

REGIS EDUARDO GEROTO

**DESEMPENHO DE CAMADAS DE PROTEÇÃO
PARA GEOMEMBRANAS**

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 Geotecnia.

Área de Concentração: Geotecnia Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

São Carlos

2008

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **REGIS EDUARDO GEROTO**

Dissertação defendida e julgada em 17/10/2008 perante a Comissão Julgadora:



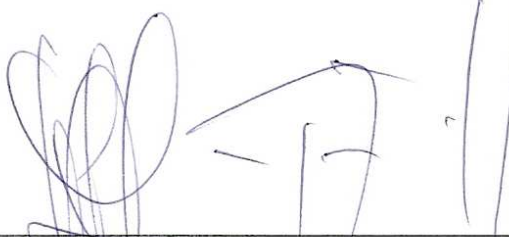
Prof. Titular **ORENCIO MONJE VILAR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO



Prof. Titular **BENEDITO DE SOUZA BUENO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO



Dr. **AFONSO CELSO MORUZZI MARQUES**
(Engecorps) APROVADO



Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José Carlos e Rosa Maria pelo exemplo, paciência e amor incondicional.

Ao meu irmão Carlos Rodrigo, sua esposa Maura e o pequeno Pedro pelo carinho sempre recebido.

À Pri e toda sua família de doidos que tanto amo e admiro.

Ao “Chefe” Prof. Dr. Orencio Monje Vilar pela amizade, bom humor e principalmente pelo amparo nos momentos de dificuldade.

Aos Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno, Prof^a Dr^a Teresinha de Jesus Bonuccelli e Prof. Dr. Sérgio Antônio Röhm pela amizade e incentivo na decisão de iniciar o mestrado.

Aos funcionários, técnicos e professores do Departamento de Geotecnia pela amizade, respeito e ensinamentos.

Aos grandes amigos da “geo”, em especial aos amigos Alexandre, Camilla, Cléber, Dani, Diogo, Gilberto, Jamal, Lucas, Paula, Osvaldo e Neto pela amizade e companheirismo.

Aos amigos doutores Heraldo Pitanga, Paulo Lodi e Roger Rodrigues e doutoranda Karla Rebelo pelas valiosas sugestões e contribuições durante a realização do trabalho.

Aos meus irmãos de RBP pela lealdade e amizade eternamente recordadas.

Aos amigos da Engecorps – Corpo de Engenheiros Consultores Ltda pelo apoio e ajuda na finalização do mestrado.

Às empresas Sansuy do Brasil, Ober S.A. e Formato – Coberturas Especiais pelo fornecimento de amostras e cooperação durante a realização da pesquisa.

Ao CNPq e FAPESP pelas bolsas de auxílio para a realização deste trabalho.

*“A sabedoria da vida não consiste
em fazer aquilo que se gosta,
mas em gostar do que se faz”.*

Leonardo da Vinci

RESUMO

GEROTO, R. E. (2008). **Desempenho de Camadas de Proteção para Geomembranas**. 188p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

A eficiência das geomembranas como barreiras para controle e desvio de fluxo está diretamente relacionada com a integridade de sua superfície. Nos sistemas de impermeabilização basal, como utilizados em aterros sanitários, as geomembranas podem entrar em contato com materiais perfurantes e cortantes, como a brita do sistema de drenagem. Para prevenir perfurações e outros danos em geomembranas, são empregadas camadas de proteção, como geotêxteis não-tecidos e areia. Este estudo avalia o desempenho de geotêxteis não-tecidos de fibras curtas de poliéster (PET) e de polipropileno (PP), além de uma configuração com areia, como camadas de proteção para geomembranas de policloreto de vinila (PVC) e de polietileno de alta densidade (PEAD). Foram realizados ensaios índices, ensaios de puncionamento hidrostático e ensaios de carregamento estático em grande escala, para verificar os mecanismos de ruptura das geomembranas e o comportamento da resistência ao puncionamento com a adoção de camadas de proteção. Os resultados demonstraram desempenho superior, como elemento de proteção, dos geotêxteis de maior resistência mecânica e mecanismos de rupturas diferenciados entre geomembranas de PEAD e de PVC.

Palavras chaves: geomembrana, geotêxtil, camadas de proteção, aterro sanitário.

ABSTRACT

GEROTO, R. E. (2008). **Performance of Protective Layers for Geomembranes**. 188p. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

The efficiency of geomembranes as barriers for flow diversion is directly related to its integrity. In basal lining systems, such as those used in landfills and waste disposal lagoon, geomembranes can get into contact with sharp materials, such as gravel from the drainage system, which can induce excessive deformation and holes. To prevent geomembrane damage, nonwoven geotextiles and sand are usually employed as protective layers. This paper deals with the performance of polyester (PET) and polypropylene (PP) nonwoven geotextiles and a sand layer, as protective layers for polyvinyl chloride (PVC) and high density polyethylene (HDPE) geomembranes. Index, hydrostatic puncture and large-scale uniaxial compression tests were performed and have allowed understanding the geomembrane damage mechanism and the influence of protective layers properties in increasing the geomembrane performance against puncture. The test results have shown that the behavior in puncture protection is related to the mechanical resistance of geotextile and that the rupture mechanism is different for the different types of geomembrane used in the study.

Keywords: geomembrane, geotextile, protective layers, landfill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Destino final dos RSU em função do número de municípios (IBGE, 2000).	37
Figura 2.2 – Constituintes de um aterro sanitário (SANTEK, 2006).	39
Figura 2.3 – Estrutura de um aterro sanitário (ENGECORPS, 1996).	40
Figura 2.4 – Execução de barreiras de desvio de fluxo em aterro sanitário (ENGECORPS, 2006).	43
Figura 2.5 – Configurações de “liners” (adaptado de SHARMA & LEWIS, 1994).	44
Figura 2.6 – Geossintéticos empregados em SCRS (KOERNER, 1998).	46
Figura 2.7 – Exemplos de materiais geossintéticos.	48
Figura 2.8 – Exemplos de aplicações de geomembranas.	51
Figura 2.9 – Representação do processo de FST (HSUAN, 2000).	53
Figura 2.10 – Detalhe das fibras de geotêxteis tecidos (BHATIA & SMITH, 1996).	57
Figura 2.11 – Detalhe das fibras de geotêxteis não-tecidos (MARK <i>et al.</i> , 1986).	58
Figura 2.12 – Danos mecânicos em geomembranas.	60
Figura 2.13 – Representação geométrica para análise das tensões e deformações nas geomembranas (WILSON-FAHMY <i>et al.</i> , 1996).	65
Figura 2.14 – Equipamento de puncionamento hidrostático (NAREJO <i>et al.</i> , 1996).	67
Figura 2.15 – Ilustração da distribuição das camadas para o ensaio de danos em geomembranas.	70
Figura 2.16 – Equipamentos utilizados no ensaio de compressão estática (SHERCLIFF, 1998).	71
Figura 3.1 – Curvas granulométricas do solo 1 e solo 2.	74
Figura 3.2 – Curva de compactação do solo 1.	75
Figura 3.3 – Equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização dos solos.	75
Figura 3.4 – Conjunto de peneiras e mesa vibratória para o ensaio de análise granulométrica.	78
Figura 3.5 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados.	79
Figura 3.6 – Método do paquímetro para determinação da forma dos agregados.	79
Figura 3.7 – Gráfico de frequência da forma dos agregados graúdos.	80

Figura 3.8 – Ábacos utilizados nas análises visuais da forma dos agregados (SUGUIO, 1973).	80
Figura 3.9 – Método de análise visual dos agregados graúdos.	81
Figura 3.10 – Geomembranas utilizadas na pesquisa.	82
Figura 3.11 – Equipamentos utilizados no ensaio de caracterização das propriedades físicas de geomembranas.....	84
Figura 3.12 – Materiais utilizados no ensaio de permeabilidade a vapor d'água.....	85
Figura 3.13 – Prensa mecânica utilizada nos ensaios de caracterização mecânica.	86
Figura 3.14 – Equipamento utilizado no ensaio de FST.	88
Figura 3.15 – Ensaio de DSC para geomembrana de PEAD com 1,5 mm.	89
Figura 3.16 – Ensaio de DSC para geomembrana de PEAD com 2,0 mm.	90
Figura 3.17 – Geotêxteis não-tecidos utilizados na pesquisa.	91
Figura 3.18 – Equipamentos utilizados para caracterização física dos geotêxteis não-tecidos.....	93
Figura 3.19 – Execução do ensaio de punção estático (CBR).	94
Figura 3.20 – Equipamento utilizado no ensaio de punção estático.	96
Figura 3.21 – Detalhe do pistão com $\varnothing = 8$ mm e o posicionamento das amostras.....	97
Figura 3.22 – Equipamento utilizado no ensaio de punção dinâmico.....	98
Figura 3.23 – Posicionamento das amostras de geossintéticos na base do equipamento.....	99
Figura 3.24 – Verificação da abertura devido à perfuração da geomembrana.	99
Figura 3.25 – Câmara de pressão utilizada no ensaio de punção hidrostático.	101
Figura 3.26 – Base com os cones truncados preenchida com material granular.....	102
Figura 3.27 – Detalhes dos cones truncados e aferição da altura crítica do cone.	102
Figura 3.28 – Base de argamassa com o posicionamento das britas espaçadas.....	103
Figura 3.29 – Detalhe das britas posicionadas na base de argamassa.	103
Figura 3.30 – Posicionamento dos materiais para o ensaio de punção hidrostático.	104
Figura 3.31 – Detalhe do reservatório e da bomba hidráulica.....	105
Figura 3.32 – Instrumentos de medição e controle de pressão.....	106
Figura 3.33 – Equipamentos utilizados para a aquisição dos dados.	106
Figura 3.34 – Gráfico de carregamento e determinação da ruptura da geomembrana.....	107
Figura 3.35 – Equipamentos utilizados no ensaio de carregamento estático.	109

Figura 3.36 – Distribuição esquemática das camadas no ensaio de carregamento estático.	110
Figura 3.37 – Base de solo compactado.	111
Figura 3.38 – Posicionamento da folha de papel alumínio.	111
Figura 3.39 – Instalação das camadas de proteção sobre as geomembranas.	112
Figura 3.40 – Detalhe da preparação das paredes da caixa metálica com geomembranas e graxa.	113
Figura 3.41 – Preenchimento da caixa metálica com material granular (brita 3).	113
Figura 3.42 – Posicionamento do pistão sobre os espaçadores para execução do carregamento.	114
Figura 3.43 – Fechamento do circuito elétrico para determinar perfurações em geomembranas.	117
Figura 3.44 – Equipamentos utilizados para determinação de perfurações (<i>Spark Test</i>).	118
Figura 3.45 – Detalhe da formação do arco voltaico.	118
Figura 3.46 – Execução do ensaio de permeabilidade a vapor d'água.	119
Figura 3.47 – Execução dos ensaios pós-dano para verificação das propriedades mecânicas.	120
Figura 3.48 – Equipamento utilizado no ensaio de estouro adaptado.	122
Figura 3.49 – Execução do ensaio de estouro e verificação do deslocamento vertical.	122
Figura 3.50 – Execução do ensaio de fissuramento sob tensão.	123
Figura 4.1 – Gráfico de força vs deslocamento para geomembrana de PVC 1,0 mm.	126
Figura 4.2 – Gráfico de força vs deslocamento para geomembrana de PVC 2,0 mm.	126
Figura 4.3 – Gráfico de força vs deslocamento para geomembrana de PEAD 1,5 mm.	127
Figura 4.4 – Gráfico de força vs deslocamento para geomembrana de PEAD 2,0 mm.	127
Figura 4.5 – Resistência ao puncionamento estático.	128
Figura 4.6 – Incremento percentual de resistência ao puncionamento estático.	128
Figura 4.7 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da gramatura das camadas de proteção.	129
Figura 4.8 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da espessura das camadas de proteção.	130
Figura 4.9 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da resistência à tração longitudinal das camadas de proteção.	131
Figura 4.10 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da resistência à tração transversal das camadas de proteção.	132

Figura 4.11 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da resistência ao puncionamento das camadas de proteção.....	133
Figura 4.12 – Variação do diâmetro do furo.	135
Figura 4.13 – Redução do diâmetro perfurado em função da gramatura das camadas de proteção....	136
Figura 4.14 – Redução do diâmetro perfurado em função da espessura das camadas de proteção. ...	137
Figura 4.15 – Redução do diâmetro perfurado em função da resistência à tração longitudinal das camadas de proteção.....	138
Figura 4.16 – Redução do diâmetro perfurado em função da resistência à tração transversal das camadas de proteção.....	139
Figura 4.17 – Redução do diâmetro perfurado em função da resistência ao puncionamento das camadas de proteção.....	140
Figura 4.18 – Resistência à tração transversal vs gramatura do geotêxtil.	142
Figura 4.19 – Resistência ao puncionamento hidrostático – GM de PVC com 1,0 mm.	144
Figura 4.20 – Resistência ao puncionamento hidrostático – GM de PVC com 2,0 mm.	144
Figura 4.21 – Resistência ao puncionamento hidrostático – GM de PEAD com 1,5 mm.	145
Figura 4.22 – Resistência ao puncionamento hidrostático – GM de PEAD com 2,0 mm.	145
Figura 4.23 – Deformações na superfície da geomembrana de PVC 1,0 mm e das camadas de proteção após o ensaio de puncionamento hidrostático.	146
Figura 4.24 – Deformações na superfície da geomembrana de PVC 2,0 mm e das camadas de proteção após o ensaio de puncionamento hidrostático.	147
Figura 4.25 – Deformações na superfície da geomembrana de PEAD 1,5 mm e das camadas de proteção após o ensaio de puncionamento hidrostático.	148
Figura 4.26 – Deformações na superfície da geomembrana de PEAD 2,0 mm e das camadas de proteção após o ensaio de puncionamento hidrostático.	149
Figura 4.27 – Variação da resistência ao puncionamento hidrostático em função da resistência ao puncionamento estático – CBR das camadas de proteção, para a base de brita.....	150
Figura 4.28 – Variação da resistência ao puncionamento hidrostático em função da resistência ao puncionamento estático – CBR das camadas de proteção, para cones (Hc = 37 mm).....	151
Figura 4.29 – Variação da resistência ao puncionamento hidrostático em função da resistência ao puncionamento estático – CBR das camadas de proteção, para cones (Hc = 25 mm).....	152
Figura 4.30 – Ruptura por rasgo em geomembrana de PVC.....	153

Figura 4.31 – Ruptura por puncionamento em geomembrana de PEAD.	154
Figura 4.32 – Ilustração da distribuição das tensões no contato das geomembranas com o cone.	156
Figura 4.33 – Ilustração da distribuição das tensões para geomembranas de PVC.	157
Figura 4.34 – Ruptura da geomembrana após a ruptura do geotêxtil no ensaio com cones.	157
Figura 4.35 – Ilustração da distribuição das tensões para geomembranas de PEAD.	159
Figura 4.36 – Ruptura da geomembrana independente da ruptura do geotêxtil.	159
Figura 4.37 – Deformações na geomembrana de PVC/Sem Proteção e na base compactada.	161
Figura 4.38 – Deformações na geomembrana de PVC/PET300 e na base compactada.	161
Figura 4.39 – Deformações na geomembrana de PVC/PET600 e na base compactada.	162
Figura 4.40 – Deformações na geomembrana de PVC/PP600 e na base compactada.	162
Figura 4.41 – Deformações na geomembrana de PVC/2xPP600 e na base compactada.	163
Figura 4.42 – Deformações na geomembrana de PVC/Areia e na base compactada.	163
Figura 4.43 – Deformações na geomembrana de PEAD/Sem Proteção e na base compactada.	164
Figura 4.44 – Deformações na geomembrana de PEAD/PET300 e na base compactada.	164
Figura 4.45 – Deformações na geomembrana de PEAD/PET600 e na base compactada.	165
Figura 4.46 – Deformações na geomembrana de PEAD/PP600 e na base compactada.	165
Figura 4.47 – Deformações na geomembrana de PEAD/2xPP600 e na base compactada.	166
Figura 4.48 – Deformações na geomembrana de PEAD/Areia e na base compactada.	166
Figura 4.49 – Ocorrência de danos na geomembrana de PVC em função do tipo de proteção.	167
Figura 4.50 – Ocorrência de danos na geomembrana de PEAD em função do tipo de proteção.	167
Figura 4.51 – Permeabilidade de amostras de geomembranas de PVC com 1,0 mm, danificadas e intacta.	168
Figura 4.52 – Permeabilidade de amostras de geomembranas de PEAD de 1,5 mm, danificadas e intacta.	169
Figura 4.53 – Variação percentual da tensão de ruptura das geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.	170
Figura 4.54 – Variação percentual da resistência à propagação de rasgos para as geomembranas de PVC danificadas em relação às amostras intactas.	170
Figura 4.55 – Variação percentual da resistência ao estouro para as geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.	171

Figura 4.56 – Variação percentual da tensão de escoamento das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas em relação às amostras intactas.....	172
Figura 4.57 – Variação percentual da tensão de ruptura das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas em relação às amostras intactas.....	172
Figura 4.58 – Variação percentual da resistência ao estouro das geomembranas de PEAD 1,5 mm danificadas em relação às amostras intactas.....	173
Figura 4.59 – Variação percentual do tempo de ruptura sob FST para geomembranas de PEAD com 1,5 mm danificadas em relação às amostras virgens.....	174
Figura 4.60 – Rupturas das geomembranas de PEAD de 1,5 mm, observadas por microscopia, após o ensaio de fissuramento sob tensão.	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo das principais geomembranas fabricadas (BAGCHI, 1994).....	50
Tabela 2.2 – Fatores de correção de carregamento.	71
Tabela 3.1 – Ensaio de caracterização dos solos.	73
Tabela 3.2 – Características geotécnicas dos solos utilizados.....	76
Tabela 3.3 – Características físico-mecânicas do basalto Serra Geral.	77
Tabela 3.4 – Ensaio realizado nos agregados utilizados na pesquisa.....	77
Tabela 3.5 – Ensaio realizado para caracterização das geomembranas.	83
Tabela 3.6 – Características físicas das geomembranas utilizadas.....	84
Tabela 3.7 – Características hidráulicas das geomembranas utilizadas.	85
Tabela 3.8 – Características mecânicas das geomembranas utilizadas.	87
Tabela 3.9 – Resultados do ensaio de FST das geomembranas de PEAD utilizadas.....	88
Tabela 3.10 – Ensaio realizado para caracterização dos geotêxteis não-tecidos.....	92
Tabela 3.11 – Características físicas dos geotêxteis não-tecidos utilizados.....	93
Tabela 3.12 – Características mecânicas dos geotêxteis não-tecidos utilizados.	95
Tabela 3.13 – Configurações utilizadas no ensaio de carregamento estático.....	108
Tabela 3.14 – Ensaio pós-dano realizado nas geomembranas.	115
Tabela 3.15 – Tipos de danos na superfície das geomembranas.	116
Tabela 4.1 – Resistência à punção hidrostática do conjunto GM de PVC/camada de proteção.	143
Tabela 4.2 – Resistência à punção hidrostática do conjunto GM de PEAD/camada de proteção.....	143
Tabela 4.3 – Permeabilidade a vapor d'água das geomembranas de PVC e PEAD danificadas.	168
Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas das geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas.....	169
Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas.....	171
Tabela 4.6 – Tempo de ruptura das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas.....	173

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAM	<i>Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CSPE	Polietileno Clorosulfonado
DC	Corrente Contínua
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
ESP	Espessura
FST	Fissuramento sob Tensão
GA	Geomanta
GCD	Geocomposto para Drenagem
GCL	<i>Geosynthetic Clay Liner</i> (Geocomposto argiloso - bentonítico)
GG	Geogrelha
GM	Geomembranas
GN	Georrede
GR	Gramatura da Camada de Proteção
GRI	<i>Geosynthetic Research Institute</i>
GT	Geotêxteis
GTN	Geotêxtil Não-tecido
GTW	Geotêxteis Tecidos

Hc	Altura do Cone
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Registrada
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEC	Polietileno Clorado
PECS-R	Polietileno Clorosulfonado Reforçado
PELMD	Polietileno Linear de Média Densidade
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
R ²	Coefficientes de Correlação
RP	Resistência à Punção CBR dos Geotêxteis
RP _{CONJ}	Resistência ao Puncionamento do Conjunto
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RT _L	Resistência à Tração Longitudinal dos Geotêxteis
RT _T	Resistência à Tração Transversal dos Geotêxteis
SCRS	Sistemas de Contenção de Resíduos Sólidos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
T _m	Temperatura de Fusão Cristalina
T _g	Temperatura de Transição Vítrea
Ø _{PERF}	Diâmetro Perfurado

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Condutividade Hidráulica
\emptyset	Diâmetro
Σ	Somatório
γ_d	Peso Específico Seco
S_r	Grau de Saturação
w	Teor de Umidade

SUMÁRIO

	PÁG.
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	29
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	33
2.1.1 Propriedades dos Resíduos Sólidos Urbanos	34
2.1.2 Métodos de Tratamento dos Resíduos Sólidos	35
2.2 ATERRO SANITÁRIO	38
2.2.1 Elementos Funcionais de um Aterro Sanitário.....	40
2.2.2 Sistemas de Revestimento de Fundo e Lateral do Aterro – “ <i>Liners</i> ”	42
2.3 MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS	45
2.3.1 Geossintéticos em Sistemas de Contenção de Resíduos Sólidos (SCRS)...	46
2.3.2 Geomembranas.....	49
2.3.3 Geotêxteis.....	55
2.4 PROTEÇÃO MECÂNICA EM GEOMEMBRANAS.....	59
2.4.1 Prevenção de Danos Mecânicos em Curto Prazo.....	63
2.4.2 Prevenção de Danos Mecânicos em Longo Prazo	69
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	73
3.1 SOLOS UTILIZADOS	73
3.1.1 Ensaio de Caracterização dos Solos	74
3.2 AGREGADOS UTILIZADOS	76
3.2.1 Ensaio de Caracterização dos Agregados	78
3.3 GEOMEMBRANAS	82
3.3.1 Ensaio de Caracterização das Propriedades Físicas.....	83
3.3.2 Ensaio de Caracterização das Propriedades Hidráulicas	85
3.3.3 Ensaio de Caracterização das Propriedades Mecânicas.....	86

3.3.4	Ensaio de Fissuramento sob Tensão (FST).....	87
3.3.5	Ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC).....	89
3.4	GEOTÊXTEIS NÃO-TECIDOS	91
3.4.1	Ensaio de Caracterização das Propriedades Físicas.....	92
3.4.2	Ensaio de Caracterização das Propriedades Mecânicas.....	93
3.5	ENSAIOS ÍNDICE	96
3.5.1	Puncionamento Estático	96
3.5.2	Puncionamento Dinâmico	98
3.6	ENSAIO DE PUNÇIONAMENTO HIDROSTÁTICO.....	100
3.6.1	Equipamentos Utilizados.....	100
3.6.2	Execução do Ensaio	104
3.7	ENSAIO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO	108
3.7.1	Equipamentos Utilizados.....	109
3.7.2	Execução do Ensaio	110
3.8	ENSAIOS PÓS-DANO	115
3.8.1	Inspeção Visual das Deformações.....	116
3.8.2	Verificação das Perfurações – <i>Spark Test</i>	116
3.8.3	Verificação das Propriedades Hidráulicas.....	119
3.8.4	Verificação das Propriedades Mecânicas	120
3.8.5	Ensaio de Resistência ao Estouro (adaptado).....	121
3.8.6	Ensaio de Fissuramento sob Tensão (<i>Stress Cracking</i>)	123
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES		125
4.1	ENSAIO DE PUNÇIONAMENTO ESTÁTICO.....	125
4.1.1	Apresentação dos Resultados	125
4.1.2	Análise dos Resultados.....	134
4.2	ENSAIO DE PUNÇIONAMENTO DINÂMICO.....	135
4.2.1	Apresentação dos Resultados	135
4.2.2	Análise dos Resultados.....	141
4.3	ENSAIO DE PUNÇIONAMENTO HIDROSTÁTICO.....	142
4.3.1	Apresentação dos Resultados	142
4.3.2	Análise dos Resultados.....	153
4.4	ENSAIO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO	160
4.4.1	Análises Visuais dos Danos	160

4.4.2	Análise das Propriedades Hidráulicas	168
4.4.3	Análise das Propriedades Mecânicas	169
4.4.4	Análise das Propriedades de Desempenho sob FST (<i>Stress Cracking</i>)	173
4.4.5	Análise dos Resultados Obtidos	175
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES		177
REFERÊNCIAS		181

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

As atividades humanas geram resíduos de vários tipos e diferentes níveis de toxicidade. Dentre os diferentes impactos que estes resíduos podem ocasionar quando não tratados ou dispostos adequadamente, pode-se destacar: poluição e degradação de aquíferos, do lençol freático e dos recursos hídricos em geral; eutrofização e redução da fauna e flora do solo e das águas superficiais; permanência de produtos não biodegradáveis no solo; problemas de saúde pública, além de comprometimento visual e estético.

A escassez de áreas para depósito de resíduos e a adoção de regulamentações ambientais restritivas, visando garantir o confinamento seguro dos resíduos, propiciaram o desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento e contenção dos resíduos. Para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos, podem ser empregadas técnicas como a compostagem, incineração e reciclagem, enquanto que, para a disposição final dos resíduos sólidos gerados, são utilizados os aterros sanitários.

Nos locais onde ocorrerá a disposição dos resíduos, deve-se garantir o confinamento seguro dos efluentes gerados pela decomposição dos resíduos. Para tal, são executadas barreiras para controle e desvio de fluxo, denominadas “*liners*”. Estas barreiras são executadas no sistema de impermeabilização basal com a finalidade de evitar que o líquido percolado atinja o solo subjacente e as águas subterrâneas, e também devem ser executadas na cobertura do maciço de resíduos para evitar a infiltração de água no interior do maciço de resíduos sólidos.

Para a execução destes “liners” podem ser empregados materiais naturais, tais como solos argilosos de baixa permeabilidade e/ou materiais industrializados de baixa permeabilidade, como as geomembranas poliméricas e os geocompostos bentoníticos.

Particularmente, no que concerne a geomembrana durante sua vida útil, esta barreira pode sofrer degradação por intempéries, elevadas temperaturas, lixívias ou danos mecânicos devido ao contato com materiais agressivos em sua superfície. Estes danos mecânicos podem ocasionar a ruptura ou deformações indesejáveis ao material, o que pode conseqüentemente diminuir sua resistência e atuar como agente catalisador nos fenômenos de degradação química e biológica, sob condições de serviço.

Os danos na superfície da geomembrana, além de difícil detecção, envolvem custos elevados para o seu reparo. Portanto, para garantir a integridade da geomembrana e permitir o seu funcionamento como barreiras para o controle e desvio de fluxo, devem ser empregados elementos de proteção atuando como uma camada redutora de tensões. Estas camadas de proteção devem ser capazes de minimizar e reduzir possíveis danos à superfície das geomembranas, preservando suas características inerentes à finalidade designada na obra.

Para o dimensionamento destas camadas de proteção, faz-se necessário o conhecimento das características dos elementos utilizados que influenciam no desempenho como camadas de proteção, bem como das características das geomembranas empregadas e da forma de ruptura destes materiais, além dos esforços solicitantes a que estes materiais serão submetidos durante a sua utilização como barreira de controle e desvio de fluxo.

Este estudo tem como objetivo investigar o desempenho de alternativas de proteção para geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de policloreto de vinila (PVC). Para a compreensão dos fatores que influenciam no desempenho destas camadas de proteção, buscou-se esclarecer os mecanismos de ruptura por punção que podem ocorrer em geomembranas, assim como o desempenho de camadas de proteção mecânica constituídas por

geotêxteis não-tecidos de poliéster (PET) e de polipropileno (PP), além de uma configuração com areia.

Para a consecução desses objetivos, realizaram-se ensaios índices de puncionamento estático e dinâmico para verificar mecanismos básicos do desempenho das camadas de proteção e desenvolveu-se um equipamento de puncionamento hidrostático com o uso de uma base padronizada (cones truncados) e de uma base com materiais naturais. Estes ensaios foram complementados por ensaios de carregamento estático por um período de 100 horas com a finalidade de simular a etapa de operação de um aterro sanitário.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A ABNT, pelo instrumento da norma NBR 10004, define resíduos sólidos como:

[...] resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade, de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de variação. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e esgoto, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isto soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Segundo a NBR 10004, os resíduos sólidos, de acordo com sua periculosidade, podem ser enquadrados nas seguintes classes:

- **Classe I** – são os resíduos perigosos, que apresentam periculosidade por uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- **Classe II a)** – são os resíduos não perigosos e não inertes, que podem apresentar propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Nesta categoria, estão incluídos os papéis, papelão, restos vegetais, entre outros;

- **Classe II b)** – são os resíduos não perigosos e inertes, que não são facilmente decompostos. Nesta categoria, enquadram-se as rochas, tijolos, vidros e determinados plásticos e borrachas.

2.1.1 Propriedades dos Resíduos Sólidos Urbanos

O conhecimento das propriedades físicas, químicas e biológicas dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é de grande importância para definir o tipo de tratamento e disposição final do resíduo sólido gerado.

As propriedades biológicas são influenciadas pela composição, idade, teor de umidade, pH dos líquidos presentes, temperatura no aterro, entre outros aspectos. A biodegradabilidade é a principal propriedade biológica de interesse do ponto de vista geotécnico. Esta propriedade influencia na compressibilidade da massa de resíduos, na permeabilidade do RSU com o tempo, na densidade dos materiais e na geração de gases.

No que diz respeito à composição química, devem-se quantificar parâmetros como o teor de matéria orgânica, teor de cinzas, carbono, potássio, fósforo, entre outras propriedades químicas do resíduo.

A determinação das propriedades físicas do maciço de resíduos é a de maior importância sob o ponto de vista geotécnico. As características físicas do maciço condicionam o comportamento global do aterro, relacionando-se com parâmetros geotécnicos como resistência ao cisalhamento, coesão, teor de umidade, permeabilidade e peso específico.

A composição física do lixo retrata o desenvolvimento da sociedade que gera este resíduo. O lixo gerado em comunidades menos desenvolvidas, em geral, possui maior concentração de matéria orgânica, fato este que influi diretamente nas propriedades físicas do resíduo e, conseqüentemente, no comportamento geotécnico.

De maneira geral, os resíduos com maior concentração de matéria orgânica apresentam valores menores de resistência ao cisalhamento e coesão quando comparados com resíduos com maior presença de plásticos, madeira e borracha. Parâmetros como teor de umidade, temperatura, permeabilidade, grau de compactação e peso específico são influenciados pela forma de lançamento, compactação e cobertura do resíduo, além da profundidade analisada e a idade do maciço.

Estudo realizado por Carvalho (1999), nos resíduos dispostos no Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado na cidade de São Paulo, obteve valores de peso específico entre 8,0 e 15,0 kN/m³, sendo verificadas amostras mais densas para maiores profundidades. Estudo conduzido por Marques (2001) verificou, em amostras retiradas no mesmo local, que o método de compactação (equipamento e número de passadas) influencia diretamente na densificação das amostras, com valores situados na faixa de 3,4 a 14,0 kN/m³ para os resíduos analisados. Fialho (2007) analisou amostras retiradas do Aterro Central, da cidade de Salvador, onde obteve peso específico da ordem de 8,0 kN/m³ para resíduos novos e peso específico de 14,0 kN/m³ para resíduos com idade superior a 4 anos.

2.1.2 Métodos de Tratamento dos Resíduos Sólidos

Os métodos de tratamento de RSU têm como objetivo reduzir o volume final do resíduo gerado, além de impedir o descarte destes em ambientes ou locais inadequados. Estes métodos promovem mudanças nas propriedades dos RSU, transformando-os em materiais inertes ou biologicamente estáveis. Os métodos de tratamento mais difundidos são:

- **Compostagem** – processo de decomposição biológica de materiais orgânicos de origem animal e vegetal pela ação de microorganismos, não sendo necessária a adição de qualquer componente. A decomposição pode acontecer por processos aeróbios ou anaeróbios.

As principais vantagens deste processo são o aproveitamento agrícola da matéria orgânica, a eliminação de patogênese e a reciclagem de nutrientes para o solo;

- **Reciclagem** – consiste na separação dos diversos materiais constituintes dos RSU (papel, papelão, plástico, vidro, metal, etc.), tendo como finalidade seu reuso ou como matéria-prima na manufatura de bens. Este processo tem como principais vantagens: redução da quantidade de resíduos direcionados para aterros e outros sistemas de tratamento, preservação de recursos naturais, economia de energia;
- **Incineração** – processo de tratamento de resíduos através da queima de materiais em alta temperatura (geralmente acima de 900°C). Este processo reduz os compostos orgânicos em constituintes minerais, tais como dióxido de carbono, vapor d'água e sólidos inorgânicos (cinzas). Este processo tem como principais vantagens a redução do volume dos resíduos e a redução da periculosidade de alguns resíduos perigosos, como os resíduos hospitalares.

Na gestão eficaz dos RSU, estes métodos de tratamento devem ser aplicados em conjunto para otimizar as vantagens de cada um isoladamente. A incineração é um tratamento eficaz para reduzir o volume de resíduos, tornando-os inertes, porém sua instalação requer altos investimentos, necessários para reduzir a contaminação causada pelos gases gerados da queima. As centrais de reciclagem e compostagem, além de gerarem empregos e renda, reduzem a quantidade de resíduos a ser disposta em aterros.

Para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos, o solo é o principal meio de recepção. As formas mais usuais de disposição em solo são:

- **Lixões ou Vazadouros** – caracterizados pela ausência de controle dos resíduos depositados quanto ao volume, periculosidade, classe, etc. Os resíduos ficam depositados sobre o solo natural, a céu aberto, sem nenhum tipo de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública e geralmente não sofrem compactação para redução de volume. Não é feito controle de entrada de pessoas e animais;

- **Aterro Controlado** – a principal diferença desta forma de disposição para os vazadouros está no fato de haver um controle mínimo como cobertura de solo sobre os resíduos dispostos, compactação para redução de volume e restrição de entrada de pessoas e animais. Não estão presentes sistemas de controle ambiental como impermeabilização basal e drenagem do chorume e gases produzidos;
- **Aterros Sanitários** – são aqueles que possuem elementos apropriados e técnicas de engenharia aplicadas para a disposição final dos resíduos. São constituídos por células de disposição, compactação do resíduo, cobertura, sistema de drenagem e tratamento do chorume e dos gases, barreiras de desvio e controle de fluxo, instrumentação e monitoramento geotécnico e ambiental.

