apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Ensaio de punção hidroestática

Fonte: Geroto (2008).

Geroto (2008) mostrou que há uma grande diferença no comportamento entre geomembranas de PVC e PEAD, em que a geomembrana de PVC por ser mais flexível apresentou melhor desempenho quanto a ruptura no ensaio de punção hidroestática.

Os resultados dos ensaios de Narejo *et al.* (1996) mostraram que a resistência à punção da geomembrana aumenta com o acréscimo de massa por unidade de área do geotêxtil. A utilização de pedregulhos angulares proporcionam resultados semelhantes ao de cones truncados. Já a resistência à punção do sistema, utilizando pedregulhos arredondados, é maior que para pedregulhos angulosos. Como resultado da pesquisa, foi desenvolvido o método de projeto para seleção de um geotêxtil não-tecido como camada de proteção com massa por unidade de área suficiente para evitar o puncionamento da geomembrana, como mostrado na Equação 3.

As Tabela 6 e Tabela 7, foram desenvolvidas com base em ensaios de laboratório de curto prazo. Koerner (2010), revisou os valores dos fatores de redução a longo prazo para *creep*. Para isso, foi realizado o ensaio de punção hidroestática durante dez anos aplicando tensões de 10, 15, 23 e 28% do valor da tensão de ruptura. Com base nos resultados obtidos, algumas modificações foram propostas e estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de RF_{CR} revisados

RF_{CR}			
Massa por unidade de área (gm/m ²)	Altura da protuberância (mm)		
	38	25	12
Geomembrana sozinha	N/R	N/R	N/R
270	N/R	N/R	N/R
550	N/R	N/R	>1.5
1100	N/R	1.5	1.3
>1100	1.3	1.2	1.1

Fonte: Koerner (2010).

Segundo Jones et al. (2000), o tipo, a qualidade das fibras e a fabricação dos geotêxteis influenciam no desempenho das camadas de proteção. Essa afirmação foi provada por Koerner (2010), que desenvolveu seu trabalho aplicando as Normas ASTM D4833, D5495 e D6241, e mostrou a diferença entre geotêxteis não tecidos do tipo PET e PP utilizados para proteção. Verificou-se que os geotêxteis do tipo PP apresentam melhor desempenho mecânico.

2.4.4 Metodologia BAM

A metodologia Alemã aborda além do funcionamento da geomembrana, a proteção mecânica a longo prazo levando em consideração o *stress cracking*.

O instituto de estudo alemão BAM (*Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung*) elaborou em 1995 recomendações para restringir as deformações na superfície da geomembrana que aceleram os processos de ruptura frágil como, por exemplo, o fenômeno de fissuramento sob tensão (FST). Desta forma, sugere-se a utilização de geotêxteis não-tecidos de elevada massa por unidade de área (>2000 g/m²). O valor da deformação limite estabelecido para geomembranas com base nos ensaios de fluência realizados por esse instituto foi de 0,25%.

O ensaio proposto pelo BAM (1995) é o ensaio de compressão estática (*cylinder test*) que tem por objetivo simular o comportamento a longo prazo do aterro, e sua configuração é representada na Figura 10.

Figura 10 – Configuração do ensaio de compressão estática

Fonte: Scheirs (2009)

O ensaio normalmente é conduzido utilizando uma camada drenante de 200 mm de espessura, material granular com diâmetro entre 16 à 32 mm e uma geomembrana de PEAD com 2,5 mm de espessura. Coloca-se uma placa metálica deformável (lençol de chumbo com 0,5 mm) embaixo da geomembrana, com a finalidade de monitorar as deformações ocorridas durante o ensaio. Seeger e Muller (1995), propuseram algumas condições de ensaio baseadas no comportamento da geomembrana considerando sua vida útil, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Recomendações de ensaio

Temperatura	Duração	Carregamento
40° C	1000 horas	1,5 x Valor do carregamento
23° C	1000 horas	2,25 x Valor do carregamento
23° C	100 horas	2,5 x Valor do carregamento

Fonte: Seeger e Muller (1995)

Os estudos realizados por Seeger e Muller (2003), limitaram a deformação da geomembrana para 3%, diferentemente dos 0,25% proposto por BAM (1995). Posteriormente, Peggs *et al.* (2005), recomendaram que esse valor deveria estar em

um intervalo variando entre 6% para geomembranas carregadas com *stress cracking* menores que 1500 horas, e 8% para *stress cracking* maiores que 1500 horas.

Branchman e Gudina (2008) ensaiaram geomembranas de PEAD com 1,5 mm de espessura, protegidas por uma camada de argila compactada ou uma camada de geossintético. Os ensaios foram realizados sobre uma camada de pedregulho grosso de 50 mm, variando o tempo de ensaio entre 10 a 100 horas, com uma carga de 250 kPa. Os ensaios não tiveram ruptura por puncionamento, porém a deformação excedeu os limites estipulados de 3%, e posteriormente de 6 e 8%. Verificou-se uma implicação da falta de informações sobre o contato entre o pedregulho e a geomembrana, provocando uma perda de desempenho a longo prazo. Portanto, é necessário um estudo sobre os fatores que limitam a deformação da geomembrana a longo prazo.

O primeiro método de interpretação da deformação da geomembrana utilizado foi o de alongamento de arco especificado por Seege e Muller (1995). Os autores, no entanto, afirmam que o uso do método por si só pode não representar o pico das deformações. O cálculo da deformação é descrito na Equação 4 e a sua representação gráfica encontra-se na Figura 11.

$$\varepsilon_a = \frac{(h^2 + a^2) \cdot \sin^{-1}\left(\frac{2ah}{h^2 + a^2}\right)}{2ah} - 1, h < a \quad (4)$$

Onde:

ε_a : Deformação longitudinal da geomembrana;

a: menor sentido entalhe; e

h: maior sentido do entalhe.

Figura 11 – Método alongamento de arco

Fonte: Tognon *et al.* (2000)

Uma outra abordagem da deformação da geomembrana é o cálculo baseado na sua forma deformada, proposto por Tognon *et al.* (2000). Assume-se que há somente deslocamentos verticais e não radiais, portanto a influência dos deslocamentos radiais devido aos pedregulhos, não são conhecidos. Essa segunda abordagem está representada na Figura 12, e a formulação matemática na Equação 5.

$$\varepsilon_m = \sqrt{\left(1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right)} - 1 \quad (5)$$

Onde:

ε_m : Deformação da geomembrana;

w : Deformação vertical;

x : Espaçamento do grid.

Figura 12 – Método de cálculo por diferenças finitas

Fonte: Tognon *et al.* (2000).

A Equação 5 é utilizada para calcular a deformação considerando uma diferença finita da superfície deformada. Tognon *et al.* (2000), mostraram que ambos os métodos (alongamento de arco e diferenças finitas) resultam em uma aproximação da deformação ocorrida na geomembrana e podem subestimar os valores obtidos.

Devido ao fato do método de Tognon *et al.* (2000), resultar em uma aproximação da deformação da geomembrana e não apresentar as deformações radiais, Eastman (2013) desenvolveu um método de leitura onde se leva em consideração as deformações radiais. Para o desenvolvimento do método foi construído um equipamento, onde não há necessidade de retirar o lençol de chumbo

da caixa de ensaios, realizando a leitura das coordenadas por meio de escaneamento a laser.

Assim como Tognon *et al.* (2000), Eastman (2013) ensaiou três diferentes formatos para aplicar a tensão na geomembrana: i) arredondada; ii) angular e iii) plana, e comparou as deformações obtidas levando em consideração a deformação radial. Os resultados obtidos na leitura das deformações radiais foram que o deslocamento radial é muito pequeno quando comparado com o deslocamento vertical, mas não deve ser negligenciados do cálculo das deformações. Em comparação com o método de Tognon *et al.* (2000), os formatos arredondados apresentaram uma diferença na ordem de grandeza de 2 a 3 vezes; para os angulares a diferença foi na ordem de 3 a 5 vezes; e para os formatos planos a ordem de grandeza foi a mesma para os dois métodos.

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM AS DEFORMAÇÕES DA GEOMEMBRANA

Como foi abordado nos itens anteriores Peggs *et al.* (2005), consideram que, para prevenir o fissuramento sob tensão constante, deve-se atribuir um valor limite de deformação de 6 e 8%. Koerner (2010), discute estes valores e discorda por dois motivos: i) não são mais utilizadas na fabricação de geomembranas as resinas suscetíveis a FST, pois a GRI – GM 13 especifica que a geomembrana para ser utilizada em projetos de impermeabilização deve superar as 500 horas de ensaio previstas pela Norma ASTM D5397 (ensaio de *stress crack*); ii) para a densidade das geomembranas presentes no mercado nos dias de hoje atingirem valores 0,941 g/cm³, que para a Norma ASTM D883 é o menor valor permitido para geomembranas de PEAD, houve a adição de negro de fumo, portanto o autor afirma que quanto menor a densidade da resina, maior a resistência a *stress cracking*.

Hornsey e Wishaw (2012), fizeram uma crítica comparativa dos métodos descritos nas normas americana - ASTM D5514-06 (2011) e, europeia EN 13719 (2002). Para o autor as vantagens do ensaio EN 13719 (2002) são:

- Permite avaliar a influência da base; e
- Permite a deformação da camada de drenagem quando aplicada a carga, pelo fato dela estar livre, o qual afeta os esforços na geomembrana.

Já as desvantagens do método são:

- Limitar a quantidade de pontos de análise da deformação;

- A escolha dos pontos de análise da deformação varia entre operadores;
- Impossibilidade de comparar alguns ensaios, pois todo o material deve ser substituído após cada ensaio;
- A camada de solo ou elastômetro utilizada na base, é um parâmetro de grande variabilidade dos resultados, impossibilitando algumas vezes a comparação dos testes;
- O tamanho limitado dos materiais não condiz com as realidades encontradas em campo; e
- O lençol de chumbo, por localizar-se abaixo da geomembrana pode reduzir os valores mensurados de deformação.

Para o método ASTM D5514-06 (2011) as vantagens são:

- Fácil execução; e
- Repetibilidade dos ensaios.

As desvantagens do método são:

- O material granular não representa a realidade observada em campo;
- Por aplicar a pressão por ar ou água, o suporte apresentado pela camada de base está sendo ignorado, portanto serão obtidos maiores valores de deformação na geomembrana; e
- O método "*arc elongation*" utilizado para o cálculo das deformações não é adequado para a leitura das deformações;

Hornsey e Wishw (2012), testaram diferentes condições de ensaio da Norma EN 13719 (2002), e observaram alguns fatores, como:

- O uso de agregados de diversos tamanhos e formas implicam em diferentes resultados para uma mesma configuração, portanto, recomenda-se o uso de uma granulometria mal graduada e agregados com forma semelhantes, evitando o truncamento na caixa de ensaio;
- Observou que após 24 horas de ensaio os valores de deformação não variam quando comparados com ensaios de 100 horas, desta forma, propõem-se uma redução no tempo; e
- Ao invés de realizar a leitura da deformação somente dos pontos mais críticos, recomenda-se a utilização da malha inteira com grids de 3; 1; 0,5; e 0,3 mm, sendo que os melhores resultados são para os grids de 1 e 0,5 mm.

Branchman e Sabir (2010), realizaram ensaios em um equipamento que substitui a utilização da brita por um aplicador de tensão direto na geomembrana com

um formato angular. Neste ensaios foi avaliada a influência da temperatura nos valores de deformação, e conclui-se que, mantendo as mesmas condições de ensaio e aumentando a temperatura de 22° C para 55° C, ocorre um aumento na ordem de 1,3 vezes nos valores de deformação.

Gudina e Branchman (2008), realizaram ensaios utilizando a seguinte configuração (de baixo para cima num SRF): solo compactado, geomembrana de PEAD com 1,5 mm, com uma dobra (*wrinkle*), e uma camada de brita. Os ensaios tiveram como objetivo avaliar a influência da deformação decorrente deste dobra, com diferentes camadas de proteção. Os resultados mostraram que, utilizando ou não um geotêxtil como camada de proteção, a deformação foi maior nos locais de dobra da geomembrana, e nos ensaios com uma camada de proteção constituída por areia esse aumento na deformação não foi observado.

Gudina e Branchman (2008) também utilizaram GCL como um elemento de interface entre o solo compactado e a geomembrana. Com os resultados obtidos, os autores observaram, que as deformações da geomembrana aumentam quando há um acréscimo da quantidade de água inicial no GCL, e com a diminuição da rigidez da camada de base.

Dickinson (2008), aplicou 250 kPa em um sistema composto por: solo compactado, GCL, geomembrana de 1,5 mm, camada de proteção e material granular. Nas configurações em que não foi utilizada nenhuma proteção ou geotêxteis com massa por unidade de área de até 2200 g/m², ocorreu a diminuição da espessura do GCL até o ponto de extrusão da bentonita. As configurações em que a camada de proteção foi 150 mm de areia, não houve extrusão do GCL.

Branchman e Sabir (2010), utilizando o mesmo equipamento de Gudina e Branchman (2008), avaliaram a influência da presença de material granular embaixo da geomembrana, o que se deve a presença de rocha em solos residuais e problemas na instalação. Para isto, foram colocados intencionalmente 5 britas angulares com 35 mm abaixo da geomembrana e acima uma camada granular de areia. Os resultados mostraram o puncionamento da geomembrana somente para o ensaio com 2000 kPa de tensão, e para os ensaios com menores valores de tensão relataram a presença de entalhes. Porém em todos estes ensaios os valores de deformação superaram o limite de 6 e 8%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as propriedades e características do solo, brita e geossintéticos que foram utilizados na pesquisa. Os ensaios de caracterização destes materiais foram realizados nas instalações dos Laboratórios de Mecânica dos Solos e de Geossintéticos, pertencentes à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC – USP).

Apresenta-se o equipamento utilizado para o ensaio de compressão estática e as configurações dos sistemas de revestimento de fundo avaliadas bem como o arranjo da instrumentação de cada ensaio.

Relata-se, ainda, a metodologia de leitura das coordenadas, as quais foram realizadas nas instalações do Laboratório de Metrologia do curso de Engenharia Mecânica da EESC – USP, e o método de cálculo da deformação da geomembrana utilizando o lençol de chumbo.

Ao final do ensaio de compressão estática, avaliou-se a resistência ao punção estático das geomembranas (pós-dano), comparando-se as propriedades da geomembrana virgem e da geomembrana degradada.

De uma forma resumida, a sistemática de trabalho adotada na pesquisa envolve a realização das seguintes etapas: i) caracterização dos materiais naturais (solo e brita) e sintéticos (geomembrana e geotêxtil), ii) montagem do ensaio de compressão estática, iii) leitura da deformação da geomembrana, por meio do lençol de chumbo e iv) os ensaios pós-dano.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais caracterizados no programa experimental foram os seguintes: solo, brita, geomembrana e geotêxtil não tecido. A caracterização completa do solo foi realizada por Rincon (2016).

3.1.1 Solo

Foi utilizada como base de solo compactado e como camada de proteção da geomembrana, uma argila arenosa coletada na rodovia Luiz Augusto de Oliveira (SP – 215), sentido São Carlos-SP – Ribeirão Bonito-SP.

O solo utilizado foi classificado como um silte plástico arenoso (MH), pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e uma argila arenosa-siltosa,

conforme a norma brasileira NBR 6502/95. A curva de distribuição granulométrica é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Curva de distribuição granulométrica

Para a caracterização completa do solo foram realizados os ensaios básicos propostos pelas normas brasileira. Apresenta-se os ensaios realizados e os resultados obtidos, na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades geotécnicas do solo utilizado

Ensaio	Norma	Parâmetro	Tipo de solo
			Areia argilosa com vestígio de silte
Massa específica dos sólidos	NBR 6508: 1984	ρ_s (g/cm ³)	2,646
Limite de plasticidade	NBR 7180: 1984	WP (%)	14
Limite de liquidez	NBR 6459: 1984	WL (%)	16

Complementa-se os dados expostos na Tabela 10, com a curva de compactação (NBR 7182: 1986), a qual determina a umidade ótima e a massa específica seca máxima do material, valores utilizados no solo da base do SRF avaliado nos ensaios de compressão estática, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Curva de compactação

3.1.2 Brita

Em um SRF, a brita exerce a função de drenagem e é disposta acima do elemento de proteção e da geomembrana. Este trabalho, como já anunciado, tem por objetivo analisar diferentes configurações de camada de proteção; portanto, faz-se necessário conhecer as características físicas da brita a ser utilizada nos ensaios. Eastman (2013) analisou a influência do formato da brita (arredondada ou pontiaguda) e a granulometria da brita na deformação da geomembrana. Com base neste estudo, foi conduzida, em laboratório, a caracterização da brita, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Ensaios de caracterização da brita

Ensaio	Norma
Análise Granulométrica	NBR 7181
Índice de forma	NBR 7809

A Figura 15 mostra a curva granulométrica da brita e a região escolhida para utilizar nos ensaios de compressão estática que se situa na classificação do agregado graúdo como brita 3.