A disposição de resíduos em aterros sanitários destaca-se pelo fato de esta técnica cumprir os requisitos mínimos sanitários e ambientais para a disposição final dos resíduos, durante sua vida útil e após sua desativação.

No entanto, de acordo com levantamento realizado pelo IBGE (2000), apenas uma pequena parcela dos municípios brasileiros dispõe seus RSU em aterros sanitários, como verificado na Figura 2.1.

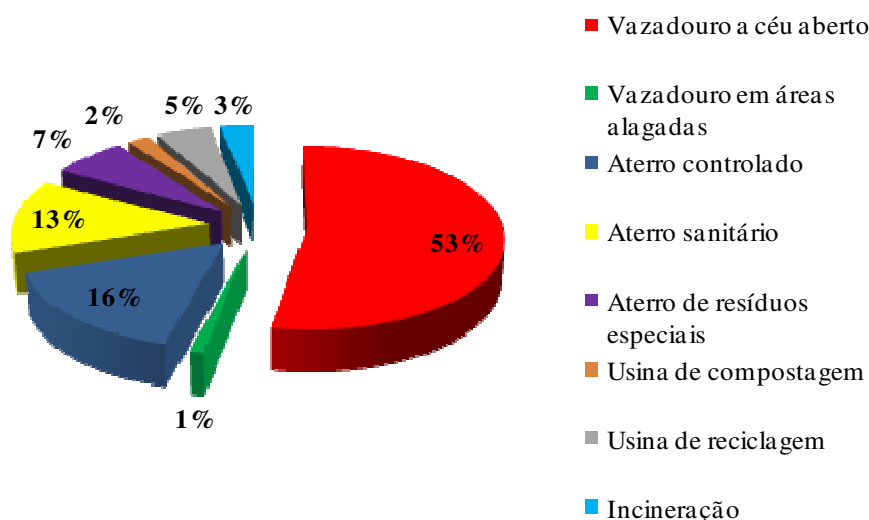


Figura 2.1 – Destino final dos RSU em função do número de municípios (IBGE, 2000).

2.2 ATERRO SANITÁRIO

A disposição de resíduos sólidos no solo é utilizada desde os primórdios da civilização humana. Os mesopotâmicos utilizavam-se das técnicas de aterramento de seus resíduos, enterrando-os em trincheiras até a sua decomposição, para posterior remoção e utilização como fertilizantes orgânicos na produção de cereais (LIMA, 1995 *apud* LINS, 2003). No século XVI, a peste bubônica contribuiu na Europa para que o homem passasse a utilizar a prática de aterrar seus dejetos.

A revolução industrial e a crescente produção e consumo de bens ocasionaram, além de um aumento significativo no consumo das matérias primas, a elevação das taxas de geração de resíduos e o acréscimo no volume de resíduos a serem dispostos no meio ambiente (LINS, 2003).

Atualmente, apesar da gama de tecnologias de tratamento (incineração, compostagem, reciclagem, compactação e alternativas como trituração e enfardamento) que visam reduzir previamente o volume de resíduos, a disposição final em aterros sanitários continua sendo o método de disposição mais empregado no mundo.

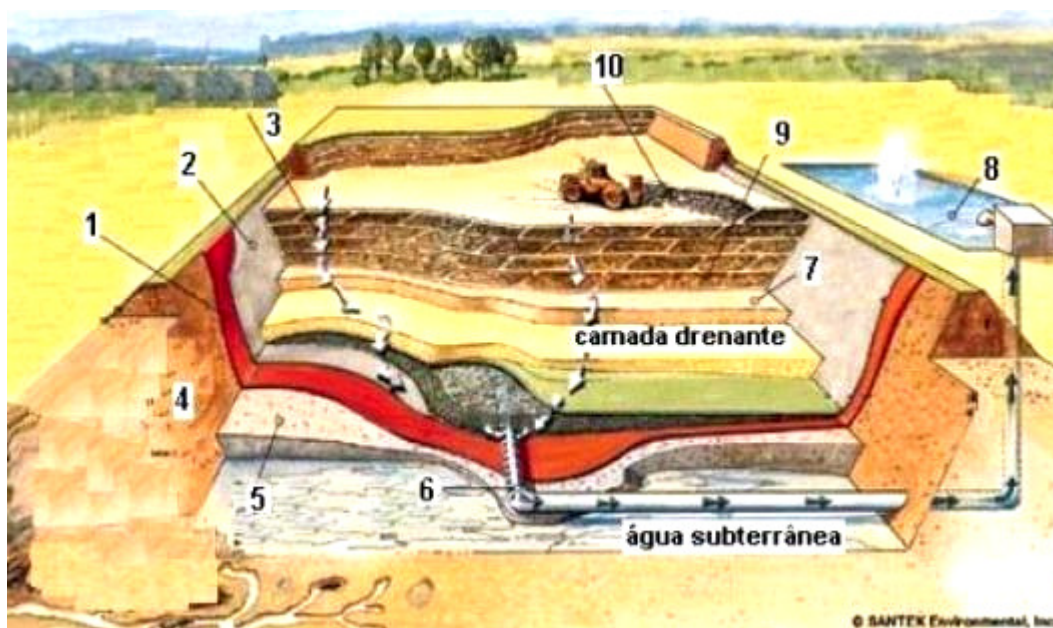
A ABNT, pelo instrumento da norma NBR 8419, define aterro sanitário como:

[...] o método de disposição de resíduos sólidos no solo, sem provocar prejuízos ou ameaças à saúde e à segurança, utilizando-se de princípios de engenharia, de tal modo a confinar o lixo no menor volume possível, cobrindo-o com uma camada de terra, ao fim do trabalho de cada dia, ou mais frequentemente, conforme o necessário”.

O projeto de um aterro sanitário deve contemplar parâmetros físicos, químicos e biológicos relativos à classe do resíduo a dispor. Para a concepção de projetos técnicos, a

análise destes fatores é primordial devido às peculiaridades dos diferentes tipos de resíduos receptados e dos componentes necessários para o tratamento.

Os elementos, ambientais e executivos, constituintes de um aterro sanitário podem ser observados na Figura 2.2.



- (1) geomembrana, (2) geotêxtil, (3) percolado, (4) paredes do aterro, (5) argila compactada, (6) dreno de coleta, (7) camada drenante, (8) lagoa, (9) células antigas, (10) compactação do resíduo.

Figura 2.2 – Constituintes de um aterro sanitário (SANTEK, 2006).

A ação enzimática de microrganismos e a conseqüente decomposição de materiais orgânicos resultam na produção de gases, sendo que o metano corresponde a cerca de 60% do total de gases gerados (CARVALHO, 1999). Esta decomposição dos resíduos acarreta a geração de um líquido percolado (chorume) com elevada concentração de matéria orgânica, e de outros materiais inorgânicos, constituindo-se num poluente agressivo ao meio ambiente.

A execução do aterro sanitário deve ser feita de tal forma que não comprometa a qualidade das águas superficiais, subterrâneas e do solo. O projeto deve contemplar um sistema de revestimento de fundo e das laterais, sistema de drenagem de base e remoção do chorume, sistema de drenagem de gases, sistema de drenagem de águas pluviais e superficiais, sistema de cobertura dos resíduos e sistema de monitoramento.

2.2.1 Elementos Funcionais de um Aterro Sanitário

Os estudos preliminares permitem a definição do sistema de disposição adequado e do projeto dos elementos funcionais de um aterro sanitário para determinada área. A escolha da área adequada, a partir dos critérios ambientais e operacionais, leva a um projeto seguro do ponto de vista ambiental e permite simplificações no projeto, sem comprometer a segurança sanitária da proposta.

De acordo com Tiveron *et al.* (1995), a técnica de execução de um aterro sanitário consiste na compactação do resíduo em células com altura variando de 2,0 a 4,0 metros e inclinação máxima para os taludes de 1V:2H. O resíduo deve ser espalhado e compactado pelo talude de baixo para cima, com 3 a 5 passadas do trator de esteira (SCHALCH *et al.* 1990), de modo a obter um peso específico da ordem de 10 kN/m³ (TIVERON *et al.* 1995).

A Figura 2.3 apresenta os detalhes de um aterro sanitário com a ilustração de seus elementos funcionais.

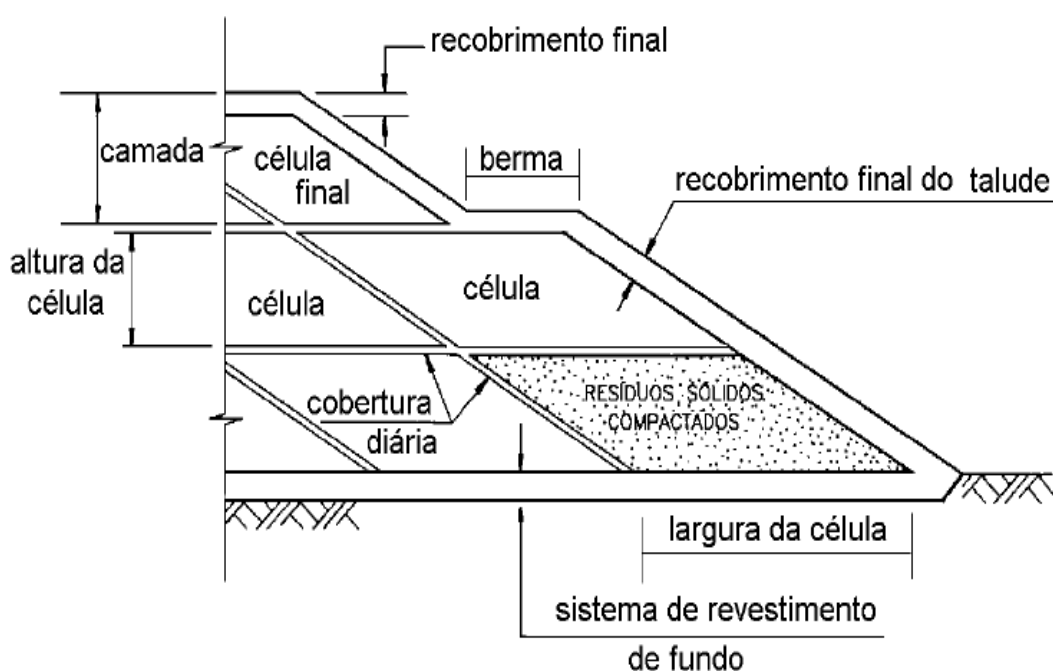


Figura 2.3 – Estrutura de um aterro sanitário (ENGEORPS, 1996).

Em um projeto de aterro sanitário, podem ser observados os seguintes elementos funcionais:

- **Vias de Acesso às Células** – as vias internas de acesso às células durante toda a fase operacional do aterro e principalmente nos períodos chuvosos requerem atenção especial, devido à alta compressibilidade do RSU e ao fato das camadas de solo de cobertura serem pouco espessas, o que pode ocasionar deformações ou até ruptura da base. Para estes casos, podem ser utilizados geossintéticos de reforço (geogrelhas e geotêxteis) na base das vias e para contenção das bermas;
- **Células Sanitárias** – as células sanitárias dos aterros são construídas a partir da disposição e compactação do lixo em camadas, dentro de uma área confinada. A compactação dos resíduos sólidos ocasiona uma redução substancial do volume de resíduos, proporcionando acréscimo na vida útil do aterro. O processo de compactação também auxilia na redução da compressibilidade do maciço e da migração de percolados e gases no interior, reduzindo os riscos de incêndio. Após a compactação, o resíduo deve ser recoberto diariamente, por uma camada que pode ser de solo ou materiais inertes, processados ou não;
- **Sistema de Cobertura dos Resíduos** – o sistema de cobertura do maciço de resíduos procura minimizar os impactos ao meio ambiente através da proteção da superfície das células de lixo. O recobrimento diário, com espessura mínima de 15 cm de solo, evita o arraste de detritos pelo vento, bem como a proliferação de vetores que possam provocar problemas de saúde pública. O recobrimento final é executado após o encerramento de uma parcela do aterro. Este possui espessura mínima de 40 cm de solo e, além das funções inerentes a do recobrimento diário, esta camada também minimiza a infiltração de águas provenientes de precipitações, o que pode ocasionar um aumento substancial do volume de chorume gerado. Adicionalmente, o recobrimento final impede o escape de gases, além de propiciar a plantação de vegetação (OLIVEIRA, 2002);

- **Sistema de Drenagem de Águas Pluviais** – o sistema de drenagem de águas pluviais capta a água superficial, evitando a infiltração na massa de resíduos, minorando o volume de chorume gerado, a possibilidade de erosão dos taludes e o carreamento de poluentes;
- **Sistema de Drenagem Vertical** – o sistema de drenagem vertical é executado desde a base do aterro até a camada de cobertura superficial e possui a função de captar e direcionar os gases gerados pela decomposição da matéria orgânica. Este sistema pode auxiliar na drenagem do chorume, sendo interligado ao sistema de drenagem horizontal;
- **Sistema de Drenagem Horizontal (Base)** – o sistema de drenagem coleta e conduz o chorume para o local de acumulação, onde este será tratado. Para a execução destes drenos podem ser empregados tubos de concreto ou PEAD perfurados, instalados em uma trincheira com brita;
- **Sistema de Monitoramento** – o sistema de monitoramento pode ter caráter ambiental através do controle da qualidade das águas superficiais, águas subterrâneas, qualidade do ar e poluição do solo; ou geotécnico com o controle de parâmetros geotécnicos, acompanhando a evolução dos aterros, de possíveis recalques ou instabilidades dos taludes, com o objetivo de obter subsídios para a realização de alterações de projeto, da seqüência executiva ou uso de técnicas para remediação.

2.2.2 Sistemas de Revestimento de Fundo e Lateral do Aterro – “*Liners*”

O sistema de revestimento de fundo tem como função impedir a migração do chorume gerado para o solo, com a finalidade de evitar a contaminação do solo durante a vida útil e após o término das operações do aterro. A definição do tipo de tratamento da fundação depende de aspectos geológicos - geotécnicos e hidrogeológicos da área de implantação do aterro e suas adjacências.

Este sistema envolve a execução de barreiras para controle e desvio de fluxo na base e laterais do aterro, associada à conformação da superfície em plataformas inclinadas para drenagem do chorume, além da captação e drenagem de nascentes e cursos d'água caso existam. A determinação do tipo de barreira é feita com base nas características físico-químicas do percolado, a vida útil do projeto e as taxas de infiltração esperadas.

Podem ser empregadas barreiras naturais, constituídas por solos argilosos compactados com condutividade hidráulica (k) variando de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s (DANIEL, 1993), barreiras sintéticas compostas de materiais poliméricos, como as geomembranas, com baixa condutividade hidráulica e elevadas resistências químicas e físicas, ou compostas por bentonita (GCLs ou misturas de solos com adição de bentonita).

As geomembranas são comumente empregadas no revestimento ou cobertura de depósitos de efluentes, resíduos sólidos ou gases, em face de sua facilidade na instalação e eficiência. Os tipos de geomembranas mais comuns são as de PEAD (polietileno de alta densidade), PVC (policloreto de vinila) e PECS-R (polietileno clorossulfonado reforçado).

A Figura 2.4 apresenta a instalação de uma geomembrana na base e nas laterais de um aterro sanitário, além do revestimento da lagoa de coleta do chorume.



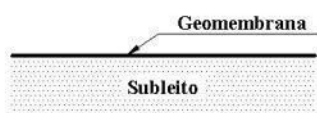
Figura 2.4 – Execução de barreiras de desvio de fluxo em aterro sanitário (ENGEORPS, 2006).

Estas barreiras para controle e desvio de fluxo podem ser simples, quando apresentam apenas um material na sua execução, ou compostas, quando são constituídas pela combinação de diversos materiais. Os sistemas compostos, mais empregados na execução de aterros, são constituídos por uma camada de argila compactada combinada a uma geomembrana.

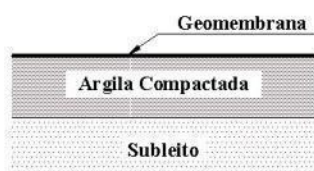
A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) recomenda, para a execução do subsolo de um aterro sanitário, a manutenção de uma distância de no mínimo 3,0 metros dos corpos d'água, sendo este subsolo, constituído por um depósito extenso e homogêneo de solo argiloso, que apresente porcentagem superior a 30% de partículas passando pela peneira nº 200, com coeficiente de permeabilidade (k) menor ou igual a 1×10^{-7} cm/s, e que não sofra alterações na sua permeabilidade, devido a efeitos produzidos resíduos.

A Figura 2.5 apresenta várias configurações de “liners” para a impermeabilização da fundação de um aterro sanitário, sendo que estas podem ser executadas combinando camadas de argila compactada, geomembranas, sistemas de monitoramento de vazamentos e geocompostos argilosos.

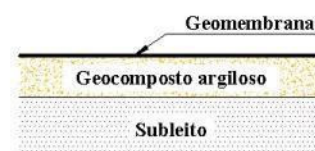
Barreira com geomembrana simples



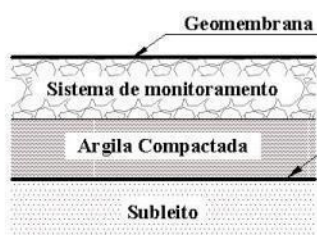
Barreira composta



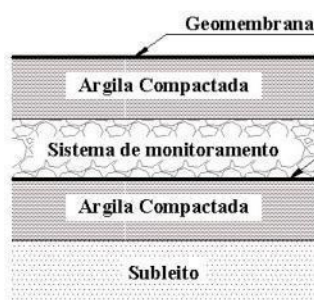
Barreira composta



Barreira dupla composta



Barreira dupla composta



Barreira dupla composta

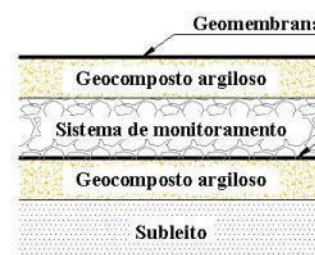


Figura 2.5 – Configurações de “liners” (adaptado de SHARMA & LEWIS, 1994).

2.3 MATERIAIS GEOSINTÉTICOS

O emprego de materiais geossintéticos constitui prática generalizada e crescente no âmbito da geotecnia. Dentre os aspectos que favorecem essa crescente utilização, pode-se citar: versatilidade, excelente desempenho e, principalmente, o fato de proporcionarem baixo custo, em grande parte das situações, quando comparadas às soluções convencionais.

De acordo com Koerner (1998), os materiais utilizados na fabricação de geossintéticos são provenientes da indústria plástica de polímeros primários, produzidos a partir do petróleo e que constituem a principal matéria prima para fabricação de embalagens, recipientes plásticos e “plásticos de engenharia” (usados na construção civil, indústria automobilística, dentre outros).

Segundo Manrich *et al.* (1997), das classificações dos polímeros sintéticos, a mais conhecida e de interesse prático, por se relacionar a uma de suas características mais importantes, é quanto ao comportamento termomecânico. Por esta classificação, os polímeros são assim definidos:

- **Elastômeros** – são polímeros que se caracterizam por uma elevada elasticidade, podendo distender a pelo menos duas vezes o seu comprimento original, à temperatura ambiente. Dentre as aplicações deste polímero, destacam-se a fabricação de pneus para automóveis, de bexigas e de câmaras de ar;
- **Plásticos** – os polímeros plásticos dividem-se em dois grupos:
 - **Termofixos** – polímeros que possuem um número elevado de ligações covalentes entre suas cadeias, o que confere uma característica de não permitir remodelagens por calor. Como exemplo de aplicação deste polímero cita-se: o poliéster insaturado, utilizado na fabricação de fibra de vidro para barcos, pranchas de surf, piscinas, etc;

- **Termoplásticos** – são polímeros que, ao contrário dos termofixos, se caracterizam por serem remodelados pelo calor, repetidas vezes, sendo isto possível devido às ligações fracas que unem as macromoléculas.

2.3.1 Geossintéticos em Sistemas de Contenção de Resíduos Sólidos (SCRS)

Com o avanço da tecnologia de industrialização de materiais plásticos, o uso de geossintéticos vem sendo prática comum nas obras de engenharia geotécnica onde se necessita de melhoria das características do solo local, bem como garantia de proteção e manutenção da qualidade ambiental.

De acordo com Vilar (2003), praticamente todos os geossintéticos podem ser aplicados em obras de proteção ambiental. O exemplo mais completo é o dado por sistemas de contenção de resíduos sólidos (SCRS), como os aterros sanitários (Figura 2.6).

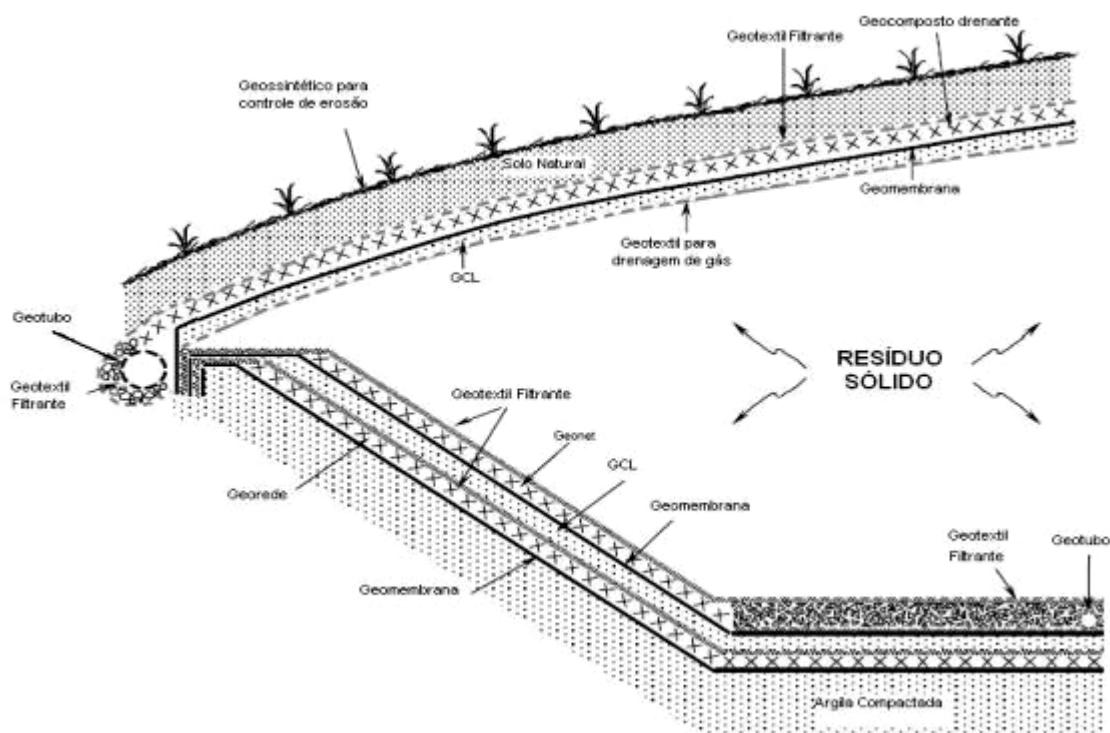
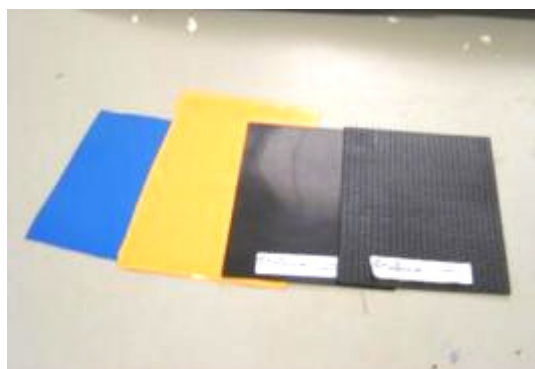


Figura 2.6 – Geossintéticos empregados em SCRS (KOERNER, 1998).

Pelo instrumento da norma ABNT NBR 12553, os principais materiais geossintéticos utilizados em SCRS, são assim definidos:

- **Geomembranas (GM)** – produto bidimensional, de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por asfaltos, elastômetros ou plastômetros, utilizado de fluxo e separação, nas condições de solicitação. Estas podem ser lisas, texturizadas ou reforçadas;
- **Geocomposto argiloso para barreira impermeabilizante (GCL)** – estrutura formada pela associação de geossintéticos a um material argiloso de baixa condutividade, desenvolvida para a função de barreira;
- **Geotêxteis (GT)** – produto têxtil bidimensional permeável, compostos por 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. Os geotêxteis podem ser subdivididos em dois grandes grupos: os geotêxteis tecidos (GTW) e os não-tecidos (GTN);
- **Geogrelha (GG)** – produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas. São constituídas por elementos resistentes à tração, podendo ser unidirecional ou bidirecional. Segundo o processo de fabricação podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas;
- **Georrede (GN)** – Produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de drenagem;
- **Geocomposto para drenagem (GCD)** – produto desenvolvido para drenagem, composto geralmente de um geotêxtil atuando como elemento de filtro e de uma georrede ou geoespaçador atuando como elemento drenante;
- **Geomanta (GA)** – produto com estrutura tridimensional permeável, usado para controle de erosão superficial do solo, podendo ser biodegradável, no caso da biomanta.

Estes materiais geossintéticos estão ilustrados na Figura 2.7.



(a) Geomembranas



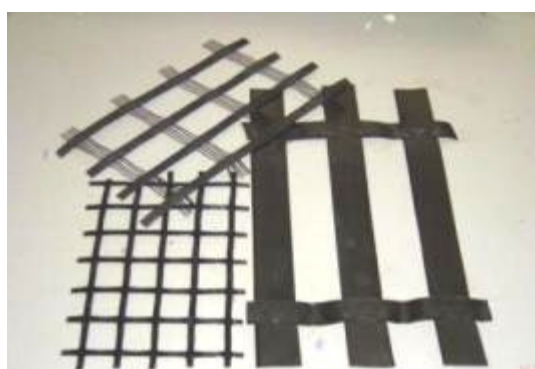
(b) GCL



(c) Geotêxteis não-tecidos



(d) Geotêxteis tecidos



(e) Geogrelhas



(f) Georrede



(g) Geocomposto para drenagem



(h) Geomanta

Figura 2.7 – Exemplos de materiais geossintéticos.

2.3.2 Geomembranas

As geomembranas são materiais concebidos a partir de materiais poliméricos, sendo empregadas como barreiras para controle e desvio de fluxo devido a sua baixíssima permeabilidade. Estes materiais possuem espessura que varia, em geral, de 0,50 a 3,00 mm, sendo empregadas em diversas obras de obras de engenharia.

Dentre as principais vantagens para a aplicação das geomembranas, em obras de engenharia, pode-se destacar: o controle de qualidade de um produto manufaturado, a facilidade de instalação, a flexibilidade, a reduzida permeabilidade e o ganho de espaço no aterro (VILAR, 2003).

Estes elementos em muitos casos são denominados como barreiras impermeáveis, no entanto, através de ensaios de permeabilidade de vapor d'água em laboratórios, verificou-se que estes materiais apresentam valores típicos de permeabilidade compreendidos entre 1.10^{-10} a 1.10^{-13} cm/s. Pode-se afirmar que as geomembranas são capazes de prover uma barreira para líquidos e vapores, já que a permeabilidade apresentada pelo material é extremamente baixa.

As geomembranas comumente utilizadas como barreiras de desvio e controle de fluxo são as de PEAD (polietileno de alta densidade), PELMD (polietileno linear de média densidade), CSPE (polietileno clorossulfonado) e PVC (policloreto de vinila). No Brasil, as geomembranas mais utilizadas em obras de contenção de resíduos são as de PEAD e de PVC.

As geomembranas de PEAD são as mais utilizadas mundialmente em obras de SCRS, atuando como barreiras de desvio e controle de fluxo no sistema de revestimento de fundo dos aterros sanitários e no sistema cobertura da célula de resíduo. As principais vantagens das geomembranas de PEAD são: alta resistência química a diversas substâncias, maior durabilidade em longo prazo e elevada resistência às tensões geralmente impostas durante a construção e instalação.

As geomembranas de PVC também são utilizadas em obras de contenção de resíduos, no entanto, Sharma & Lewis (1994) relatam que nos EUA a aplicação de geomembranas de PVC somente é indicada para obras de caráter provisório, devido a aspectos como sua durabilidade em longo prazo e resistência a ataques químicos. Porém, com o avanço da tecnologia de fabricação e aplicação de aditivos, as geomembranas de PVC têm apresentado melhorias significativas que podem viabilizar sua aplicação em obras de longo prazo.

A Tabela 2.1 apresenta um comparativo com as principais vantagens e desvantagens dos principais tipos de geomembranas fabricadas.

Tabela 2.1 – Comparativo das principais geomembranas fabricadas (BAGCHI, 1994).

Geomembrana	Vantagens	Desvantagens
Policloreto de vinila (PVC)	Boa trabalhabilidade; Altas características de resistência; Facilidade para execução de emendas.	Baixa resistência aos raios UV, ozônio, sulfídeos e elementos de intempéries, Fraco desempenho em altas e baixas temperaturas.
Polietileno de média densidade e de alta densidade (PELMD e PEAD)	Boa resistência a diversos agentes químicos; Boas características de resistência e soldas; Bom desempenho em baixas temperaturas.	Suscetível ao fenômeno de "stress cracking"; Baixa resistência ao punção.
Polietileno clorado (PEC)	Boa resistência aos raios UV e agentes de intempéries; Bom desempenho para baixas temperaturas; Boas características de resistência.	Baixa resistência para químicos, ácidos e óleos; Baixa qualidade na emenda.
Polietileno clorosulfonado (CSPE)	Boa resistência aos raios UV e agentes de intempéries; Boa resistência para químicos, ácidos e óleos; Boa resistência para bactérias; Bom desempenho para baixas temperaturas.	Baixas características de resistência; Problemas durante emendas.

Ressalta-se que a tabela proposta por Bagchi (1994) apresenta limitações, como a não inclusão da resistência das geomembranas de PEAD aos raios UV e a possibilidade de formular as geomembranas de PVC, maximizando determinadas características do material para determinadas solicitações de resistência e climáticas.

A Figura 2.8 apresenta algumas aplicações de geomembranas em obras de engenharia.



(a) Aterros sanitários



(b) Canais



(c) Lagoas de tratamento de efluentes



(d) Impermeabilização



(e) Lagos ornamentais



(f) Biodigestores de gás

Figura 2.8 – Exemplos de aplicações de geomembranas.

A cristalinidade consiste em um arranjo regular perfeito e repetitivo dos átomos individuais nas três direções cristalográficas. Nos materiais poliméricos, a cristalinidade, quando ocorre, nunca é total e consiste no alinhamento de segmentos de cadeias em um arranjo tridimensionalmente, sendo estes denominados semicristalinos. A facilidade de cristalização dependerá da estrutura química, peso molecular e condições de cristalização do polímero.

Determinadas propriedades físicas e mecânicas das geomembranas são diretamente influenciadas pelo grau de cristalinidade do polímero e pela morfologia de suas regiões cristalinas. Geomembranas com alta cristalinidade, como o PEAD com cristalinidade da ordem de 90%, apresentam maiores rigidez, resistência química, densidade, estabilidade dimensional, resistência à tração, resistência à abrasão, temperatura de fusão cristalina (T_m), temperatura de transição vítrea (T_g), etc. No entanto, a cristalinidade causa a diminuição de outras propriedades como a resistência ao impacto, alongamento na ruptura, claridade ótica e resistência ao fenômeno de fissuramento sob tensão, também denominado *stress cracking*.

O fissuramento sob tensão (FST) é um processo de desprendimento das cadeias moleculares, onde prevalecem os escorregamentos entre as microfibrilas, quando estes elementos estão submetidos à ação de cargas de longa duração, porém inferiores a sua resistência a tração. Ambientes de degradação térmica, radiação UV ou com presença de solventes e alcoóis, podem se transformar em catalisadores do fenômeno de *stress cracking*, em especial para geomembranas de PEAD. Para inibir a ocorrência deste fenômeno, um limite de deformação de 3,5% deve ser respeitado (JONES, 1985).

A microestrutura cristalina de uma geomembrana de PEAD é composta por uma série de lamelas com moléculas dobradas e ramificações laterais que oscilam para fora da lamela e se entrelaçam na lamela adjacente (Figura 2.9 a). Quando é aplicada uma tensão elevada a esta estrutura (Figura 2.9 b), as cadeias mantêm-se unidas às lamelas adjacentes e as quebram

em fragmentos que causam o escoamento e alongamento característicos de um ensaio de tração uniaxial (Figura 2.9 c). Entretanto, quando baixas tensões são aplicadas (Figura 2.9 d), as ligações entre as cadeias vão se soltando lentamente, provocando a separação das lamelas e gerando uma ruptura frágil (Figura 2.9 e) em comparação ao escoamento/alongamento previstos na ruptura dúctil.

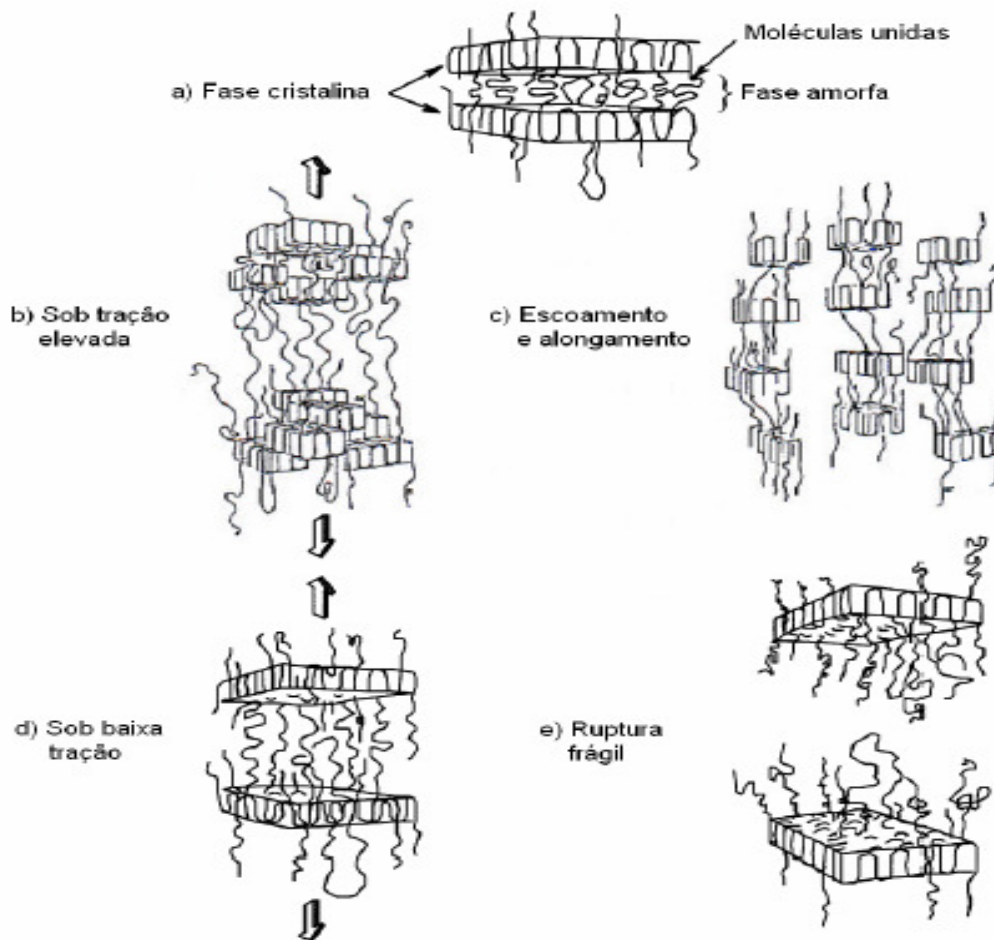


Figura 2.9 – Representação do processo de FST (HSUAN, 2000).

Segundo Bright (1993), diversos polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos, como o polietileno (PE), poliéster (PET) e policloreto de vinila (PVC) podem estar sujeitos ao fenômeno de FST (*stress cracking*).

Dentre estes polímeros, o que apresenta maior suscetibilidade a ocorrência do fenômeno é o PE, enquanto que os materiais formulados com PET são os que apresentam

menor susceptibilidade ao FST. O PVC é menos suscetível ao fenômeno, quando comparado ao PE, no entanto, o PVC pode apresentar comportamento frágil com tendência ao fissuramento sob tensão após a perda de plastificante(s) devido à solubilização e/ou devido ao ataque microbiológico, tornando-se também suscetível ao fenômeno (BRIGHT,1993).

Os estudos acerca do fissuramento sob tensão, em especial para geomembranas de PEAD, ressaltam a importância da correta formulação durante o processo de manufatura e devidos cuidados durante os procedimentos de emendas em campo.

Para avaliar a suscetibilidade das geomembranas ao fenômeno de *stress cracking*, podem ser empregados diversos tipos de ensaios, sendo que a maioria destes ensaios são conduzidas por longos períodos de tempo. O método de ensaio proposto pela norma americana ASTM D 5397 é um dos mais difundidos no meio técnico, devido à possibilidade de obter resultados confiáveis em períodos de tempos relativamente curtos. Neste método são utilizados corpos de prova ranhurados, submetidos a um estágio de carga de 30% da tensão de escoamento do material. As amostras são imersas em uma solução com um reagente de superfície ativa, o Igepal CO-630 (90% de solução aquosa), a uma temperatura de 50° C.

O instituto de pesquisas de geossintéticos da Universidade de Drexel (Geosynthetic Research Institute - GRI), pelo instrumento da norma de ensaio GM13 estabelece um tempo mínimo de 300 horas para a ruptura dos corpos de prova.

Lavoie (2006) realizou ensaios em amostras de PE, submetidas à degradação por radiação UV, degradação térmica e degradação química, com a exposição das amostras em ambientes com a presença de solventes e alcoóis. O autor verificou uma redução da resistência ao FST da ordem de 50 a 60%, nos ensaios de SP-NCTL (Ensaio com corpo de prova ranhurado sob 1 estágio de carga), ou seja, os processos de degradação, além de ocasionarem a redução da resistência mecânica das amostras, tornaram-se agentes catalisadores do fenômeno de fissuramento sob tensão.

2.3.3 Geotêxteis

A ABNT, pelo instrumento da norma NBR 12553, define os geotêxteis como:

[...] produtos têxteis permeáveis utilizados na engenharia geotécnica. Esses materiais são constituídos por fibras obtidas através da fusão de polímeros, podendo desempenhar diversos papéis como parte integrante de um projeto de engenharia.

Os geotêxteis foram os primeiros geossintéticos empregados na geotecnia e constituem até hoje, os materiais mais utilizados dessa extensa família, desempenhando diferentes papéis em obras de engenharia. As principais funções dos geotêxteis em obras de engenharia são: drenagem (coleta e condução de um fluido ao longo do plano do geotêxtil), filtração (retenção de partículas de solo ou outros materiais possibilitando a passagem de um fluido através do geotêxtil), separação (evitando a mistura de materiais de naturezas diferentes) e reforço (melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica).

O emprego deste elemento como camada de proteção, com a instalação do elemento entre uma geomembrana e materiais pontiagudos, que possam ocasionar deformações e perfurações na manta, está em amplo crescimento.

Para a confecção das fibras de geotêxteis são utilizados polímeros termoplásticos e semicristalinos, em ordem crescente de utilização, os principais tipos são: poliamida (PA), polietileno (PE), poliéster (PET) e polipropileno (PP) (KOERNER, 1998).

Os principais polímeros utilizados na fabricação de geotêxteis, e algumas de suas principais características estão apresentados a seguir:

- **Polietileno (PE)** – constitui o polímero orgânico mais simples e possui a estrutura química menos reativa de todos os termoplásticos comercializados. Características como processamento fácil, baixo custo e propriedades físicas aceitáveis justificam sua utilização na fabricação de geotêxteis (CASSIDY *et al.*, 1992). É geralmente resistente a ataque químico,

mas está sujeito a termo e foto-oxidação na presença de radiação ultravioleta, apresentando acentuada sensibilidade à fluência (COOKE & REBENFELD, 1988).

- **Polipropileno (PP)** – este polímero está presente em cerca de 80% das fibras de geotêxteis (KOERNER, 1998). Este material apresenta propriedades mecânicas aceitáveis, inércia química e custo relativamente baixo. Os maiores problemas associados a este polímero estão relacionados à oxidação e à fluência.
- **Poliamida (PA)** – os tipos mais importantes usados na fabricação dos geotêxteis são o nylon 6 e o nylon 6.6. As propriedades químicas desses dois tipos de poliamida são similares, sendo ambos resistentes a ataque químico. As fibras de nylon são mais resistentes à foto e termo-oxidação do que as fibras de PP e PE, apresentando resistência à hidrólise em ambientes neutros e alcalinos. No entanto, em ambientes úmidos, há grande variação de suas propriedades mecânicas.
- **Poliéster (PET)** – Koerner (1998) ressalta que cerca de 15% das fibras utilizadas em geotêxteis são de poliéster. Entre os fatores que justificam esse uso, destacam-se suas propriedades mecânicas, como a elevada resistência à tração. De acordo com Horrocks & D'Souza (1992), o grande inconveniente associado às fibras de poliéster aparenta ser a sensibilidade à hidrólise em ambientes alcalinos.

Apesar da distinção de várias características dos geotêxteis em função dos tipos de polímero empregados na fabricação do material, os geotêxteis podem ser agrupados basicamente em duas grandes classes, os geotêxteis tecidos e os não-tecidos.

Os geotêxteis tecidos constituem materiais obtidos através do entrelaçamento de fios, filamentos ou outros componentes, segundo direções preferenciais, denominadas trama e urdume. A trama corresponde aos fios dispostos transversalmente à direção de fabricação do geotêxtil, enquanto os fios dispostos longitudinalmente a essa direção correspondem ao urdume.

De acordo com Bhatia & Smith (1996), os geotêxteis tecidos podem ser produzidos com quatro tipos básicos de fibras: monofilamentos, multifilamentos, laminetes e fibrilas. Na Figura 2.10, pode ser observado o entrelaçamento das fibras para o caso de multifilamentos e laminetes.

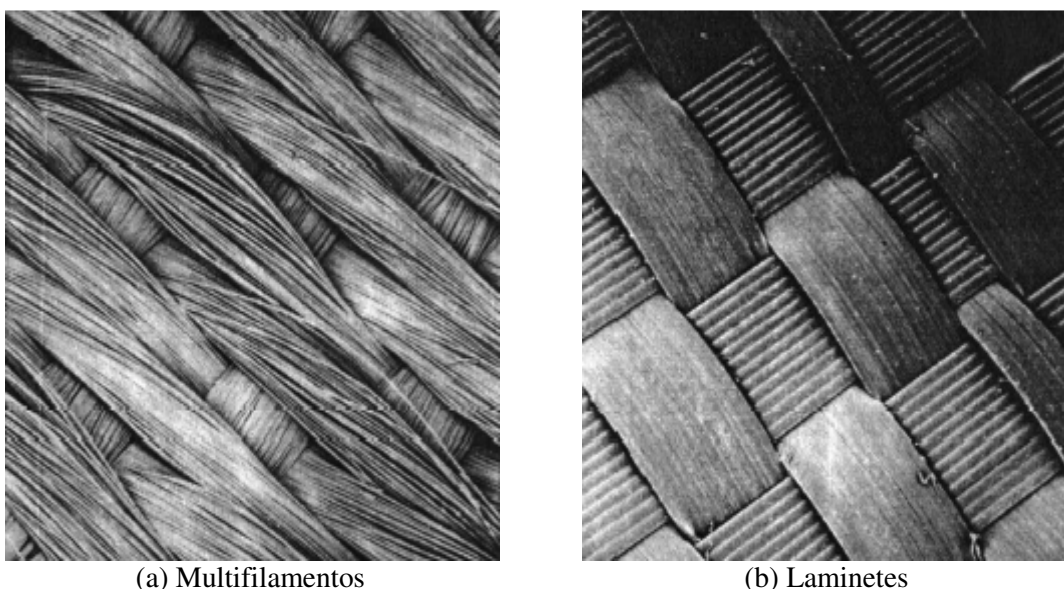


Figura 2.10 – Detalhe das fibras de geotêxteis tecidos (BHATIA & SMITH, 1996).

De acordo com a NBR 12553, os geotêxteis não-tecidos são materiais compostos por fibras ou filamentos distribuídos aleatoriamente e interligados por processos mecânicos, térmicos e/ou químicos. Os geotêxteis não-tecidos podem ser confeccionados com fibras curtas que possuem comprimento de 25 a 100 mm, ou fibras longas, com filamentos contínuos que possuem grande extensão.

O método de fabricação dos geotêxteis não-tecidos influencia propriedades como: gramatura, espessura, resistência, permeabilidade, entre outras. Os processos de fabricação podem ser divididos em:

- **Mecânico (agulhagem)** – processo em que as fibras são dispostas em uma esteira rolante passando sob uma prancha constituída por uma série de agulhas dentadas. A ligação ocorre com o entrelaçamento do material pela penetração das agulhas, repetidas vezes. A

densidade da agulhagem na fabricação do geotêxtil influi em suas características e em seu desempenho. A espessura dos geotêxteis não-tecidos fabricados por este processo varia de 2,0 a 5,0 mm.

- **Térmico (termo ligação)** – para este método, a ligação ocorre por fusão parcial das fibras, onde pode ocorrer a ligação de alguns pontos, como também de regiões mais extensas da manta. Os geotêxteis fabricados por este método apresentam espessuras reduzidas, da ordem de 0,5 a 1,0 mm.
- **Químico (resina química)** – a ligação das fibras dos geotêxteis não-tecidos resinados ocorre pela aplicação de substâncias químicas no material, como a aplicação de resina acrílica por imersão ou pulverização.

A Figura 2.11 apresenta um detalhe dos geossintéticos não-tecidos agulhados e termoligados, respectivamente.

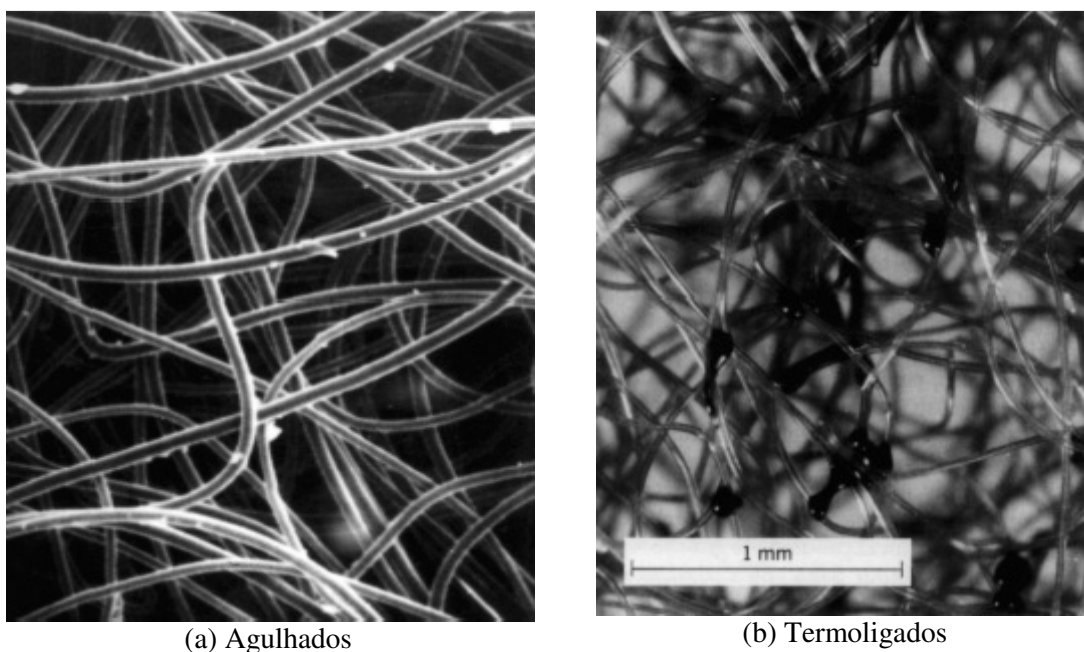


Figura 2.11 – Detalhe das fibras de geotêxteis não-tecidos (MARK *et al.*,1986).

2.4 PROTEÇÃO MECÂNICA EM GEOMEMBRANAS

Para a disposição de resíduos, em aterros sanitários e em lagoas de efluentes, faz-se necessária a adoção de um sistema adequado de contenção de fluidos na base, para evitar a contaminação do solo e águas subjacentes. As geomembranas, materiais poliméricos de baixa condutividade hidráulica e de pequena espessura, são amplamente empregadas no revestimento de base ou de cobertura destas obras.

A configuração das barreiras de controle e desvio de fluxo pode ocasionar o contato direto da geomembrana com materiais agressivos, como as britas do sistema de drenagem. O contato com estes materiais poderá submeter a superfície da geomembrana a esforços de punção que podem ocasionar perfurações e deformações indesejáveis. Estas perfurações e deformações, além da dificuldade na detecção, dificultam a remediação e/ou reabilitação da área danificada, o que pode prejudicar o desempenho dessa barreira no confinamento dos resíduos e dos percolados.

Em estudo realizado por Jacquelin *et al.* (2008), em que se utilizou o método da lâmina d'água para detecção de furos em geomembranas, foram analisadas mais de 60 lagoas de efluentes localizadas em nove diferentes instalações mineiras. Estas áreas analisadas totalizaram mais de 4,3 milhões de m² revestidos com geomembranas de PVC, PEAD e PELMD.

Neste estudo, verificou-se que a ocorrência de perfurações nas geomembranas é decorrente de uma série de fatores, como: inexperiência do instalador, falta de controle de qualidade dos materiais e ausência de procedimentos durante a etapa de instalação da geomembrana ou lançamento da brita de drenagem. Após a aplicação dos métodos para a detecção de perfurações, foi verificada uma densidade média de 7,4 perfurações por hectare, ou uma perfuração a cada 1.350 m², nas áreas revestidas com geomembranas.

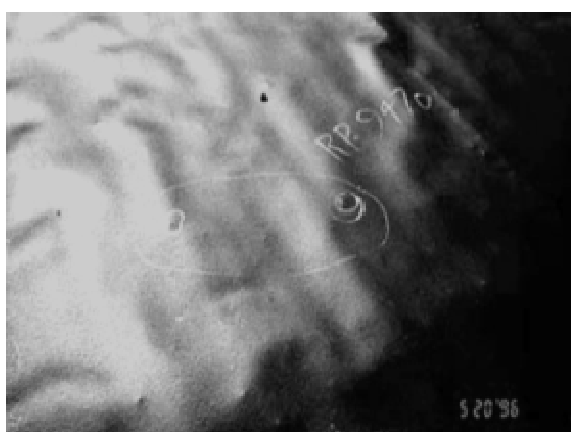
Com o uso de métodos elétricos para detecção de furos em geomembranas, Nosko & Touze-Foltz (2000) avaliaram a ocorrência de danos durante a etapa de instalação da geomembrana no sistema de impermeabilização basal de aproximadamente 300 aterros sanitários, totalizando uma área de 3.250.000 m². Neste estudo foi verificada a quantidade de perfurações, a causa e o diâmetro destas perfurações na superfície da geomembrana.

A maior parte dos danos foi ocasionada pelo puncionamento das britas utilizadas na execução do sistema de drenagem. Foram verificadas 4194 perfurações, com média de um defeito a cada 800 m², sendo que o diâmetro perfurado variava de 0,5 a 10,0 cm.

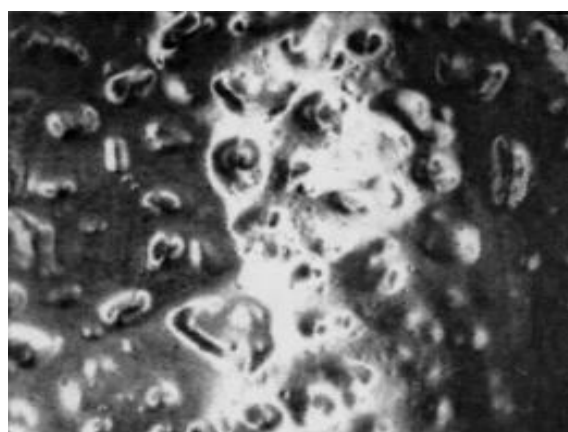
Os esforços de punção, que podem ocasionar perfurações ou deformações na superfície da geomembrana, podem ocorrer em duas etapas distintas:

- **Danos em curto prazo** – estes danos ocorrem durante a fase de instalação da geomembrana e são ocasionados pelo lançamento da brita do sistema de drenagem, queda de objetos e tráfego de maquinário e pessoas durante a etapa de instalação da manta;
- **Danos em longo prazo** – os danos em longo prazo ocorrem durante o período de operação do aterro sanitário com o lançamento dos resíduos e as cargas sobrejacentes, da ordem de 500 a 1000 kPa, sobre a superfície da geomembrana.

A Figura 2.12 ilustra os danos ocorridos em geomembranas durante a instalação (a), e os danos devido a ação de sobrecarga na superfície da geomembrana (b).



(a) Danos de instalação



(b) Danos devido à sobrecarga

Figura 2.12 – Danos mecânicos em geomembranas.

Para restringir ou minimizar possíveis danos mecânicos nas geomembranas, deve-se introduzir uma camada de proteção sobre a superfície da mesma. Dentre os materiais empregados para esta finalidade, destacam-se: geotêxteis não-tecidos, tapetes pneumáticos, geocompostos bentoníticos, georredes, tapetes domésticos ou industriais ou uma composição dos materiais descritos acima.

A avaliação da eficiência das camadas de proteção, bem como as filosofias de projeto empregadas para o dimensionamento dos elementos de proteção, ainda não estão completamente estabelecidas no meio técnico. Para a determinação do tipo de proteção que deve ser empregado para restringir danos nas geomembranas, diversos fatores devem ser contemplados, como: a magnitude das tensões a que a geomembrana será submetida, as características dos materiais que poderão ocasionar danos na superfície da geomembrana, as características físicas e mecânicas das geomembranas e dos elementos de proteção, entre outros.

Segundo Reddy & Saichek (1998), os estudos iniciais sobre proteção de geomembranas têm como princípio introduzir geotêxteis de diferentes gramaturas (massa por unidade de área) sobre ou sob a geomembrana para realização de ensaios de impacto e puncionamento, para verificar o incremento de resistência do elemento com a introdução deste geotêxtil de proteção.

Ensaio conduzidos por Budka *et al.* (2007) simularam a etapa de instalação de geomembranas de PEAD em uma base de solo compactado, com a construção de um campo experimental de 540 m². Para a avaliação da eficiência das camadas de proteção, foram empregados geotêxteis de diferentes gramaturas, espessuras e resistência, para a proteção da geomembrana. Foi executada uma camada com brita, empregando-se uma configuração com brita angular e outra com brita arredondada. Os danos foram ocasionados pela movimentação de caminhões e tratores sobre estas camadas de brita.

A avaliação dos danos foi realizada através de análises visuais das geomembranas e ensaios de tração bi-axial (multidirecional). Verificou-se que as britas angulares ocasionam danos mais contundentes quando comparadas às britas mais arredondadas, e que a ocorrência de danos reduz a resistência à tração bi-axial das geomembranas analisadas.

Estudos realizados por Tognon *et al.* (2000), avaliaram a deformação da superfície das geomembranas devido à incidência de partículas de brita. Através de um novo método proposto, foram comparados os resultados obtidos com os correspondentes ao método tradicional do arco de alongamento.

Com base nas deformações determinadas pelos autores, comparou-se o desempenho de alternativas de proteção para geomembranas, tais como geotêxteis não-tecidos e um colchão de geotêxteis preenchido com areia ou borracha. Os melhores desempenhos foram verificados para as alternativas com o colchão preenchido com areia ou borracha, com deformações da ordem de 1,0%. Para as alternativas de proteção em que se utilizou geotêxteis não-tecidos, foram observadas deformações próximas a deformação de escoamento da geomembrana utilizada, da ordem de 13%.

Em estudo apresentado por Jones *et al.* (2000), foram realizados ensaios de carregamento estático, de acordo com as diretrizes propostas pela Agência Ambiental Britânica (UK Environment Agency). Neste estudo foi avaliada a influência da gramatura e do processo de fabricação dos geotêxteis não-tecidos empregados como camadas de proteção para geomembranas de PEAD.

Com base nos resultados, verificou-se que o desempenho das camadas de proteção não pode ser quantificado em função apenas da gramatura do elemento. Segundo os autores, parâmetros como o tipo e a qualidade das fibras, o processo de entrelaçamento dos fios e a resistência dos elementos possuem influência significativa no desempenho dos geotêxteis como alternativas de proteção.

Atualmente, há duas filosofias difundidas no meio técnico para avaliar o desempenho das camadas de proteção. A filosofia americana é baseada na prevenção de danos em curto prazo, onde deve-se garantir que o alongamento não ultrapasse o ponto de escoamento das geomembranas sem que ocorram perfurações. A filosofia alemã, baseada na prevenção de danos em longo prazo, procura restringir deformações na superfície da geomembrana que possam acelerar processos de ruptura frágil, como o fenômeno de fissuramento sob tensão (FST).

2.4.1 Prevenção de Danos Mecânicos em Curto Prazo

A filosofia americana que procura restringir a ocorrência de danos mecânicos na superfície da geomembrana em curto prazo foi proposta por pesquisadores da Universidade de Drexel (EUA), através de um extenso programa experimental, com base em ensaios de puncionamento hidrostático.

Para a prevenção destes danos mecânicos são empregados geotêxteis com baixas e médias gramaturas (de 250 a 600 g/m²), para evitar que o alongamento não ultrapasse o ponto de escoamento da geomembrana, e conseqüentemente evitar a ocorrência de rasgos ou perfurações na geomembrana.

Para avaliar a eficiência de camadas de proteção, o programa de pesquisa executado foi dividido em uma base teórica, um programa experimental de puncionamento hidrostático e desenvolvimento de uma equação para o projeto de camadas de proteção e exemplos de aplicação, apresentados em um conjunto de artigos elaborados por Wilson-Fahmy, Narejo e Koerner (1996).

Para compreensão dos aspectos que levam a ruptura da geomembrana quando estas estão sob carregamento hidrostático e submetidas à esforços de punção, foram admitidas as seguintes hipóteses por Wilson-Fahmy *et al.* (1996):

- A geomembrana não possui dobras ou regiões de maior rigidez;
- A geomembrana possui comportamento elástico-linear;
- Na região de contato da geomembrana com o elemento protuberante, é admitido que as tensões atuantes possuam a mesma ordem de grandeza;
- No contato da geomembrana com o elemento protuberante, o atrito é reduzido;
- As tensões de tração no contato da geomembrana com a base serão nulas;
- As forças resultantes da geomembrana, na porção que esta encontra-se em suspensão, estarão relacionadas com o raio formado pela circunferência da deformação;
- O efeito do coeficiente de Poisson é desprezado.

Com base nas relações de equilíbrio para um elemento infinitesimal, foi obtida a equação 2.1:

$$2\pi(R_i - x)p_i ds = 2F_i \operatorname{sen}\left(\frac{d\psi}{2}\right) \quad (2.1)$$

Onde:

$(R_i - x)$: raio da ponta do elemento protuberante;

ds : comprimento da corda do elemento;

i : posição da geomembrana no momento analisado;

p_i : pressão aplicada na superfície do material;

F_i : força tangencial aplicada na geomembrana, em função da circunferência formada;

$d\psi$: ângulo formado pela intersecção do prolongamento das tangentes.

A Figura 2.13 ilustra a geometria dos elementos analisados na avaliação das tensões solicitantes à superfície da geomembrana.

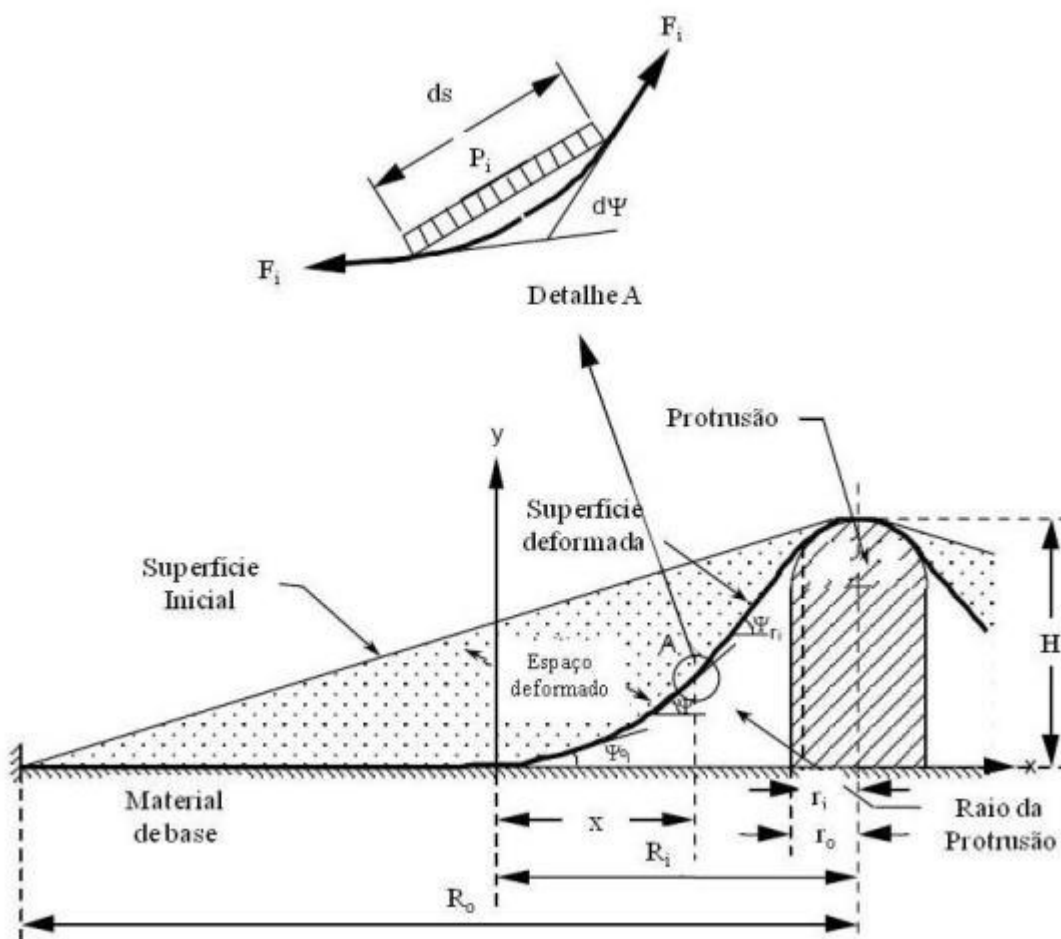


Figura 2.13 – Representação geométrica para análise das tensões e deformações nas geomembranas (WILSON-FAHMY *et al.*, 1996).

Com base na equação e geometria apresentadas foi avaliado o comportamento dos materiais utilizados na pesquisa (geomembranas e geotêxteis) e a influência de suas propriedades. As considerações feitas por Wilson-Fahmy *et al.* (1996), a partir das análises realizadas para a continuidade dos estudos, estão apresentadas a seguir:

- A altura da protusão simula o diâmetro de britas isoladas em uma base;
- O raio da protusão relaciona-se com o grau de arredondamento das britas;
- Relações de R_o/H superiores a 4,0 representam britas isoladas;

- A base com cones espaçados representa uma altura igual a 1,5 da maior dimensão da brita;
- A resistência do conjunto ao puncionamento aumenta com a redução do diâmetro e o maior arredondamento das britas, além do emprego de materiais com maior espessura.

Os procedimentos experimentais são apresentados por Narejo *et al.* (1996). O programa experimental foi realizado com o ensaio de carregamento hidrostático, com cones truncados. Os testes foram conduzidos em uma câmara circular de pressão, onde foram posicionados os cones em sua base, com a possibilidade de variar a altura exposta dos cones pelo preenchimento da base da câmara com material granular.

Para a realização dos ensaios, foram empregadas geomembranas de PEAD com espessuras de 1,0 a 2,5 mm e geotêxteis não-tecidos com gramatura de 130 a 1350 g/m², sendo estes últimos empregados como camadas de proteção.

Os ensaios demonstraram que há um incremento de resistência ao puncionamento com a introdução de geotêxteis não-tecidos como camada de proteção. As curvas de resistência obtidas demonstraram-se equivalentes tanto para os geotêxteis de PET, quanto para os geotêxteis de PP.

A partir dos resultados obtidos, foi desenvolvida a equação básica do incremento de resistência com o emprego de geotêxteis como camada de proteção, a qual é apresentada a seguir:

$$P_{ADM} = 450 \frac{M}{H^2} \quad (2.2)$$

Onde:

P_{ADM} : pressão resistente pelo conjunto geomembrana/camada de proteção;

M: massa por unidade de área do geotêxtil (g/m²);

H: altura protuberante do cone.

A Figura 2.14 ilustra detalhes do equipamento utilizado pelos pesquisadores no ensaio de punção hidrostática com cone truncado.

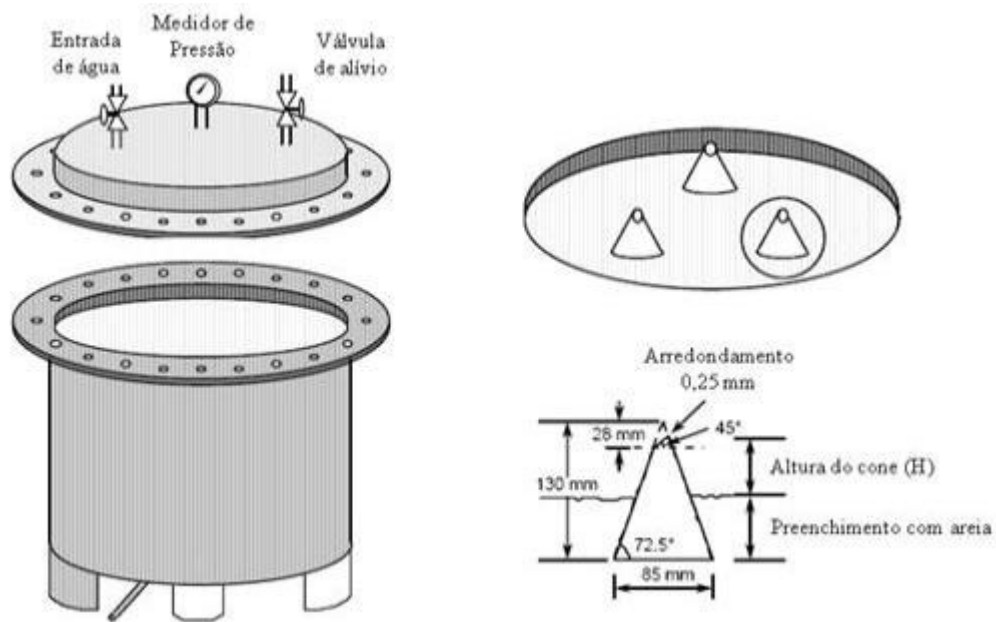


Figura 2.14 – Equipamento de punção hidrostática (NAREJO *et al.*, 1996).

Com base na equação 2.2, foi desenvolvida uma equação para seleção de um geotêxtil como camada de proteção, em função da gramatura do elemento. Para esta equação, foram englobados os fatores de redução devido aos danos mecânicos, a forma e a distribuição das britas, além da redução de resistência dos materiais devido à fluência e à degradação química, física e biológica.

Esta equação proposta por Narejo *et al.* (1996) está apresentada a seguir:

$$P' = \left(450 \frac{M}{H^2} \right) \left(\frac{1}{MF_S \times MF_{PD} \times MF_R} \right) \cdot \left(\frac{1}{FS_{CR} \times FS_{CBD}} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

- P': pressão máxima resistente pelo conjunto;
- MF_S: fator de redução para o formato dos grãos;
- MF_{PD}: fator de redução devido ao espaçamento da brita;

MF_R: fator de redução para o arqueamento do solo;

FS_{CR}: fator de segurança parcial de fluência;

FS_{CBD}: fator de segurança parcial de degradação biológica e química.