Figura 15 – Curva de distribuição granulométrica da brita

Para determinar a forma dos agregados foi utilizado um paquímetro. Considerou-se “a” como maior dimensão, “b” como dimensão intermediária e “c” como menor dimensão. Com esses valores, plotou-se um gráfico de frequência, apresentado na Figura 16, dos pares “c/b em função de “b/a”. Verificou-se que os agregados graúdos utilizados são predominantemente da forma cúbica.

Figura 16 – Gráfico de frequência da forma dos agregados graúdos

3.1.3 Geomembrana

Nesta pesquisa, utilizou-se um lote de geomembrana de PEAD (polietileno de alta densidade), com espessura de 2,0 mm. A escolha do polímero deve-se ao fato de que, segundo Koerner (2008), geomembranas de PEAD são por virtude um material resistente a agentes químicos e tem uma alta vida útil, por isso, o que justifica o seu

uso como elemento de barreira em SRF. Porém, elas são altamente sensíveis as deformações, podendo ocorrer seu punctionamento.

Para a caracterização da geomembrana foram realizados ensaios físicos, mecânicos e de desempenho de fissuramento sob tensão constante, também denominado *Stress Cracking*. A Tabela 12 apresenta os ensaios de caracterização física e mecânica realizados na geomembrana, as respectivas normas utilizadas e os resultados. O APÊNDICE B, apresenta as curvas dos ensaios de tração da geomembrana. No item 3.4, discuti-se o fissuramento sob tensão constante.

Tabela 12 – Ensaios de caracterização da geomembrana

Ensaio		Norma	Unidade	Valor
Físicos				
Espessura nominal		NBR ISO 9863-1	mm	2,08
			CV (%)	3,8
Densidade		ASTM D 792: 2013	g/cm³	0,94
			CV (%)	0
Mecânico				
Tração – escoamento	Long.	NBR 15856	N/mm	41,84
			CV (%)	0,49
			Deformação (%)	14,48
			CV (%)	1,62
	Trans.		N/mm	40,14
			CV (%)	1,10
			Deformação (%)	15,78
			CV (%)	4,51
Tração – ruptura	Long.	NBR 15856	N/mm	64,89
			CV (%)	16,55
			Deformação (%)	841
			CV (%)	14
	Trans.		N/mm	61,62
			CV (%)	8,22
			Deformação (%)	787
			CV (%)	7,57
Puncionamento estático		NBR ISO 12236	N	804,2
			mm	13,70

3.1.4 Geotêxtil

Uma das funções do geotêxtil não tecido em SRF é a de proteção da geomembrana contra o seu puncionamento limitando sua deformação. Por esse motivo, para uma melhor eficiência, costuma-se utilizar geotêxteis com maior massa por unidade de área.

Para a caracterização do geotêxtil não tecido foram realizados ensaios que permitiram mensurar suas propriedades físicas e mecânicas. Os geotêxteis não tecido escolhidos para a pesquisa foram do tipo PP (polipropileno) de fibra cortada com massa por unidade de área de 650 g/m² e 550 g/m². Para outras configurações de ensaio, estes geotêxteis foram agrupados formando um de 1300 g/m² e outro de 1100 g/m², respectivamente.

A escolha por geotêxteis não tecido do tipo PP decorre de Koerner (2008), em que os resultados dos ensaios de cones truncados mostraram uma melhor eficiência em proteção da geomembrana; isso acontece em virtude do peso específico do PP (polipropileno) ser menor que o PET (polietileno), portanto, há mais filamentos em uma massa por unidade de área equivalente.

A Tabela 13 apresenta os resultados da caracterização do geotêxtil 1. O qual trata-se de um geotêxtil de massa por unidade de área próxima ao geotêxtil 2, porém com maior espessura, resistência à tração e ao puncionamento. O APÊNDICE B, apresenta as curvas do ensaio de tração de ambos os geotêxteis.

Tabela 13 – Ensaio de caracterização do geotêxtil 1

Ensaio		Norma	Unidade	Valor
Físicos				
Espessura		ABNT NBR 9863	mm	5,43
			CV (%)	0,18
Massa por unidade de área		ABNT NBR 9864	g/m²	650
			CV (%)	0,35
Mecânico				
Tração faixa larga	Long.	ABNT NBR 10319	kN/mm	41,71
			CV (%)	10,04
			Deformação (%)	151,6
			CV (%)	5,76
	Trans.		kN/mm	42,62
			CV(%)	11,28
			Deformação (%)	161,1
			CV (%)	7,91
Punção estática		ASTM D 4833	N	1320
			mm	22,94
Punção CBR		ABNT NBR 12236	kN	6,334
			mm	85,44

Na Tabela 14, tem-se os resultados do geotêxtil 2 que, em comparação com o primeiro, possui uma massa por unidade de área com valores próximos do geotêxtil 1, e tem menores valores de espessura, resistência à tração e ao puncionamento.

Tabela 14 – Ensaaios de caracterização do geotêxtil 2

Ensaio		Norma	Unidade	Valor
Físicos				
Espessura		ABNT NBR 9863	mm	3,13
			CV (%)	0,13
Massa por unidade de área		ABNT NBR 9864	g/m²	550
			CV (%)	0,28
Mecânico				
Tração faixa larga	Long.	ABNT NBR 10319	kN/mm	23,21
			CV (%)	7,18
			Deformação (%)	74,1
			CV (%)	7,25
	Trans.		kN/mm	29,19
			CV(%)	4,14
			Deformação (%)	80,3
			CV (%)	4,72
Punção estática		ASTM D 4833	N	865,7
			mm	18,84
Punção CBR		ABNT NBR 13359	kN	3,84
			mm	49,42

3.2 CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO ESTÁTICA

O ensaio de compressão estática foi realizado tomando como base a metodologia da BAM (1995), que simula a carga dos resíduos durante o período de operação de um aterro sanitário até o final de sua vida útil. Segundo a metodologia da BAM (1995), o ensaio realizado em laboratório, é executado colocando uma geomembrana sobre uma base de elastômero, acima da geomembrana, foi disposto o geotêxtil de proteção e, em seguida, a camada de drenagem com agregados submetidos a um carregamento estático, por um período de tempo.

Diferentemente da metodologia BAM (1995), utilizou-se uma base com solo argiloso compactado, ou seja, não utilizou-se o elastômetro. Portando, neste trabalho, utilizou-se a mesma prensa servo-controlada empregado por Geroto (2008), localizada no Laboratório de Mecânica das Rochas EESC-USP. A prensa servo-controlada consiste em uma caixa metálica com dimensões internas de 500 x 500 mm em planta e altura de 500 mm. Como continuidade ao trabalho desenvolvido por

Geroto (2008), foram avaliadas diferentes configurações e fez-se a leitura das deformações, por meio de extensômetros elétricos (*strain gauges*) e nomeados neste trabalho de “EE”, e o lençol de chumbo.

A configuração da caixa de ensaios é apresentada na Figura 17. Trata-se de uma primeira camada base de argila compactada com 240 mm de altura, acima o lençol de chumbo de 0,5 mm, seguida pela geomembrana isolada ou com a camada de proteção e por cima a camada de drenagem com os agregados graúdos com 250 mm de altura. Nos ensaios 11 e 12, a camada base de argila tem uma altura de 180 mm, a camada de proteção com solo argiloso (mesmo utilizado na base) tem uma altura de 100 mm e finalizando a brita com 220 mm.

Figura 17 – Sessão da caixa de ensaio, mostrando configurações de 1 a 10

A Tabela 15 traz o resumo das configurações dos ensaios de compressão estática realizados.

Tabela 15 – Configurações dos ensaios de compressão estática

Teste	Tipo de proteção	Carregamento (kPa)
1	GTX-N 1	600
2	2 x GTX-N 1	600
3	GTX-N 2	600
4	2 x GTX-N 2	600
5	GTX-N 1	1800
6	2 x GTX-N 1	1800
7	GTX-N 2	1800
8	2 x GTX-N 2	1800
9	Sem proteção	600
10	Sem proteção	1800
11	100 mm de solo argiloso	600
12	100 mm de solo argiloso	1800

* GTX-N₁ – Geotêxtil não tecido com massa por unidade de área 650 g/m²;

* GTX-N₂ – Geotêxtil não tecido com massa por unidade de área 550 g/m²;

* Solo argiloso – Mesmo solo utilizado na base, caracterizado no item 0.

Como observado na Tabela 15, foram dois valores de carregamento aplicados no sistema, 600 kPa e 1800 kPa. Ambos os carregamentos foram separados em estágios de carga, sendo que o primeiro foi dividido em uma pré-carga de 50 kPa, a qual foi mantida por 30 minutos; após os 30 minutos, cada carregamento crescente teve um incremento de 150 kPa por hora, até a pressão de 600 kPa, onde manteve-se por 100 horas. O segundo carregamento também começou com uma pré-carga de 50 kPa, a qual foi mantida por 30 minutos; após a pré-carga, cada carregamento teve um incremento de 350 kPa por hora, até a pressão de 1800 kPa, no qual, equivalente ao primeiro, manteve-se por 100 horas.

Para compreender o que representa estes carregamentos em termos da altura máxima de um aterro sanitário urbano brasileiro, considera-se que o valor do peso específico de resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário de São Carlos-SP é de 10 kN/m³, o qual, segundo Abreu (2015) varia de 9 a 15 kN/m³. Sendo assim, para os carregamentos aplicados de 600 kPa e 1800 kPa, sabendo que a duração do ensaio de compressão estática foi de 100 horas e que a temperatura era de 23 °C (Tabela 9), é possível admitir que os ensaios realizados correspondiam a um aterro sanitário com altura máxima de 24 e 72 m, respectivamente.

3.2.1 Montagem da caixa

A primeira camada a ser montada foi a de argila compactada com 240 mm de altura. Para garantir um grau de compactação de $97 \pm 2\%$, a execução da compactação foi realizada em 3 etapas, sendo cada uma com 80 mm, e utilizou-se um compactador manual, de área retangular, e nível de bolha para garantir o nivelamento da camada. Em cada uma das etapas, as paredes da caixa foram demarcadas e utilizou-se a quantidade necessária de solo, com umidade de $22 \pm 2\%$. Com o intuito de conferir se cada etapa de compactação atingiu o requisitado, retirou-se três corpos de prova para verificar o teor de umidade do solo. A Figura 18, mostra a compactação.

Figura 18 – Base de solo compactado e colocação da geomembrana na lateral interna da caixa

Na Figura 18, observa-se a colocação de uma geomembrana lubrificada com graxa, revestindo o interior da caixa, com a função de reduzir o deslocamento lateral, diminuir o atrito com as bordas e marcar o nível de compactação, assim como Tognon *et al.* (1999) explica em seu trabalho. Todos os ensaios foram conduzidos à temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$.

Após a compactação do solo, colocou-se o lençol de chumbo e a geomembrana, como ilustrado na Figura 19. Também na Figura 19, observa-se a instalação da instrumentação e, com a finalidade de evitar o rasgo, a proteção dos fios com fita isolante e na lateral da caixa a colocação de uma geomembrana de PVC.

Figura 19 – Colocação do lençol de chumbo e geomembrana

O material de preenchimento utilizado acima da geomembrana foi do tipo granular (brita 3) e para o fechamento da caixa utilizou-se uma chapa metálica, que, além da função de isolar a caixa, distribui a carga vertical aplicada pelo pistão. A Figura 20 ilustra o detalhe da parte superior da caixa.

Figura 20 – Preenchimento com material granular e detalhe final da caixa

3.2.2 Instrumentação

No ensaio foram utilizados quatro extensômetros elétricos (EE) uniaxiais, separados em pares, formando 90° entre eles, como mostra a Figura 21. Baseado em Tognon *et al.* (1999), o EE tem a função de validação e comparação com as leituras do lençol de chumbo. Outra função é conhecer o desenvolvimento das deformações com o passar do tempo.

Devido as altas deformações esperadas e o material onde o extensômetro elétrico foi instalado ser em um polímero (geomembrana PEAD), escolheu-se um EE próprio para essas limitações: KFEL 5-120-D34 da marca Kaiowa com deformação específica de até 15%. Eastman (2013) afirma que uma das dificuldades do uso de EE é a escolha do adesivo, pois este influencia na leitura da deformação e na aderência com a geomembrana. Devido a essas dificuldades, escolheu-se o adesivo CC-36, por ser um adesivo próprio para polímeros do tipo PEAD.

Figura 21 – Instalação dos extensômetros elétricos

Nas informações fornecidas pelo fabricante (catálogo do extensômetro elétrico) e por Hoffmann (2012) encontram-se a explicação da necessidade de preparar a superfície de instalação do EE para se obter uma leitura de deformação confiável. Por esse motivo, dividiu-se nas seguintes etapas de preparação da geomembrana e instalação dos EE em:

- Lixar a superfície, com a finalidade de aplanar e aumentar a aderência com o EE;
- Passar com o auxílio de gaze o neutralizador, condicionador e álcool isopropílico, com a finalidade de remover a graxa e impurezas. Após o uso dos materiais de limpeza, esperar 1 hora até a secagem total da superfície. Os materiais utilizados e a superfície preparada são apresentadas na Figura 21;
- Demarcar os locais onde os EE iriam ser instalados, como apresentado na Figura 22;
- Com o auxílio de uma pinça e um pedaço de plástico (acompanha o extensômetro na sua caixa), fazer a colagem do EE utilizando o adesivo CC-36; sua fixação foi feita aplicando uma pressão com o polegar por 1 minuto;

- Esperar o tempo de cura do adesivo, que dura em média 24 horas. Após sua cura, aplica-se uma resina de silicone, com a finalidade de proteger o EE contra a perfuração;
- Utilizar terminais de ligação adjacente aos EE, com a função de ligar os fios do EE aos cabos de ligação do aparelho de aquisição de dados e proteger contra o rompimento da solda feita entre o EE e os fios e cabos; e
- Após a instalação do EE, testar a ligação dos seus circuitos e a sua leitura inicial.

Na Figura 22 são ilustrados os locais onde foram instalados os extensômetros elétricos. Percebe-se que, na vista lateral, os extensômetros estão na parte superior da geomembrana e, na vista frontal superior, localizam-se na faixa central.

Figura 22 – Local de instalação dos extensômetros elétricos

A ligação entre o EE e o aparelho de aquisição de dados foi feita na forma de $\frac{1}{4}$ (quarto) de Ponte de Wheatstone com três fios, como mostra a Figura 23. Na Figura 23, R_G representa um único extensômetro elétrico e $R_{L1,2 \text{ e } 3}$, são os três fios que ligam o EE ao aparelho de aquisição de dados. As resistências R_2 , R_3 e R_4 estão dentro do aparelho de aquisição de dados e elas completam a Ponte de Wheatstone.

Figura 23 – Detalhe da Ponte de Wheatstone utilizada

A calibração das leituras feitas pelo aparelho de aquisição de dados foi realizada por meio da aplicação de um carregamento lento, um deslocamento e uma deformação conhecida na geomembrana, como mostrado no esquema de ensaio de calibração na Figura 24.

Figura 24 – Calibração dos EE

A partir dos resultados obtidos, plotou-se a reta de calibração do EE, apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Calibração do extensômetro elétrico

3.3 LEITURA DA DEFORMAÇÃO POR MEIO DO LENÇOL DE CHUMBO

A deformação foi medida de acordo com as metodologias citada em Hornsey e Wishaw (2012), utilizando-se um lençol de chumbo com 0,5 mm de espessura, o qual tem a função de registrar as deformações da geomembrana durante o ensaio e analisá-las posteriormente.