Koerner *et al.* (1996) apresenta exemplos de aplicação do método para o emprego de camadas de proteção, onde determina-se a gramatura do geotêxtil a ser empregado, além de descrever o cálculo para determinar o Fator de Segurança obtido. A equação do Fator de Segurança está apresentada a seguir:

$$FS = \frac{P'}{P_{REQ}} \quad (2.4)$$

Onde:

FS: fator de segurança;

P': pressão máxima resistente pelo conjunto;

P_{REQ}: pressão requerida em projeto.

No entanto, esta filosofia de projeto é alvo de questionamentos por diversos autores. Além do fato de este método não considerar o efeito de deformações locais nas geomembranas ao longo do tempo, que podem ocasionar rupturas por fissuramento sob tensão, a seleção das camadas de proteção é baseada na gramatura do geotêxtil.

Estudos apresentados por diversos autores questionam este método de seleção. Jones *et al.* (2000) verificaram que parâmetros como o tipo e a qualidade das fibras, além do método de fabricação dos geotêxteis influenciam no desempenho destas camadas de proteção. Nos ensaios em grande escala conduzidos por Tognon *et al.* (2000), foi verificado o pior desempenho dos geotêxteis empregados como camada de proteção para os materiais selecionados com base na filosofia americana.

2.4.2 Prevenção de Danos Mecânicos em Longo Prazo

A filosofia alemã, muito difundida na Europa, avalia a eficiência das camadas de proteção em função dos danos em longo prazo, devido às cargas sobrejacentes de resíduos. Esta filosofia procura evitar que a concentração de tensões e deformações, principalmente em geomembranas de polietileno, ocasione a ruptura do elemento por fissuramento sob tensão (FST). Esta filosofia sugere o emprego de geotêxteis não-tecidos com elevada gramatura (gramatura $> 2.000 \text{ g/m}^2$) ou camadas de geotêxteis preenchidas com areia ou produtos sintéticos que atuem como elementos de amortecimento.

Para este tipo de análise, o desempenho das camadas de proteção é governado por deformações locais induzidas. O valor da deformação limite estabelecido para geomembranas teve como base ensaios de fluência conduzidos na Alemanha, pelo Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung – BAM (Instituto Federal para Ensaio e Pesquisa de Materiais), os quais determinaram o valor de deformação limite de 0,25%.

A avaliação das camadas de proteção pelo BAM é realizada por um ensaio de compressão estática (*cylinder test*). Os procedimentos experimentais, bem como os requisitos para a verificação do desempenho em longo prazo, em acordo com as regulamentações técnicas da BAM, são descritos por Seeger & Müller (1996).

Para a avaliação do desempenho das camadas de proteção, com base no *cylinder test*, são executadas as seguintes etapas:

- É posicionada a geomembrana sobre uma placa flexível com espessura variando de 0,5 a 1,0 mm, contida num recipiente cilíndrico com diâmetro entre 300 e 500 mm;
- Este conjunto placa/geomembrana é colocado sobre outra placa, mais rígida, com espessura da ordem de 20 mm, que servirá como base durante a realização do ensaio;
- É instalada sobre a geomembrana a camada de proteção a ser avaliada no ensaio;

- É feito o lançamento da brita, que tem como finalidade simular a camada de drenagem horizontal de um aterro sanitário;
- Sobre esta brita, é colocado um geotêxtil de separação, sendo lançada uma camada de areia para o preenchimento total do cilindro;
- É posicionada uma chapa metálica sobre a camada de areia para a execução do carregamento estático.

A Figura 2.15 apresenta a distribuição das camadas para a execução do ensaio de carregamento estático.

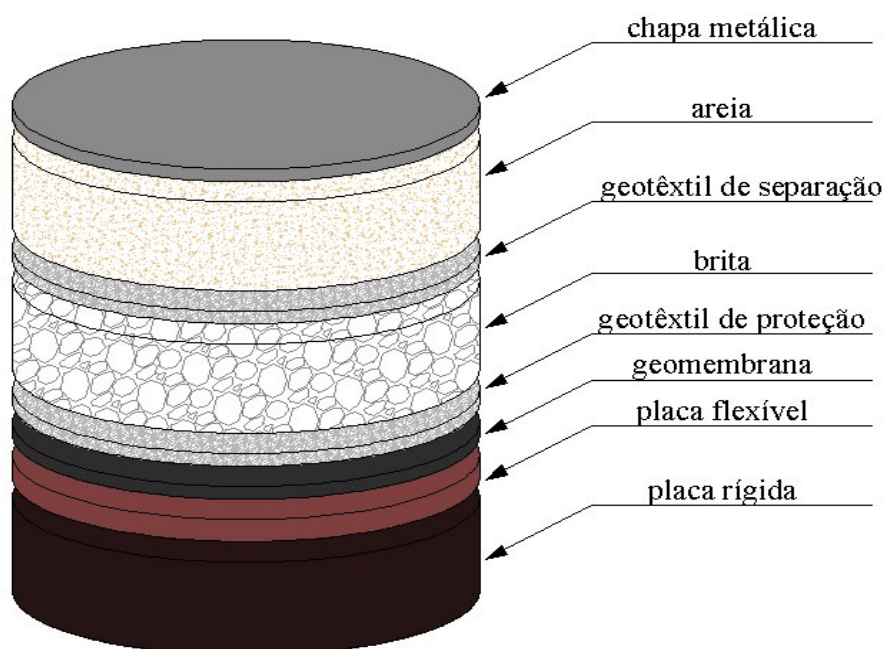


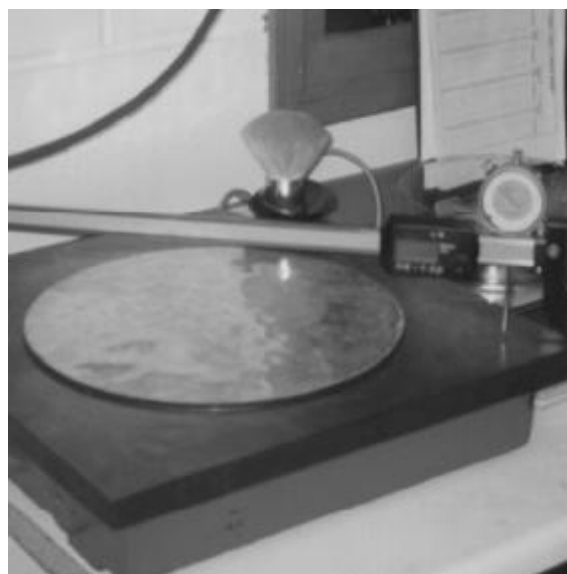
Figura 2.15 – Ilustração da distribuição das camadas para o ensaio de danos em geomembranas.

O carregamento estático é monitorado através de células de carga instaladas na base do cilindro. Após um período de carregamento de 1.000 h, a placa é removida e as deformações são avaliadas.

A Figura 2.16 apresenta o equipamento utilizado para a execução do ensaio (a), além da placa metálica (b) utilizada para determinar as deformações ocorridas na superfície da geomembrana.



(a) Vista geral do equipamento



(b) placa metálica para análise de deformações

Figura 2.16 – Equipamentos utilizados no ensaio de compressão estática (SHERCLIFF, 1998).

Neste método, é aplicado um fator de correção de carga em função das condições experimentais, que procuram simular as condições de carregamento *in situ*. Os fatores de correção do carregamento em função da temperatura e do tempo de duração do ensaio estão apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Fatores de correção de carregamento.

Condições de ensaio	Fator de correção
1.000h, 40° C	1,50
1.000h, 23° C	2,25
100h, 23° C	2,50

Conforme citado anteriormente, as normas do BAM estabelecem que a magnitude das deformações medidas na geomembrana devem ser inferiores a 0,25%. Após a remoção das placas de carregamento e após um período de 24 horas, a superfície da geomembrana deve ser observada visualmente para analisar as deformações ocorridas no material. O material empregado como camada de proteção apresenta-se como mais eficiente quando não são observadas deformações visíveis nestas análises.

Contudo, verificam-se ressalvas para a aplicação desta filosofia de projeto, principalmente quanto ao valor limite admitido para deformações nas geomembranas. Nos ensaios de carregamento estático em grande escala conduzidos por Tognon *et al.* (2000), foi verificado que nenhum dos tipos de proteção empregados foi capaz de apresentar deformações inferiores a 0,25%.

A medida de deformações desta magnitude envolve um mecanismo complexo, associado às características de relaxação/deformação das geomembranas com o tempo, além da necessidade da utilização de um método de interpretação de deformações adequado, o que torna extremamente difícil a determinação destas deformações em campo.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais (naturais e sintéticos) e ensaios de danos em geomembranas isoladas ou com camadas de proteção. Neste capítulo, estão descritos os equipamentos e materiais utilizados, além dos resultados dos ensaios de caracterização dos geotêxteis não-tecidos, geomembranas, britas e solo empregados nos diferentes ensaios.

3.1 SOLOS UTILIZADOS

Foram utilizados dois tipos de solo nesta pesquisa. O solo 1 corresponde a uma areia argilosa, sendo esta utilizada como base compactada para o ensaio de carregamento estático. O solo 2 é uma areia média a fina, empregado como alternativa de proteção para geomembranas no ensaio de carregamento estático.

Para a caracterização das propriedades dos solos utilizados, foram realizados os ensaios apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Ensaios de caracterização dos solos.

Ensaio	Norma	Amostras ensaiadas
Granulometria	NBR 7181	Solo 1 e Solo 2
Compactação	NBR 7182	Solo 1
Massa específica dos sólidos	NBR 6508	Solo 1 e Solo 2
Índice de vazios máximo	NBR 12004	Solo 2
Índice de vazios mínimo	NBR 12051	Solo 2
Classificação dos solos (SUCS)	ASTM D 2487	Solo 1 e Solo 2

3.1.1 Ensaios de Caracterização dos Solos

Para a classificação dos solos em função do diâmetro de suas partículas, foi realizado o ensaio de análise granulométrica. A primeira etapa consiste na realização do peneiramento mecânico, para determinar a curva granulométrica da fração grossa dos solos. Devido à presença de partículas finas ($\varnothing < 0,075$ mm) no solo 1, foi realizado o ensaio de sedimentação com água destilada para as partículas finas deste solo (análise granulométrica conjunta).

A Figura 3.1 apresenta as curvas granulométricas do solo 1 e do solo 2.

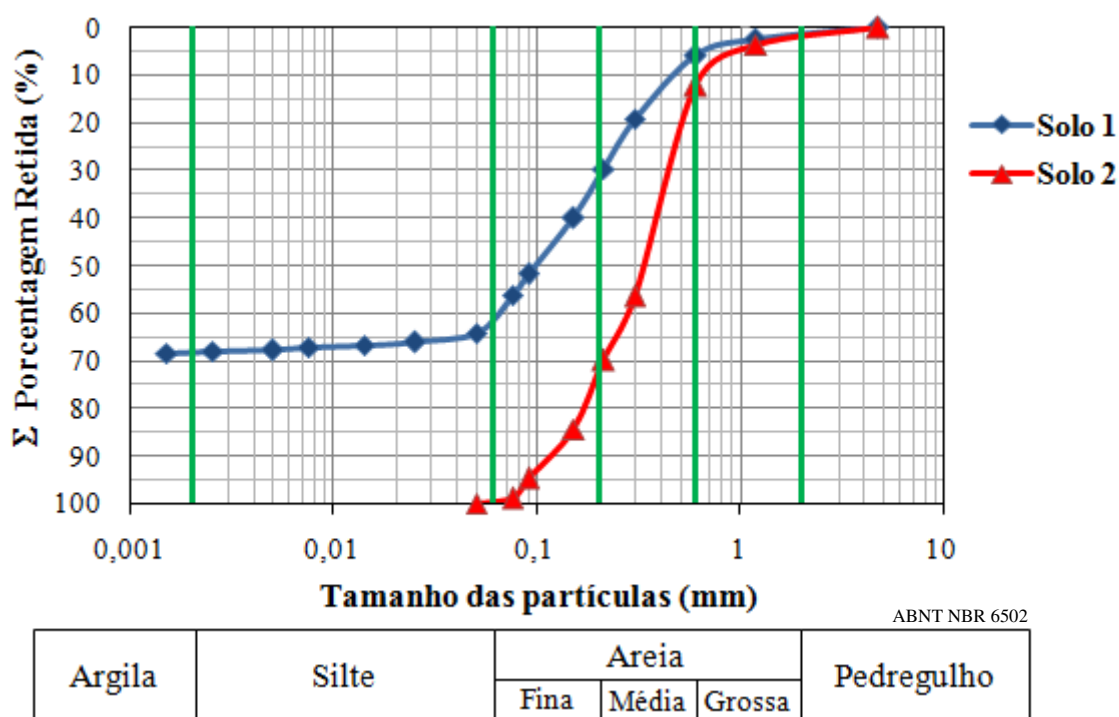


Figura 3.1 – Curvas granulométricas do solo 1 e solo 2.

A execução de uma base compactada depende dos parâmetros ótimos do solo. Para a obtenção destes parâmetros, realizou-se o ensaio de compactação Proctor para o solo 1 (areia argilosa). A Figura 3.2 apresenta a curva de compactação, o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo para o solo 1.

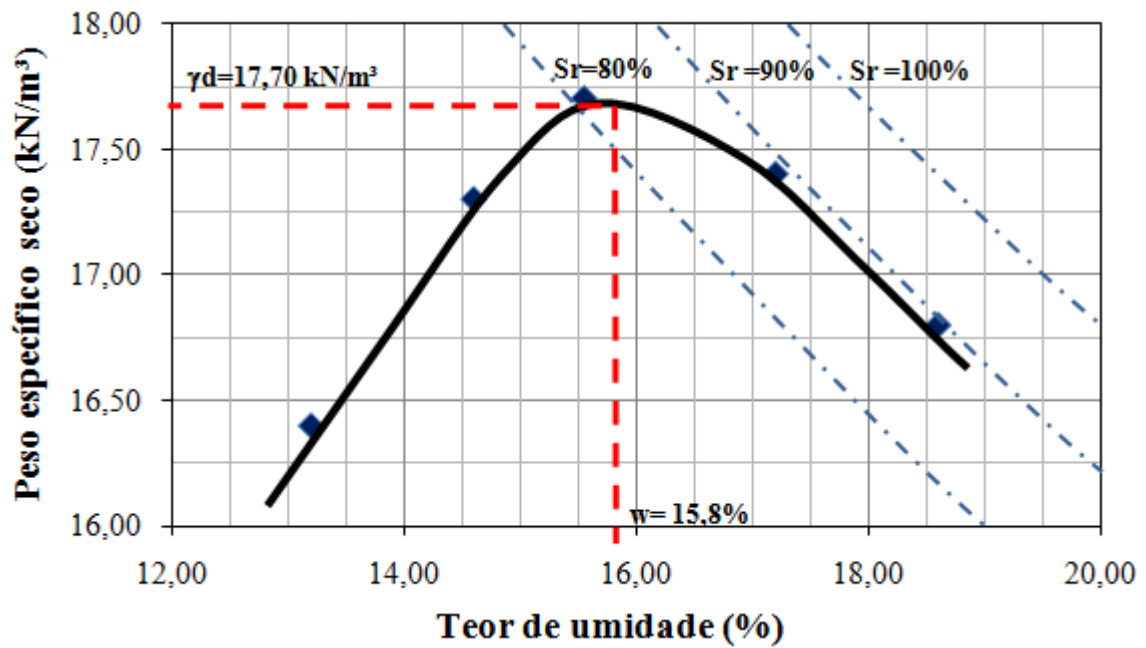


Figura 3.2 – Curva de compactação do solo 1.

Os equipamentos utilizados para a determinação do peso específico dos sólidos e para realização do ensaio de compactação relativa para o solo 2 estão apresentados na Figura 3.3.



(a) Picnômetro - ensaio para determinação do peso específico dos sólidos.



(b) Cilindro para determinação da compactação relativa dos solos.

Figura 3.3 – Equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização dos solos.

O resumo das características geotécnicas e a classificação dos solos, segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características geotécnicas dos solos utilizados.

Propriedade	Unidade	Solo 1	Solo 2
Peso específico dos sólidos	kN/m ³	26,97	26,71
Peso específico seco máximo	kN/m ³	17,70	17,10
Teor de areia grossa	%	6,00	12,00
Teor de areia média	%	24,00	58,00
Teor de areia fina	%	32,00	28,00
Teor de silte	%	5,00	2,00
Teor de argila	%	33,00	-
Teor de umidade ótimo	%	15,80	-
Índice de vazios máximo		-	0,78
Índice de vazios mínimo		-	0,52
Classificação SUCS		SC	SW

3.2 AGREGADOS UTILIZADOS

Nesta pesquisa, foram utilizados dois tipos de agregados. Para o ensaio de danos em geomembrana, foi utilizado um agregado graúdo, classificado como brita 3, enquanto que para o preenchimento da câmara de pressão no ensaio de puncionamento hidrostático, foi utilizado um agregado miúdo, classificado como brita 0.

Estes agregados são provenientes de rochas basálticas da formação Serra Geral pertencente ao Grupo São Bento da bacia do Paraná. Estes agregados basálticos apresentam coloração cinza escura e estrutura isotrópica compacta fanerítica fina.

Os agregados provenientes de rochas basálticas da formação Serra Geral foram utilizados em diversas pesquisas no departamento de geotecnia da Escola de Engenharia de

São Carlos. Desta forma, para introduzir as características dos agregados utilizados, serão apresentados dados de ensaios conduzidos no laboratório de mecânica das rochas. A Tabela 3.3 apresenta a caracterização físico-mecânica das rochas basálticas da formação Serra Geral, realizada por Pehovaz-Alvarez (2004).

Tabela 3.3 – Características físico-mecânicas do basalto Serra Geral.

Propriedade	Unidade	Paralelo	Perpendicular
Resistência à compressão uniaxial	MPa	376,85	346,27
Resistência à tração indireta	MPa	17,67	15,49
Módulo de Elasticidade	GPa	84,55	84,69
Coefficiente de Poisson		0,23	0,23
Velocidade sônica	km/s	5,94	6,59
Porosidade	%		0,46
Absorção	%		0,16
Densidade seca	g/cm ³		2,92

Para este estudo, além das propriedades físico-mecânicas dos agregados, faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros do formato e angularidade das arestas dos agregados graúdos para a avaliação pós-dano na superfície das geomembranas.

A ocorrência de perfurações e rasgos, na geomembrana, torna-se mais freqüente no contato com agregados de maior diâmetro e arestas mais angulares, onde há maior deformação do material e onde a perfuração ocorre de forma mais incisiva. A Tabela 3.4 apresenta os ensaios realizados para a caracterização do diâmetro e forma dos agregados.

Tabela 3.4 – Ensaios realizados nos agregados utilizados na pesquisa.

Ensaio	Norma	Amostras ensaiadas
Granulometria ($\varnothing < 4,8$ mm)	NBR 7181	Brita 0
Granulometria ($\varnothing > 4,8$ mm)	DNER-ME083	Brita 3
Índice de forma dos agregados	NBR 7809	Brita 3
Grau de esfericidade	Ábaco de Rittenhouse	Brita 3
Grau de angularidade	Ábaco de Russel & Taylor	Brita 3

3.2.1 Ensaios de Caracterização dos Agregados

Para a classificação dos agregados em função do diâmetro de seus grãos, foram realizados ensaios de análise granulométrica. Para o agregado miúdo, foi utilizado um sistema de peneiras similar ao utilizado no ensaio de peneiramento mecânico para solos, enquanto que para o agregado graúdo, foi utilizado um conjunto de peneiras de maiores dimensões, em função do grande volume e diâmetro dos grãos ensaiados.

A Figura 3.4 apresenta os equipamentos de peneiramento mecânico utilizados para a execução dos ensaios de análise granulométrica para os agregados miúdos e graúdos.



(a) Conjunto de peneiras para agregados miúdos



(b) Conjunto de peneiras para agregados graúdos

Figura 3.4 – Conjunto de peneiras e mesa vibratória para o ensaio de análise granulométrica.

As curvas granulométricas do agregado miúdo, classificado como brita 0, e do agregado graúdo, classificado como brita 3, estão apresentadas na Figura 3.5.

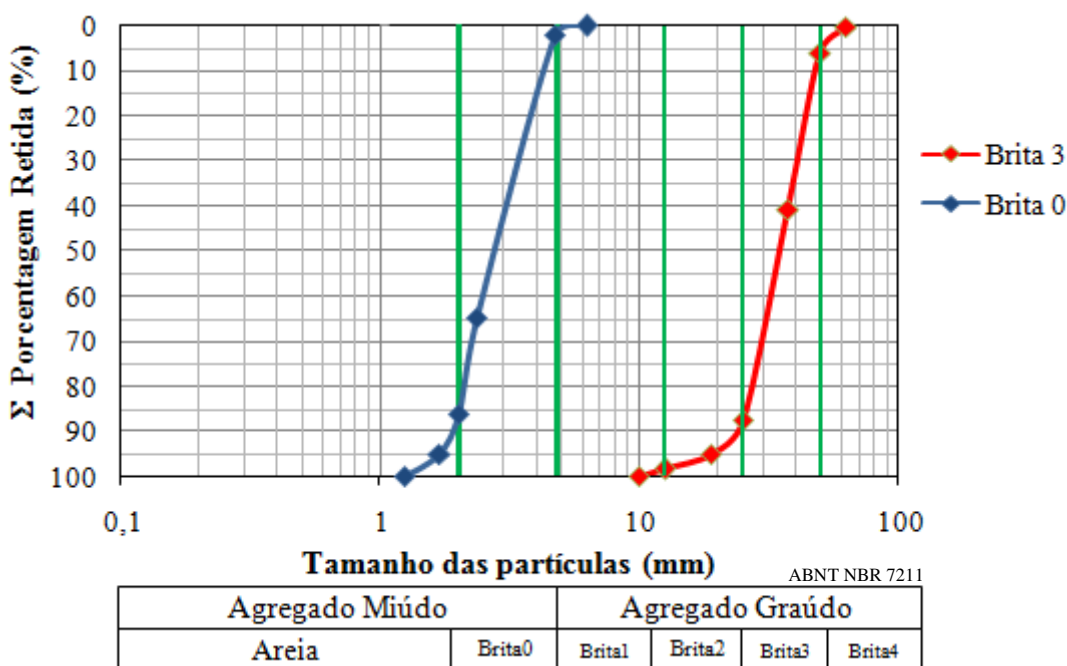


Figura 3.5 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados.

Para os agregados graúdos (brita 3), foram realizados os ensaios para a determinação da forma, grau de esfericidade e angularidade dos grãos. Estas propriedades influenciam diretamente na ocorrência e magnitude dos danos mecânicos na superfície da geomembrana.

Para caracterização da forma dos agregados, plotou-se o gráfico de frequência dos pares de valores “c/b” em função de “b/a”, onde o caractere “a” é a maior dimensão do agregado, “b” a dimensão intermediária e “c” a menor. A Figura 3.6 ilustra o método de execução do ensaio para determinar a forma dos agregados com o uso de um paquímetro.

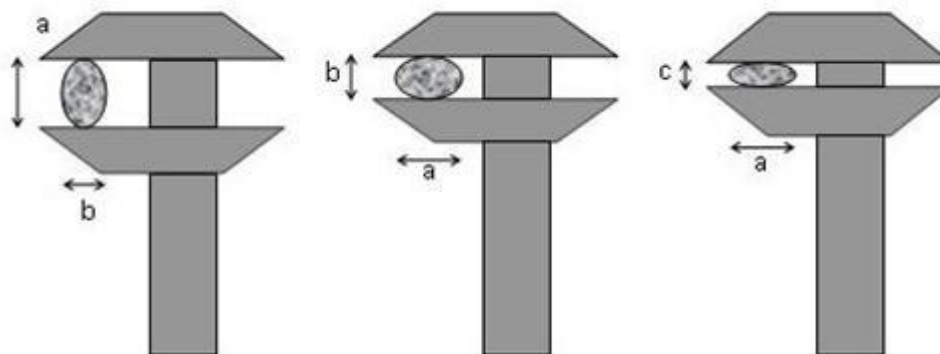


Figura 3.6 – Método do paquímetro para determinação da forma dos agregados.

A Figura 3.7 apresenta o gráfico de frequência da forma dos agregados graúdos. Neste ensaio, verificou-se que os agregados graúdos apresentam forma cúbica a lamelar.

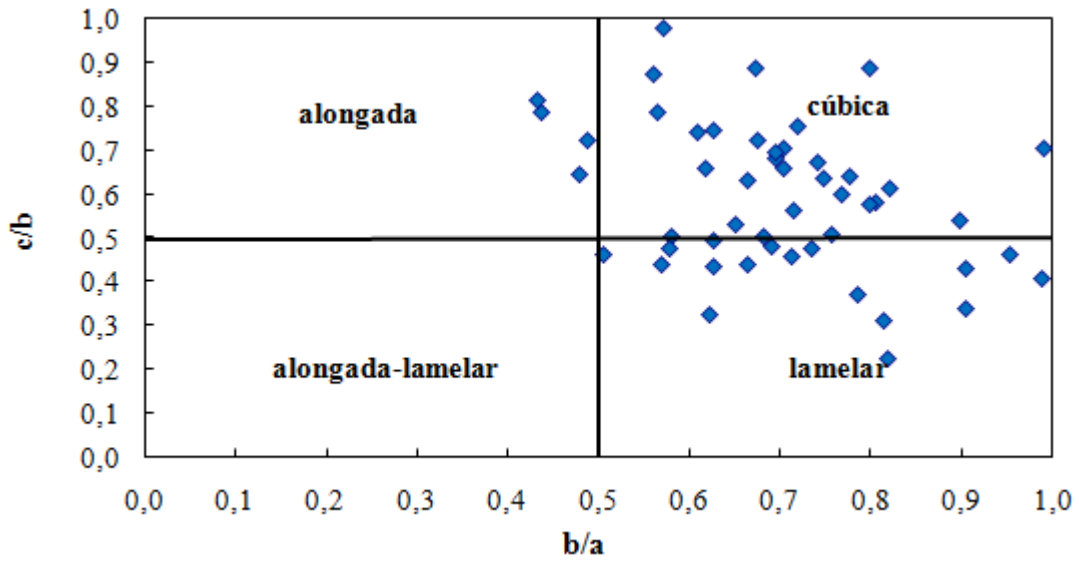


Figura 3.7 – Gráfico de frequência da forma dos agregados graúdos.

Para determinar o grau de esfericidade e de angularidade dos grãos, foram realizadas análises visuais comparativas, com base nos ábacos de Rittenhouse (a), para determinar o grau de esfericidade, e de Russel & Taylor (b), para a angularidade, sendo ilustrados na Figura 3.8.

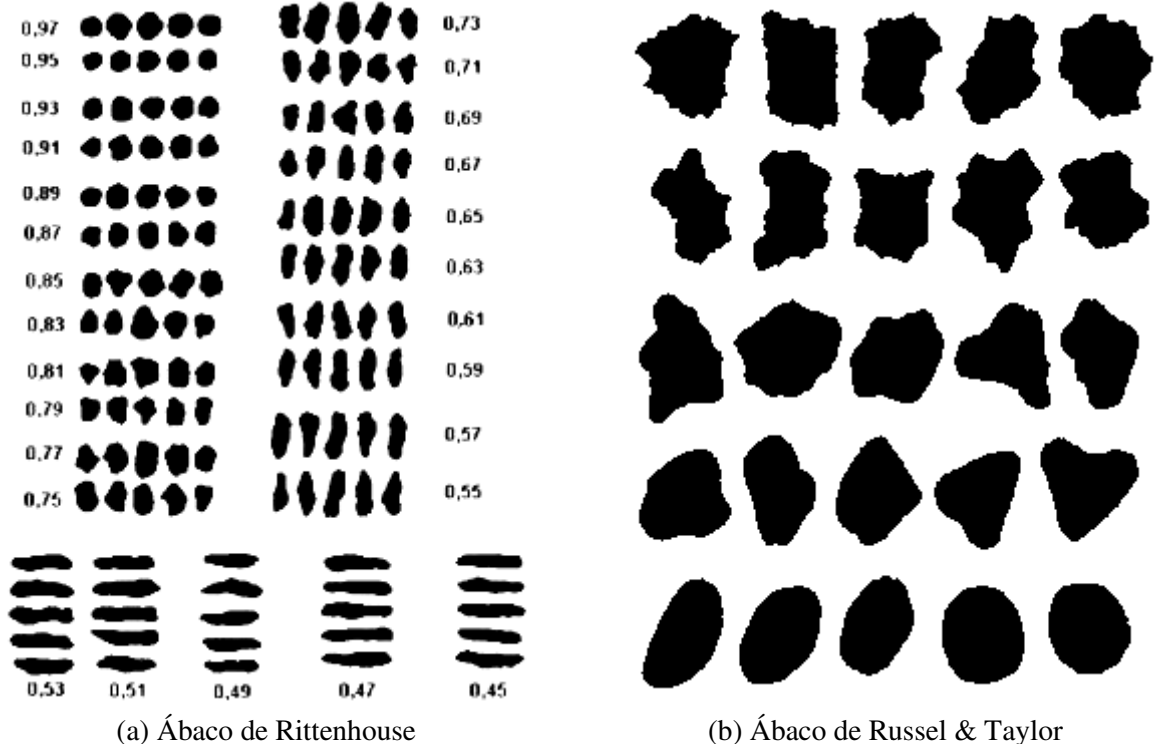


Figura 3.8 – Ábacos utilizados nas análises visuais da forma dos agregados (SUGUIO, 1973).

Com base nas análises visuais comparativas, foi determinado para os agregados graúdos utilizados nos ensaios de danos, um grau de esfericidade de 0,70, onde valores mais próximos de 1,0 indicam partículas mais arredondadas, como observado no ábaco de Rittenhouse (1943) *apud* Suguio (1973).

Em relação ao grau de arredondamento dos agregados graúdos utilizados na pesquisa, estes materiais apresentaram-se como subangulares a angulares, onde o grau de angularidade pode variar de altamente arredondado, arredondado, subarredondado, subangular e angular, no sentido ascendente do ábaco de Russel & Taylor (1937) *apud* Suguio (1973).

A Figura 3.9 apresenta um detalhe do agregado graúdo (a) utilizado nos ensaios de dano em geomembranas e o método de análise visual comparativa das amostras, com o auxílio de um retroprojektor (b).



(a) Detalhe dos agregados graúdos



(b) Projeção dos agregados para análise

Figura 3.9 – Método de análise visual dos agregados graúdos.

3.3 GEOMEMBRANAS

Nesta pesquisa, foram utilizadas geomembranas de PVC (policloreto de vinila) com espessuras de 1,0 e 2,0 mm e de PEAD (polietileno de alta densidade) com espessuras de 1,5 e 2,0 mm. A escolha deve-se ao fato de estas serem as difundidas no meio técnico, além de atenderem aos requisitos mínimos para a execução de emendas. A Figura 3.10 apresenta os tipos de geomembranas utilizadas nesta pesquisa.

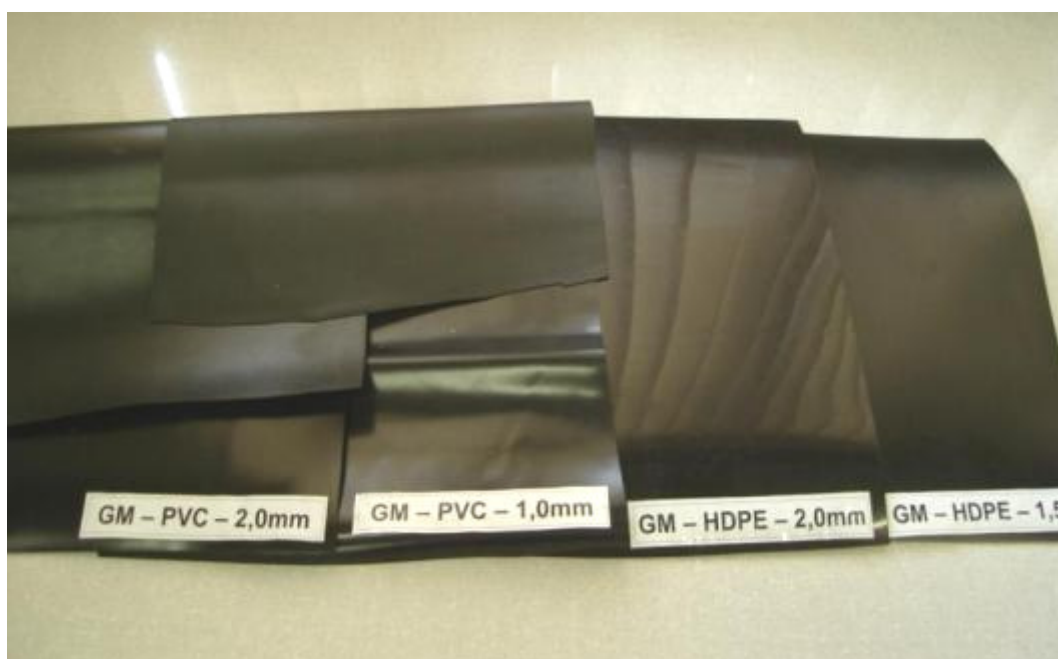


Figura 3.10 – Geomembranas utilizadas na pesquisa.

Para a caracterização das propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas, as geomembranas de PEAD e PVC foram submetidas a ensaios realizados no Laboratório de Geossintéticos da EESC/USP. Também foram realizados ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC) para determinar o teor de cristalinidade das amostras, e o ensaio de desempenho de fissuramento sob tensão, também denominado *Stress Cracking*.

A Tabela 3.5 apresenta os ensaios realizados nas geomembranas e as respectivas normas utilizadas.

Tabela 3.5 – Ensaaios realizados para caracterização das geomembranas.

Propriedade	Norma	Amostras ensaiadas
<i>Física</i>		
Espessura nominal	ASTM D 5199	PEAD e PVC
Densidade específica	ASTM D 792	PEAD e PVC
<i>Hidráulica</i>		
Permeabilidade a vapor d'água	ASTM E 96	PEAD e PVC
<i>Mecânica</i>		
Puncionamento estático	ASTM D 4833	PEAD e PVC
Puncionamento dinâmico	NBR 14971	PEAD e PVC
Resistência a rasgos	ASTM D 1004	PEAD e PVC
Resistência a tração (haltere)	ASTM D 6693	PEAD
Resistência a tração (tiras)	ASTM D 882	PVC
<i>Desempenho</i>		
Fissuramento sob tensão (<i>Stress Cracking</i>)	ASTM D 5397	PEAD
<i>Análise Térmica</i>		
Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	ASTM E 928	PEAD

3.3.1 Ensaaios de Caracterização das Propriedades Físicas

Para a caracterização das propriedades físicas das geomembranas, foram realizados ensaios de espessura nominal e densidade.

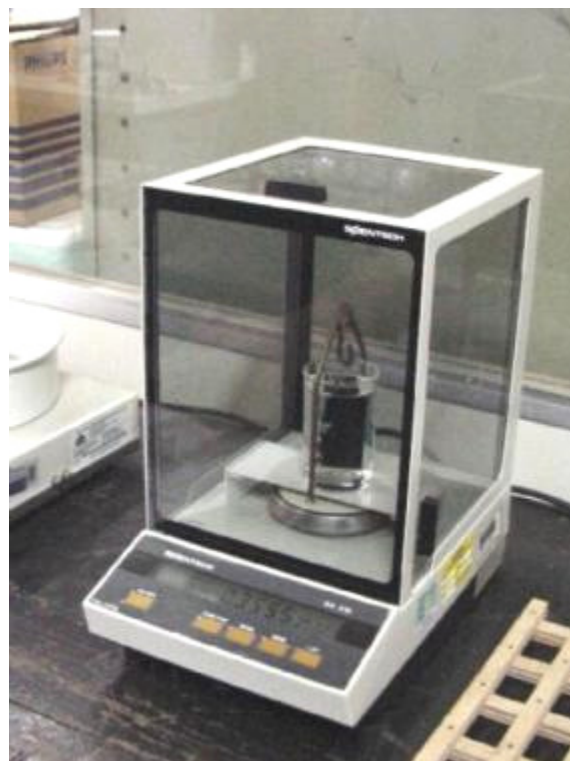
A espessura nominal das geomembranas foi determinada com um equipamento constituído por um relógio comparador acoplado a uma base metálica e com um disco metálico que aplica uma pressão de 20 kPa na superfície da geomembrana.

Para determinar a densidade das amostras de geomembranas utilizadas, foi verificada a variação da massa seca do corpo de prova em relação à massa do mesmo corpo de prova imerso em água destilada, de acordo com o Princípio de Arquimedes.

Os equipamentos utilizados para a caracterização física das geomembranas estão apresentados na Figura 3.11. A execução do ensaio para determinar a espessura das geomembranas está ilustrada na Figura 3.11 (a), enquanto que a Figura 3.11 (b) apresenta a determinação da massa da geomembrana imersa em água, para a determinação da densidade dos materiais.



(a) Equipamento para determinação da espessura das geomembranas



(b) Balança utilizada para determinação da densidade das geomembranas

Figura 3.11 – Equipamentos utilizados no ensaio de caracterização das propriedades físicas de geomembranas.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física para o conjunto de amostras de geomembranas de PEAD e PVC estão apresentados na Tabela 3.6.

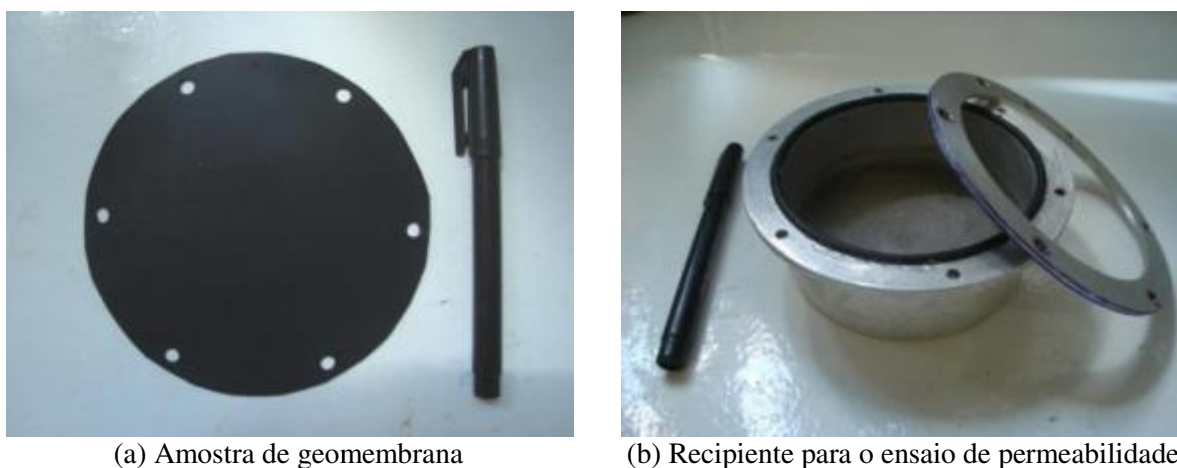
Tabela 3.6 – Características físicas das geomembranas utilizadas.

Propriedade	Unidade	PEAD		PVC	
		1,5	2,0	1,0	2,0
Espessura	mm	1,517	1,948	1,009	1,918
Densidade	g/cm ³	0,949	0,947	1,320	1,295

3.3.2 Ensaios de Caracterização das Propriedades Hidráulicas

As geomembranas são materiais de baixa permeabilidade, o que torna difícil quantificar a permeabilidade destes elementos pelos métodos tradicionais. Assim, para quantificar a permeabilidade destes materiais, é empregado o ensaio de permeabilidade a vapor d'água. Neste ensaio, os corpos de prova são acoplados a um recipiente com o fundo preenchido por água, onde é verificada a variação da massa do conjunto, em determinados intervalos de tempo, para condições de temperatura e umidade do ar conhecidas.

O detalhe da amostra utilizada e os recipientes utilizados para a determinação da permeabilidade a vapor das geomembranas estão apresentados na Figura 3.12.



(a) Amostra de geomembrana

(b) Recipiente para o ensaio de permeabilidade

Figura 3.12 – Materiais utilizados no ensaio de permeabilidade a vapor d'água.

Os resultados obtidos no ensaio para caracterização das propriedades hidráulicas das geomembranas estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Características hidráulicas das geomembranas utilizadas.

Propriedade	Unidade	PEAD		PVC	
		1,5	2,0	1,0	2,0
Permeância	g/Pa.s.m ²	$1,83 \cdot 10^{-10}$	$9,18 \cdot 10^{-11}$	$1,15 \cdot 10^{-9}$	$6,01 \cdot 10^{-10}$
Permeabilidade	g/Pa.s.m	$2,77 \cdot 10^{-13}$	$1,79 \cdot 10^{-13}$	$1,16 \cdot 10^{-12}$	$1,15 \cdot 10^{-12}$
	cm/s	$2,04 \cdot 10^{-13}$	$1,32 \cdot 10^{-13}$	$8,53 \cdot 10^{-11}$	$8,45 \cdot 10^{-11}$

3.3.3 Ensaios de Caracterização das Propriedades Mecânicas

Para a caracterização das propriedades mecânicas das geomembranas foram realizados os ensaios de: i) resistência ao puncionamento dinâmico, onde foi verificada a abertura do furo na superfície da geomembrana; ii) resistência ao puncionamento estático; iii) resistência a propagação de rasgos; iv) resistência a tração em geomembranas de PEAD, com o uso de amostras em forma de haltere, onde determinou-se a resistência ao escoamento e a ruptura dos materiais; e v) resistência a tração em amostras de PVC, com amostras em forma de tiras com 25 mm de largura, para se determinar a resistência a ruptura destes materiais.

Nestes ensaios, salvo o ensaio de puncionamento dinâmico, foi utilizada uma prensa mecânica que permite controlar as condições de contorno (velocidade, força e critérios de paralisação), além da aquisição e armazenamento dos dados através da conexão a um computador. A Figura 3.13 ilustra o equipamento utilizado para os ensaios de caracterização mecânica das geomembranas.



Figura 3.13 – Prensa mecânica utilizada nos ensaios de caracterização mecânica.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica das geomembranas estão apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Características mecânicas das geomembranas utilizadas.

	Unidade	PEAD		PVC		
		1,5	2,0	1,0	2,0	
Puncionamento estático	N	709,80	744,00	314,80	559,60	
	mm	19,20	12,49	23,02	22,48	
Puncionamento dinâmico	mm	3,89	2,95	3,32	0,60	
Rasgo	Long.	N	242,70	289,20	40,93	79,31
	Trans.	N	247,60	294,00	49,42	90,35
Tração - Escoamento	Long.	N/mm	32,47	36,26	-	-
		%	15,52	16,41	-	-
	Trans.	N/mm	34,76	38,56	-	-
		%	14,25	15,55	-	-
Tração - Ruptura	Long.	N/mm	48,72	60,30	16,89	29,95
		%	790,70	766,90	394,20	474,50
	Trans.	N/mm	47,29	57,19	13,83	27,07
		%	784,90	784,80	364,60	482,20

3.3.4 Ensaio de Fissuramento sob Tensão (FST)

As geomembranas, em particular as de PEAD, podem fissurar de maneira frágil quando submetidas a tensões de tração inferiores a sua máxima resistência mecânica e em contato com fluidos agressivos. Para analisar este fato, foi realizado o ensaio de fissuramento sob tensão, com corpo de prova ranhurado sob carga constante.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de fissuramento sob tensão (*Stress Cracking*) está apresentado na Figura 3.14.



Figura 3.14 – Equipamento utilizado no ensaio de FST.

Este ensaio é realizado com apenas um estágio de carga, onde é verificado o tempo de ruptura médio de 5 corpos de prova. Para a execução do ensaio, as amostras foram imersas em uma solução com temperatura de 50°C e concentração de 90% de água para 10% de Igepal CO 630, e aplicou-se uma carga de 30% da tensão de escoamento obtida no ensaio de tração. A Tabela 3.9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de fissuramento sob tensão com carga constante para as geomembranas de PEAD com 1,5 e 2,0 mm de espessura.

Tabela 3.9 – Resultados do ensaio de FST das geomembranas de PEAD utilizadas.

Amostra	Tensão de escoamento (MPa)	n° de amostras	Tempo de ruptura (horas)
PEAD 1,5	20,73	5	190
PEAD 2,0	18,48	5	> 300

De acordo com os resultados observados no ensaio de fissuramento sob tensão, as geomembranas de PEAD com espessura de 1,5 mm não atendem os critérios prescritos pelo Geosynthetic Research Institute (GRI), que estabelece um tempo mínimo para a ruptura do elemento de 300 horas.

3.3.5 Ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

O ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) é utilizado para caracterizar o comportamento térmico dos materiais poliméricos por meio de uma análise térmica quantitativa. Quando ocorrem alterações térmicas no corpo de prova, a sua temperatura apresenta uma variação em relação à temperatura da referência inerte, onde podem ser verificadas as transições endotérmicas (como fusão) e exotérmicas (como cristalização), com picos em direções opostas no termograma. No ensaio de DSC são obtidos o ponto de fusão (T_m), a cristalinidade (através de calor de fusão), a taxa de cristalização, estabilidade de oxidação, temperatura de transição vítrea (T_g) e vaporização.

A Figura 3.15 apresenta o resultado do ensaio de DSC para a geomembrana de PEAD com espessura de 1,5 mm, enquanto que a Figura 3.16 apresenta o resultado do ensaio para a geomembrana de PEAD com 2,0 mm de espessura.

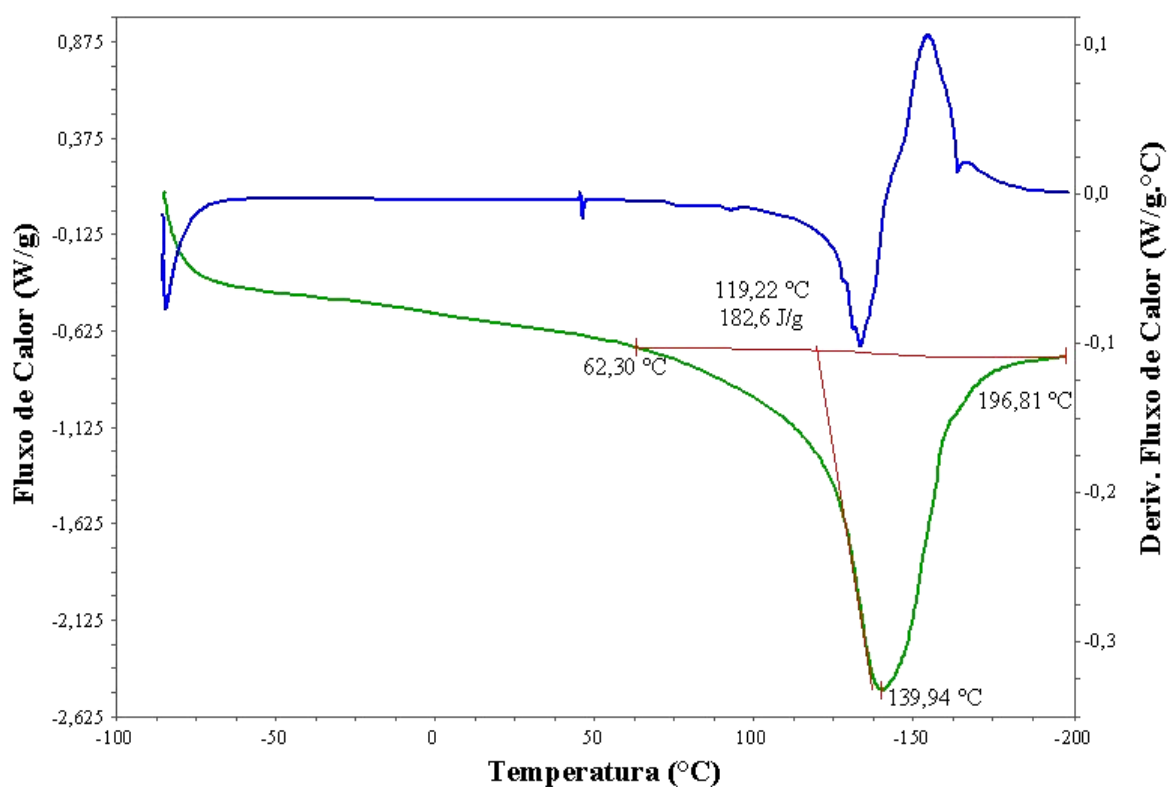


Figura 3.15 – Ensaio de DSC para geomembrana de PEAD com 1,5 mm.

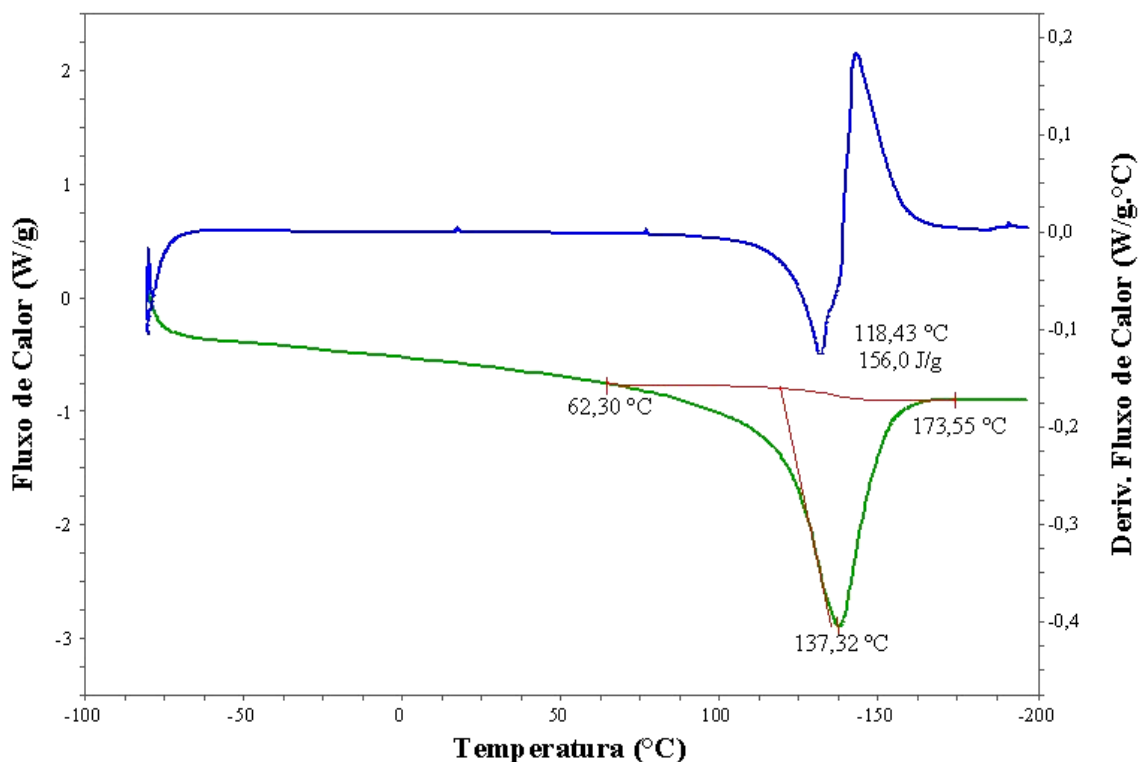


Figura 3.16 – Ensaio de DSC para geomembrana de PEAD com 2,0 mm.

A cristalinidade é obtida comparando-se o valor de ΔH da amostra com o valor teórico de ΔH para 100% de cristalinização que para o HDPE é de 285 J/g. No ensaio de DSC, para as amostras de PEAD com espessura de 1,5 mm, o calor de fusão obtido foi de 182,6 J/g, e cristalinidade de 64,03%. Para o caso da geomembrana de PEAD com espessura 2,0 mm, foi determinado o calor de fusão de 156,0 j/g, e percentagem cristalina de 54,74%.

Este teor de cristalização, acima dos valores esperados para o caso da geomembrana de PEAD com espessura de 1,5 mm, influencia diretamente as propriedades mecânicas e de desempenho deste material. As geomembranas com alta cristalinidade possuem maior resistência mecânica, com o pico observado em menores deformações, e são mais suscetíveis ao fenômeno de fissuramento sob tensão (*Stress Cracking*), como observado nos resultados apresentados na Tabela 3.9. Para a geomembrana de PEAD com espessura de 2,0 mm, a percentagem cristalina encontra-se dentro da faixa de valores esperados para este material.

3.4 GEOTÊXTEIS NÃO-TECIDOS

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados geotêxteis não-tecidos de fibra curta de poliéster (PET) e polipropileno (PP). Os geotêxteis não-tecidos de PET utilizados nesta pesquisa possuem gramatura de 150, 300, 400 e 600 g/m², enquanto que o geotêxtil não-tecido de PP utilizado possui gramatura de 600 g/m². A Figura 3.17 apresenta os geotêxteis não-tecidos utilizados.



Figura 3.17 – Geotêxteis não-tecidos utilizados na pesquisa.

Foram realizados ensaios para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos geotêxteis não-tecidos de PP e PET utilizados como camadas de proteção para geomembranas. A Tabela 3.10 apresenta os ensaios realizados para a caracterização dos geotêxteis não-tecidos utilizados.

Tabela 3.10 – Ensaio realizados para caracterização dos geotêxteis não-tecidos.

Propriedade	Norma	Amostras ensaiadas
<i>Física</i>		
Espessura nominal	NBR 12569	PET e PP
Massa por unidade de área	NBR 12568	PET e PP
<i>Mecânica</i>		
Puncionamento estático (CBR)	NBR 13359	PET e PP
Puncionamento estático	ASTM D 4833	PET e PP
Puncionamento dinâmico	NBR 14971	PET e PP
Resistência a tração – faixa larga	NBR 12824	PET e PP
Resistência a tração – grab	ASTM D 4632	PET e PP
Resistência a propagação de rasgos	ASTM D 4533	PET e PP

3.4.1 Ensaio de Caracterização das Propriedades Físicas

Foram realizados os ensaios de espessura nominal e massa por unidade de área (gramatura) para a caracterização das propriedades físicas dos geotêxteis não-tecidos.

A gramatura dos geotêxteis não-tecidos foi determinada com o uso de uma balança digital, onde determinou-se a massa de dez amostras com geometria conhecida, sendo que a gramatura corresponde à média dos valores obtidos.

A espessura nominal das geomembranas foi determinada com o uso de um equipamento semelhante ao utilizado para o ensaio em geomembranas, com um relógio comparador acoplado a uma base metálica, com a variante que o disco metálico utilizado neste ensaio aplica uma pressão de 2 kPa na superfície das amostras.

A Figura 3.18 (a) apresenta o equipamento utilizado para quantificar a massa por unidade de área (gramatura) das amostras de geotêxtil, enquanto que a Figura 3.18 (b) apresenta o equipamento utilizado para determinar a espessura dos geotêxteis não-tecidos.



(a) Ensaio para determinação da gramatura



(b) Ensaio para determinação da espessura

Figura 3.18 – Equipamentos utilizados para caracterização física dos geotêxteis não-tecidos.

Os resultados médios obtidos nos ensaios para a caracterização física das amostras de geotêxteis não-tecidos utilizados estão apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Características físicas dos geotêxteis não-tecidos utilizados.

Propriedade	Unidade	PET				PP
		150	300	400	600	600
Gramatura	g/m ²	168,3	293,2	353,2	576,4	593,2
Espessura	mm	1,58	2,50	2,19	3,36	4,62

3.4.2 Ensaios de Caracterização das Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos geotêxteis não-tecidos foram caracterizadas através de ensaios de resistência à tração faixa larga, resistência à tração tipo grab, resistência a propagação de rasgos e ensaios de puncionamento dinâmico e estático.

A prensa mecânica utilizada para a caracterização mecânica dos geotêxteis não-tecidos, bem como o aparato utilizado para a realização do ensaio de puncionamento estático com pistão de 50 mm de diâmetro, estão apresentados na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Execução do ensaio de puncionamento estático (CBR).

Nesta pesquisa, para a determinação da resistência ao puncionamento dos geotêxteis não-tecidos, além dos ensaios convencionais para determinar a resistência ao puncionamento estático e dinâmico, optou-se por realizar o ensaio de puncionamento estático similar ao realizado para as geomembranas.

Para o ensaio de resistência ao puncionamento dinâmico, verificou-se o diâmetro de abertura de um furo devido à queda de um cone com geometria, massa e altura de queda padronizadas. No ensaio de puncionamento estático (CBR), foi verificada a resistência das amostras e o deslocamento até a ruptura devido à penetração de um pistão de diâmetro igual a 50 mm, enquanto que para o ensaio de puncionamento estático, similar ao utilizado para caracterizar as geomembranas, verificou-se a resistência e o deslocamento para a penetração de um pistão fresado com diâmetro de 8 mm nas amostras de geotêxteis não-tecidos.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos geotêxteis não-tecidos utilizados estão apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Características mecânicas dos geotêxteis não-tecidos utilizados.

Propriedades	Unidade	PET				PP	
		150	300	400	600	600	
Rasgo	Long.	N	194,80	363,90	480,40	620,60	730,20
	Trans.	N	183,90	235,30	271,10	488,10	451,40
Tração Faixa Larga	Long.	N/mm	7,05	9,94	10,92	21,96	21,87
		%	68,95	93,49	73,64	77,68	82,18
	Trans.	N/mm	6,79	13,24	21,60	26,70	37,20
		%	98,53	92,56	55,40	75,64	62,33
Tração Grab	Long.	N	385,60	551,00	711,40	1249,00	1346,00
		%	77,95	96,98	79,33	83,74	89,83
	Trans.	N	360,70	661,60	1082,00	1491,00	1761,00
		%	93,68	90,08	60,28	84,89	64,12
Puncionamento Estático - CBR (Ø de 50 mm)		kN	0,98	1,82	2,67	3,79	5,06
		mm	51,37	58,85	50,67	58,05	56,45
Puncionamento Estático (Ø de 8 mm)		N	212,70	329,80	534,80	717,80	1106,00
		mm	17,06	19,02	17,60	20,68	23,39
Puncionamento Dinâmico	Ø	mm	124,00	94,00	73,00	51,00	22,00

3.5 ENSAIOS ÍNDICE

Os ensaios índice têm por finalidade investigar mecanismos básicos do comportamento de geotêxteis como camadas de proteção para geomembranas. Estes ensaios têm como vantagens a simplicidade, a rapidez de execução e o baixo custo.

3.5.1 Puncionamento Estático

O ensaio de puncionamento estático, em acordo com a norma ASTM D 4833, tem como finalidade obter a resistência do conjunto geomembrana/camada de proteção ao puncionamento promovido por uma haste metálica. A Figura 3.20 apresenta o equipamento utilizado para a realização do ensaio de puncionamento estático.



Figura 3.20 – Equipamento utilizado no ensaio de puncionamento estático.

A partir do ensaio índice de punção estático, pode-se verificar o incremento de resistência à punção, com a introdução de camadas de proteção com resistência e gramatura distintas. O ensaio é realizado em um molde cilíndrico vazado com 45 mm de diâmetro, onde é posicionado o conjunto geomembrana/camada de proteção, sendo este submetido a um esforço de punção por uma haste metálica com diâmetro de 8 mm a uma velocidade de 300 mm/min. Neste ensaio, é determinada a máxima força e o deslocamento do pistão no momento da ruptura das amostras ensaiadas.

Para a realização deste ensaio, foi posicionada uma geomembrana com um geotêxtil de proteção sobre o molde cilíndrico, sendo os elementos travados por uma prensa pneumática de pequeno porte. A Figura 3.21 apresenta o detalhe do pistão utilizado no ensaio, e o sistema pneumático utilizado para o travamento do conjunto geomembrana/camada de proteção no molde cilíndrico.

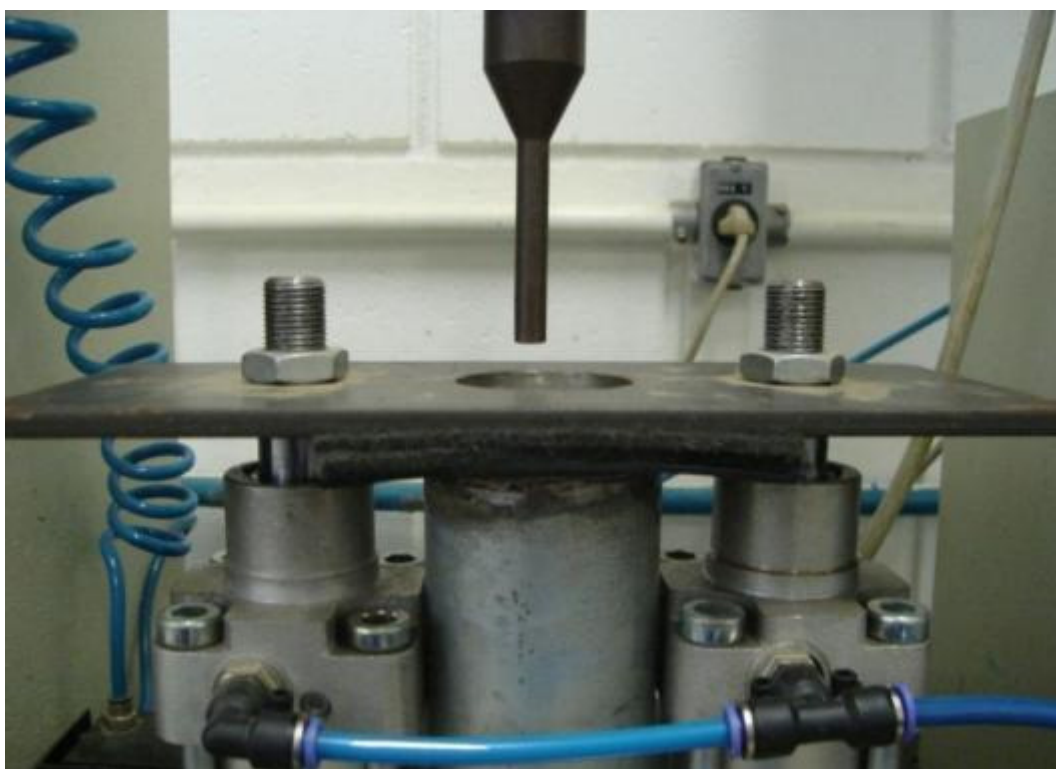


Figura 3.21 – Detalhe do pistão com $\varnothing = 8$ mm e o posicionamento das amostras.

3.5.2 Puncionamento Dinâmico

O ensaio de puncionamento dinâmico, conforme a norma ABNT NBR 14971, tem como finalidade verificar a abertura de perfuração devido à queda de objetos pontiagudos sobre a superfície do geossintético. A Figura 3.22 apresenta o equipamento utilizado para a realização do ensaio de puncionamento dinâmico.



Figura 3.22 – Equipamento utilizado no ensaio de puncionamento dinâmico.

Para a execução do ensaio deve-se fixar a geomembrana e a camada de proteção na base do equipamento. Um cone com massa de 500 gramas, acoplado a uma haste metálica, é desprendido do topo do equipamento a uma altura de 500 mm. A fixação da geomembrana e a sobreposição da camada de proteção no equipamento estão ilustradas na Figura 3.23.



Figura 3.23 – Posicionamento das amostras de geossintéticos na base do equipamento.

Neste ensaio, é verificada a ocorrência de deformações ou perfurações devido ao contato com o cone. Em caso de perfuração, o diâmetro desta abertura deve ser quantificado com o auxílio de um cone metálico e um paquímetro, de modo que, após a verificação do comprimento de penetração deste cone na abertura, este valor é correlacionado com uma tabela que quantifica o diâmetro devido à perfuração deste elemento. A Figura 3.24 apresenta um detalhe da medição devido à perfuração da geomembrana.



Figura 3.24 – Verificação da abertura devido à perfuração da geomembrana.

3.6 ENSAIO DE PUNÇIONAMENTO HIDROSTÁTICO

O ensaio de punçionamento hidrostático, segundo a norma ASTM D 5514, avalia o desempenho das geomembranas e/ou do conjunto geomembrana/camada de proteção, em condições de carregamentos hidrostáticos crescentes e quando submetidos ao punçionamento por materiais (naturais ou sintéticos) posicionados na base de uma câmara de pressão circular.

Foram realizados ensaios de punçionamento hidrostático em geomembranas de PEAD com espessura de 1,5 e 2,0 mm e de PVC com 1,0 e 2,0 mm de espessura, isoladas ou com geotêxteis não-tecidos como camadas de proteção. As configurações de proteção foram concebidas com geotêxteis de PET com gramaturas de 150, 300, 400 e 600 g/m² e PP com 600 g/m², além de uma configuração com a sobreposição de dois geotêxteis de PP com 600 g/m², como camadas de proteção.

3.6.1 Equipamentos Utilizados

Este ensaio foi realizado em uma câmara de pressão circular, com diâmetro interno de 500 mm, que suporta pressões superiores a 1800 kPa. A câmara de pressão pode utilizar em sua base materiais sintéticos (cones truncados) ou materiais naturais (britas).

O procedimento de ensaio com cones truncados procura estabelecer um padrão de ensaio para uso em diferentes laboratórios, com a possibilidade de comparação dos resultados obtidos. O ensaio com materiais naturais (britas, detritos ou solo) tem como finalidade verificar o desempenho das geomembranas isoladas ou com camadas de proteção, para algumas solicitações exercidas por materiais utilizados no local onde será instalada a geomembrana.

A câmara de pressão circular e seus componentes instalados na base e na parte superior podem ser observados na Figura 3.25.



Figura 3.25 – Câmara de pressão utilizada no ensaio de puncionamento hidrostático.

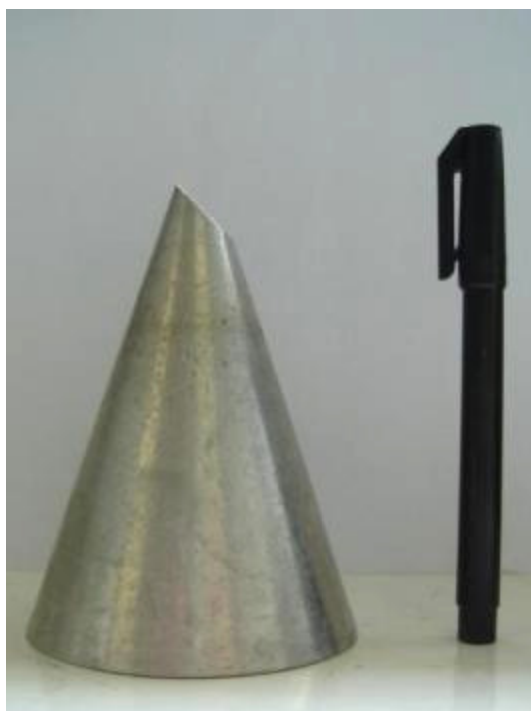
Para o procedimento de ensaio em que são utilizados três cones truncados na base da câmara, a altura crítica dos cones (H_c) pode ser variada com o preenchimento da base com material granular, sendo que a altura crítica dos cones é considerada a altura exposta do elemento acima desta camada de preenchimento. Para a realização dos ensaios de puncionamento hidrostático, foram utilizados, nesta pesquisa, duas variações de altura crítica dos cones (H_c), com alturas expostas de 25 e 37 mm.

A base da câmara de pressão com cones truncados, preenchida com material granular (brita 0), está apresentada na Figura 3.26.

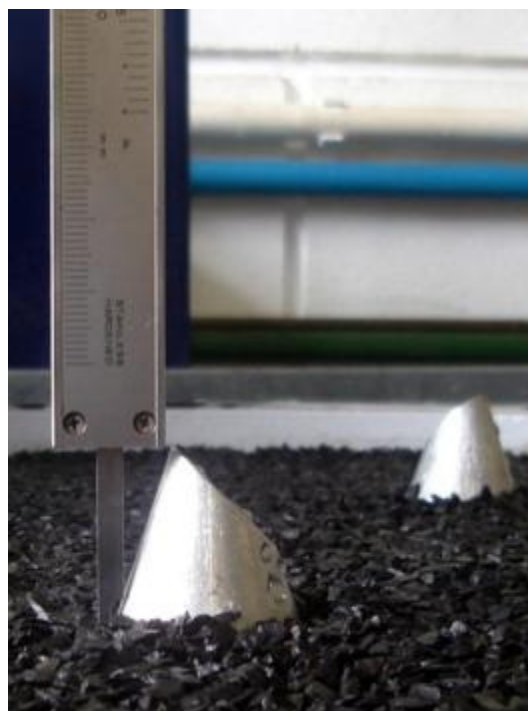


Figura 3.26 – Base com os cones truncados preenchida com material granular.