Com a finalidade de eliminar os efeitos de borda do lençol de chumbo, que inicialmente tem 495 x 495 mm, diminui-se a área de análise para 400 x 400 mm, como ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Esquema da área de leitura do lençol de chumbo

A leitura das deformações registradas pelo lençol de chumbo foi realizada pela Máquina de Leitura por Coordenadas do Laboratório de Metrologia da Engenharia Mecânica (EESC – USP) apresentado na Figura 27. Essa máquina realizou as leituras pontuais das coordenadas (x,y,z) em um Grid de 4 mm, totalizando assim 10.000 pontos.

Figura 27 – Máquina de Leitura por Coordenadas

A metodologia de cálculo da deformação foi realizada conforme Hornsey e Wishaw (2012), segundo as indicações apresentadas na Figura 28. O método divide a leitura em um grid de 1 x 1 mm e, através da Equação 6, é realizado o cálculo da deformação a partir da altura dos 8 pontos ao redor (duas diagonais, uma vertical e uma horizontal) de um ponto central e adota-se o maior valor entre eles, eliminando os pontos da borda da superfície. Dessa forma, com uma superfície de 400 x 400 mm e um grid de 1 mm, totalizou 160.000 pontos de análise. Criou-se uma *macro* (código computacional de sequência programada que executa automaticamente tarefas específicas), pelo *Visual Basics*, no *Excel*, para facilitar o cálculo da deformação entre os pontos. O código completo da *macro* está disponível no APÊNDICE A.

$$\varepsilon(\%) = \left[\frac{\sqrt{L^2 + \Delta z^2}}{L} - 1 \right] \cdot 100 \quad (6)$$

Sendo que:

L - comprimento original;

Z - altura original;

ε – Deformação em porcentagem.

Figura 28 – Esquema da análise das deformações

Fonte: Hornsey e Wishaw (2012).

Como a leitura fornecida pela Máquina de Leitura por Coordenadas foi realizada para um grid de 4 x 4 mm, utilizou-se o *software* Surfer para interpolar os pontos e gerar um grid de 1 x 1 mm. O método de interpolação utilizado foi o de triângulação com interpolação linear. A escolha desse método consiste na aproximação da superfície por triângulos cujos vértices pertencem ao conjunto das amostras, ou seja, as alturas $z(x,y)$ são aproximadas pelo plano definido pelos vértices do triângulo da superfície, desde que (x,y) pertença à região de projeção.

Além da interpolação, a partir dos resultados de deformação obtidos pela metodologia de Hornsey e Hishaw (2012), utilizou-se o Surfer para elaborar as superfícies de deformação de cada ensaio.

3.4 FISSURAMENTO SOB TENSÃO CONSTANTE

Segundo Peggs *et al.* (2005), devido a microestrutura semicristalina da geomembrana de PEAD, a qual fornece alta resistência química e mecânica à geomembrana, o fissuramento sob tensão constante é uma característica apresentada somente para geomembranas de PEAD. Rowe *et al.* (2004), afirmam que a suscetibilidade da geomembrana em apresentar fissuramento sob tensão constante a longo prazo é algo preocupante. Por esse motivo, Seeger e Muller (2003) e Peggs *et al.* (2005) propuseram limites para a deformação da geomembrana, e consequentemente limites para carga aplicada. Os limites de deformação propostos para geomembranas de PEAD, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores limitantes de deformação da geomembrana

PEAD lisa (SCR <1500 hr)	6%
PEAD lisa (SCR >1500 hr)	8%
PEAD texturizada	4%

Fonte: Traduzida e modificada de Peggs et al (2005).

O ensaio de fissuramento sob tensão constante foi realizado de acordo com a norma ASTM D5397(2012), que trata da aplicação de níveis de carga variando entre 20 a 65% da máxima resistência à tração, em incrementos de 5%, registrando o tempo da ruptura de cada amostra.

Como resultado do ensaio é calculado o SCR (*stress cracking resistance*), o qual representa o ponto de alternância de declividade, na forma de um degrau, no gráfico do ensaio. Lavoie (2006), mostrou que fisicamente o ponto em que há a alternância de declividade, trata-se do ponto onde a ruptura deixa de ser dúctil e passa a ser frágil.

Apresenta-se os resultados obtidos pelo ensaio de fissuramento sob tensão constante na Tabela 17, os quais são os estágios de carregamento, entre 20 a 65% da máxima resistência à tração, com os respectivos tempos de ruptura.

Tabela 17 – Resultado do fissuramento sob tensão constante

% Resist. tração	Tempo horas
65	0,015
60	0,05
55	0,2
50	2
45	35
40	149
35	748
30	1164
25	1913
20	7346

A partir da Tabela 17, plota-se o gráfico da Figura 29. O SCR (*stress cracking resistance*) representa o ponto onde percebe-se a presença de um degrau na curva.

Figura 29 – Gráfico obtido pelo fissuramento sob tensão constante

Analisando a Figura 29, observa-se que o valor do SCR está entre 1100 e 1300 horas, o qual é menor que 1500 horas, portanto segundo Peggs *et al.* (2005), a deformação limitante da geomembrana em estudo é 6%.

3.5 ENSAIO DE PÓS DANO: PUNÇIONAMENTO ESTÁTICO

Após o ensaio de carregamento estático e a retirada do material granular (brita 3), realizou-se o ensaio de pós dano e inspeção visual da geomembrana, como uma segunda análise do desempenho das camadas de proteção da geomembrana. Vale ressaltar que a superfície deformada obtida pelo lençol de chumbo foi a primeira análise.

O ensaio de pós dano realizado, verifica a alteração da resistência ao punçionamento (NBR ISO 12236:2013) da geomembrana virgem, em comparação com a degradada mecanicamente.

E a inspeção visual analisa qualitativamente os danos mecânicos experimentados pela geomembrana. A forma de classificação dos danos ocorridos na superfície da geomembrana e avaliados visualmente, estão indicados na Tabela 18.

Tabela 18 – Tipos de dano na geomembrana

Tipo de dano	Descrição
Arranhão	Riscos e marcas ocasionadas pelo contato direto da brita
Entalhe	Pequena deformação, sem a ocorrência de furo, devido à pressão da brita sobre a geomembrana
Entalhe profundo	Deformação profunda na superfície da geomembrana, com a formação de estrias na parte oposta ao contato com a brita
Perfuração	Abertura que possibilita a passagem de um fluido ou gás, atravessando a superfície da geomembrana

Fonte: Geroto (2008)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo apresenta os resultados dos 12 ensaios realizados, sendo que cada ensaio possui um tipo de proteção da geomembrana. Para uma melhor apresentação didática dos resultados, foram apresentados, para cada tipo de proteção uma avaliação da superfície deformada da geomembrana por meio da leitura das coordenadas do lençol de chumbo deformado (após o ensaio de compressão estática) e a comparação das deformações pontuais provenientes dos extensômetros elétricos (EE). Inicialmente, comentam-se os resultados dos ensaios, de modo individual, e, na sequência, apresenta-se o ensaio pós-dano da geomembrana, para, ao final, discutir os diferentes aspectos dos ensaios. A Figura 30 esquematiza os parâmetros utilizados na avaliação da superfície deformada da geomembrana após o ensaio de compressão diametral e extensometria para análise pontual.

Figura 30 – Esquema da apresentação dos resultados

Os resultados da leitura da deformação por meio do lençol de chumbo, conforme explicado no Capítulo 3, foram obtidos pela metodologia apresentada em Hornsey e Wishaw (2012). Assim, foram obtidos dois grids para análise: i) 1x1 mm e ii) 4x4 mm. Para cada grid, apresenta-se o gráfico da frequência de uma específica deformação e a sua porcentagem sobre a área total do lençol de chumbo (400 mm x 400 mm).

Com o auxílio do programa *Surfer 8*, elaborou-se a superfície deformada de cada geomembrana analisada, com o objetivo de visualizar a distribuição das deformações no lençol de chumbo, comparando-a com a avaliação visual da geomembrana após o ensaio.

Com relação aos extensômetros elétricos utilizados para a estimativa pontual de deformações da geomembrana, foram realizados duas análises: i) a primeira refere-se à comparação dos valores de deformação obtidos pelo lençol de chumbo e

pelos EE e ii) a segunda apresenta à variação dos valores de deformações pontuais ao longo do tempo de aplicação da carga.

4.1 ENSAIO 1 E 5: GTX-N 1

Com a proteção do geotêxtil não tecido 1, realizou-se dois ensaios com carregamentos de 600 e 1800 kPa. A Tabela 19 mostra o resumo dos deslocamentos observados nos ensaios.

Tabela 19 – Resumo dos deslocamentos observados nos ensaios com o GTX-N 1

ENSAIO	TIPO DE PROTEÇÃO	CARGA (kPa)	DESLOCAMENTO DO SISTEMA (mm)*
1	GTX-N 1 (650 g/m ²)	600	37
5	GTX-N 1 (650 g/m ²)	1800	87

* Deslocamento de toda a caixa ao final do ensaio.

4.1.1 Superfície deformada

As Tabela 20 e Tabela 21, referentes aos ensaios 1 e 5, respectivamente, com o uso do GTX-N 1, apresentam para o Grid 1 mm e 4 mm os valores de deformação em termos de porcentagem total da área por classe de deformação. Nas Figura 31 e Figura 32 encontram-se os gráficos das porcentagens dos respectivos ensaios.

Tabela 20 – Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 1

<i>Grid 1 mm</i>			<i>Grid 4 mm</i>		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	46627	29,88	0 - 0,25	2005	20,88
0,25 - 0,5	30015	19,24	0,25 - 0,5	1869	19,46
0,5 - 0,75	18406	11,80	0,5 - 0,75	1231	12,82
0,75 - 1	12019	7,70	0,75 - 1	796	8,29
1 - 2	26369	16,90	1 - 2	1908	19,87
2 - 3	11024	7,07	2 - 3	863	8,99
3 - 6	9690	6,21	3 - 6	691	7,19
6 - 8	1130	0,72	6 - 8	229	2,38
8 - 10	489	0,31	8 - 10	10	0,10
10 - 15	210	0,13	10 - 15	1	0,01
>15	46	0,03	>15	1	0,01
total	156025		total	9604	

Figura 31 – Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 1

Tabela 21 – Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 5

Grid 1 mm			Grid 4 mm		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	6515	4,18	0 - 0,25	72	0,75
0,25 - 0,5	8506	5,45	0,25 - 0,5	245	2,55
0,5 - 0,75	9103	5,83	0,5 - 0,75	383	3,99
0,75 - 1	8323	5,33	0,75 - 1	433	4,51
1 - 2	27809	17,82	1 - 2	1546	16,10
2 - 3	20227	12,96	2 - 3	1318	13,72
3 - 6	34164	21,90	3 - 6	2327	24,23
6 - 8	13258	8,50	6 - 8	993	10,34
8 - 10	8172	5,24	8 - 10	637	6,63
10 - 15	11310	7,25	10 - 15	921	9,59
>15	8638	5,54	>15	729	7,59
total	156025		total	9604	

Figura 32 – Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 5

A partir da Tabela 20 e da Figura 31, observou-se nos Grids de 1 e 4 mm que as deformações se concentraram entre 0,5 e 0,25%. Ao analisar os resultados dessas deformações, atribuindo-se 6% como o valor limitante de deformação, conforme Peggs *et al.* (2005), constatou-se que apenas 1% do total dos valores estão acima do estabelecido como limitante para o Grid de 1 mm e 2% para o Grid de 4 mm, mostrando que a proteção foi suficiente para as condições ensaiadas.

Com o aumento da carga de 600 kPa para 1800 kPa – aplicados nos ensaios 1 e 5, respectivamente, verificou-se que, tanto no Grid de 1 mm como no de 4 mm, ocorreu entre 5 e 10% uma maior concentração da deformação. Estas deformações estão superiores à 6% que é o critério limitante de deformação adotado, conforme demonstra a Tabela 21 e Figura 32.

Ao término do Ensaio 1, analisou-se visualmente a geomembrana e não se constatou nenhuma perfuração e nem entalhes profundos. Havia somente arranhões, deformações e entalhes leves que, ao comparar a análise visual da geomembrana com a superfície deformada com auxílio do programa *Surfer 8*, verificou-se uma coincidência dos pontos mais deformados que foram observados visualmente com os pontos de máxima deformação quando calculados pelo lençol de chumbo.

As Figura 33 e Figura 34 mostram as superfícies deformadas dos Ensaios 1 e 5, as quais foram obtidas pela leitura de deformação do lençol de chumbo para os Grids de 1 e 4 mm.

Figura 33 – Superfície deformada da geomembrana: Ensaio 1

Figura 34 – Superfície deformada da geomembrana: Ensaio 5

Verificou-se na Figura 33, que a superfície deformada do Grid de 1 mm representou melhor a realidade da geomembrana, pois, em comparação com o Grid de 4 mm, há uma suavidade da deformação e uma melhor distribuição dos valores. Observou-se também, que os pontos onde os valores de deformação superaram os 15%, são pontos de borda, que, segundo a metodologia de Hornsey e Wishaw (2012), eles devem ser desconsiderados, devido ao manuseio do lençol de chumbo na hora na instalação e retirada da caixa de ensaio.

Diferentemente da análise visual da geomembrana do Ensaio 1, com o aumento de carga para 1800 kPa no Ensaio 5, observou-se visualmente um ponto de perfuração, seis regiões com entalhes profundos e diversos pontos com arranhões e entalhes leves na geomembrana. As regiões em que foram observadas a perfuração e os entalhes profundos da geomembrana, ao serem comparadas com a superfície deformada da Figura 34, são identificadas nas regiões onde há concentração dos pontos em azul, principalmente ao centro. Tal observação se verificou em todas as geomembranas ensaiadas.

Assim como na superfície do Ensaio 1, a superfície do Grid de 1 mm ficou mais nítida que a do Grid de 4 mm, porém, diferentemente do Ensaio 1, ela não ficou suavizada.

4.1.2 Análise pontual da deformação

No Ensaio 1, os EE foram utilizados com a intenção de validar pontualmente a deformação calculada pela metodologia de Hornsey e Wishaw (2012). A Figura 35 mostra que a comparação das leituras de deformação do EE 2, com o lençol de chumbo, no Grid 4 mm, foi semelhante. Para o Grid 1 mm não ocorreu tal semelhança. Ao tomar a mesma comparação de leitura no EE 1, observou-se que a deformação foi 21% maior que o Grid 1 e 34% menor que o Grid 4, conforme demonstrado na Figura 36.

Figura 35 – Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 1

Figura 36 – Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 1

Os resultados dos EE 3 e 4 não foram apresentados em virtude de terem, após um tempo de ensaio, parado de apresentar leitura. A variação de resultado das comparações e a não leitura dos EE justificam-se em razão destes serem uma instrumentação delicada, onde a camada drenante (brita), a qualquer momento, poderia romper um fio ou até mesmo o EE.

Para o Ensaio 1 não será apresentada a curva *strain* x tempo, devido a um problema técnico com o aquisitor de dados que impossibilitou realizar a leitura de *μstrain*, durante todo o ensaio.

A Figura 37 apresenta a comparação do EE 1 com as leituras do lençol de chumbo do Ensaio 5.

Figura 37 – Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 5

Diferentemente do Ensaio 1, o Ensaio 5 teve somente o EE 1 com leitura até o final. Comparando os valores de deformação do EE e do lençol de chumbo, percebeu-se uma diferença de 36% dos resultados. Essa diferença é devido os EE 1 e 2 serem acoplados e como o EE 2 descolou, consequentemente, a leitura do EE 1 foi comprometida.

A leitura de *strain x tempo* do EE 1 para o Ensaio 5 está apresentada na Figura 38. Observou-se um patamar próximo a 60 horas de ensaio, onde a variação da leitura de $\mu strain$ foi mínima.

Figura 38 – Curva *strain x tempo* do Ensaio 5

Ao analisar os EE no final do ensaio, verificou-se que o motivo da interrupção da leitura são seus elevados valores, ou seja, após ultrapassar 10000 $\mu strain$ o adesivo utilizado para colar o EE e a geomembrana descolaram. Outra razão para o descolamento foi devido ao puncionamento da geomembrana no local onde se instalou o EE.

4.2 ENSAIO 2 E 6: 2 x GTX-N 1

Utilizou-se como elemento de proteção o 2 x GTX-N 1, o qual consiste na sobreposição de dois GTX-N 1, aumentando a sua espessura e massa por unidade de área. Com esse elemento de proteção, realizou-se dois ensaios com diferentes carregamentos. A Tabela 22 mostra um resumo dos deslocamentos observados nos ensaios com 2 x GTX-N1.