A Figura 3.27 apresenta o cone truncado utilizado (a) e a verificação da altura crítica do cone (b) para a execução do ensaio.



(a) Detalhe do cone truncado



(b) Verificação da altura crítica

Figura 3.27 – Detalhes dos cones truncados e aferição da altura crítica do cone.

Para a execução dos ensaios de puncionamento hidrostático com materiais naturais, foi confeccionada uma base de argamassa com as dimensões da base da câmara de pressão, onde foram inseridas britas basálticas com formas pontiagudas e lamelares. Estas britas basálticas posicionadas na base com argamassa possuem altura exposta de 30 a 37 mm. A Figura 3.28 apresenta a câmara com a base de materiais naturais.



Figura 3.28 – Base de argamassa com o posicionamento das britas espaçadas.

A Figura 3.29 apresenta o detalhe das britas pontiagudas (a) e lamelares (b) inseridas na base.



(a) Britas pontiagudas



(b) Britas lamelares

Figura 3.29 – Detalhe das britas posicionadas na base de argamassa.

3.6.2 Execução do Ensaio

Para a execução dos ensaios, deve-se posicionar sobre a base com cones truncados ou britas a camada de proteção a ser analisada e sobre esta a geomembrana. A Figura 3.30 ilustra o posicionamento do geotêxtil de proteção e da geomembrana sobre a base com brita.



Figura 3.30 – Posicionamento dos materiais para o ensaio de punção hidrostática.

Após o posicionamento dos materiais no interior da câmara de pressão circular, esta é fechada e, após a verificação dos registros que controlam o fluxo de água, inicia-se o preenchimento da câmara com água. Para o abastecimento do equipamento com água, foi utilizado um reservatório ao lado do equipamento, sendo monitorada a temperatura da água utilizada, para controlar possíveis variações que possam influenciar no resultado final.

Finalizado o preenchimento da câmara de pressão com água do reservatório, dá-se início à etapa de carregamento hidrostático com o auxílio de uma bomba hidráulica que possibilita a aplicação de pressões hidráulicas superiores a 2 MPa.

A Figura 3.31 apresenta o reservatório de água com o termômetro utilizado para o monitoramento da temperatura da água (a) e a bomba hidráulica utilizada para a aplicação de pressões hidrostáticas (b).



(a) Reservatório e monitoramento da temperatura



(b) Bomba hidráulica

Figura 3.31 – Detalhe do reservatório e da bomba hidráulica.

Os carregamentos são realizados com incremento de pressão hidrostática de 15 kPa por minuto. O controle e incremento das pressões aplicadas foram realizados com o auxílio de um conjunto de registros. O registro de controle da saída da bomba está inserido em um sistema de recirculação que permite o controle da vazão e da pressão de saída, além do retorno de água para o reservatório; o registro localizado na entrada da câmara permite o controle fino do incremento de pressão e a manutenção das pressões no interior da câmara.

Para aquisição e controle das pressões no interior da câmara, foi utilizado um sistema composto por um transdutor de pressão acoplado à câmara de pressão, uma fonte de alimentação para o transdutor de pressão, um multímetro para verificar a variação da tensão devido ao incremento de pressão no interior da câmara e um software instalado em um computador para aquisição e conversão das unidades elétricas em unidades de pressão em função do tempo.

Na Figura 3.32, podem ser verificados o transdutor de pressão (a) e o registro para o controle fino das pressões no interior da câmara de pressão (b).



(a) Transdutor de pressão



(b) Registro para controle da pressão

Figura 3.32 – Instrumentos de medição e controle de pressão.

Os equipamentos utilizados para a aquisição e verificação das pressões no interior da câmara de pressão estão apresentados na Figura 3.33.

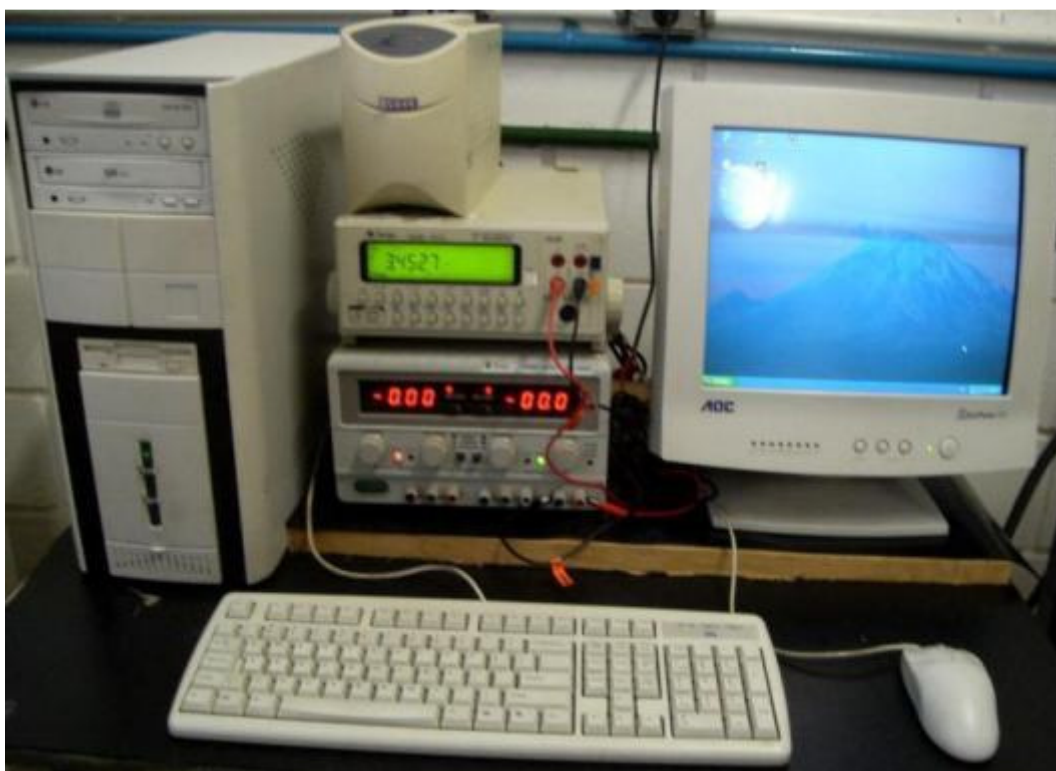


Figura 3.33 – Equipamentos utilizados para a aquisição dos dados.

A determinação do tempo e da pressão na ruptura da geomembrana, além da verificação da expulsão da água pelo dreno da câmara, é feita por uma análise gráfica do carregamento durante a realização do ensaio.

O carregamento hidrostático pode ser verificado através de um gráfico cujos patamares de carregamento são bem definidos. A ruptura do elemento ocasiona variações da pressão no interior da câmara, o que pode ser claramente observado no gráfico de carregamento realizado.

A variação da pressão no interior da câmara em função do tempo, a qual permite determinar o momento da ruptura da geomembrana no ensaio de puncionamento hidrostático, está ilustrada na Figura 3.34.

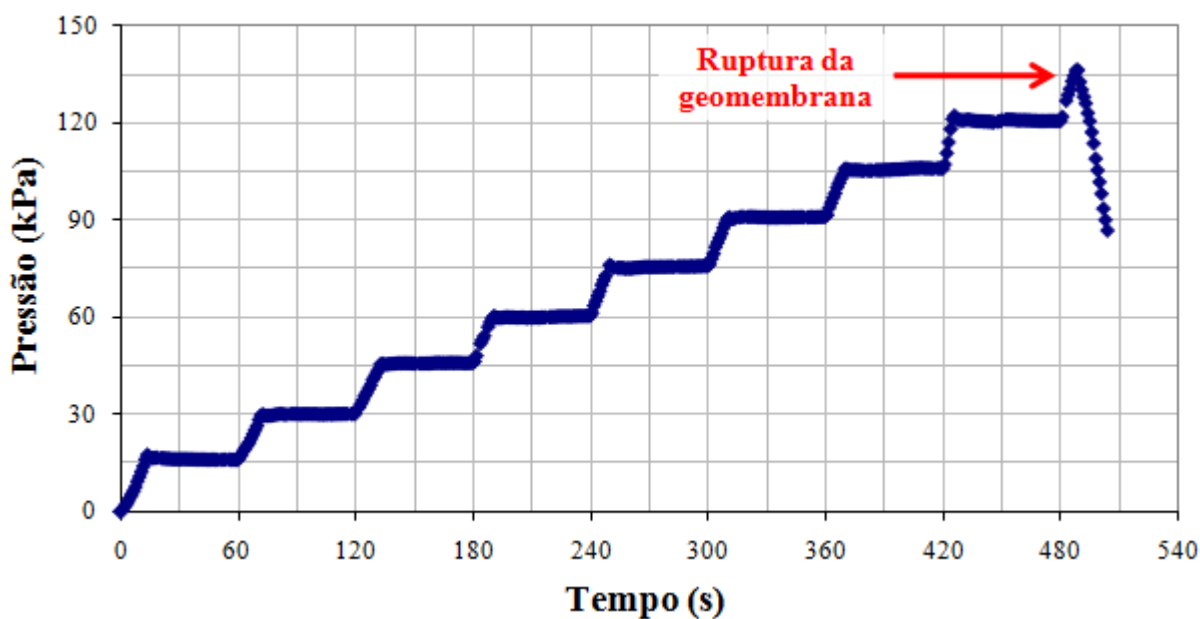


Figura 3.34 – Gráfico de carregamento e determinação da ruptura da geomembrana.

3.7 ENSAIO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO

O ensaio de carregamento estático simula o efeito da carga sobrejacente de resíduos durante o período de operação de um aterro sanitário. Neste ensaio, procura-se reproduzir em laboratório a instalação de uma geomembrana sobre uma base de solo compactado e o contato da superfície da geomembrana com os agregados, que simulam a camada de drenagem horizontal, submetidos a um carregamento estático.

Este ensaio tem como base o ensaio de compressão estática (*cylinder test*) elaborado pelo BAM (1994). Nesta pesquisa, foram utilizadas geomembranas de PEAD e PVC com espessuras de 1,5 mm e 1,0 mm, respectivamente. Estas geomembranas foram submetidas aos carregamentos isoladas ou protegidas com materiais como geotêxteis não-tecidos de PET e PP e uma camada de areia média a fina.

As configurações utilizadas nos ensaios de carregamento estático estão apresentadas na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Configurações utilizadas no ensaio de carregamento estático.

Geomembrana	Tipo de Proteção	Gramatura (g/m ²)
PEAD 1,5	Sem proteção	-
	Geotêxtil não-tecido de PET	300
	Geotêxtil não-tecido de PET	600
	Geotêxtil não-tecido PP	600
	Geotêxtil não-tecido PP	2 x 600
	Areia média a fina	85000
PVC 1,0	Sem proteção	-
	Geotêxtil não-tecido de PET	300
	Geotêxtil não-tecido de PET	600
	Geotêxtil não-tecido PP	600
	Geotêxtil não-tecido PP	2 x 600
	Areia média a fina	85000

3.7.1 Equipamentos Utilizados

Para a realização do ensaio de carregamento estático, foi utilizada uma caixa metálica com dimensões internas de 500 x 500 mm na base e altura de 500 mm. Para facilitar a instalação dos materiais no interior da caixa, esta pode ser dividida em duas partes, com altura de 250 mm cada.

Esta caixa está instalada no interior de um pórtico onde são executados carregamentos com uma prensa servo-controlada. Para garantir o encaixe do pistão da prensa servo-controlada sobre as camadas executadas no interior da caixa, deve-se posicionar uma placa metálica quadrada para a distribuição das tensões por toda a superfície da camada superior de agregados, e espaçadores circulares para o contato do pistão com esta placa metálica.

A Figura 3.35 apresenta a caixa metálica utilizada, mostrando-se o posicionamento das placas metálicas e espaçadores (a) e a central de controle do atuador da prensa (b).



(a) Posicionamento da placa e espaçadores



(b) Central de controle do atuador

Figura 3.35 – Equipamentos utilizados no ensaio de carregamento estático.

3.7.2 Execução do Ensaio

Para simular as características observadas em campo durante a etapa de operação de um aterro sanitário, foram executadas as camadas de base com solo compactado, posicionou-se a geomembrana isolada ou com a camada de proteção e posicionou-se também a camada de drenagem horizontal com os agregados graúdos.

A disposição destas camadas no interior da caixa metálica pode ser observada na Figura 3.36.

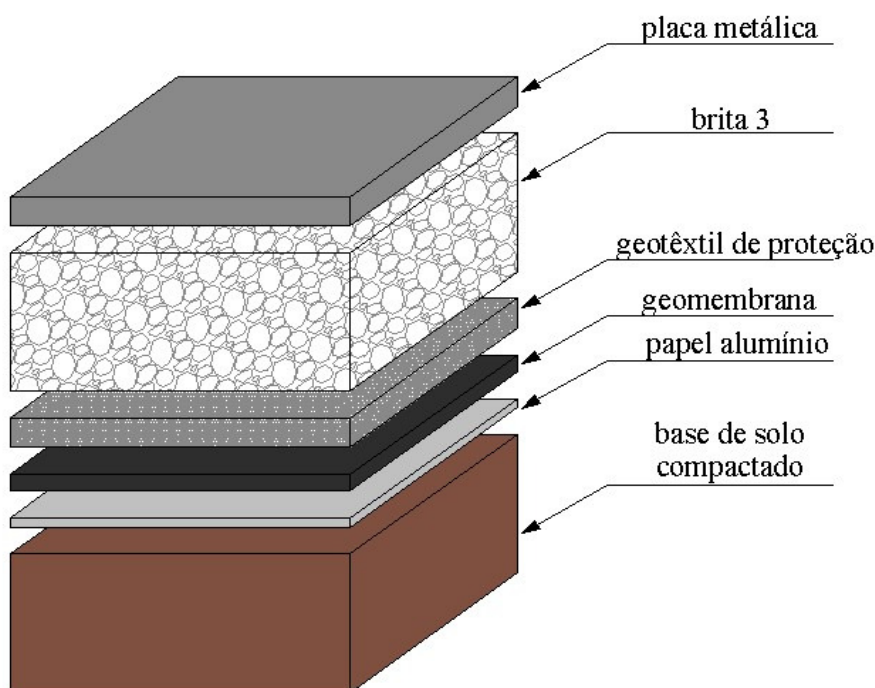


Figura 3.36 – Distribuição esquemática das camadas no ensaio de carregamento estático.

Neste ensaio, a base de solo compactada é constituída por uma areia argilosa com altura total de 250 mm. Para garantir um grau de compactação do solo superior a 98%, a execução da compactação foi realizada em três etapas. Para cada uma destas etapas, as paredes da caixa foram demarcadas e utilizou-se uma quantidade de solo necessário para atingir o grau de compactação pré-definido para este volume na caixa. Após a realização da compactação, foi determinado grau de compactação de 98,1%, para a base compactada.

A Figura 3.37 apresenta a base de solo compactado na parte inferior da caixa metálica.

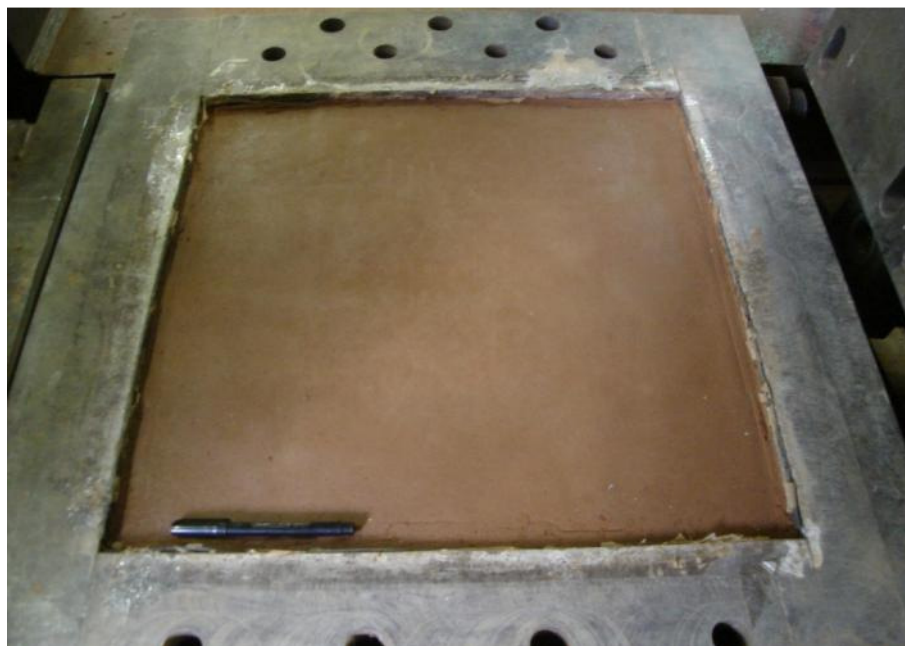


Figura 3.37 – Base de solo compactado.

Foi posicionada sobre a base de solo compactado uma folha de papel alumínio com o intuito de verificar visualmente a magnitude das deformações ocasionadas pelo puncionamento da brita na base de solo compactada. O posicionamento desta folha de papel alumínio pode ser observado na Figura 3.38.

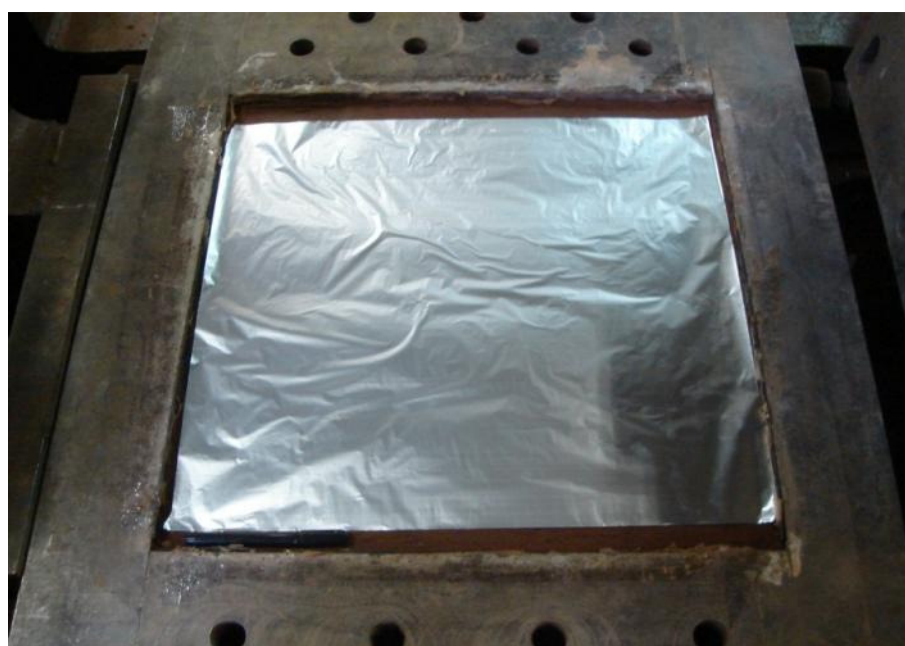


Figura 3.38 – Posicionamento da folha de papel alumínio.

Para cada ensaio de carregamento estático realizado, foram concebidas duas configurações de camada de proteção, com dimensões de 250 x 500 mm para cada configuração. Os carregamentos foram realizados nas geomembranas isoladas, protegidas com geotêxteis não-tecidos de PET e PP e em uma configuração com areia média a fina com espessura de 50 mm.

A Figura 3.39 ilustra o posicionamento da geomembrana e das camadas de proteção sobre a base com solo compactado.

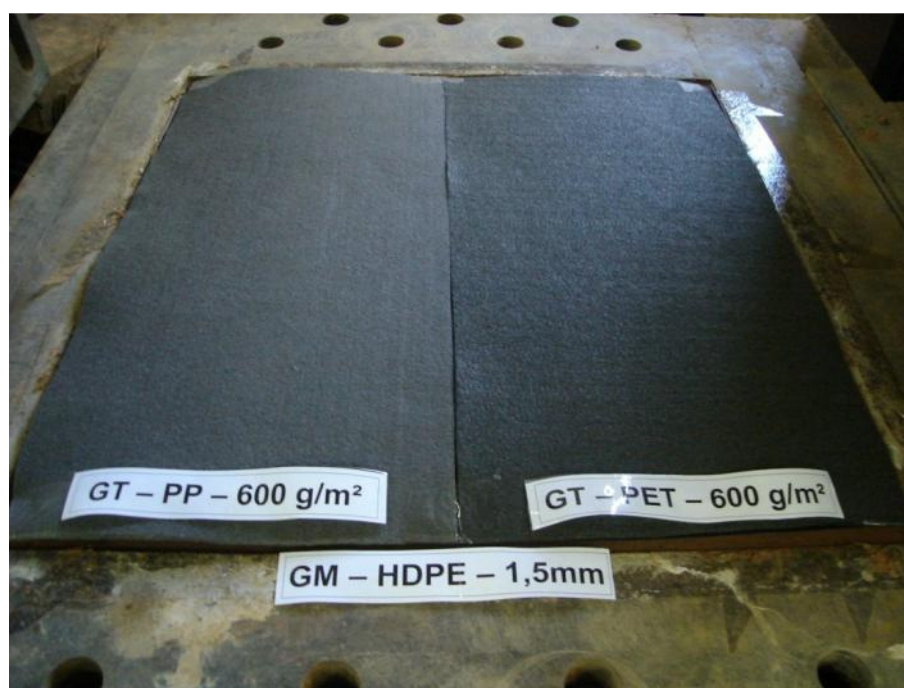
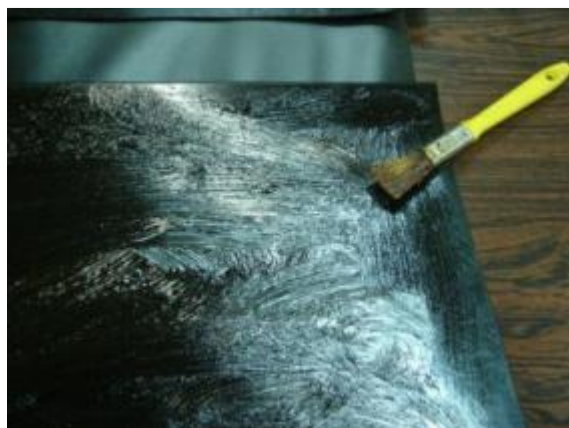


Figura 3.39 – Instalação das camadas de proteção sobre as geomembranas.

Após a instalação da geomembrana e das camadas de proteção sobre a base compactada, foi posicionada a parte superior da caixa metálica para o preenchimento com o material granular (brita 3). Para minimizar o efeito da borda durante a etapa de carregamento, as paredes da caixa metálica foram forradas com duas folhas de geomembrana com uma camada de graxa entre elas.

A Figura 3.40 ilustra o detalhe das geomembranas com a camada de graxa (a) e o posicionamento destas folhas na parede da caixa (b).



(a) Camada de graxa na geomembrana



(b) Forragem das paredes com as folhas de geomembrana com graxa.

Figura 3.40 – Detalhe da preparação das paredes da caixa metálica com geomembranas e graxa.

A caixa metálica foi preenchida em sua porção superior com uma camada de 250 mm de brita 3, com o objetivo de simular a camada de drenagem horizontal de uma aterro sanitário. Sobre a camada de brita 3, foi posicionada a placa metálica para a distribuição uniforme das pressões aplicadas. Para garantir o contato do pistão da prensa servo-controlada com a placa metálica, foram posicionados espaçadores circulares.

O preenchimento da caixa com brita pode ser observado na Figura 3.41.

**Figura 3.41** – Preenchimento da caixa metálica com material granular (brita 3).

A estrutura final do ensaio de carregamento estático após a execução das camadas no interior da caixa e após o posicionamento da placa e dos espaçadores sobre a camada de brita pode ser observada na Figura 3.42.



Figura 3.42 – Posicionamento do pistão sobre os espaçadores para execução do carregamento.

O conjunto geomembrana/camada de proteção foi submetido a uma etapa de carregamento crescente com incremento de 125 kPa por hora, até a pressão máxima de ensaio de 500 kPa, simulando um aterro de resíduos com altura de 50 m e peso específico dos resíduos de 10 kN/m². O ensaio foi realizado por um período total de 100 horas, em que os incrementos de carga foram realizados nas 4 horas iniciais e, nas 96 horas restantes o sistema foi submetido ao carregamento máximo.

Após o período de 100 horas de carregamento, retirou-se o material granular para submeter a geomembrana a inspeções visuais e verificação de perfurações na sua superfície. Em seguida, estes materiais foram submetidos a ensaios pós-dano para verificar variações em suas propriedades mecânicas, hidráulicas e de desempenho.

3.8 ENSAIOS PÓS-DANO

Para avaliar o desempenho das camadas de proteção após a realização do ensaio de carregamento estático, foram realizados os ensaios pós-dano nas geomembranas de PEAD e de PVC. A avaliação pós-dano das geomembranas contempla a verificação da frequência e magnitude das deformações e descontinuidades na superfície das geomembranas, além da execução dos ensaios para verificar possíveis alterações das propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais.

Os métodos de avaliação visual das geomembranas, bem como os ensaios realizados para verificar danos e variação nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais, estão apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Ensaio pós-dano realizados nas geomembranas.

Avaliação	Norma	Descrição
<i>Integridade da Superfície</i>		
Inspeção visual das deformações	-	Verificação da frequência e magnitude das deformações na superfície da geomembrana
Verificação de perfurações	ASTM D 7007	Determinação de perfurações na superfície por métodos elétricos (<i>Spark Test</i>)
<i>Propriedades Hidráulicas</i>		
Permeabilidade a vapor d'água	ASTM E 96	Análise de possíveis variações da permeabilidade das amostras
<i>Propriedades Mecânicas</i>		
Resistência a rasgos	ASTM D 1004	Verificação de variações na resistência a propagação de rasgos
Resistência à tração (haltere)	ASTM D 6693	Análise de possíveis variações na resistência à tração em GM de PEAD
Resistência à tração (tiras)	ASTM D 882	Análise de possíveis variações na resistência à tração em GM de PVC
Resistência à tração multidirecional (adaptado)	-	Verificação do desempenho devido a pressões internas
<i>Desempenho</i>		
Fissuramento sob tensão (<i>Stress Cracking</i>)	ASTM D 5397	Verificação do tempo de ruptura da amostra

3.8.1 Inspeção Visual das Deformações

As análises visuais da superfície da geomembrana foram realizadas após a retirada da camada de agregado graúdo sobrejacente à geomembrana (brita 3) do interior da caixa metálica. Além da inspeção visual do material, também foram feitos registros fotográficos das geomembranas e da base de solo compactado recoberta com a folha de papel alumínio.

A partir destas análises, foi possível quantificar a frequência e a magnitude das deformações na superfície da geomembrana. A forma de classificação dos danos ocorridos na superfície da geomembrana está apresentada na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Tipos de danos na superfície das geomembranas.

Deformação	Descrição
Arranhões	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 formação de estrias na parte oposta ao contato com a brita.
Perfurações	Abertura que possibilita a passagem de um fluído ou gás, atravessando a superfície da geomembrana

3.8.2 Verificação das Perfurações – *Spark Test*

O teste para detecção de furos em geomembranas (*Spark Test*) foi empregado, inicialmente, para verificar discontinuidades no revestimento de tubos metálicos, sendo utilizado a partir de 1984 para a detecção de furos em geomembranas.

O teste é realizado com o uso de um equipamento que emite uma corrente elétrica contínua (DC) com tensões superiores a 1 kV, porém com baixa amperagem. Para a execução do teste, deve-se conectar à fonte de tensão uma sonda fixada a um condutor (escova, mola ou

barra de alumínio) e um cabo para o aterramento. A Figura 3.43 ilustra a forma de funcionamento dos métodos elétricos para detecção de furos.

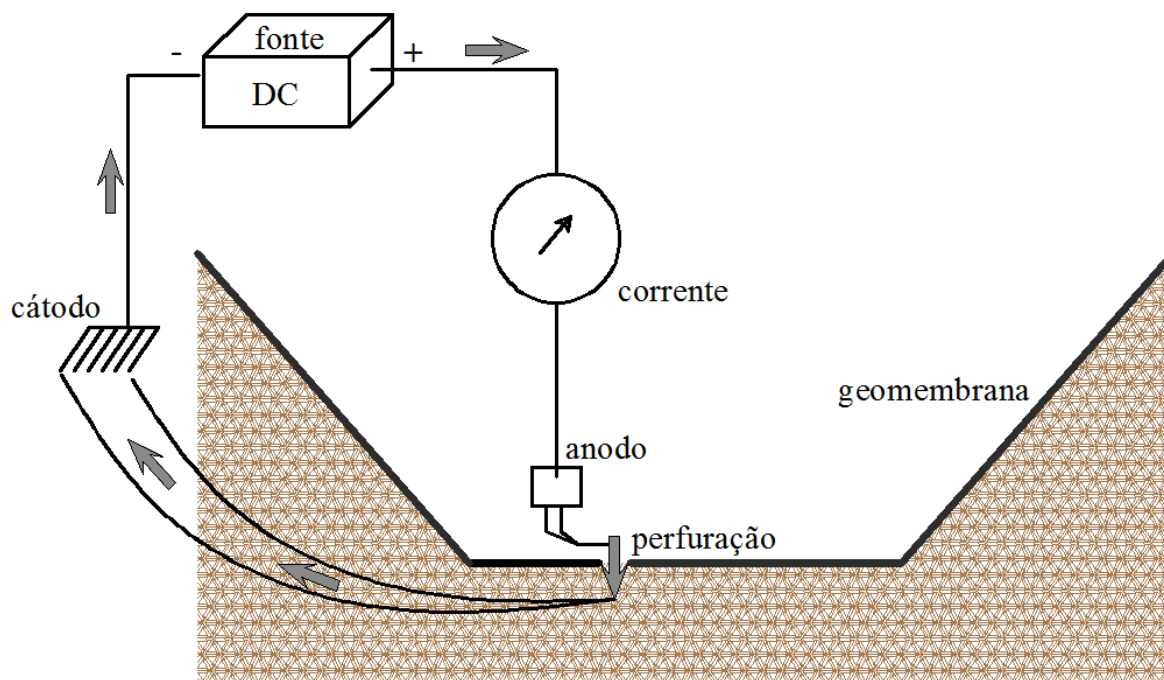


Figura 3.43 – Fechamento do circuito elétrico para determinar perfurações em geomembranas.

Para a detecção destas perfurações ou discontinuidades, é feita uma varredura por toda a superfície da geomembrana com a passagem do condutor fixado à sonda. Em caso de perfurações ou discontinuidades na geomembrana, irá ocorrer o fechamento do arco voltaico, sendo possível verificar uma faísca ou emissão de ruído no local da perfuração.

Deve-se verificar a tensão da saída utilizada no equipamento para a detecção das perfurações nas geomembranas, já que o comprimento do arco é diretamente influenciado por esta tensão. Para a detecção de perfurações em geomembranas, foi recomendada pelo fabricante do equipamento a alimentação do condutor com uma tensão de 10 kV para cada milímetro de espessura das geomembranas analisadas.

O equipamento utilizado para a detecção das perfurações nas geomembranas ensaiadas está apresentado na Figura 3.44.

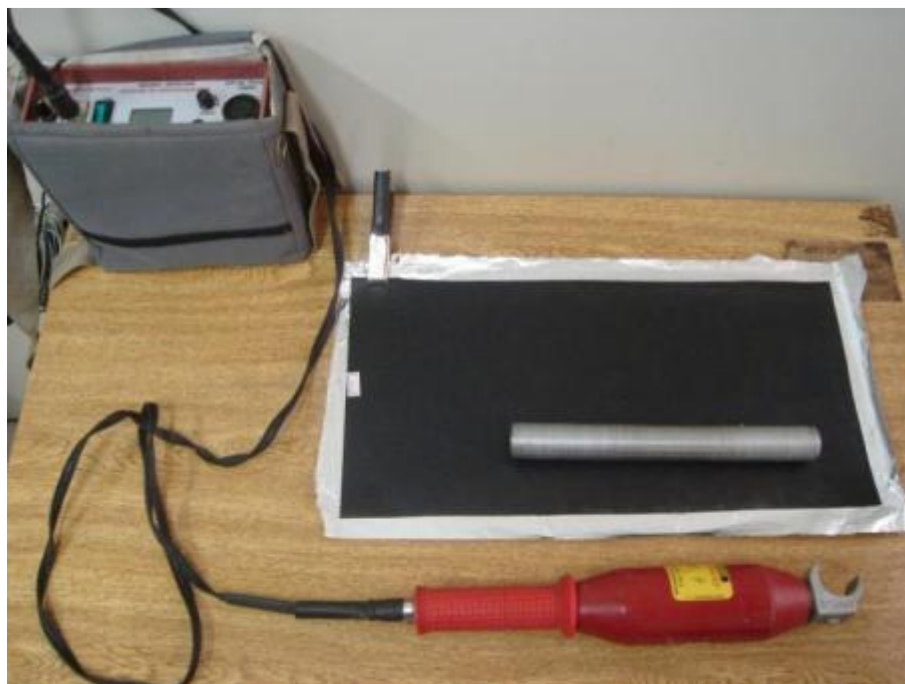


Figura 3.44 – Equipamentos utilizados para determinação de perfurações (*Spark Test*).

A Figura 3.45 apresenta a execução do ensaio e a formação do arco voltaico devido a proximidade do condutor à folha de papel alumínio utilizada como base para o aterramento do circuito.

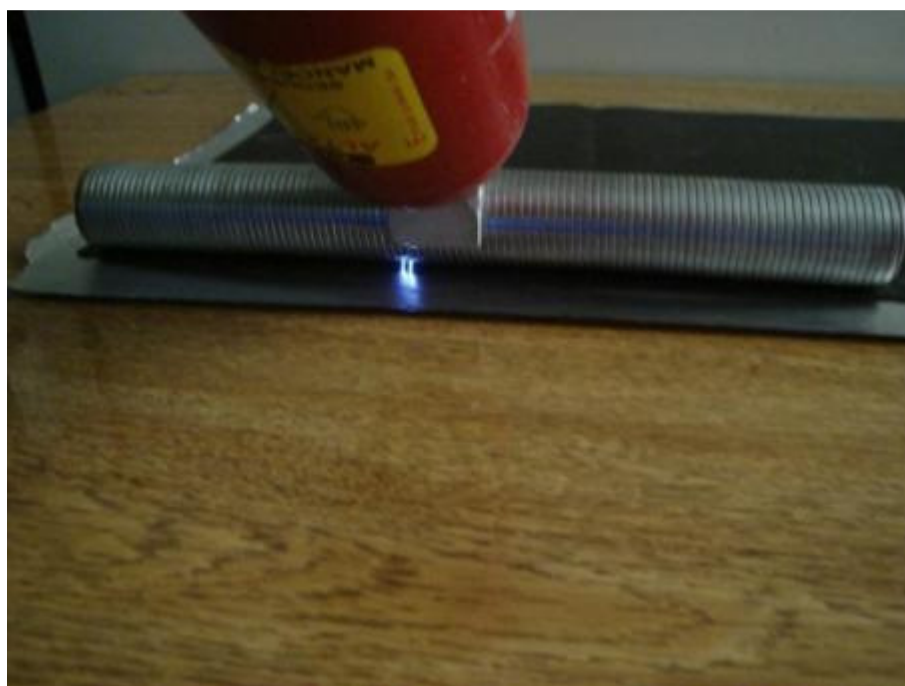


Figura 3.45 – Detalhe da formação do arco voltaico.

3.8.3 Verificação das Propriedades Hidráulicas

As geomembranas são empregadas com a finalidade de prover uma barreira para o controle e desvio de fluxo. Desta forma, a avaliação do desempenho hidráulico é fundamental para verificar se estes materiais preservam suas características isolantes após a ocorrência de danos mecânicos na sua superfície.

Para verificar o desempenho hidráulico das geomembranas após a execução do carregamento estático, as amostras foram submetidas ao ensaio de permeabilidade a vapor d'água. O ensaio de permeabilidade a vapor d'água para as geomembranas submetidas à danos mecânicos está ilustrado na Figura 3.46.



Figura 3.46 – Execução do ensaio de permeabilidade a vapor d'água.

3.8.4 Verificação das Propriedades Mecânicas

A ocorrência de danos mecânicos nas geomembranas pode ocasionar alterações em sua estrutura interna e conseqüente redução da resistência aos esforços mecânicos que o elemento pode ser submetido. Estes danos na superfície das geomembranas podem provocar a ruptura do elemento quando este for submetido a tensões inferiores às pré-determinadas em ensaios de caracterização.

Para avaliar alterações das propriedades de resistência mecânica das geomembranas, foram realizados ensaios de resistência à propagação de rasgos, ensaios de resistência à tração (escoamento e ruptura) em amostras com forma de haltere para as geomembranas de PEAD e resistência à tração (ruptura) em amostras com forma de tiras para as geomembranas de PVC.

Os ensaios de resistência à tração em amostras de PVC (a) e de resistência à propagação de rasgos (b) estão ilustrados na Figura 3.47.



(a) Ensaio de tração em amostras de PVC



(b) Ensaio de propagação de rasgos

Figura 3.47 – Execução dos ensaios pós-dano para verificação das propriedades mecânicas.

3.8.5 Ensaio de Resistência ao Estouro (adaptado)

As geomembranas, quando instaladas em campo, podem estar submetidas a esforços de tração em várias direções. A ocorrência de danos na superfície do material ocasiona regiões de maior fragilidade na geomembrana, o que pode acarretar a ruptura precoce do elemento. Para avaliar a influência dos danos nas geomembranas, foi realizado o ensaio de estouro, adaptado para pequenas amostras.

Os ensaios de resistência ao estouro e de resistência à tração multidirecional, geralmente, são realizados em amostras com diâmetro superior a 500 mm. No entanto, as amostras empregadas nos ensaios de carregamento estático, além de possuírem dimensões inferiores a 500 mm de diâmetro, foram utilizadas em ensaios pós-dano para verificar possíveis alterações de suas propriedades hidráulicas, mecânicas e de desempenho. Desta forma, para verificar a resistência ao estouro das geomembranas danificadas, optou-se por realizar uma adaptação deste ensaio em uma câmara com menores dimensões e amostras com diâmetro externo de 150 mm, para a fixação do material no anel da câmara.

A câmara empregada na execução deste ensaio possui formato circular com as paredes reforçadas. Esta câmara possui diâmetro interno de 100 mm e profundidade de 25 mm. A fixação da geomembrana é realizada na parte superior, sendo travada por um anel revestido com material áspero para evitar o deslizamento da amostra durante a execução do ensaio. Na parte inferior da câmara, é acoplada uma mangueira, por onde é introduzido o ar sob alta pressão.

A determinação dos incrementos de pressão aplicados às geomembranas de PEAD e de PVC foi obtida por ensaios testes que estimaram a resistência destes materiais. Os incrementos de pressão aplicados às geomembranas de PEAD foram de 25 kPa a cada 30 segundos, enquanto que para as geomembranas de PVC, foi aplicado um incremento de

pressão de 12,5 kPa a cada 30 segundos. A Figura 3.48 apresenta o equipamento utilizado para a o ensaio de estouro adaptado.



Figura 3.48 – Equipamento utilizado no ensaio de estouro adaptado.

Para verificar o deslocamento vertical das geomembranas durante a realização dos ensaios, foi posicionada sobre o centro da amostra uma haste demarcada, sendo comparadas as demarcações da haste com uma folha graduada posicionada atrás do equipamento de pressão (Vide Figura 3.49).

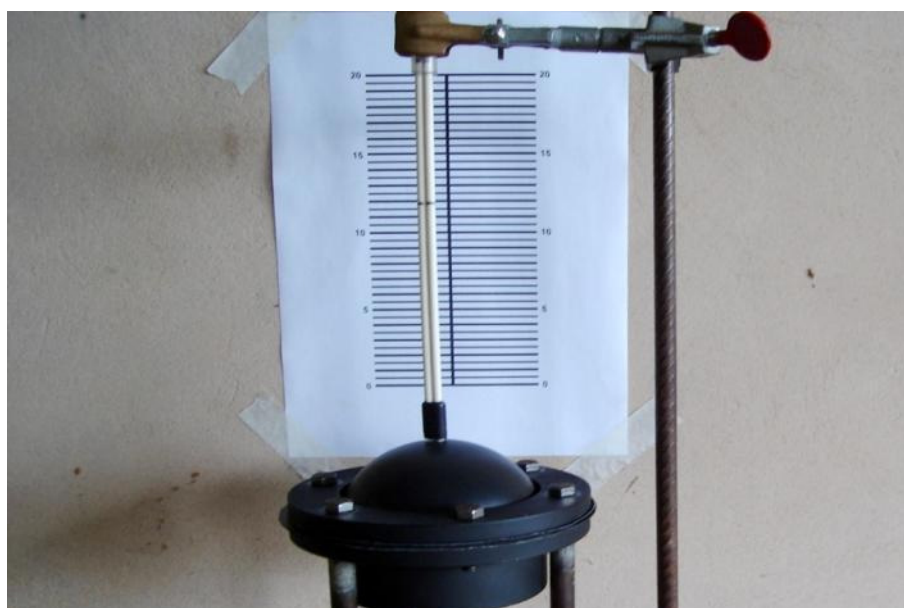


Figura 3.49 – Execução do ensaio de estouro e verificação do deslocamento vertical.

3.8.6 Ensaio de Fissuramento sob Tensão (*Stress Cracking*)

Os danos mecânicos “superficiais” podem provocar alterações na estrutura interna das cadeias poliméricas constituintes das geomembranas, podendo ocasionar a ruptura do elemento, mesmo quando este for submetido a tensões inferiores às determinadas nos ensaios de caracterização. Desta forma, estes materiais tornam-se suscetíveis à ruptura por fissuramento sob tensão.

Para avaliar a suscetibilidade destes materiais à ruptura por *stress cracking*, foi realizado após a ocorrência de danos mecânicos, o ensaio de fissuramento sob tensão em amostras ranhuradas, submetidas a uma carga constante de 30% da tensão de escoamento obtida no ensaio de tração. Verificou-se, também, através deste ensaio, a capacidade das camadas de proteção em inibir a ocorrência deste fenômeno em geomembranas cristalinas, como as de PEAD.

A Figura 3.50 apresenta as amostras de geomembranas de PEAD (a) submetidas previamente ao ensaio de carregamento estático com camada de proteção de PET 300, sendo agora utilizadas no ensaio de fissuramento sob tensão. Mostra-se o detalhe da realização do ensaio com as amostras imersas em uma solução com Igepal CO 630.



(a) Amostras do ensaio de FST



(b) Detalhe da execução do ensaio

Figura 3.50 – Execução do ensaio de fissuramento sob tensão.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar o desempenho das camadas de proteção para geomembranas, foram realizados ensaios de puncionamento estático, puncionamento dinâmico, além dos ensaios em grande escala de puncionamento hidrostático e carregamento estático. Neste capítulo, estão apresentados os resultados obtidos nestes ensaios e as análises do desempenho das camadas de proteção para as geomembranas.

4.1 ENSAIO DE PUNCIONAMENTO ESTÁTICO

O ensaio índice de puncionamento estático permite verificar o incremento de resistência ao puncionamento promovido por uma haste metálica, com a introdução das camadas de proteção. Estas camadas de proteção foram compostas por geotêxteis não-tecidos de PET (gramaturas de 150, 300, 400, 600 e 2 x 600 g/m²) e PP (gramatura de 600 e 2 x 600 g/m²), sobre as geomembranas de PVC (1,0 e 2,0 mm de espessura) e PEAD (1,5 e 2,0 mm de espessura).

4.1.1 Apresentação dos Resultados

Os gráficos da força de puncionamento em função do deslocamento vertical, obtidos no ensaio de puncionamento estático para as geomembranas isoladas ou com o emprego de camadas, de proteção estão apresentados a seguir.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os gráficos de força vs deslocamento vertical para as geomembranas de PVC com espessuras de 1,0 mm e 2,0 mm respectivamente, isoladas ou com o emprego de geotêxteis de proteção.

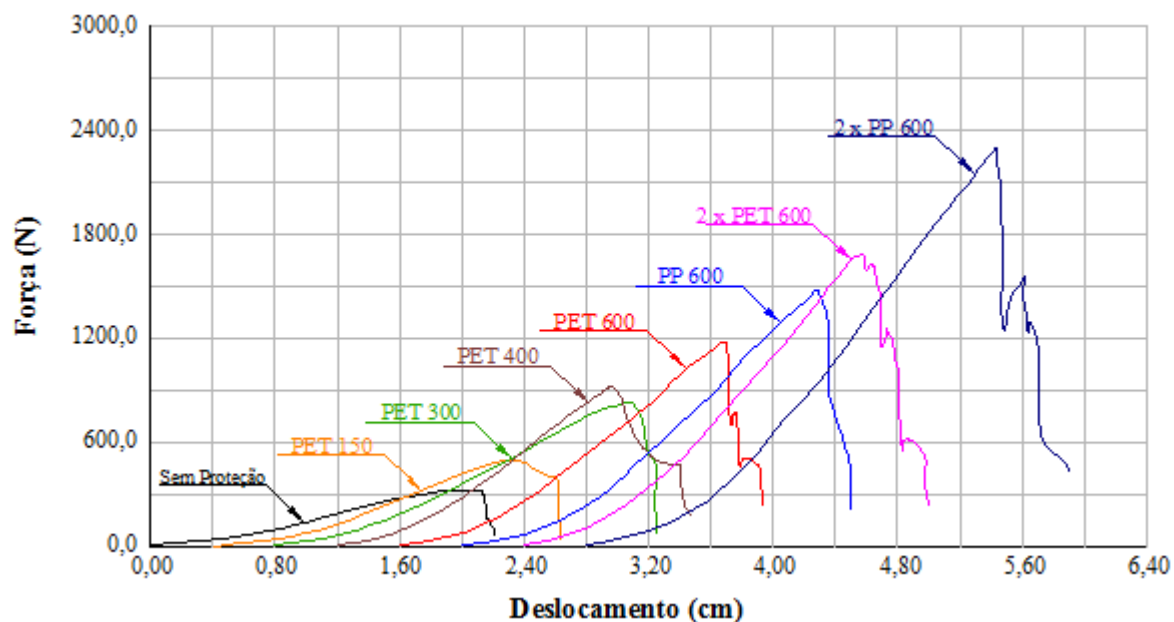


Figura 4.1 – Gráfico de força vs deslocamento para geomembrana de PVC 1,0 mm.

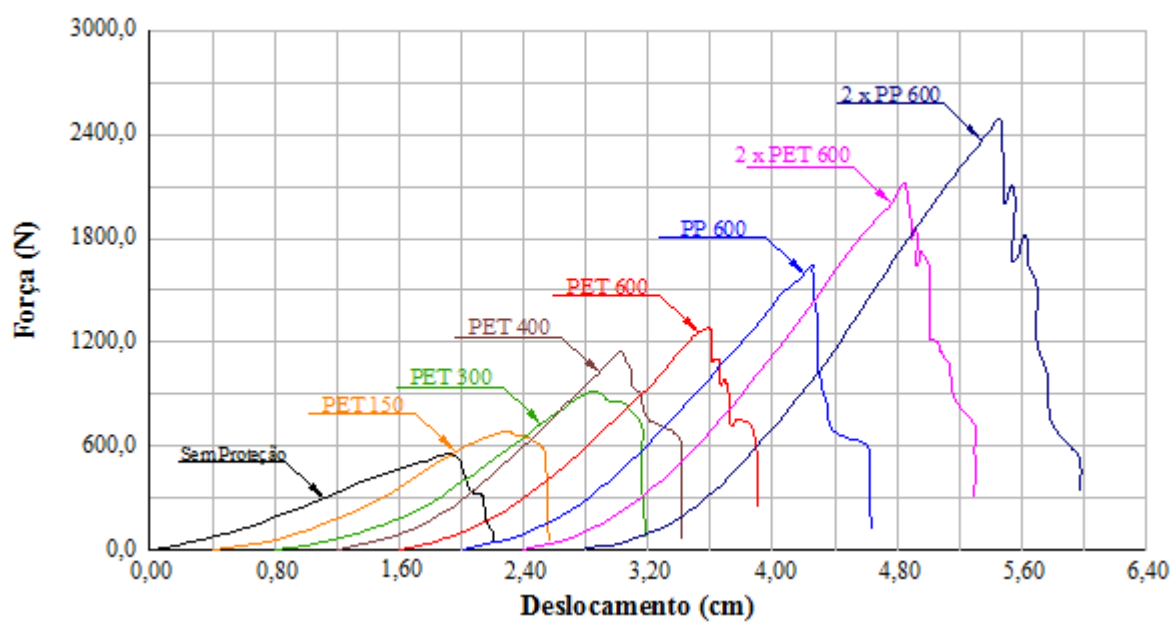


Figura 4.2 – Gráfico de força vs deslocamento para geomembrana de PVC 2,0 mm.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os gráficos de força vs deslocamento vertical para as geomembranas de PEAD com espessuras de 1,5 mm e 2,0 mm respectivamente, isoladas ou com o emprego de geotêxteis de proteção.

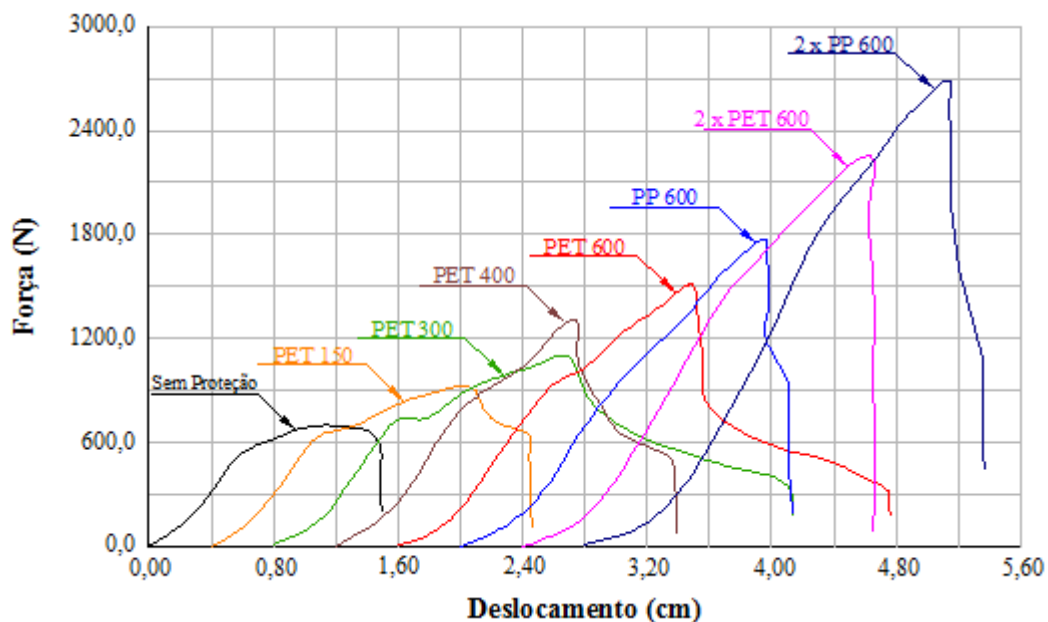


Figura 4.3 – Gráfico de força vs deslocamento para geomembrana de PEAD 1,5 mm.

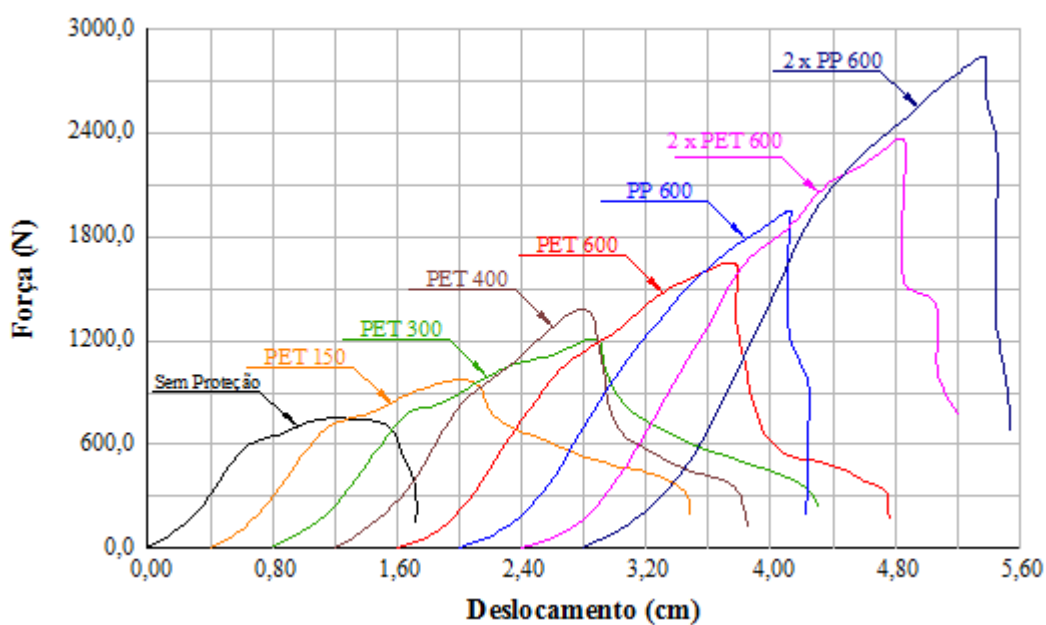


Figura 4.4 – Gráfico de força vs deslocamento para geomembrana de PEAD 2,0 mm.

Os valores de resistência ao puncionamento estático para as geomembranas de PVC e PEAD, isoladas ou com emprego de camadas de proteção, estão apresentados na Figura 4.5.

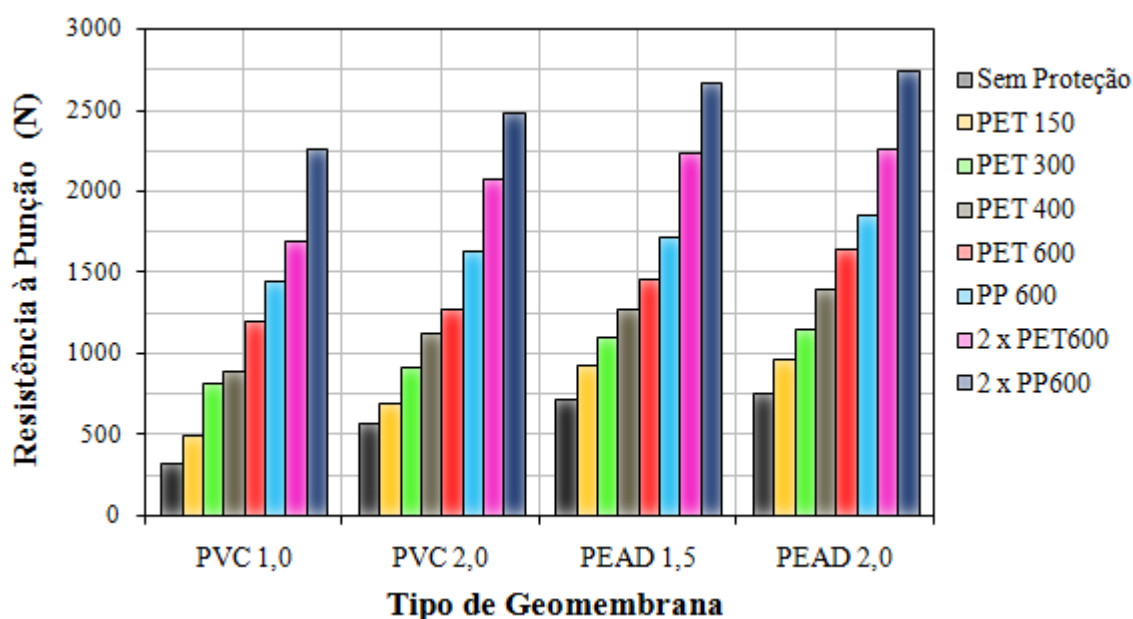


Figura 4.5 – Resistência ao puncionamento estático.

Verifica-se que a introdução das camadas de proteção proporcionou um incremento de resistência das geomembranas ao puncionamento estático. O incremento percentual de resistência ao puncionamento do conjunto pode ser observado na Figura 4.6.

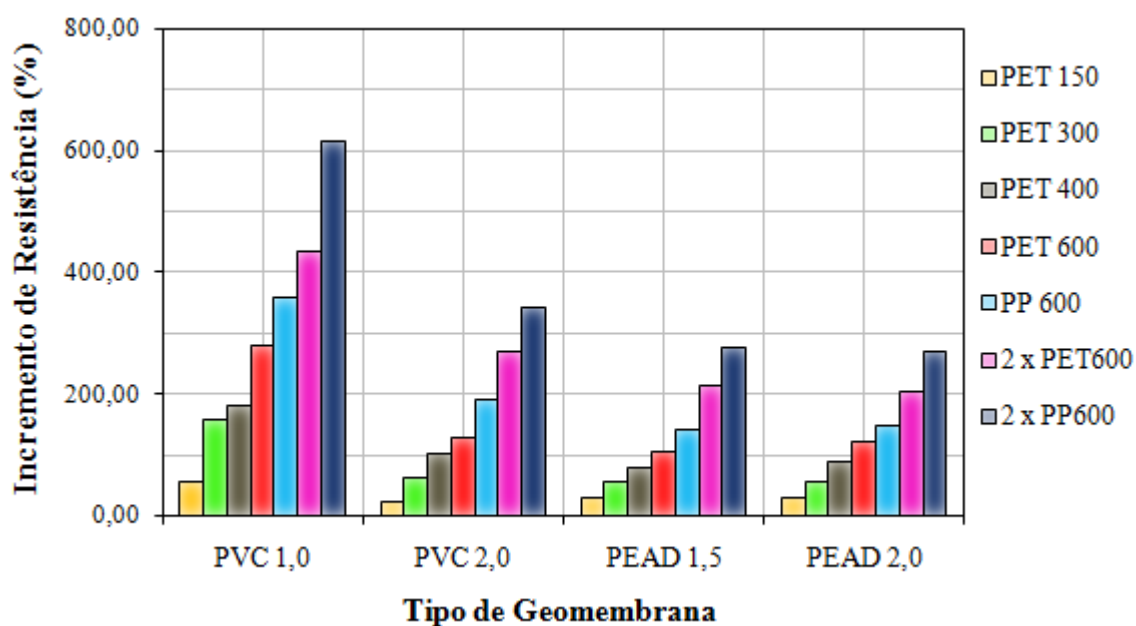


Figura 4.6 – Incremento percentual de resistência ao puncionamento estático.

Para verificar a influência das propriedades dos geotêxteis empregados como camadas de proteção, foram realizadas análises do incremento de resistência em função das propriedades físicas (gramatura e espessura) e das propriedades mecânicas (resistência à tração longitudinal e transversal, além da resistência ao puncionamento estático - CBR).

A Figura 4.7 apresenta a resistência ao puncionamento em função da gramatura dos geotêxteis utilizados.

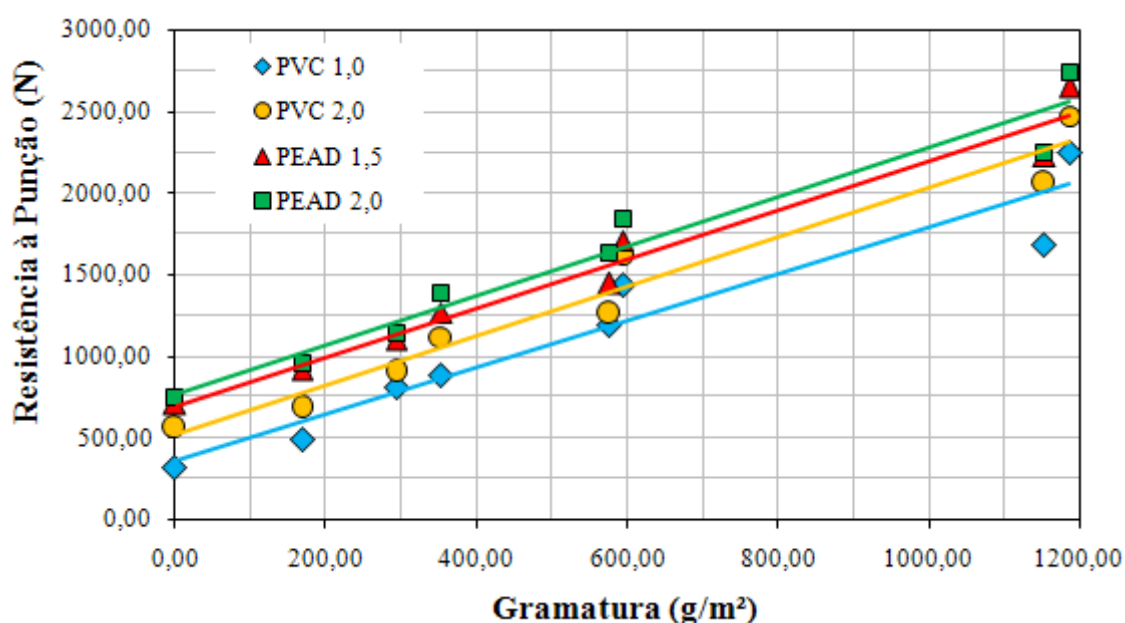


Figura 4.7 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da gramatura das camadas de proteção.

As equações da resistência ao puncionamento do conjunto (RP_{CONJ}) em função da gramatura da camada de proteção (GR) estão apresentadas a seguir:

$$\text{PVC 1,0} \quad RP_{CONJ} = 1,426.(GR) + 360,0 \quad R^2 = 0,926 \quad (4.1)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad RP_{CONJ} = 1,512.(GR) + 519,9 \quad R^2 = 0,954 \quad (4.2)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad RP_{CONJ} = 1,502.(GR) + 692,1 \quad R^2 = 0,966 \quad (4.3)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad RP_{CONJ} = 1,512.(GR) + 768,2 \quad R^2 = 0,952 \quad (4.4)$$

A avaliação do incremento de resistência em função da espessura nominal das camadas de proteção está ilustrada na Figura 4.8.

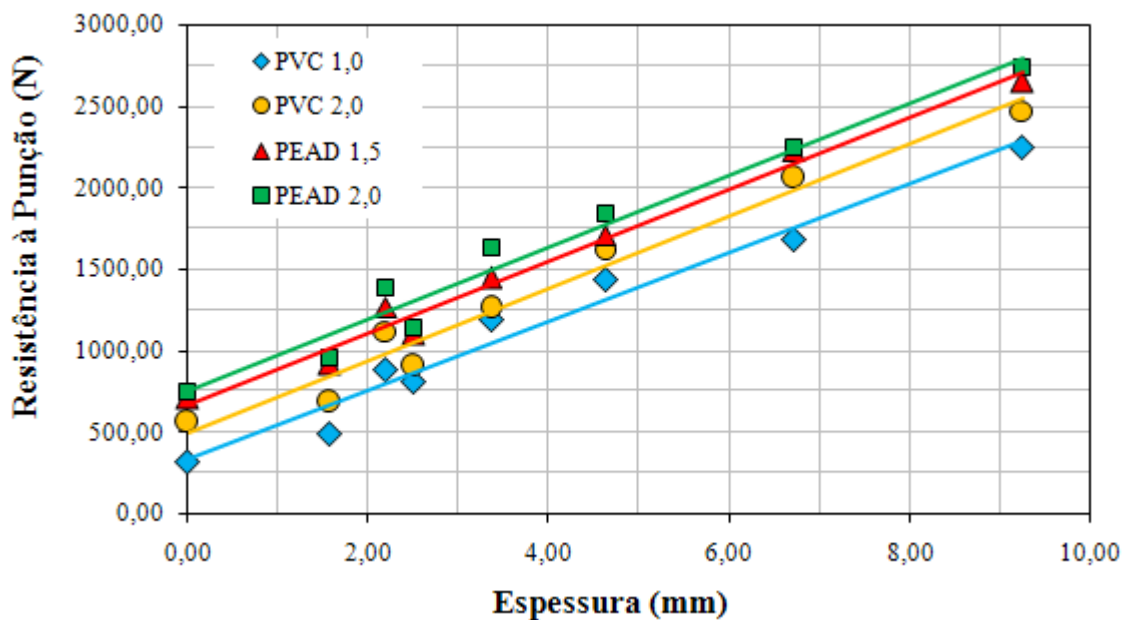


Figura 4.8 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da espessura das camadas de proteção.

Com base no gráfico apresentado na Figura 4.8, determinou-se as equações da resistência ao puncionamento do conjunto em função da espessura (ESP) dos materiais utilizados como camadas de proteção.

$$\text{PVC 1,0} \quad R_{\text{CONJ}} = 212,1 \cdot (\text{ESP}) + 330,0 \quad R^2 = 0,969 \quad (4.5)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad R_{\text{CONJ}} = 221,7 \cdot (\text{ESP}) + 500,2 \quad R^2 = 0,970 \quad (4.6)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad R_{\text{CONJ}} = 220,4 \cdot (\text{ESP}) + 671,9 \quad R^2 = 0,983 \quad (4.7)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad R_{\text{CONJ}} = 221,6 \cdot (\text{ESP}) + 748,9 \quad R^2 = 0,968 \quad (4.8)$$

O incremento da resistência ao puncionamento em função do acréscimo de resistência à tração longitudinal das camadas de proteção (geotêxteis) está ilustrado na Figura 4.9.

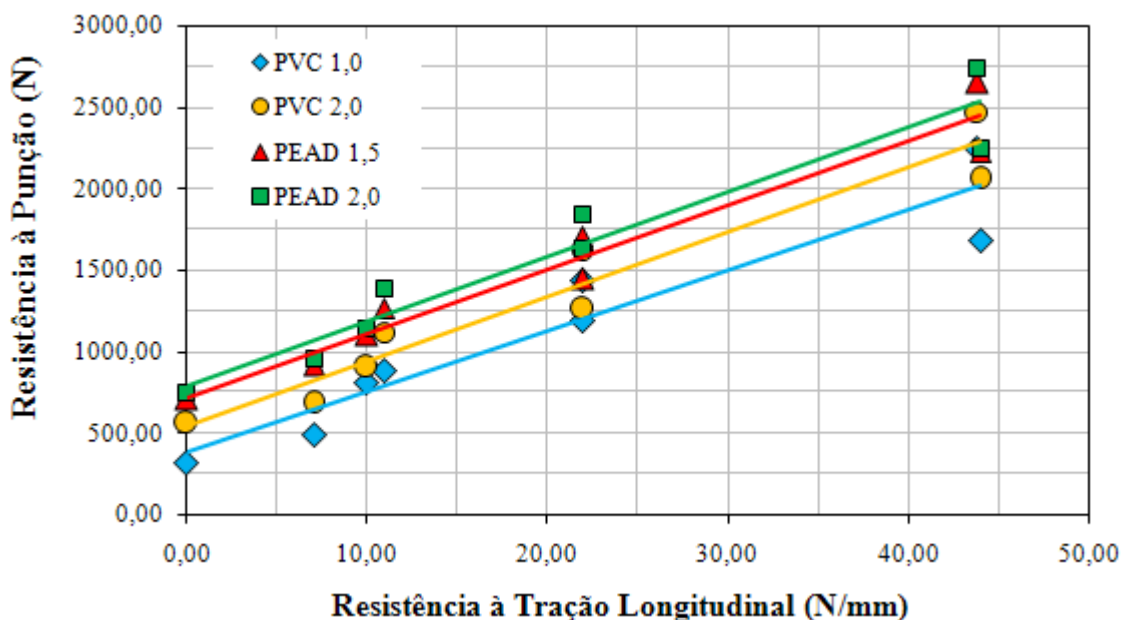


Figura 4.9 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da resistência à tração longitudinal das camadas de proteção.