Tabela 22 - Resumo dos deslocamentos nos ensaios com o 2 x GTX-N1 duplo

ENSAIO	TIPO DE PROTEÇÃO	CARGA (kPa)	DESLOCAMENTO DO SISTEMA (mm)*
2	2 x GTX-N 1 (1300 g/m ²)	600	48
6	2 x GTX-N 1 (1300 g/m ²)	1800	57

* Deslocamento de toda a caixa ao final do ensaio.

4.2.1 Superfície deformada

As Tabela 23 e Tabela 24 apresentam os resultados de deformação em termos de porcentagem total da área por classe de deformação para o Grid de 1 mm e 4 mm, dos ensaios 2 e 6, referentes ao GTX-N1 duplo. Nas Figura 39 e Figura 40 são apresentados os gráficos referentes às porcentagens.

Tabela 23 – Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 2

<i>Grid 1 mm</i>			<i>Grid 4 mm</i>		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	19955	12,79	0 - 0,25	635	6,61
0,25 - 0,5	18286	11,72	0,25 - 0,5	941	9,80
0,5 - 0,75	16425	10,53	0,5 - 0,75	951	9,90
0,75 - 1	14091	9,03	0,75 - 1	880	9,16
1 - 2	40853	26,18	1 - 2	2748	28,61
2 - 3	21100	13,52	2 - 3	1503	15,65
3 - 6	21029	13,48	3 - 6	1612	16,78
6 - 8	3109	1,99	6 - 8	247	2,57
8 - 10	755	0,48	8 - 10	53	0,55
10 - 15	354	0,23	10 - 15	60	0,31
>15	68	0,04	>15	4	0,04
total	156025		total	9604	

Figura 39 – Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 2

Tabela 24 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 6

Grid 1 mm			Grid 4 mm		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	11466	7,35	0 - 0,25	216	2,25
0,25 - 0,5	13073	8,38	0,25 - 0,5	501	5,22
0,5 - 0,75	12104	7,76	0,5 - 0,75	614	6,39
0,75 - 1	10804	6,92	0,75 - 1	587	6,11
1 - 2	33563	21,51	1 - 2	2109	21,96
2 - 3	21970	14,08	2 - 3	1498	15,60
3 - 6	31273	20,04	3 - 6	2313	24,08
6 - 8	9058	5,81	6 - 8	720	7,50
8 - 10	4999	3,20	8 - 10	393	4,09
10 - 15	5425	3,48	10 - 15	473	4,93
>15	2290	1,47	>15	180	1,87
total	156025		total	9604	

Figura 40 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 6

Percebe-se pela Figura 39, ao comparar o Grid 1 e 4 mm, uma diferença entre as concentrações da porcentagem de deformação sobre o total de pontos nas menores deformações. No Grid 1 mm a porcentagem para valores de deformação entre 0 e 0,25% foi de 12,79%; no mesmo intervalo, o Grid de 4 mm obteve 6,61%. Essa diferença de valores é explicada pelo fato do Grid 1 mm ser mais refinado que o Grid 4 mm, portanto, aumenta a concentração dos valores mais baixos de deformação, assim como observado em Hornsey e Wishaw (2012). Por esta razão, os autores recomendam a utilização do Grid de 1 mm. Vale ressaltar que este fenômeno foi observado em todos os ensaios.

Analisando-se os resultados da Tabela 23 e levando-se em conta os limites de deformação (6% e 8%), os valores de deformação para o Grid de 1 mm está 2,75% e 0,75% acima dos limites, respectivamente.

O Ensaio 6 está representado pela Figura 40 e apresentado na Tabela 24. É possível observar que para o Grid 1 mm 92% dos valores de deformação estão abaixo do valor limitante da deformação de 8% e 86% dos valores estão abaixo do valor limitante de 6%.

Ao final do Ensaio 2 foi realizada a análise visual da geomembrana, na qual foi notada a presença de um entalhe profundo, três regiões com entalhes leves, alguns arranhões e nenhuma perfuração.

Na Figura 41 se evidencia-se a superfície deformada do Ensaio 2 e a superfície deformada do Ensaio 6 encontra-se ilustrada na Figura 42.

Figura 41 – Superfície deformada da geomembrana: Ensaio 2

Figura 42 – Superfície deformada do Ensaio 6

Verifica-se pela Figura 41, assim como apresentado no item 4.2.1, que 97% dos valores de deformação estão abaixo do estipulado como deformação limite de 6%, porém se observa uma região de cor azul um pouco abaixo do centro da placa, a qual dispõe de deformações maiores que 10%. Ao comparar esta região com a inspeção visual feita na geomembrana, verificou-se a coincidência da localização do entalhe profundo.

Embora 97% dos valores de deformação estivessem abaixo de 6%, ocorreu um entalhe profundo na geomembrana. Isto ocorreu em decorrência da presença de uma brita angulosa que, no momento de distribuição das britas na caixa e na aplicação da carga, formou na geomembrana uma área de tensão pontual.

No decorrer da inspeção visual da geomembrana do Ensaio 6, verificou-se três áreas com entalhes profundos, a presença de entalhes leves e arranhões em toda a área da geomembrana e nenhuma perfuração da geomembrana.

Comparando-se as superfícies com Grid de 1 mm e 4 mm, apresentadas na Figura 42, percebe-se que ambas ficaram parecidas, no entanto, a superfície com Grid de 1 mm suavizou as áreas de pico, as quais possuem deformações maiores que 10%.

4.2.2 Análise pontual da deformação

No Ensaio 2, dos quatro EE instalados na geomembrana, dois deles forneceram leituras até o final do ensaio; os outros dois, logo nos primeiros minutos, forneceram leituras superiores a 10.000 $\mu strain$ e ficaram fora de escala, não fornecendo mais leituras. A comparação dos resultados dos EE 1 e 2 com o lençol de chumbo está apresentada nas Figura 43 e Figura 44.

Figura 43 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 2

Figura 44 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 2

Ao analisar a comparação da deformação da geomembrana por meio dos EE 1 e 2 e das leituras de deformação utilizando o lençol de chumbo, verificou-se que, tanto para o EE 1 quanto para o 2, os valores de deformação foram 27% menores que os obtidos pelo lençol de chumbo ao serem comparados com a coordenada 250.

A Figura 45 exibe a leitura de *strain* x tempo para dois EE do Ensaio 2. Notou-se que a partir das 40 horas de ensaio atingiu-se um patamar em que a variação de *μstrain* ficou constante.

Figura 45 - Curva *strain* x tempo do Ensaio 2

Assim como no Ensaio 2, o Ensaio 6 teve dois EE com leitura até o final do ensaio e dois com a leitura interrompida. Nas Figura 46 e Figura 47 encontram-se as

comparações das leituras de deformação por EE x lençol de chumbo. Na Figura 48 mostra-se a evolução da deformação versus tempo, no decorrer do Ensaio 6.

Figura 46 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 6

Figura 47 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 6

Ao comparar o EE 1 do Ensaio 6 com a deformação obtida pela leitura da deformação por meio do lençol de chumbo, verificou-se uma diferença de 36% dos valores de deformação para o Grid de 4 mm. Para o Grid de 1 mm, essa diferença foi ainda maior, cerca de 60%.

A Figura 47 aponta que a leitura da deformação do EE em comparação com o Grid de 4 mm foi 22% menor. Para o Grid de 1 mm, essa deformação foi 14% menor.

Averigua-se pela Figura 48 que, tanto para o EE 1 quanto para o EE 2, há a presença de um patamar em que a variação de $\mu strain$ fica constante, ambos a partir de 10 horas de ensaio.

Figura 48 - Curva *strain* x tempo do Ensaio 6

4.3 ENSAIO 3 E 7: GTX-N 2

O GTX-N 2 como proteção foi utilizado nos ensaios 3 e 7. A Tabela 25 mostra o resumo dos deslocamentos observados nos ensaios.

Tabela 25 - Resumo dos deslocamentos observados nos ensaios com o GTX-N 2

ENSAIO	TIPO DE PROTEÇÃO	CARGA (kPa)	DESLOCAMENTO DO SISTEMA (mm)*
3	GTX-N 2 (550 g/m ²)	600	46
7	GTX-N 2 (550 g/m ²)	1800	52

* Deslocamento de toda a caixa ao final do ensaio.

4.3.1 Superfície deformada

Os resultados obtidos pela leitura de deformação por meio do lençol de chumbo estão apresentados na Tabela 26 e na Figura 49, para a carga de 600 kPa e na Tabela 27 e Figura 50 para a carga de 1800 kPa.

Tabela 26 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 3

Grid 1 mm			Grid 4 mm		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	20355	13,05	0 - 0,25	608	6,33
0,25 - 0,5	19473	12,48	0,25 - 0,5	1031	10,74
0,5 - 0,75	15718	10,07	0,5 - 0,75	915	9,53
0,75 - 1	13415	8,60	0,75 - 1	843	8,78
1 - 2	34794	22,30	1 - 2	2273	23,67
2 - 3	20609	13,21	2 - 3	1479	15,40
3 - 6	23384	14,99	3 - 6	1789	18,63
6 - 8	4817	3,09	6 - 8	403	4,20
8 - 10	1907	1,22	8 - 10	143	1,49
10 - 15	1366	0,88	10 - 15	105	1,09
>15	187	0,12	>15	15	0,16
total	156025		total	9604	

Figura 49 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 3

Tabela 27 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 7

Grid 1 mm			Grid 4 mm		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	11663	7,48	0 - 0,25	220	2,29
0,25 - 0,5	12312	7,89	0,25 - 0,5	444	4,62
0,5 - 0,75	10722	6,87	0,5 - 0,75	485	5,05
0,75 - 1	10259	6,58	0,75 - 1	545	5,67
1 - 2	29112	18,66	1 - 2	1723	17,94
2 - 3	19048	12,21	2 - 3	1264	13,16
3 - 6	30974	19,85	3 - 6	2272	23,66
6 - 8	11328	7,26	6 - 8	931	9,69
8 - 10	7083	4,54	8 - 10	583	6,07
10 - 15	8306	5,32	10 - 15	698	7,27
>15	5218	3,34	>15	439	4,57
total	156025		Total	9604	

Figura 50 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 7

Constata-se, pela Figura 49, que a maior concentração das deformações foi ao redor de 2% e, também, que 94% da área da geomembrana apresentou deformações abaixo dos 6% propostos como valor limitante de deformação.

Com o aumento da carga de 600 kPa para 1800 kPa e utilizando-se a proteção do GTX-N 2, verifica-se, pela Tabela 27, que 21% dos valores de deformação estão acima dos 6% estipulados como limite; a mesma tabela revela que a maior

concentração das deformações (24% do total para o Grid de 4 mm) está entre 3 a 6%.

Ao término do Ensaio 3, analisou-se visualmente a geomembrana e constatou-se um entalhe profundo e nenhuma perfuração; nas regiões mais centrais da geomembrana, observou-se entalhes leves e arranhões.

Na Figura 51, apresenta-se a superfície deformada do Ensaio 3. Observa-se que as deformações se concentraram ao centro da geomembrana e, assim como no ensaio 2, por mais que a geomembrana apresente 94% dos valores abaixo do 6% (valor tido como limitante), há uma área representada pela cor azul que se observa a presença de um entalhe profundo e deformações superiores a 10%.

Figura 51 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 3

A Figura 52 revela que as maiores deformações estão concentradas na parte inferior e nas bordas do lençol de chumbo; isso se explica em razão da não uniformidade na distribuição das britas e concentração das britas mais angulosas na parte inferior.

Com o aumento da carga para 1800 kPa, no Ensaio 7, observa-se, pela análise visual da geomembrana, a presença de cinco regiões com entalhes profundos, diversos pontos com entalhes leves e arranhões e nenhuma perfuração.

Figura 52 – Superfície deformada da geomembrana Ensaio 7

4.3.2 Análise pontual da deformação

No Ensaio 3, dos quatro EE instalados, três apresentaram leituras até o final do ensaio. A leitura do EE 1 foi interrompida, em virtude do rompimento do fio de ligação do EE com o aquisitor de dados, pois este fio entrou em contato com a brita, logo no início do ensaio. As Figura 53, Figura 54 e Figura 55 mostram a comparação da leitura de deformação por meio dos EE e do lençol de chumbo.

Figura 53 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 3

Figura 54 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 3

Figura 55 - Comparação EE 4 e leitura lençol de chumbo do Ensaio 3

Ao comparar as deformações das leituras dos EE com as leituras do lençol de chumbo com Grid 1 e 4 mm, averigua-se na Figura 53 que o EE 2 apresentou apenas 3% de variação dos valores; na Figura 54, o EE 3 mostrou variação de 18% a 28% dos resultados de deformação e na Figura 55, o EE 4 teve variação de 10% ao serem comparados com a coordenada 253.

A leitura de deformação x tempo está apresentada na Figura 56, onde é possível observar que o patamar, em que há a estabilização das leituras de deformação da geomembrana, localiza-se após as 10 horas de ensaio.

Figura 56 – Curva *strain* x tempo do Ensaio 3

Ao aumentar a carga de 600kPa para 1800kPa, no Ensaio 7, somente um EE manteve seu funcionamento até o final do ensaio. Na Figura 57, encontra-se a comparação da máxima deformação obtida pelo EE 2 com as leituras de deformação do lençol de chumbo, verifica-se que a leitura máxima de deformação do EE 2 foi 25% menor, em comparação com o Grid de 4 mm, e, 20% menor em comparação com o Grid de 1 mm.

Figura 57 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 7

A variação de deformação x tempo do EE 2 para o Ensaio 7, encontra-se na Figura 58. Observou-se que, após 10 horas de ensaio, a variação de deformação em função do tempo tornou-se constante.

Figura 58 - Curva *strain* x tempo do Ensaio 7

4.4 ENSAIO 4 E 8: 2 x GTX-N 2

Nos Ensaios 4 e 8, utilizou-se como elemento de proteção o 2 x GTX-N 2, o qual consiste na sobreposição de dois GTX-N 2, aumentando sua espessura e gramatura. A Tabela 28 apresenta um resumo dos deslocamentos nos ensaios, utilizando o GTX-N 2 duplo como elemento de proteção.

Tabela 28 - Resumo dos deslocamentos nos ensaios com o GTX-N 2 duplo

ENSAIO	TIPO DE PROTEÇÃO	CARGA (kPa)	DESLOCAMENTO DO SISTEMA (mm)*
4	2 x GTX-N 2 (1100 g/m ²)	600	51
8	2 x GTX-N 2 (1100 g/m ²)	1800	59

* Deslocamento de toda a caixa ao final do ensaio.

4.4.1 Superfície deformada

Os resultados obtidos pela leitura de deformação por meio do lençol de chumbo estão apresentados nas Tabela 29 e Tabela 30, as quais mostram os resultados de deformação em termos de porcentagem total da área por classe de deformação, para o Grid de 1 mm e 4 mm, dos Ensaios 4 e 8. Nas Figura 59 e Figura 60 são apresentados os gráficos dessas porcentagens.

Tabela 29 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 4

<i>Grid 1 mm</i>			<i>Grid 4 mm</i>		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	19687	12,62	0 - 0,25	545	5,67
0,25 - 0,5	19978	12,80	0,25 - 0,5	998	10,39
0,5 - 0,75	15764	10,10	0,5 - 0,75	955	9,94
0,75 - 1	12771	8,19	0,75 - 1	769	8,01
1 - 2	38753	24,84	1 - 2	2578	26,84
2 - 3	22465	14,40	2 - 3	1687	17,57
3 - 6	21236	13,61	3 - 6	1635	17,02
6 - 8	3240	2,08	6 - 8	286	2,79
8 - 10	1344	0,86	8 - 10	104	1,08
10 - 15	673	0,43	10 - 15	56	0,58
>15	114	0,07	>15	9	0,09
total	156025		total	9604	

Figura 59 - Gráfico de frequência para o Ensaio 4

Tabela 30 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 8

Grid 1 mm			Grid 4 mm		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	18674	11,97	0 - 0,25	466	4,85
0,25 - 0,5	16369	10,49	0,25 - 0,5	795	8,28
0,5 - 0,75	14083	9,03	0,5 - 0,75	764	7,96
0,75 - 1	12196	7,82	0,75 - 1	704	7,33
1 - 2	32675	20,94	1 - 2	2154	22,43
2 - 3	18455	11,83	2 - 3	1322	13,77
3 - 6	25501	16,34	3 - 6	1907	19,86
6 - 8	7215	4,62	6 - 8	598	6,23
8 - 10	4553	2,92	8 - 10	369	3,84
10 - 15	4343	2,78	10 - 15	372	3,87
>15	1961	1,26	>15	153	1,59
total	156025		total	9604	

Figura 60 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 8

Analisando-se os resultados da Tabela 29 e levando-se em conta os limites de deformação (6% e 8%), os valores de deformação para os Grids de 1 e 4 mm estão 4% e 2% acima do limite, respectivamente.

Com o aumento da carga de 600 kPa para 1800 kPa no Ensaio 8, conforme exposto na Tabela 30, os valores de deformação para o Grids de 1 mm ficaram 12% e 7% acima dos limites estipulados por Peggs *et al.* (2005). Para o Grid de 4 mm os valores de deformação ficaram 16% e 10% acima desses mesmos limites.

Analisando a Figura 60, verifica-se que a maior concentração das deformações (23% do total para o Grid de 4 mm) está entre 1 a 2%. O mesmo acontece para o Grid de 1 mm, porém com menor intensidade, apresentando 21% dos valores entre 1 a 2%. Isto ocorre devido ao aumento da concentração das deformações menores em função do refinamento do grid.

Ao final do Ensaio 4, foi realizada a análise visual da geomembrana, na qual foi notada a presença de um ponto com entalhe profundo, três regiões com entalhes leves, alguns arranhões e nenhuma perfuração.

Na Figura 61, evidencia-se a superfície deformada do Ensaio 4.

Figura 61 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 4

Observa-se na Figura 61, que as deformações estão bem espaçadas e distribuídas por todo o lençol de chumbo e, assim como nos Ensaio 2 e 3, por mais que a geomembrana apresente 96% dos valores abaixo do 6% limitante, há um ponto representado pela cor azul, onde se observa a presença de um entalhe profundo e deformações superiores a 10%. Percebe-se também outro ponto de deformação, próximo à coordenada (350;150), na cor branca tendendo ao azul. Esse ponto apresenta uma deformação de 10%, portanto, superior ao limite estabelecido.

Na Figura 62, que apresenta a superfície deformada do Ensaio 8, constata-se que as deformações estão bem distribuídas pelo lençol de chumbo. A análise visual e a verificação da superfície deformada revelaram a inexistência de perfuração, seis

regiões com entalhe profundo (regiões em azul), várias regiões com entalhes leves (regiões em branco) e arranhões.

Figura 62 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 8

4.4.2 Análise pontual da deformação

No Ensaio 4, os quatro EE instalados tiveram leituras até o final do ensaio. As Figura 63, Figura 54, Figura 64, Figura 65 e Figura 66 mostram a comparação da leitura de deformação por meio dos EE e do lençol de chumbo.

Figura 63 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 4

Figura 64 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 4

Verifica-se na Figura 63 que a leitura do EE 1 em comparação com a leitura do lençol de chumbo com Grid 1 e 4 mm ficou 10% menor. Pela Figura 64, constata-se uma equivalência nos resultados das deformações no EE 2.

Na Figura 65, observa-se que o valor de deformação obtido pelo EE 3 foi 12% maior que ao comparado com a leitura do lençol de chumbo. Entretanto, constata-se que ao comparar com a coordenada vizinha (164) há uma equivalência dos valores.

O EE 4 está apresentado na Figura 66 e verifica-se que ao comparar os valores de deformação obtidos pelo EE 4 com o lençol de chumbo, há uma variação de 32% dos resultados.

Figura 65 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 4

Figura 66 - Análise pontual da deformação: EE 4 x lençol de chumbo - Ensaio 4

Ao analisar o comportamento das leituras de deformação x tempo apresentadas na Figura 67, percebe-se que o patamar em que as leituras se tornam constantes está localizado aproximadamente após as 24 horas de ensaio para todos os EE da figura. Verifica-se também que, ao atingir 80 horas de ensaio, o EE 1 e 2 apresentam queda nos seus valores de *strain*. O motivo para tal acontecimento deve ao fato que após um tempo de aplicação da carga há a acomodação da brita e da geomembrana.

Figura 67 - Curva *strain* x tempo do Ensaio 4

Para o Ensaio 8, os quatro EE tiveram leituras até o final do ensaio. As Figura 68, Figura 54, Figura 69, Figura 70 e Figura 71 apresentam a comparação da leitura de deformação por meio dos EE e do lençol de chumbo.

Figura 68 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 8

Figura 69 - Análise pontual da deformação: EE 2 x lençol de chumbo - Ensaio 8

Figura 70 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 8

Figura 71 - Comparação EE 4 e leitura lençol de chumbo do Ensaio 8

A partir da Figura 68, percebe-se que a leitura do EE em comparação com o lençol de chumbo foi 10% maior. Para as Figura 69 e Figura 70, obteve-se uma leitura de 50% e 28% menor, respectivamente, considerando o Grid 4 mm.

Diferentemente dos EE 1, 2 e 3, o EE 4 apresentou equivalência na comparação das leituras de deformação pelo EE e o lençol de chumbo.

As leituras de deformação x tempo do Ensaio 8 são apresentadas na Figura 72. Percebe-se que o patamar em que as leituras tornam-se constantes está localizado após as 10 horas de ensaio para todos os EE da figura. Verifica-se também que, ao atingir 75 horas de ensaio, os EE variam sua leitura bruscamente. A razão para tal ocorrência se deve ao fato de que houve uma queda na energia elétrica, forçando o

desligamento do equipamento. Após 30 minutos com a volta da energia, continuou-se o ensaio.

Ainda pode-se notar, pela Figura 72, que, tendo em vista que o EE 1 teve um pico superior a 10.000 $\mu strain$ no começo do ensaio e logo após estabilizou sua leitura em torno de 1.000 $\mu strain$, este EE pode ter atingido seu limite e invés de parar a leitura ele forneceu valores baixos de deformação.

Figura 72 - Curva *strain* x tempo do Ensaio 8

4.5 ENSAIO 11 E 12: Proteção com camada de solo

Utilizou-se como elemento de proteção uma camada de solo com 100 mm de altura. Com esse elemento de proteção, realizou-se com as cargas de 600 kPa e 1800 kPa para os Ensaios 11 e 12. A Tabela 31 mostra um resumo dos deslocamentos do ensaio com a proteção com solo.

Tabela 31 - Resumo dos deslocamentos nos ensaios com camada de solo

ENSAIO	TIPO DE PROTEÇÃO	CARGA (kPa)	DESLOCAMENTO DO SISTEMA (mm)*
11	camada com 10 cm de solo argiloso	600	34
12	camada com 10 cm de solo argiloso	1800	57

* Deslocamento de toda a caixa ao final do ensaio.

4.5.1 Superfície deformada

As Tabela 32 e Tabela 33 apresentam os resultados de deformação em termos de porcentagem total da área por classe de deformação para o Grid de 1 mm e 4 mm, dos Ensaios 11 e 12, referentes à proteção com 100 mm de solo argiloso. Nas Figura 73 e Figura 74 apresentam-se os gráficos inerentes às porcentagens.

Tabela 32 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 11

Grid 1 mm			Grid 4 mm		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	147721	94,68	0 - 0,25	8952	93,21
0,25 - 0,5	5714	3,66	0,25 - 0,5	446	4,64
0,5 - 0,75	1184	0,76	0,5 - 0,75	100	1,04
0,75 - 1	453	0,29	0,75 - 1	38	0,40
1 - 2	767	0,49	1 - 2	56	0,58
2 - 3	104	0,07	2 - 3	8	0,08
3 - 6	71	0,05	3 - 6	4	0,04
6 - 8	11	0,01	6 - 8	0	0,00
8 - 10	0	0,00	8 - 10	0	0,00
10 - 15	0	0,00	10 - 15	0	0,00
>15	0	0,00	>15	0	0,00
total	156025		total	9604	

Figura 73 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 11

Tabela 33 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 12

<i>Grid 1 mm</i>			<i>Grid 4 mm</i>		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	137267	87,98	0 - 0,25	8179	85,16
0,25 - 0,5	10585	6,78	0,25 - 0,5	781	8,13
0,5 - 0,75	3816	2,45	0,5 - 0,75	293	3,05
0,75 - 1	1577	1,01	0,75 - 1	131	1,36
1 - 2	1975	1,27	1 - 2	155	1,61
2 - 3	325	0,21	2 - 3	24	0,25
3 - 6	337	0,22	3 - 6	30	0,31
6 - 8	143	0,09	6 - 8	11	0,11
8 - 10	0	0,00	8 - 10	0	0,00
10 - 15	0	0,00	10 - 15	0	0,00
>15	0	0,00	>15	0	0,00
total	156025		total	9604	

Figura 74 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 12

Pela Tabela 32 e a Figura 73, percebe-se que 100% dos resultados estão abaixo dos 6% estipulados como limite de deformação da geomembrana. Também observa-se que 94% dos valores de deformação estão entre 0 e 0,25%.

Analisando a Tabela 33 e a Figura 74, observou-se que mesmo com o aumento da carga de 600 kPa para 1800 kPa, os resultados da deformação da geomembrana continuaram 100% abaixo dos 6% estipulados como limite de deformação. Observa-se que, diferentemente do Ensaio 11, com o aumento da carga houve uma diminuição

dos valores mais baixos de deformação, mas ainda, 87% dos valores de deformação se concentraram entre 0 e 0,25%.

Ao término do Ensaio 1, analisou-se visualmente a geomembrana e não se constatou nenhuma perfuração, nenhum entalhe profundo e nem entalhes leves. Havia somente arranhões e leves deformações.

Observa-se, por meio da Figura 75, a inexistência de um ponto onde a deformação ultrapassa 6% e a região em que se visualiza a maior deformação é na borda superior do lençol de chumbo que se pode considerar como sendo efeitos de borda no manuseio do lençol de chumbo na hora de retirá-lo. Portanto, as deformações presentes não foram ocasionadas em razão do puncionamento da geomembrana com a presença da brita e, sim, em virtude da conformação da geomembrana com o solo.

Figura 75 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 11

Com o aumento da carga e, consequentemente, do deslocamento do solo da base e da camada de proteção, observou-se um pequeno acréscimo na deformação da geomembrana, mas somente em questão de deformações, sem a presença de entalhes, conforme ilustrado na Figura 76.

Figura 76 - Superfície deformada do Ensaio 12

4.5.2 Análise pontual da deformação

No Ensaio 11, dos quatro EE instalados na geomembrana, dois deles forneceram leituras até o final do ensaio e os outros dois, logo nos primeiros minutos, ficaram fora de escala, não fornecendo mais leituras. A comparação dos resultados dos EE 3 e 4 com o lençol de chumbo está apresentada nas Figura 77 e Figura 78.

Figura 77 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 11

Figura 78 - Análise pontual da deformação: EE 4 x lençol de chumbo - Ensaio 11

Verificou-se pela Figura 77 que a leitura do EE 3, em comparação com a leitura do lençol de chumbo com Grid 1 e 4 mm, foi 73% maior. A Figura 78 mostra a comparação do EE 4, apresentando uma variação de 200% dos resultados de deformação.

Na Figura 79, ao analisar o comportamento das leituras de deformação x tempo, percebe-se 3 diferentes patamares em que as leituras se tornam constantes, em decorrência de duas quedas de energia e, conseqüentemente, da pausa no ensaio, que, após a volta da energia e continuação do ensaio, teve-se uma nova acomodação da brita e da geomembrana.

Figura 79 - Curva *strain* x tempo do Ensaio 11

No Ensaio 12, ao aumentar a carga de 600kPa para 1800kPa, dois EE mantiveram seu funcionamento até o final do ensaio e os outros dois EE não apresentaram medidas até o final do ensaio, devido a presença da brita ter rompido o fio de ligação do EE com o aquisitor de dados.

Na Figura 80 se observa-se a comparação da máxima deformação obtida pelo EE 1 com as leituras de deformação do lençol de chumbo, notando a equivalência das leituras. Essa mesma comparação é feita para o EE 3, apresentado pela Figura 81, na qual se verifica também que as leituras de deformação foram equivalentes.

Figura 80 - Análise pontual da deformação: EE 1 x lençol de chumbo - Ensaio 12

Figura 81 - Análise pontual da deformação: EE 3 x lençol de chumbo - Ensaio 12

Na Figura 82, ao analisar o comportamento das leituras de deformação x tempo, percebe-se que o patamar em que as leituras tornam-se constantes está

localizado aproximadamente após 30 horas de ensaio para os dois EE da figura. Verifica-se também que, ao atingir 75 horas de ensaio, o EE 1 e 3 apresentam queda nos seus valores de *strain*. Assim como no Ensaio 11, há uma queda de energia e, conseqüentemente, uma pausa no ensaio que, após a volta da energia e continuação do ensaio, resultou-se em uma nova acomodação da brita e da geomembrana.

Figura 82 – Curva *strain* x tempo do Ensaio 12

4.6 ENSAIO 9 E 10: SEM PROTEÇÃO

Nos Ensaio 9 e 10, não se utilizou elemento de proteção para a geomembrana. A Tabela 34 apresenta um resumo dos deslocamentos nos ensaios sem proteção.

Tabela 34 - Resumo dos deslocamentos nos ensaios sem proteção

ENSAIO	TIPO DE PROTEÇÃO	CARGA (kPa)	DESLOCAMENTO DO SISTEMA (mm)*
9	Sem proteção	600	20
10	Sem proteção	1800	50

* Deslocamento de toda a caixa ao final do ensaio.

4.6.1 Superfície deformada

Os resultados obtidos pela leitura de deformação por meio do lençol de chumbo estão apresentados nas Tabela 35 e Tabela 36, as quais mostram os resultados de deformação em termos de porcentagem total da área por classe de deformação, para

o Grid de 1 mm e 4 mm, dos ensaios 9 e 10. Nas Figura 83 e Figura 84, são apresentados os gráficos dessas porcentagens.

Tabela 35 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 09

<i>Grid 1 mm</i>			<i>Grid 4 mm</i>		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	57075	36,58	0 - 0,25	2499	26,02
0,25 - 0,5	26408	16,93	0,25 - 0,5	1628	16,95
0,5 - 0,75	15245	9,77	0,5 - 0,75	1010	10,52
0,75 - 1	12022	7,71	0,75 - 1	850	8,85
1 - 2	25838	16,56	1 - 2	2037	21,21
2 - 3	10706	6,86	2 - 3	877	9,13
3 - 6	7295	4,68	3 - 6	601	6,26
6 - 8	1087	0,70	6 - 8	83	0,86
8 - 10	283	0,04	8 - 10	19	0,20
10 - 15	0	0,00	10 - 15	0	0,00
>15	0	0,00	>15	0	0,00
Total	156025		total	9604	

Figura 83 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 9

Tabela 36 - Variação da deformação na superfície da geomembrana: Ensaio 10

Grid 1 mm			Grid 4 mm		
$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total	$\Delta\epsilon(\%)$	Frequência	% do total
0 - 0,25	14519	9,31	0 - 0,25	330	3,44
0,25 - 0,5	13844	8,87	0,25 - 0,5	542	5,64
0,5 - 0,75	11509	7,38	0,5 - 0,75	550	5,73
0,75 - 1	9223	5,91	0,75 - 1	472	4,91
1 - 2	27159	17,41	1 - 2	1593	16,59
2 - 3	18834	12,07	2 - 3	1262	13,14
3 - 6	30573	19,59	3 - 6	2309	24,04
6 - 8	9940	6,37	6 - 8	812	8,45
8 - 10	6806	4,36	8 - 10	587	6,11
10 - 15	8278	5,31	10 - 15	720	7,50
>15	5340	3,42	>15	427	4,45
total	156025		total	9604	

Figura 84 - Frequência da deformação para grid 1 mm e grid 4 mm: Ensaio 10

Constatou-se pela Figura 83 e Tabela 35, que apenas 0,7% dos resultados de deformação estão acima dos 6% estipulados. Observou-se também que a maior concentração dos resultados (36% do total para o Grid de 1 mm e 26% para o Grid de 4 mm) está entre 0 e 0,25%.

Na Tabela 36 e Figura 84 são apresentados os resultados da leitura do lençol de chumbo do ensaio 10. Com o aumento da carga e sem o uso de nenhuma proteção,

verificou-se que 20% e 26% dos resultados estão acima dos 6% estipulados como limite de deformação para os Grids de 1 e 4 mm, respectivamente.

Ao final do Ensaio 09, foi realizada a análise visual da geomembrana, onde não foi notada perfuração e nenhum ponto de entalhe profundo. Percebeu-se a presença de seis regiões com entalhes leves e alguns arranhões.

Na Figura 85, se é apresentada a superfície deformada do Ensaio 9. Nesta, observa-se uma distribuição irregular das deformações no lençol de chumbo e nenhuma região na cor azul representando áreas de alta deformações.

O fato de nenhuma área com alta deformação ser encontrada na superfície do lençol de chumbo é explicado devido a distribuição irregular da brita na caixa, a inexistência de uma brita angulosa em contato com a geomembrana e o alto grau de compactação obtido pelo solo da base, impedindo a deformação da geomembrana.

Figura 85 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 09

Diferentemente da análise visual da geomembrana do Ensaio 09, com o aumento da carga para 1800 kPa no Ensaio 10, observou-se visualmente um ponto de perfuração, cinco regiões com entalhes profundos e diversos pontos com arranhões e entalhes leves na geomembrana. Observa-se também pela Figura 86, a qual se apresenta a superfície deformada do Ensaio 10, um aumento na densidade das deformações, ou seja, a maior parte da área da geomembrana apresenta um tipo de dano mecânico.

Figura 86 - Superfície deformada da geomembrana Ensaio 10

4.6.2 Análise pontual da deformação

Como não há camada de proteção da geomembrana, ou seja, a brita está em contato direto com a geomembrana, optou-se em não utilizar a instrumentação por meio dos EE, devido a alta chance destes romperem.

4.7 PÓS DANO DA GEOMEMBRANA

Após cada ensaio de compressão estática, as geomembranas foram retiradas e realizados ensaios de puncionamento estático (NBR ISO 12236) para verificar possíveis alterações de suas propriedades. Na Figura 87 são apresentados os locais que foram retirados os corpos de prova de cada geomembrana ensaiada.

Figura 87 – Locais dos corpos de prova para ensaio pós-dano da geomembrana

A Tabela 37 traz o resumo dos valores médios obtidos de força máxima e deslocamento dos 16 corpos de prova ensaios para cada geomembrana

Tabela 37 – Resumo dos resultados do ensaio pós-dano

Geomembrana	Puncionamento estático		Δ pós-dano (%) ^{*(1)}
Virgem	N	1175	-
	mm	13,70	-
Ensaio 1	N	1137	-3.23
	mm	11,93	12.92
Ensaio 2	N	1166	-0.77
	mm	12,93	5.62
Ensaio 3	N	1142	-2.81
	mm	13,09	4.45
Ensaio 4	N	1124	-4.34
	mm	12,81	6.50
Ensaio 5	N	1193	1.53
	mm	13,00	5.11
Ensaio 6	N	1141	-2.89
	mm	12,85	6.20
Ensaio 7	N	1198	1.96
	mm	12,41	9.42
Ensaio 8	N	1177	0.17
	mm	13,30	2.92
Ensaio 9	N	1149	-2.21
	mm	13,06	4.67
Ensaio 10	N	1184	0.77
	mm	12,84	6.28
Ensaio 11	N	1150	-2.13
	mm	12,65	7.66
Ensaio 12	N	1128	-4.00
	mm	12,68	7.45

^{*(1)} – Variação da força e do deslocamento, da comparação da geomembrana virgem com a degradada

Na Figura 88, apresenta-se gráfico em barras para melhor visualização dos resultados da variação da média da força máxima de cada ensaio.

Figura 88 – Comparação da variação da força máxima do pós-dano com a geomembrana virgem

Verifica-se pela Figura 88, que a propriedade de resistência ao puncionamento não apresentou variações ao serem comparadas com as amostras danificadas e a amostra virgem.

4.8 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste trabalho foram calculadas as deformações de uma geomembrana de PEAD, de 2 mm, sobre uma base de solo argiloso compactado; acima da geomembrana considerou-se distintos cenários (solo argiloso, geotêxtil não tecido ou sem proteção) e a camada de drenagem com agregados de 50 mm. O conjunto desses materiais foi submetido a aplicação de duas tensões 600 kPa e 1800 kPa, ambas durante um período de 100 horas.

Primeiramente, para facilitar a visualização e compreensão da discussão dos resultados, apresenta-se na Tabela 38 o resumo de todos os resultados obtidos nos ensaios realizados. A discussão dos resultados será disposta em tópicos. Com as principais discussões decorrentes das análises dos resultados.

Tabela 38 - Resumo dos resultados dos ensaios realizados

[illegible]

Tabela 38 Continuação – Resumo dos resultados dos ensaios realizados

Ensaio	Carga (kPa)	Tipo de proteção	GC*	Análise visual	Deslocamento sistema (mm)	Concentração das cargas*	% >6%*	% >8%*	Δ EE comparado com LC*	Δ pós-dano*
11	600	10 cm solo argiloso	98	P - 0 EP - 0 E - 0	34	Uniforme	0%	0%	EE 3 - 73% EE 4 - 200%	-2,05%
12	1800	10 cm solo argiloso	96	P - 0 EP - 0 E - 0	57	Uniforme	0%	0%	EE 1 - EQ EE 3 - EQ	-4%

* GC – Grau de compactação do solo da base

* Concentração das cargas – Analisado pela concentração das deformações na superfície deformada obtida pelo *software Surfer 8*

* LC – Lençol de chumbo

* P – Perfuração da geomembrana

* EP – Entalhe profundo

* E – Entalhe

* EQ – Equivalente

* % >6%* - Porcentagem de deformação da área total da geomembrana que está acima de 6% (primeiro limite de deformação recomendado por Peggs *et al.* (2005)

* % >8%* - Porcentagem de deformação da área total da geomembrana que está acima de 8% (segundo limite de deformação recomendado por Peggs *et al.* (2005)

* Δ pós-dano – Variação da força máxima de cada ensaio ao ser comparada com a geomembrana virgem

a) Leitura de deformação com os EE

Dos 12 ensaios realizados, em 10 deles foram instalados quatro EE, entretanto, nem todos os EE forneceram leituras até o final do ensaio, ocasionando dificuldade na padronização e averiguação dos seus resultados.

Comparando os valores de deformações por meio dos EE que tiveram leitura até o final do ensaio com as deformações obtidas através do meio do lençol de chumbo, não se observou concordância entre elas, obtendo-se valores que diferem de 200% no ensaio 11 e valores equivalentes no Ensaio 12. Considerando a média, os valores de leitura por EE foram 20% menores que os obtidos pelo lençol de chumbo. Tal constatação também foi apresentada por Eastman (2013).

Eastman (2013) afirma que os motivos para as leituras dos EE serem distintas, quando comparadas com o lençol de chumbo, são:

- O EE fornece uma leitura de deformação somente onde está instalado;
- Todos os EE devem ser calibrados sobre uma condição de deformação conhecida, para se obter um resultado confiável.

Afirma, ainda, que os motivos de rompimento dos EE, ou seja, a ausência de leituras até o final do ensaio; e das leituras dos EE serem distintas, são:

- O EE, por ser uma instrumentação delicada, ao estar em contato com a brita, está sujeita ao seu puncionamento;
- Devido a dificuldade da escolha de um adesivo em que se garanta a eficiência da colagem do EE na geomembrana de PEAD.

Analisando as curvas de *strain* vs tempo dos 10 ensaios, percebe-se que todas apresentam um patamar em que há a estabilização das leituras de deformação da geomembrana, entretanto o começo desse patamar varia entre 10 e 70 horas de ensaio. Hornsey e Wishaw (2012) não utilizaram EE, mas, ao analisar a deformação de ensaios com a mesma configuração e com diferentes durações, percebeu-se que as leituras de deformação tornaram-se constantes, após 24 horas de ensaio. Dessa forma, pode-se considerar adequado o tempo de duração de ensaios, com condições semelhantes, por volta de 48 horas.

b) Influência da brita

Ao comparar a superfície deformada e a análise visual da geomembrana, do Ensaio 1 com a dos Ensaios 2 e 3, percebe-se que os Ensaios 2 e 3 possuem uma

região em azul que representa a presença de um entalhe profundo na geomembrana. Isto ocorreu em decorrência da presença de uma brita angulosa, que, no momento de distribuição das britas na caixa e na aplicação da carga, formou uma área de tensão pontual na geomembrana.

Analisando a superfície deformada do Ensaio 9, observou-se que há uma concentração das deformações na extremidade inferior do lençol de chumbo, provocando uma distribuição desuniforme das deformações. Essa constatação deve-se às dificuldades de trabalhar com um material (brita) que está sujeito a efeitos devidos a sua distribuição granulométrica, da aleatoriedade da disposição das suas partículas e influência do contato com as paredes da caixa de ensaio – aspectos apontados por Hornsey e Wishaw (2012).

c) Influência da base de solo compactado

A influência do solo compactado nas deformações da geomembrana consiste no fato dos ensaios com grau de compactação maior apresentarem menores valores de deformação. Os aspectos que influenciam o grau de compactação são:

- A energia utilizada para compactar o solo;
- A quantidade de água no solo, que, conforme Branchman e Sabir (2010), ao aumentar a quantidade de água no solo compactado da base, aumenta-se as deformação da geomembrana.

Ao comparar os resultados dos Ensaio 1 e 9 com os Ensaio 2, 3 e 4, percebe-se que o deslocamento do sistema, conseqüentemente da base de solo compactado, foi menor nos Ensaio 1 (37 mm) e 9 (20 mm), o que resultou em menores deformações apresentada nos dois ensaios. Tais deslocamentos foram menores devido ao grau de compactação ser maior.

No Ensaio 5, observou-se o processo inverso dos Ensaio 1 e 9, ou seja, ao invés do grau de compactação ser maior do que os ensaios de carga semelhante, o grau de compactação foi menor, o que resultou em maiores deformações. Isto foi constatado pelo fato do deslocamento do sistema ter alcançado 87 mm.

d) Ensaio sem proteção

Foram realizados dois ensaios sem proteção da geomembrana, o Ensaio 9 com carga de 600 kPa e o Ensaio 10 com 1800 kPa. Ambos foram executados com o intuito de servirem de referência para se analisar a eficiência da proteção da geomembrana.

No Ensaio 09, diferentemente dos ensaios que foram utilizados com a proteção com geotêxtil não tecido, ao realizar a inspeção visual da geomembrana, não se verificou a perfuração e nem a presença de entalhes profundos, ou seja, a não utilização da proteção resultou em menores deformações. Entretanto, como explicado nos itens “d” e “c” desta seção, tais deformações podem ter sido influenciadas pela disposição das britas na caixa de ensaio e pelo maior grau de compactação do solo.

Ao contrário do Ensaio 09, o Ensaio 10 teve uma distribuição uniforme das britas na caixa e grau de compactação do solo equivalente aos outros ensaios de mesma carga. Com isso, o Ensaio 10 apresentou os maiores valores de deformação da geomembrana, possibilitando a verificação de qual geotêxtil é mais eficaz para limitar a deformação da geomembrana.

e) Proteção com geotêxtil não tecido único

A proteção com geotêxtil não tecido único se efetivou com duas cargas (600 e 1800 kPa). Para a carga de 600 kPa, verificou-se o seguinte:

- Devido o Ensaio 09 não ter tido uma distribuição uniforme da brita e um grau de compactação maior que os outros ensaios, não foi possível efetuar a sua comparação com os ensaios onde se utilizou a proteção com geotêxtil como explicado no item “d”.

- No Ensaio 1, utilizando-se da proteção do GTX-N 1, apenas 1% dos valores de deformação obtidos foi maior que o limite de deformação. Pela análise visual não se constatou nenhum ponto de entalhe profundo ou perfuração da geomembrana. Percebeu-se também que a maior concentração dos valores de deformação (30% dos valores) estava na frequência de 0 a 0,25%.

- No Ensaio 3, utilizando-se da proteção do GTX-N 2, 94% dos resultados apresentaram deformações menores que o limite de deformação e pela análise visual se observou uma região de entalhe profundo. Verificou-se pela superfície deformada que as maiores concentrações das deformações foram ao centro do lençol de chumbo.

A comparação entre o Ensaio 1 e 3 mostrou a influência do grau de compactação do solo, pois o Ensaio 1 teve 1% dos valores acima do limite de deformação, enquanto o Ensaio 3 teve 6%.

Para a carga de 1800 kPa foram feitas as seguintes análises:

- No Ensaio 5, com a proteção da geomembrana por GTX-N 1, os resultados das deformações se concentraram entre 3 a 6%. Pela análise visual, observou-se a presença de entalhes profundos e perfuração da geomembrana. Comparando as deformações do Ensaio 5 com as do Ensaio 10, este tem uma maior deformação, com 28% dos resultados maiores que 6%, porém, como citado anteriormente, o Ensaio 5 teve o maior deslocamento do sistema (87 mm).

- No Ensaio 7, com a proteção da geomembrana feita pelo GTX-N 2, observou-se que a maior concentração dessas deformações esteve entre 5 e 10%. Pela análise visual, percebeu-se 5 regiões com entalhes profundos. Em comparação com o Ensaio 10, o Ensaio 7 teve sua deformação semelhante, ou seja, também teve 20% dos resultados acima dos 6% e a concentração das deformações foi praticamente a mesma.

A partir do exposto, conclui-se que a espessura e a massa por unidade de área dos GTX-N não foram suficientes para proteger a geomembrana da carga de 1800 kPa.

f) Proteção com geotêxtil não tecido duplo

Assim como no item “e” dessa mesma seção, aplicou-se duas cargas (600 e 1800 kPa) para a proteção com geotêxtil não tecido duplo. Para a carga de 600 kPa, analisa-se o seguinte:

- Assim como nos ensaios de proteção único, não foi possível fazer a comparação do Ensaio 9 com os ensaios com proteção de geotêxtil não tecido duplo.

- No Ensaio 2, utilizando 2 x GTX-N 1, os valores de deformação encontrados são 4% maiores que o limite de deformação. Pela análise visual, observa-se uma região com a presença de um entalhe profundo. Ao comparar os resultados do Ensaio 2 com o Ensaio 1, observa-se que, com o aumento da gramatura do GTX-N, não houve uma melhoria significativa na proteção. Observou-se que pelo fato do Ensaio 1 ter tido grau de compactação do solo maior que o Ensaio 2, este apresentou uma concentração das deformações menores que 2% maiores para o Ensaio 3.

- No Ensaio 4, utilizou-se 2 x GTX-N 2 como proteção da geomembrana. Observou-se, assim como no Ensaio 3, que 4% dos valores de deformação encontravam-se acima do limite de deformação. A diferença, entre os dois e a melhoria que o aumento da gramatura do GTX-N 2 proporcionou, mostrou-se na concentração dos resultados menores a 3%, que passou de 80% para 83%, entretanto, os dois ensaios apresentaram na análise visual a presença de uma região com entalhe profundo.

Para a carga de 1800 kPa foi feita as seguintes análises:

- No Ensaio 6, ao comparar o 2 x GTX-N 1 com o Ensaio 10 sem proteção, observou-se uma diminuição das deformações da geomembrana, ou seja, no ensaio 10 as deformações eram 20% e 13% maiores que os limites de deformação de 6% e 8%, respectivamente. Para os mesmos limites com o 2 x GTX-N 1, esses valores das deformações foram diminuídos para 14% e 8%, respectivamente. Diferentemente do ensaio 10, o ensaio 6 não mostrou ponto de perfuração e apresentou três regiões de entalhes profundos na geomembrana.

- No Ensaio 8, com a proteção de 2 x GTX-N 2, também comparando com o Ensaio 10, verificou-se uma diminuição das deformações, que para o Ensaio 10 foram de 20% e 13% maiores que os limites de deformação, passaram a ser 11% e 7% maiores para os mesmo limites. Na análise visual, assim como no Ensaio 6, não observou-se ponto de perfuração da geomembrana e visualizou-se seis regiões com entalhes profundos.

g) Melhor tipo de geotêxtil

Como comparado nas deformações dos Ensaios 1 e 2 ; 3 e 4, nos quais foram aplicados a carga de 600 kPa, o aumento da massa por unidade de área promoveu uma pequena melhoria na distribuição das deformações. Entretanto, para os ensaios com carga de 1800 kPa, as configurações em que se utilizaram geotêxteis não tecido único, ou seja, com massa por unidade de área menor, ao serem comparados com o ensaio sem proteção, não apresentaram uma diminuição nas deformações, em virtude de terem insuficiente espessura e massa por unidade de área para resistir as altas cargas aplicadas.

Ao comparar o GTX-N 1 com o GTX-N 2, verificou-se que o GTX-N 2, mesmo tendo menor massa por unidade de área, resistência a tração, resistência ao puncionamento e espessura, apresentou melhor desempenho quando utilizado como

camada de proteção. Essa característica pode ser explicada em virtude da menor deformação necessária para desenvolver as suas resistências, ou seja, tanto no ensaio de tração como no de puncionamento, o GTX-N 2 mobilizou as suas resistências mecânicas com menores deformações. Sendo assim, o GTX-N 2 apresentou melhor desempenho como proteção, evidencia não condizente com as análises realizadas por Dickson (2008). Este autor concluiu que o aumento da massa por unidade de área, espessura e rigidez do GTX-N aumenta a capacidade de proteger a geomembrana. Essa divergência de resultados pode ter ocorrido em virtude da diferença entre os materiais utilizados e da fabricação dos mesmos. Esse comportamento pode ser explicado devido o GTX-N 2 possuir maior rigidez, como observou-se no APÊNDICE B.

Ao comparar o Ensaio 8 com o Ensaio 6, por mais que o Ensaio 8 tenha apresentado uma quantidade maior de entalhes profundos, tais entalhes estavam melhor distribuídos e apresentaram uma área menor.

h) Proteção com a camada de 100 mm de solo

Nos Ensaios 11 e 12 foram utilizados 10 cm de solo compactado como camada de proteção. Em relação a limitação das deformações, a camada de solo foi a mais efetiva, garantindo que 100% dos valores estivessem abaixo de 1% de deformação. Esse resultado, mostrando que a camada de solo é eficaz como proteção, também foi observado em Dickson (2008) e Brachman e Gudina (2008).

Na análise da superfície deformada e inspeção visual da geomembrana não se verificou furo ou entalhe profundo na geomembrana. Portanto, as deformações apresentadas pela geomembrana são causadas por conta das irregularidades na base, que ocorreram em virtude do aumento da carga e deslocamento do solo.

Entretanto, segundo a norma NBR 16199 a proteção com camada de solo deve ter espessura menor que máximo 200 mm, e deve-se garantir que a carga hidráulica de percolado sobre a geomembrana seja inferior a 300 mm.

i) Pós-Dano

O ensaios de pós-dano foi realizado após o ensaio de compressão estática, com o intuito de verificar a variação das resistências mecânicas da geomembrana. Para isto, executou-se o ensaio de puncionamento estático (NBR ISO 12236) com 16

corpos de prova e se comparou o resultado de puncionamento estático da geomembrana virgem com os obtidos das geomembranas após a realização do ensaio de compressão estática. Conforme os resultados apresentados no item 4.7, verificou-se que não há uma variação significativa da resistência ao puncionamento estático da geomembrana. Tais valores podem ser explicados devido a tratar-se de um ensaio a curto prazo.

No trabalho de Geroto (2008), o autor também realizou ensaios pós-dano com o intuito de avaliar as variações das resistências mecânicas. Entretanto, diferentemente, o autor escolheu os ensaios de Tração (escoamento e ruptura) e Estouro para avaliar as variações das resistências mecânicas. Destacou-se a redução da resistência à tração na ruptura da geomembrana da ordem de 20% para a configuração sem proteção.

Analisando o pós-dano do trabalho de Geroto (2008) e o pós-dano realizado neste trabalho. Percebeu-se que ambos os trabalhos ao compararem a variação da resistência mecânica utilizando ensaios de tração (escoamento), estouro e puncionamento estático, não verificaram a variação da resistência mecânica da geomembrana. Entretanto, ao Geroto (2008) analisar o pós-dano por meio do ensaio de tração ruptura, essa variação foi verificada.

f) Influência do Grid

Ao comparar o grid 1 mm e 4 mm nas tabelas de frequência de cada ensaio, percebeu-se uma diferença entre as concentrações da porcentagem de deformação sobre o total de pontos com menores deformações. No grid 1 mm a porcentagem para valores de deformação entre 0 e 0,25% foi menor que ao comparar no mesmo intervalo com o grid de 4 mm. Essa diferença de valores se explica pelo fato do grid 1 mm ser mais refinado que o grid 4 mm, portanto, aumenta a concentração dos valores mais baixos de deformação, assim como observado em Hornsey e Wishaw (2012). Por esta razão, os autores recomendam a utilização do grid de 1 mm.

Ao analisar as superfícies deformadas do grid de 1 mm em comparação com o grid de 4 mm, percebe-se que o grid de 1 mm representou melhor a superfície deformada da geomembrana, pois, há uma suavidade da deformação e uma melhor distribuição dos valores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo avaliar as deformações de uma geomembrana de PEAD de 2 mm em diferentes configurações de camadas de proteção. Para isto, foram realizados doze ensaios de compressão estática de 600 e 1800 kPa, por um período de 100 h.

Os materiais utilizados na simulação experimental do sistema de revestimento de fundo em laboratório foram os seguintes: solo, brita, geomembrana de PEAD e geotêxtil não tecido de PP. O solo utilizado foi uma argila arenosa-siltosa, o agregado gráudo utilizado como camada drenante foi uma brita 3 com formato cúbico, foram utilizados quatro geotêxteis não tecido como elemento de proteção com massa por unidade de área de 550, 650, 1100 e 1300 g/m²;

Para se conhecer as deformações da geomembrana após o ensaio de compressão estática, foi utilizado o lençol de chumbo abaixo da geomembrana. Este tem a propriedade de “guardar” a deformação máxima sofrida pela geomembrana ao longo do ensaio de compressão estática. Com o lençol de chumbo deformado foi possível estimar por meio de uma Máquina de Leitura por Coordenadas, a superfície deformada da geomembrana para o grid 4 mm. A análise destes pontos foi feita de acordo com a metodologia empregada por Horsey e Wishaw (2012). Esta técnica mostrou-se bastante satisfatória para estimar a superfície deformada da geomembrana após a compressão estática de longa duração.

Para estimar a superfície deformada com grid de 1 mm foi utilizado o método de interpolação denominado triangulação com o auxílio do programa Surfer 8.

Ao concluir os doze ensaios, o estudo evidenciou diversos aspectos para as diferentes configurações analisadas, entretanto, enfatiza-se, no processo de avaliação das deformações da geomembrana, a influência do solo, da brita e do tipo de proteção, como forma de limitar o punção da geomembrana e sua deformação excessiva.

Os resultados mostraram que o grau de compactação do solo influenciou significativamente as deformações da geomembrana. Ao comparar os resultados dos Ensaios 1 e 9 com os Ensaios 2, 3 e 4, percebeu-se que o grau de compactação do Ensaio 1 (98%) e 9 (99%) resultou em menores deformações em relação aos Ensaios 2, 3 e 4 que apresentaram grau de compactação de 96%. Essa afirmação pode ser novamente confirmada considerando o grau de compactação apresentado pelo

Ensaio 5 que foi de 93%, no qual esta configuração resultou na maior deformação apresentada pela geomembrana em comparação aos demais ensaios.

A forma da brita também exerceu influência nas deformações da geomembrana. A comparação da superfície deformada da geomembrana do Ensaio 1 com os Ensaios 2 e 3 evidenciaram que estes apresentavam uma região em azul (superfície deformada), caracterizando a presença de um entalhe profundo. Isto ocorreu em decorrência da presença de uma brita angulosa, que, com a preparação e execução do ensaio apresentou um rearranjo capaz de formar áreas de concentração de tensão.

A distribuição não uniforme da brita na caixa de ensaio influenciou nas deformações da geomembrana, pois os resultados revelaram que a existência da concentração das britas em uma das extremidades do lençol de chumbo ocasionou, por consequência, a concentração das deformações nesta mesma extremidade, influenciando a análise da área total do lençol de chumbo. Este resultado poderia ter sido diferente se fosse utilizada uma brita com uma granulometria uniforme (mal graduada), pois como constatou-se neste trabalho, a presença de britas com uma curva granulométrica bem graduada, variando entre 20 e 55 mm, acarretou no travamento destas em uma das extremidade, fazendo com que as britas não estivessem dispostas uniformemente.

O tipo de proteção influenciou nas deformações da geomembrana. As proteções com geotêxteis não tecido simples não apresentaram valores de propriedade físicas (espessura e massa por unidade de área) suficientes para diminuir as deformações da geomembrana, quando aplicada a carga de 1800 kPa. Já a proteção com geotêxteis não tecido duplo obtiveram menor deformação, quando aplicado ambas as cargas (600 e 1800 kPa).

Os resultados dos ensaios evidenciaram que o geossintético que teve melhor desempenho como camada de proteção foi o GTX-N 2. O estudo mostrou que o GTX-N 2, mesmo tendo menores valores de massa por unidade de área, resistência à tração, resistência ao puncionamento e espessura, apresentou melhor desempenho quando utilizado como camada de proteção em comparação com o GTX-N 1. Este resultado pode ser explicado considerando que o GTX-N 2 mobilizou as suas resistências mecânicas com menores deformações, como apresentado no APÊNDICE B.

Outro aspecto relativo ao tipo de proteção equivale ao melhor desempenho na limitação das deformações. O estudo revelou que a utilização de 100 mm de solo como camada de proteção da geomembrana apresenta melhores resultados de deformação, garantindo que 100% dos valores estejam abaixo de 1% de deformação.

Ainda, foi possível observar que a instrumentação por extensometria pode ser aplicada para se conhecer o tempo de estabilização das deformações durante os ensaios. Sendo considerado adequado, para trabalhos semelhantes, ter um tempo de duração de 48 horas.

Diante do exposto, o estudo pode contribuir para o conhecimento necessário para o desenvolvimento de projetos e execução de barreiras sintéticas de controle e desvio de fluxo para sistemas de revestimento de fundo, ao mostrar a importância da compactação do solo, da escolha do elemento de proteção (dependendo da carga) e a influência do tipo de brita. No entanto, ressalta-se que, nas condições reais de obra, os geossintéticos estão expostos a diversos agentes que os podem degradar (intempéries, elevadas temperaturas, ambientes altamente químicos, entre outros), além dos danos mecânicos de curto prazo (instalação) e de longo prazo (operação), este analisado neste trabalho.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de outros trabalhos de mesma natureza, recomenda-se:

- Utilizar diferentes geossintéticos para proteção, como por exemplo, geocompostos;
- Realizar maior quantidade de ensaios para cada configuração, com o fim de conseguir analisar estatisticamente os resultados.
- Na execução dos ensaios, escolher uma brita com distribuição granulométrica uniforme;
- Para efeitos de considerar outras forma de degradação, utilizar uma geomembrana degradada (elevadas temperaturas, ambientes altamente químicos, etc).
- Para a leitura de deformação, realizar sua leitura utilizando um aparelho a laser que tenha maior resolução;
- Adaptar a macro proposta para um *software* com maior capacidade computacional, como por exemplo, Payton e R;

REFERÊNCIAS

ABREU, A. E. S. (2015). Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades. Tese Doutorado, **Escola de Engenharia de São Carlos/ USP**. São Carlos, SP, 247 pp.

ALLEN, N. S., EDGE, M. (1992). Fundamentals of polymer degradation and stabilization. **Elsevier Science Publishers**. ISBN 1-85166-773-3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16199 (2013)** Geomembranas termoplásticas – Instalação em obras geotécnicas e de saneamento ambiental. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 8419 (1996)** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento.

_____. **NBR 6502 (1995)** Rochas e solos.

_____. **NBR 7182 (1988)** Solo – Ensaio de compactação.

_____. **NBR 7181 (1988)** Solo – Análise granulométrica.

_____. **NBR 6508 (1984)** Solo – Determinação da massa específica.

_____. **NBR 7180 (1988)** Solo – Determinação do limite de plasticidade.

_____. **NBR 6459 (1984)** Solo – Determinação do limite de liquidez.

_____. **NBR 12004 (1990)** Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos.

_____. **NBR 12051 (1991)** Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos.

_____. **NBR 9863 (2013)** Geossintéticos – Determinação da espessura a pressões especificadas Parte 1: Camada única.

_____. **NBR 9864 (2013)** Geossintéticos – Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos.

_____. **NBR 10319 (2013)** Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga.

_____. **NBR 12236 (2013)** Geossintéticos – Ensaio de puncionamento estático (punção CBR).

_____. **NBR 15856 (2010)** Geomembranas e produtos correlatos – Determinação das propriedades de tração.

_____. **NBR 10319 (2013)** Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **D5514 (2014)**. Standard test method for large scale hydrostatic puncture testing of geosynthetics.

_____. **D 5199 (2012)** Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics.

_____. **D 5514 (2014)** Standard test method for large scale hydrostatic puncture testing of geosynthetics.

_____. **D 792 (2013)** Standard test method for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement.

_____. **D 1004 (2013)** Standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting.

_____. **D 6693 (2015)** Standard test method for determining tensile properties of nonreinforced polyethylene and nonreinforced flexible polypropylene geomembranes.

_____. **D 4833 (2013)** Standard test method for index puncture resistance of geomembranes and related products.

_____. **D 5397 (2012)** Standard test method for evaluation of stress crack resistance of polyolefin geomembranes using notched constant tensile load test.

_____. **D 4533 (2015)** Standard test method for trapezoid tearing strength of geotextiles.

_____. **GRI Test Method GT12(a) (2016)** Test methods and properties for nonwoven geotextiles used as protection (or cushioning) materials.

_____. **GRI Test Method GM13 (2016)** Test methods, test properties and testing frequency for high density polyethylene (HDPE) smooth and textured geomembranes.

AVERESCH, U. B. AND SCHICKETANZ, R. T., Recommendations for new installation procedures of geomembranes in landfill composite sealing systems. **EUROGEO 2000, BOLOGNA**

BAM (1995). Guidelines for the certification of geomembranes as a component of composite liners for municipal and hazardous waste landfills and for lining contaminated land.

BATHURST, R.J., HUANG, B. e ALLEN, T. A. (2012) Interpretation of laboratory creep testing for reliability-based analysis and load and resistance factor design (LRFD) calibration. **Geosynthetics International** 19(1): 39–53.

BOUAZZA, A., ZORNBERG, J. G., ADAM, D. (2002). Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. **Geosynthetics – 7th ICG. Delmas, Gourc & Girard (eds.)**, Nice – France.

BRACHMAN, R.W.I., MOORE, I.D., ROWE, R.K., (2000). Local strain on a leachate collection pipe. **Canadian Journal Civil Engineering** **27 (6)**, 1273 - 1285.

BRANCHMAN, R. W. I, GUIDINA, S. (2008). Geomembrane strains from coarse gravel and wrinkles in a GM/CL composite liner. **Geotextiles and Geomembranes** **26 (6)**, 488-497.

BRANCHMAN, R. W. I, SABIR, A. (2010) Geomembrane puncture and strain from stones in an underlying clay layer. **Geotextile and Geomembranes** **28**, 335 - 343.

DICKINSON, E. J. S., (2008). Physical response of composite geomembrane/geosynthetic clay liners under simulated landfill conditions. PhD degree. **Department of Civil Engineering, Queen's University**, Kingston, Ontario.

DIN EN 13719, (2012) Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the long term protection efficiency of geotextiles in contact with geosynthetic barriers.

EASTMAN, K. M., (2013). Calculating and limiting local strains in geomembranes from gravel indentations. Master degree. **Department of Civil Engineering, Queen's University**, Kingston, Ontario.

ENV ISO 10722-1, (2007): Geotextiles and geotextile-related products – Procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular materials.

GEROTO, R. E. (2008). Desempenho de camadas de proteção para geomembranas. Dissertação de mestrado. **Escola de Engenharia de São Carlos/USP**. São Carlos, SP, 188 pp.

HOFFMANN, K., (2012). An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges. **HBM**. 257 p.

HOLTZ, D., CHRISTOPHER, B. R., BERG, R. R., (1997). Geosynthetic Engineering. **BiTech Publishers Ltd**. British Columbia, Canada, pp. 452.

HORNSEY, W.P., WISHAW, D.M., (2012). Development of a methodology for the evaluation of geomembrane strain and relative performance of cushion geotextiles. **Geotextile Geomembrane** **35**, 87 - 99.

HUFENUS, R., RUEGGER, R., FLUM, D., STERBA, I. J., (2005). Strenght reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthethics. **Geotextiles and Geomembranes** **23**, 401 – 424.

ICOLD (1991). Watertight geomembranes for dams, State of the art. **Bulletin 78 of the International Comission on Large Dams**, Paris, 140p.

IGSBR 004 (2014). Aplicação de geossintéticos em áreas de disposição de resíduos.

IGSBR 003 (2014). Termos e definições complementares.

JONES, D. R. V., SHERCLIFF, D. A., DIXON, N. (2000). Difficulties associated with the specification of protection geotextiles using only unit weight. **2th European Geosynthetics Conference- Italian Geosynthetic Society.**

KOERNER, R. M., (1998). Designing with geosynthetics. **2th Edition. Pearson Education. New Jersey.**

KOERNER, R.M., WILSON-FAHMY, R.F., NAREJO, D., (1996). Puncture protection of geomembranes Part III: examples. **Geosynthetics International 3 (5)**, 655–675.

KOERNER, R. M., HSUAN, Y. G., KOERNER, G. R., GRYGER, D., (2010). Ten year creep puncture study of HDPE geomembranes protected by needle-punched nonwoven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes 28 (6)**, 503-513.

KOERNER, R. M., KOERNER, G. R., (2010). Puncture resistance of polyester (PET) and polypropylene (PP) needle-punched nonwoven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes 29** , 360-362.

LAVOIE, F. L., (2006), Estudo do fenômeno de fissuramento sob tensão (stress cracking) em geomembranas de polietileno (PE) virgens e degradadas. Dissertação de mestrado, **Escola de Engenharia de São Carlos/ USP.** São Carlos, SP.

NAREJO, D., KOERNER, R. M., WILSON-FAHMY, R. F., (1996). Puncture protection of geomembranes, part II: experimental. **Geosynthetics International, 3 (5)**, 629-653.

PEGGS, I.D., SCHMUCKER, B., CAREY, P., (2005). Assessment of maximum allowable strains in polyethylene and polypropylene geomembranes. In: **Proceedings of ASCE Geo-Frontiers 2005, Austin, TX.**

PINHO LOPES, M., RECKER, C., MULLER – ROCHHOLZ, J., LOPES, M. L., (2000). Installation damage and creep of geosynthetics and their combined effect – experimental analysis, **Proceedings of Euro-geo 2000, Vol 2**, pp. 895 – 897, Bologna, Italy.

PINHO LOPES, M., RECKER, C., MULLER – ROCHHOLZ, J., LOPES, M. L., (2002). Experimental analysis of the combined effect of installation damage and creep of geosynthetics – new results, **Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics, - Vol. 4**, pp. 1539 – 1544, Nice, France.

PINHO LOPES, M., RECKER, C., MULLER – ROCHHOLZ, J., LOPES, M. L., (2004). Damage during installation and creep of geosynthetics. New test data, **Eurogeo 3**, Munich, Germany.

PINHO LOPES, M., RECKER, C., MULLER – ROCHHOLZ, J., LOPES, M. L., (2015). Tensile properties of geosynthetics after installation damage. **Environmental Geotechnics.** Paper 13.00032.

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/ USP.** São Carlos, SP, 247 pp.

RINCON, S. A. B (2016). Estudo comparativo da interação solo-geogrelha por meio de ensaios de arrancamento monotônico e cíclico utilizando equipamentos de pequenas e grandes dimensões. Dissertação de Mestrado, **Escola de Engenharia de São Carlos/ USP**. São Carlos, SP.

REEDY, K. R., SAICHEK, R. E. (1998). A rational design for the protection of landfill geomembrane liners. **6th International Conference of geosynthetics**, Atlanta, Georgia, USA, pp. 289-294.

ROWE, R. K., QUIGLEY, R.M., BRACHMAN, R.W.I., BOOKER, J.R., (2004). Barrier Systems for Waste Disposal Facilities. **Taylor & Francis Books Ltd. (E & FN Spon)**, London, 587 pp.

SAGEOS, Puncture protection of geomembranes (2003). **SAGEOS internal report**.

SCHEIRS, J. (2009). A guide to polymeric geomembrane: A practical approach. **Wiley, Chichester, UK**.

SEEGER, S., MULLER, W., (1995). Limits of stress and strain: Design criteria for protective layers for geomembranes in landfill systems. **Geosynthetics: Applications, Design and Construction**. De Groot, Den Hoedt & Termaat Eds, Balkema.

SEEGER, S., MULLER, W., (2003). Theoretical approach to designing protection: selecting a geomembrane strain criterion. In: **Dixon, D., Smith, D.M., Greenwood, J.R., Jones, D.R.V. (Eds.), Geosynthetics: Protecting the Environment**. Thomas Telford, London, pp. 137–151.

THIEL, R. AND SMITH, M. E, State of the practice review of heap leach pad design issues, **Geotextiles and Geomembranes**, **22 (6)**, 555 (2004)

TOGNON, A. R., ROWE, R. K., MOORE, I. D., (2000). Geomembrane strain observed in large-scale testing of protection layers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE** **126 (12)**, 1194–1208.

VERTEMATTI, J. C./ Coordenador, (2015). Manual brasileiro de geossintéticos. **Ed. Blucher**. São Paulo, Brasil.

WILSON-FAHMY, R. F., NAREJO, D., KOERNER, R. M. (1996). Puncture protection of geomembranes, part I: theory. **Geosynthetics International**, **3 (5)**, 605-628.

ZUQUETTE, V. L., (2015) Geotecnia Ambiental. **1 ed. – Rio de Janeiro: Elsevier**.

APÊNDICE A

Macro (código computacional de sequência programada que executa automaticamente tarefas específicas), pelo *Visual Basics*, no *Excel*, para calcular as deformações entre os pontos, utilizando a metodologia de Horsey e Wishaw (2012).

```
Dim x1 As Double
```

```
Dim y1 As Double
```

```
Dim z1 As Double
```

```
Dim x2 As Double
```

```
Dim y2 As Double
```

```
Dim z2 As Double
```

```
Dim y As Double
```

```
Dim i As Long
```

```
Dim comp As Double
```

```
Dim strain1 As Double
```

```
Dim strain2 As Double
```

```
Dim strain As Double
```

```
Sub Calculo_deformação()
```

```
Range("C4").Select
```

```
While ActiveCell <> ""
```

```
    x1 = ActiveCell.Value
```

```
    y1 = Range("D" & ActiveCell.Row).Value
```

```
    z1 = Range("E" & ActiveCell.Row).Value
```

```
    If x1 < 52.5 Or x1 > 447.5 Or y1 < 52.5 Or y1 > 447.5 Then 'Exclui valores de borda
```

```
        ActiveCell.Offset(1, 0).Select
```

```
    Else
```

```
        x2 = x1 + 1
```

```
        y2 = y1
```

```
        i = 0
```

```
        y = 0
```

```
        Do Until y = y2
```

```
            x = Cells(4 + i, 3).Value
```

```
            If x = x2 Then
```

```
                y = Cells(4 + i, 4).Value
```

```
                If y <> y2 Then
```

```
                    i = i + 1
```

```
            Else
```

```

        i = i
    End If
Else
    i = i + 1
End If
Loop
z2 = Cells(4 + i, 5)
strain1 = (((Sqr((1 ^ 2) + ((z2 - z1) ^ 2))) / 1) - 1) * 100

```

'Cálculo considerando ponto acima

```

x2 = x1
y2 = y1 + 1
i = 0
y = 0
Do Until y = y2
    x = Cells(4 + i, 3).Value
    If x = x2 Then
        y = Cells(4 + i, 4).Value
        If y <> y2 Then
            i = i + 1
        Else
            i = i
        End If
    Else
        i = i + 1
    End If
Loop
z2 = Cells(4 + i, 5)
strain2 = (((Sqr((1 ^ 2) + ((z2 - z1) ^ 2))) / 1) - 1) * 100
comp = strain1 - strain2
If comp < 0 Then
    strain = strain2
Else
    strain = strain1
End If

```

'Cálculo considerando ponto esquerda

```

x2 = x1 - 1
y2 = y1
i = 0

```



```

y = 0
Do Until y = y2
    x = Cells(4 + i, 3).Value
    If x = x2 Then
        y = Cells(4 + i, 4).Value
        If y <> y2 Then
            i = i + 1
        Else
            i = i
        End If
    Else
        i = i + 1
    End If
Loop
z2 = Cells(4 + i, 5)
strain1 = (((Sqr((1 ^ 2) + ((z2 - z1) ^ 2))) / 1) - 1) * 100
If strain < strain1 Then
    strain = strain1
Else
    strain = strain
End If

'Cálculo considerando ponto abaixo
x2 = x1
y2 = y1 - 1
i = 0
y = 0
Do Until y = y2
    x = Cells(4 + i, 3).Value
    If x = x2 Then
        y = Cells(4 + i, 4).Value
        If y <> y2 Then
            i = i + 1
        Else
            i = i
        End If
    Else
        i = i + 1
    End If
Loop

```

```

z2 = Cells(4 + i, 5)
strain1 = (((Sqr((1 ^ 2) + ((z2 - z1) ^ 2))) / 1) - 1) * 100
If strain < strain1 Then
    strain = strain1
Else
    strain = strain
End If

```

'Cálculo considerando diagonal direita acima

```

x2 = x1 + 1
y2 = y1 + 1
i = 0
y = 0
Do Until y = y2
    x = Cells(4 + i, 3).Value
    If x = x2 Then
        y = Cells(4 + i, 4).Value
        If y <> y2 Then
            i = i + 1
        Else
            i = i
        End If
    Else
        i = i + 1
    End If
Loop
z2 = Cells(4 + i, 5)
strain1 = (((Sqr(((Sqr(2)) ^ 2) + ((z2 - z1) ^ 2))) / (Sqr(2))) - 1) * 100
If strain < strain1 Then
    strain = strain1
Else
    strain = strain
End If

```

'Cálculo considerando diagonal direita abaixo

```

x2 = x1 + 1
y2 = y1 - 1
i = 0
y = 0
Do Until y = y2

```

```

x = Cells(4 + i, 3).Value
If x = x2 Then
    y = Cells(4 + i, 4).Value
    If y <> y2 Then
        i = i + 1
    Else
        i = i
    End If
Else
    i = i + 1
End If
Loop
z2 = Cells(4 + i, 5)
strain1 = (((Sqr(((Sqr(2)) ^ 2) + ((z2 - z1) ^ 2))) / (Sqr(2))) - 1) * 100
If strain < strain1 Then
    strain = strain1
Else
    strain = strain
End If

```

'Cálculo considerando diagonal esquerda acima

```

x2 = x1 - 1
y2 = y1 + 1
i = 0
y = 0
Do Until y = y2
    x = Cells(4 + i, 3).Value
    If x = x2 Then
        y = Cells(4 + i, 4).Value
        If y <> y2 Then
            i = i + 1
        Else
            i = i
        End If
    Else
        i = i + 1
    End If
Loop
z2 = Cells(4 + i, 5)
strain1 = (((Sqr(((Sqr(2)) ^ 2) + ((z2 - z1) ^ 2))) / (Sqr(2))) - 1) * 100

```

```

If strain < strain1 Then
    strain = strain1
Else
    strain = strain
End If

```

'Cálculo considerando diagonal esquerda abaixo

```

x2 = x1 - 1
y2 = y1 - 1
i = 0
y = 0
Do Until y = y2
    x = Cells(4 + i, 3).Value
    If x = x2 Then
        y = Cells(4 + i, 4).Value
        If y <> y2 Then
            i = i + 1
        Else
            i = i
        End If
    Else
        i = i + 1
    End If
Loop
z2 = Cells(4 + i, 5)
strain1 = (((Sqr(((Sqr(2)) ^ 2) + ((z2 - z1) ^ 2))) / (Sqr(2))) - 1) * 100
If strain < strain1 Then
    strain = strain1
Else
    strain = strain
End If

Range("F" & ActiveCell.Row).Value = strain
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
End If
Wend
End Sub

```

APÊNDICE B

Gráficos apresentando os ensaios de tração da geomembrana, GTX-N1 (geotêxtil preto) e GTX –N2 (geotêxtil cinza).

Ensaio de Tração

Relatório de Ensaio de Tração

Máquina: **Emic DL10000** Célula: **Trd 27** Extensômetro: - Data: **21/07/16** Hora: **01:15:55** Trabalho n° **2612**
 Programa: **MTest versão 3.00** Método de Ensaio: **ABNT NBR ISO 10319**
 Ident. Amostra: >>>>>> Identificação: **TRACAO FAIXA LARGA TRANS GTX – N2** Analista: **GABRIEL** NE::

Parâmetro >>	Força	Def.Especif.	Força/Larg.
Evento >>	Força Max.	Força Max.	Força Max.
Unidade >>	(kN)	(%)	(N/mm)
CP 1	5.543	84.27	27.44
CP 2	5.786	80.43	28.78
CP 3	5.909	74.05	29.40
CP 4	5.887	81.80	29.58
CP 5	6.181	80.92	30.75
Número CPs	5	5	5
Média	5.861	80.30	29.19
Coef.Var.(%)	3.932	4.721	4.149

Força (kN)

Observação: Tipo de Garra: Mordente de aperto pneumático

Ensaio de Tração

Relatório de Ensaio de Tração

Máquina: **Emic DL10000** Célula: **Trd 27** Extensômetro: - Data: **21/07/16** Hora: **00:39:44** Trabalho n° **2611**

Programa: **MTest versão 3.00**

Método de Ensaio: **ABNT NBR ISO 10319**

Ident. Amostra: >>>>>>> Identificação: **TRACAO FAIXA LARGA LONG GTX - N2** Analista: **GABRIEL** NE::

Parâmetro >>	Força	Def.Especif.	Força/Larg.
Evento >>	Força Max.	Força Max.	Força Max.
Unidade >>	(kN)	(%)	(N/mm)
CP 1	4.385	65.85	21.92
CP 2	4.575	77.73	22.88
CP 3	5.207	79.90	26.03
CP 4	4.407	73.88	22.04
CP 5	4.636	76.18	23.18
Número CPs	5	5	5
Média	4.642	74.71	23.21
Coef.Var.(%)	7.182	7.250	7.182

Força (kN)

Observação: Tipo de Garra: Mordente de aperto pneumático

Ensaio de Tração

Relatório de Ensaio de Tração

Máquina: **Emic DL10000** Célula: **Trd 27** Extensômetro: - Data: **20/07/16** Hora: **22:26:50** Trabalho n° **2609**
 Programa: **MTest versão 3.00** Método de Ensaio: **ABNT NBR ISO 10319**
 Ident. Amostra: >>>>>> Identificação: **TRACAO FAIXA LARGA LONG GTX - N1** Analista: **GABRIEL** NE::

Parâmetro >>	Força	Def.Especif.	Força/Larg.
Evento >>	Força Max.	Força Max.	Força Max.
Unidade >>	(kN)	(%)	(N/mm)
CP 1	8.220	158.3	40.49
CP 2	9.332	156.9	46.20
CP 3	7.072	149.2	35.36
CP 4	8.054	160.4	39.48
CP 5	8.378	147.5	42.53
CP 6	9.378	137.1	46.20
Número CPs	6	6	6
Média	8.406	151.6	41.71
Coef.Var.(%)	10.29	5.769	10.04

Força (kN)

Observação: Tipo de Garra: Mordente de aperto pneumático

Ensaio de Tração

Relatório de Ensaio de Tração

Máquina: **Emic DL10000** Célula: **Trd 27** Extensômetro: - Data: **20/07/16** Hora: **23:43:29** Trabalho n° **2610**
 Programa: **MTest versão 3.00** Método de Ensaio: **ABNT NBR ISO 10319**
 Ident. Amostra: >>>>> Identificação: **TRACAO FAIXA LARGA TRANS GTX - N1** Analista: **GABRIEL** NE::

Parâmetro >>	Força	Def.Especif.	Força/Larg.
Evento >>	Força Max.	Força Max.	Força Max.
Unidade >>	(kN)	(%)	(N/mm)
CP 1	9.872	180.9	49.36
CP 2	8.824	165.2	44.12
CP 3	8.492	158.3	43.10
CP 4	7.437	153.9	36.46
CP 5	7.972	147.6	40.06
Número CPs	5	5	5
Média	8.519	161.1	42.62
Coef.Var.(%)	10.81	7.910	11.28

Força (kN)

Observação: Tipo de Garra: Mordente de aperto pneumático