A seguir, estão apresentadas as equações de resistência ao puncionamento em função da resistência à tração longitudinal dos geotêxteis (RT_L) determinada pelo gráfico apresentado na Figura 4.9.

$$PVC\ 1,0 \quad R_{P_{CONJ}} = 37,30.(RT_L) + 387,8 \quad R^2 = 0,906 \quad (4.9)$$

$$PVC\ 2,0 \quad R_{P_{CONJ}} = 39,61.(RT_L) + 548,2 \quad R^2 = 0,937 \quad (4.10)$$

$$PEAD\ 1,5 \quad R_{P_{CONJ}} = 39,40.(RT_L) + 719,2 \quad R^2 = 0,950 \quad (4.11)$$

$$PEAD\ 2,0 \quad R_{P_{CONJ}} = 39,60.(RT_L) + 796,6 \quad R^2 = 0,935 \quad (4.12)$$

A Figura 4.10 apresenta o gráfico com o incremento de resistência em função da resistência à tração transversal das camadas de proteção.

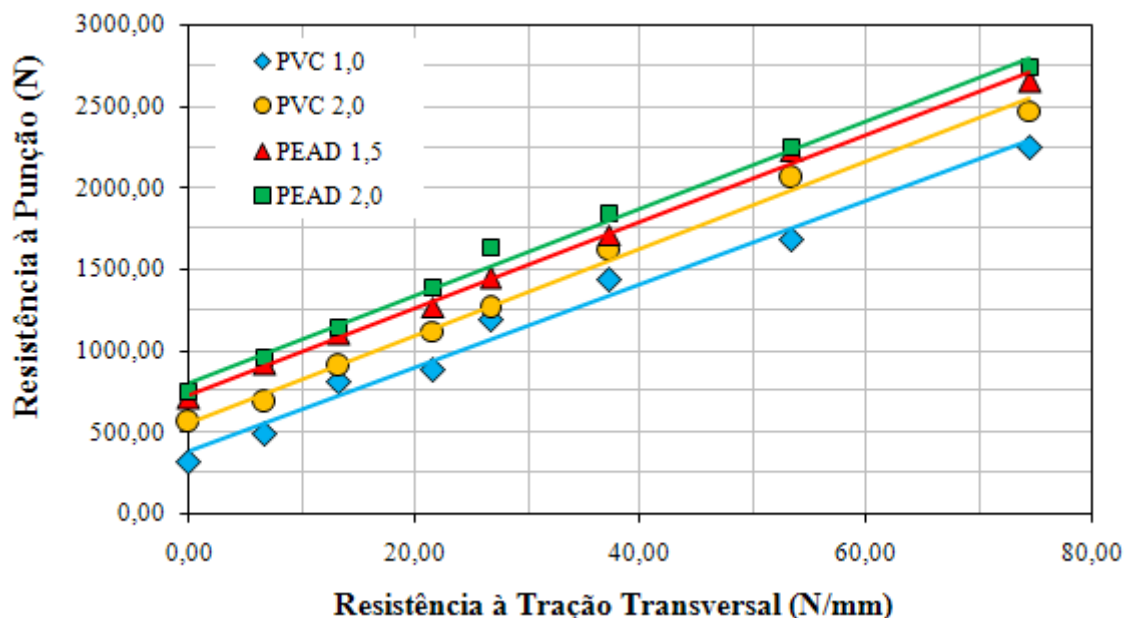


Figura 4.10 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da resistência à tração transversal das camadas de proteção.

As equações de resistência ao puncionamento em função da resistência à tração transversal (RT_T) dos materiais utilizados como camadas de proteção, determinadas pelo gráfico apresentado na Figura 4.10, estão apresentadas a seguir:

$$\text{PVC 1,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 25,57 \cdot (RT_T) + 385,2 \quad R^2 = 0,982 \quad (4.13)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 26,87 \cdot (RT_T) + 553,9 \quad R^2 = 0,993 \quad (4.14)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 26,57 \cdot (RT_T) + 729,3 \quad R^2 = 0,996 \quad (4.15)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 26,87 \cdot (RT_T) + 801,9 \quad R^2 = 0,992 \quad (4.16)$$

O incremento da resistência à punção em função da resistência ao puncionamento CBR (pistão com $\varnothing = 50$ mm) das camadas de proteção está apresentado na Figura 4.11.

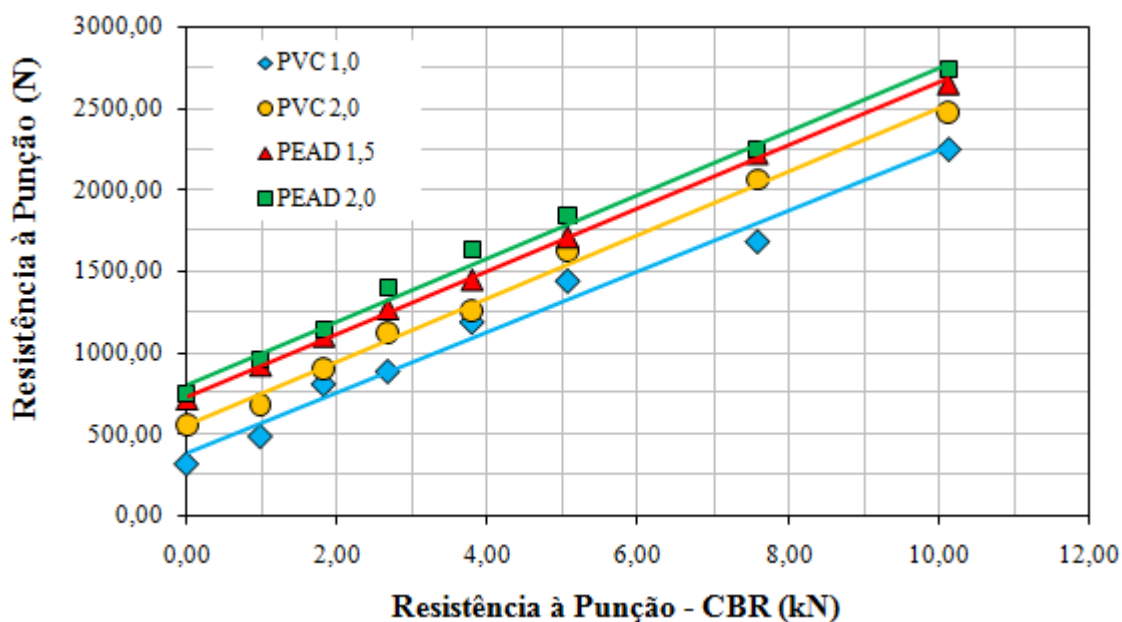


Figura 4.11 – Incremento de resistência ao puncionamento em função da resistência ao puncionamento das camadas de proteção.

Com base no gráfico apresentado na Figura 4.11, são apresentadas as equações da resistência ao puncionamento do conjunto em função da resistência à punção (RP) CBR ($\varnothing=50$ mm) das camadas de proteção.

$$\text{PVC 1,0} \quad \text{RP}_{\text{CONJ}} = 185,3 \cdot (\text{RP}) + 389,4 \quad \text{R}^2 = 0,981 \quad (4.17)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad \text{RP}_{\text{CONJ}} = 194,8 \cdot (\text{RP}) + 557,6 \quad \text{R}^2 = 0,994 \quad (4.18)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad \text{RP}_{\text{CONJ}} = 192,8 \cdot (\text{RP}) + 732,4 \quad \text{R}^2 = 0,999 \quad (4.19)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad \text{RP}_{\text{CONJ}} = 194,8 \cdot (\text{RP}) + 806,0 \quad \text{R}^2 = 0,992 \quad (4.20)$$

4.1.2 Análise dos Resultados

Com base nos resultados obtidos no ensaio índice de puncionamento estático foi possível verificar que a introdução de geotêxteis não-tecidos, como camadas de proteção, proporcionou incremento de resistência ao conjunto geomembrana/camada de proteção.

Para geomembranas de PVC com espessura de 1,0 mm, foi verificado acréscimo de resistência ao puncionamento superior a 600% para a configuração com camada dupla de PP600, sendo que a configuração com PET300 já apresentou incremento de resistência acima de 150%. As geomembranas de PVC com 2,0 mm de espessura apresentaram incremento de resistência de aproximadamente 350% para a configuração com camada dupla de PP600, sendo que a configuração com PET400 dobrou a resistência ao puncionamento do material.

As geomembranas de PEAD com 1,5 e 2,0 mm de espessura apresentaram incremento de resistência próximo a 300% para a configuração com camada dupla de PP600. Para as geomembranas de PEAD, o emprego de camadas de proteção com PET600 possibilitou um acréscimo de resistência da ordem de 100% para o ensaio de puncionamento estático.

Neste ensaio, foi possível verificar os parâmetros das camadas de proteção que melhor refletem o incremento de resistência obtido com o emprego destes materiais, para este tipo de solicitação. Foram comparados graficamente parâmetros físicos (gramatura e espessura) e parâmetros de resistência (resistência à tração longitudinal e transversal e resistência ao puncionamento – CBR) dos geotêxteis utilizados.

Verificou-se que os parâmetros de resistência mecânica (resistência à tração transversal e resistência ao puncionamento – CBR) dos geotêxteis empregados como camadas de proteção, foram os parâmetros que melhor refletiram o incremento de resistência obtido pelos conjuntos geomembrana/camada de proteção, com coeficientes de correlação (R^2) próximos de 1,0.

4.2 ENSAIO DE PUNÇONAMENTO DINÂMICO

No ensaio de punçonnemento dinâmico, foi verificada a capacidade de minorar ou restringir a ocorrência de uma perfuração na superfície da geomembrana, promovida pela queda de um cone com massa de 500 gramas a uma altura de 500 mm.

Nestes ensaios, foram utilizadas geomembranas de PVC (1,0 e 2,0 mm de espessura) e PEAD (1,5 e 2,0 mm de espessura). As camadas de proteção foram compostas por geotêxteis não-tecidos de PET (gramaturas de 150, 300, 400, 600 e 2 x 600 g/m²) e PP (gramatura de 600 e 2 x 600 g/m²) instaladas sobre as geomembranas.

4.2.1 Apresentação dos Resultados

A Figura 4.12 apresenta os resultados médios da variação do diâmetro do furo das geomembranas no ensaio de punçonnemento dinâmico

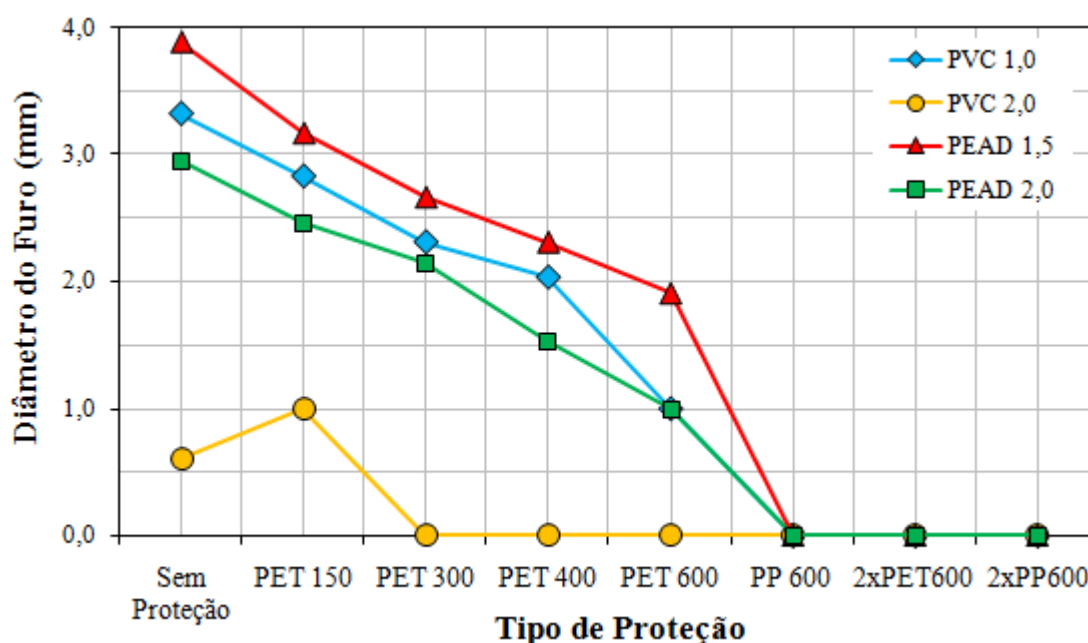


Figura 4.12 – Variação do diâmetro do furo.

Foram realizadas análises da redução do diâmetro do furo da geomembrana em função das propriedades físicas e mecânicas dos geotêxteis empregados como camadas de proteção. Nestas análises, foram considerados como pontos válidos somente os diâmetros perfurados e o primeiro ponto onde não ocorreu perfuração.

A Figura 4.13 apresenta a redução do diâmetro perfurado em função da gramatura dos geotêxteis utilizados.

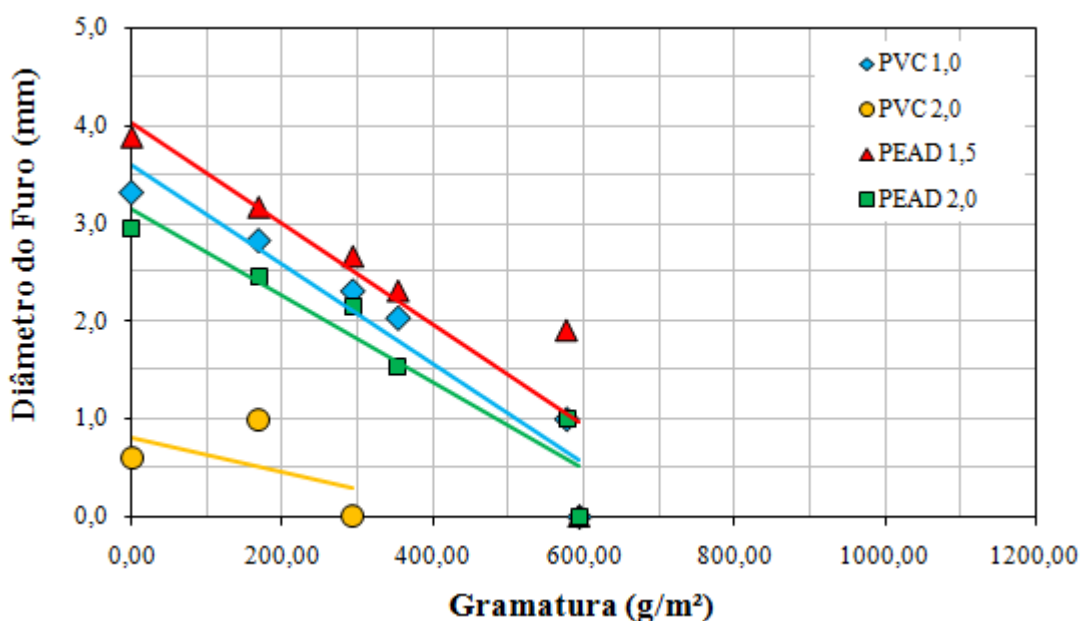


Figura 4.13 – Redução do diâmetro perfurado em função da gramatura das camadas de proteção.

As equações para determinação do diâmetro perfurado (ϕ_{PERF}), no ensaio de punção dinâmica, em função da gramatura da camada de proteção (GR) estão apresentadas a seguir:

$$\text{PVC 1,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,0051 \cdot (\text{GR}) + 3,5903 \quad R^2 = 0,916 \quad (4.21)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,0018 \cdot (\text{GR}) + 0,8099 \quad R^2 = 0,276 \quad (4.22)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,0052 \cdot (\text{GR}) + 4,0310 \quad R^2 = 0,806 \quad (4.23)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,0044 \cdot (\text{GR}) + 3,1404 \quad R^2 = 0,901 \quad (4.24)$$

A determinação da redução do diâmetro perfurado na superfície da geomembrana em função da espessura das camadas de proteção está ilustrada na Figura 4.14.

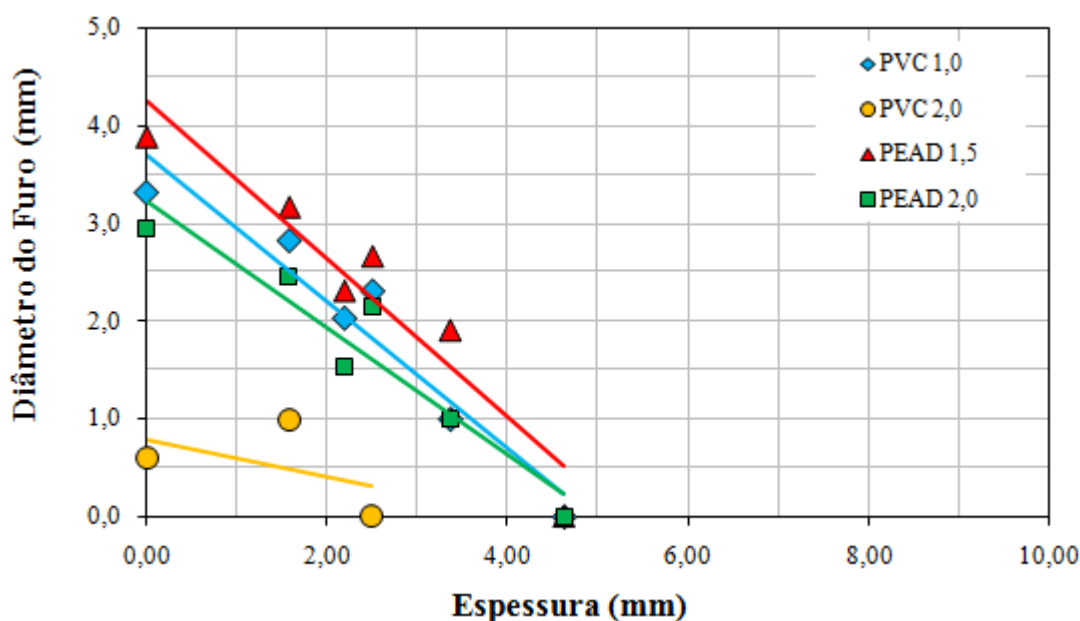


Figura 4.14 – Redução do diâmetro perfurado em função da espessura das camadas de proteção.

Com base no gráfico apresentado na Figura 4.14, foram obtidas as equações para determinar o diâmetro perfurado (ϕ_{PERF}) na superfície da geomembrana em função da espessura (ESP) dos materiais utilizados como camada de proteção.

$$\text{PVC 1,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,7486 \cdot (\text{ESP}) + 3,6931 \quad R^2 = 0,924 \quad (4.25)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,1864 \cdot (\text{ESP}) + 0,7868 \quad R^2 = 0,219 \quad (4.26)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,8078 \cdot (\text{ESP}) + 4,2412 \quad R^2 = 0,910 \quad (4.27)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,6488 \cdot (\text{ESP}) + 3,2229 \quad R^2 = 0,901 \quad (4.28)$$

A variação do diâmetro perfurado na geomembrana em função da resistência à tração longitudinal das camadas de proteção está ilustrado na Figura 4.15.

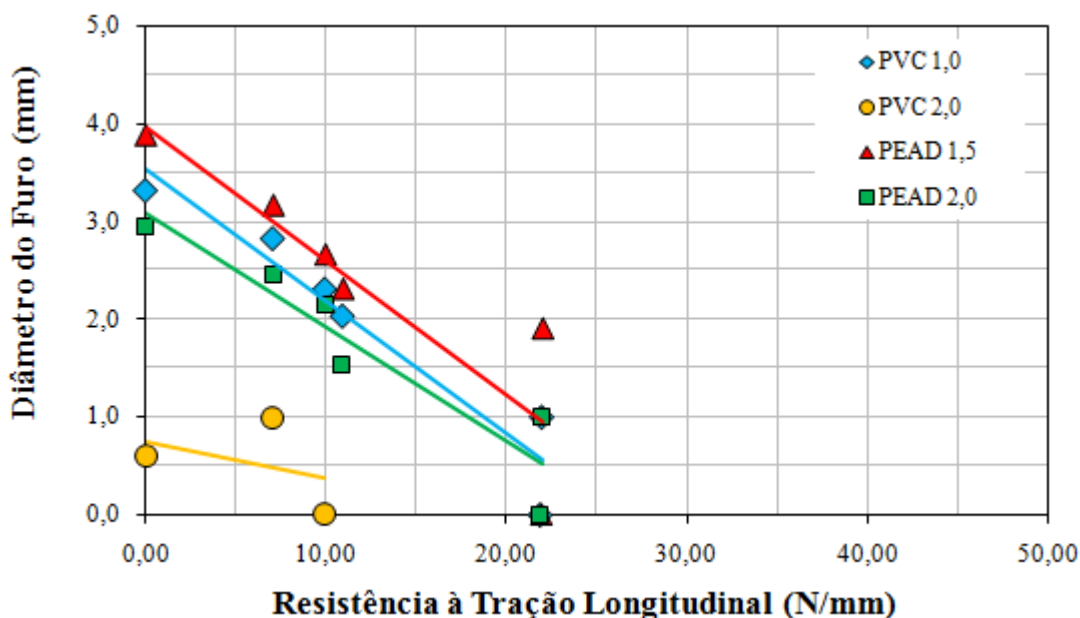


Figura 4.15 – Redução do diâmetro perfurado em função da resistência à tração longitudinal das camadas de proteção.

A seguir estão apresentadas as equações para determinar o diâmetro perfurado (ϕ_{PERF}) em função da resistência à tração longitudinal (RT_L) dos materiais, determinadas pelo gráfico apresentado na Figura 4.15.

$$PVC\ 1,0 \quad \phi_{PERF} = -0,1358.(RT_L) + 3,5389 \quad R^2 = 0,914 \quad (4.29)$$

$$PVC\ 2,0 \quad \phi_{PERF} = -0,0385.(RT_L) + 0,7512 \quad R^2 = 0,153 \quad (4.30)$$

$$PEAD\ 1,5 \quad \phi_{PERF} = -0,1368.(RT_L) + 3,9583 \quad R^2 = 0,784 \quad (4.31)$$

$$PEAD\ 2,0 \quad \phi_{PERF} = -0,1169.(RT_L) + 3,0794 \quad R^2 = 0,879 \quad (4.32)$$

A Figura 4.16 apresenta o gráfico com a variação do diâmetro perfurado da geomembrana em função da resistência à tração transversal das camadas de proteção.

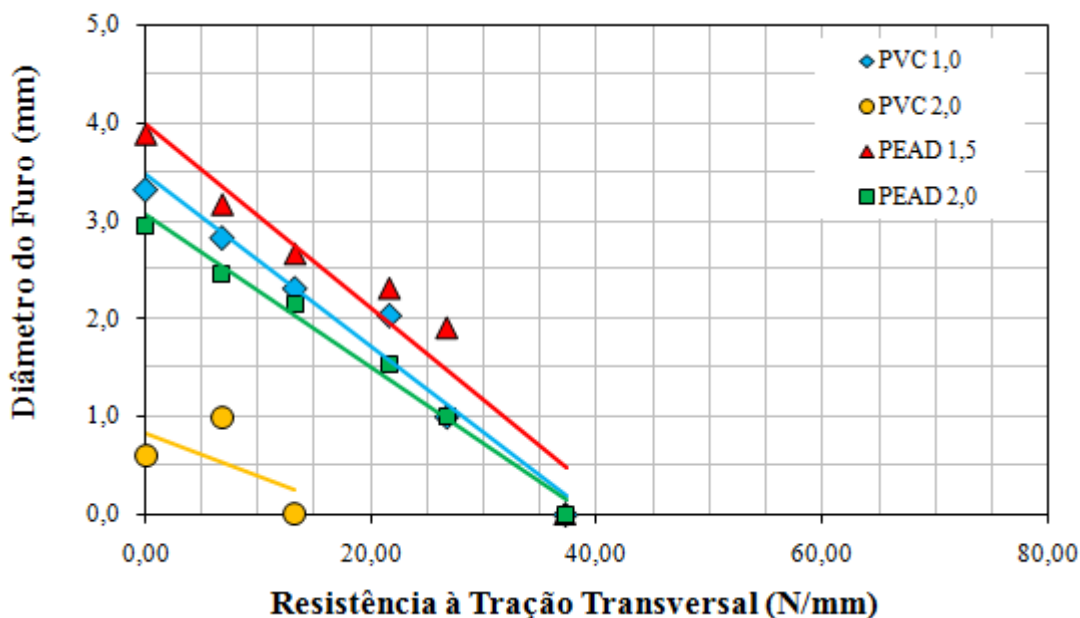


Figura 4.16 – Redução do diâmetro perfurado em função da resistência à tração transversal das camadas de proteção.

As equações para determinar o diâmetro perfurado (ϕ_{PERF}) da geomembrana em função da resistência à tração transversal (RT_T) dos materiais utilizados como camada de proteção, determinadas pelo gráfico apresentado na Figura 4.16, estão apresentadas a seguir:

$$\text{PVC 1,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,6531.(RT_T) + 3,4738 \quad R^2 = 0,981 \quad (4.33)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,3093.(RT_T) + 0,822 \quad R^2 = 0,313 \quad (4.34)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,6926.(RT_T) + 3,9756 \quad R^2 = 0,933 \quad (4.35)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,5753.(RT_T) + 3,0552 \quad R^2 = 0,988 \quad (4.36)$$

A variação do diâmetro do furo em função da resistência ao puncionamento CBR (pistão com $\varnothing = 50$ mm) das camadas de proteção está apresentada na Figura 4.17.

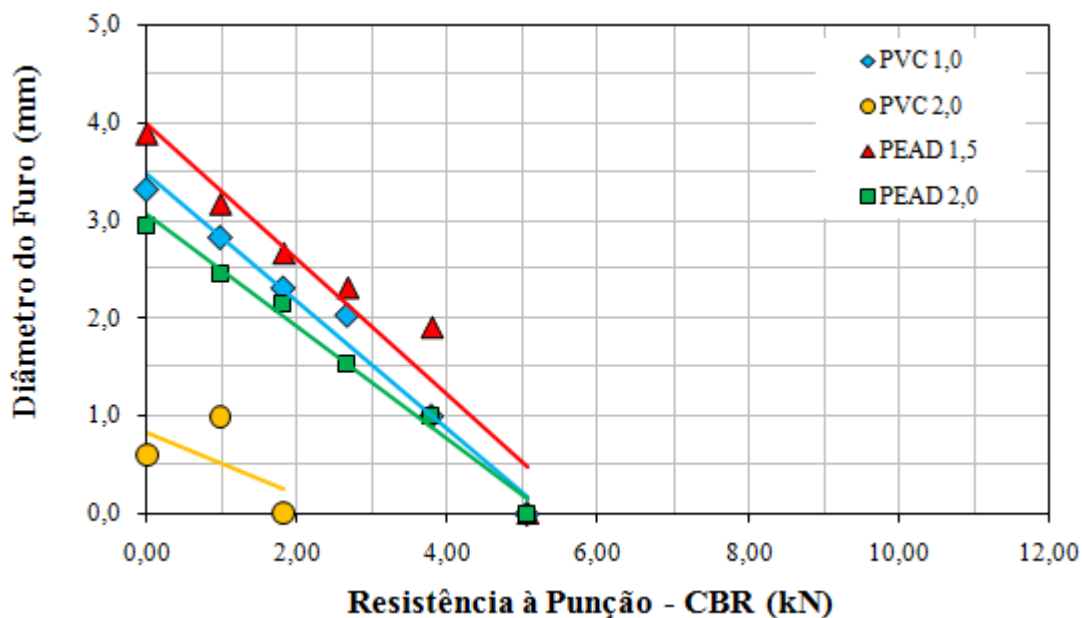


Figura 4.17 – Redução do diâmetro perfurado em função da resistência ao puncionamento das camadas de proteção.

Com base no gráfico apresentado na Figura 4.17, são apresentadas as equações para determinar o diâmetro perfurado (ϕ_{PERF}) em função da resistência à punção (RP) CBR ($\varnothing=50\text{mm}$) das camadas de proteção.

$$\text{PVC 1,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,088 \cdot (\text{RP}) + 3,4623 \quad R^2 = 0,961 \quad (4.37)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,0444 \cdot (\text{RP}) + 0,8298 \quad R^2 = 0,341 \quad (4.38)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,0942 \cdot (\text{RP}) + 3,9796 \quad R^2 = 0,932 \quad (4.39)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad \phi_{\text{PERF}} = -0,0782 \cdot (\text{RP}) + 3,0575 \quad R^2 = 0,986 \quad (4.40)$$

4.2.2 Análise dos Resultados

A introdução de geotêxteis como camada de proteção proporcionou aumento na resistência ao puncionamento da geomembrana e conseqüente redução do diâmetro perfurado.

As geomembranas de PVC apresentaram melhor comportamento frente às solicitações do ensaio quando comparadas às geomembranas de PEAD. A flexibilidade do material ocasiona uma dissipação da força de punção no momento do impacto do cone e conseqüente redução do diâmetro perfurado, fato evidenciado quando são comparados os diâmetros perfurados nas geomembranas de PVC com espessura 1,0 mm com as de PEAD com 1,5 mm.

Verificou-se para a geomembrana de PVC com 2,0 mm, aumento do diâmetro perfurado com o emprego do PET150, devido à penetração do geotêxtil com a ponta do cone, no entanto, a partir do emprego do PET300, não foram observadas perfurações. Ressalta-se que as equações obtidas para esta geomembrana, não representam o incremento de resistência em função dos parâmetros analisados, devido a discrepância dos valores obtidos.

Nestes ensaios, apenas as configurações em que foi empregada camada dupla de geotêxteis não-tecidos (2 x PP600 e 2 x PET600) e a configuração com PP600 apresentaram resultados satisfatórios para todas geomembranas, onde não foram verificadas perfurações.

Verificou-se que geotêxteis de mesma gramatura, porém fabricados com diferentes polímeros, apresentam comportamentos distintos, como verificado por Jones *et al.* (2000), sendo que as propriedades de resistência mecânica dos geotêxteis, refletiram de maneira mais adequada o comportamento das camadas de proteção.

A título de ilustração, é apresentado na Figura 4.18 o gráfico de resistência à tração transversal em função da gramatura de referência dos geotêxteis não-tecidos de PET e de PP empregados como camada de proteção nesta pesquisa. Neste gráfico é possível verificar que geotêxteis de mesma gramatura apresentam resistência mecânica distintas.

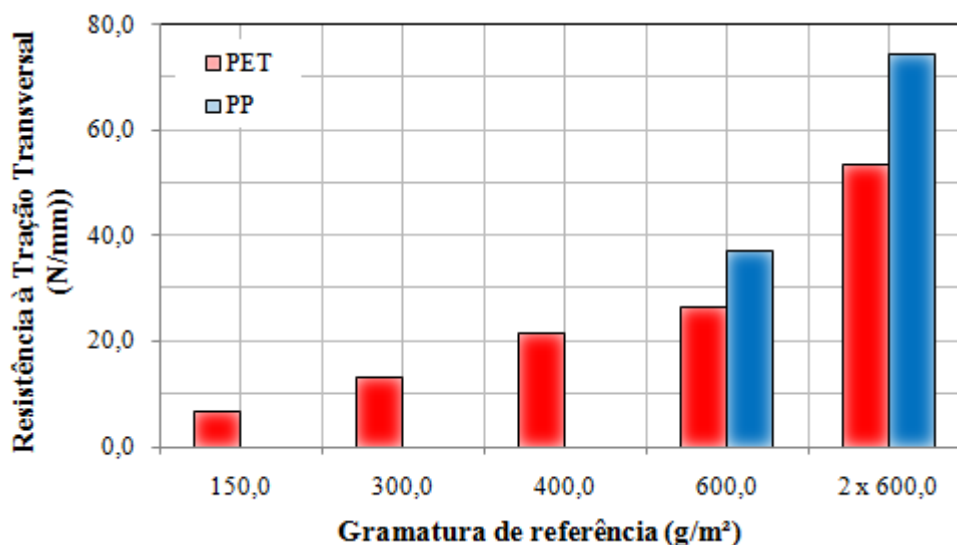


Figura 4.18 – Resistência à tração transversal vs gramatura do geotêxtil.

4.3 ENSAIO DE PUNÇONAMENTO HIDROSTÁTICO

O ensaio de punçonnement hidrostático avalia o desempenho das camadas de proteção sob condições de um carregamento hidráulico crescente, com incrementos de pressão de 15 kPa por minuto até a ruptura do elemento ou a pressão máxima de 1800 kPa.

Neste ensaio, foram utilizadas geomembranas de PVC com espessura de 1,0 e 2,0 mm e de PEAD com espessura de 1,5 e 2,0 mm. As camadas de proteção foram compostas por geotêxteis não-tecidos de PET com gramaturas de 150, 300, 400, 600 g/m² e PP com gramatura de 600 g/m², além de uma configuração com camada dupla, com a sobreposição de dois geotêxteis de PP 600.

4.3.1 Apresentação dos Resultados

A Tabela 4.1 apresenta a resistência ao punçonnement hidrostático e o tempo de ruptura para geomembranas de PVC com espessuras de 1,0 e 2,0 mm.

Tabela 4.1 – Resistência à punção hidrostática do conjunto GM de PVC/camada de proteção.

GM	Camada de Proteção	Brita - 30 a 37mm		Cone - Hc = 37 mm		Cone - Hc = 25 mm	
		Resistência (kPa)	Tempo (s)	Resistência (kPa)	Tempo (s)	Resistência (kPa)	Tempo (s)
PVC 1,0	-	59,5	212	15,3	50	345,6	1331
	PET 150	149,0	565	60,1	188	1395,2	5535
	PET 300	270,3	1072	136,2	489	> 1800	7200
	PET 400	149,1	575	75,1	262	781,4	3078
	PET 600	211,1	821	131,7	486	956,3	3823
	PP 600	300,9	1149	285,7	1114	1544,0	6179
	2 x PP 600	585,6	2317	420,4	1646	> 1800	7200
PVC 2,0	-	119,5	469	45,3	133	1470,1	5881
	PET 300	285,6	1130	225,8	896	> 1800	7200
	PET 600	240,3	940	150,0	554	1094,1	4335
	PP 600	361,5	1415	406,5	1605	1500,6	5590
	2 x PP 600	570,1	2273	465,5	1851	> 1800	7200

A resistência e o tempo no momento da ruptura para as geomembranas de PEAD com espessuras de 1,5 e 2,0 mm estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resistência à punção hidrostática do conjunto GM de PEAD/camada de proteção.

GM	Camada de Proteção	Base com Brita		Cone - Hc = 37 mm		Cone - Hc = 25 mm	
		Resistência (kPa)	Tempo (s)	Resistência (kPa)	Tempo (s)	Resistência (kPa)	Tempo (s)
PEAD 1,5	-	119,9	435	4,0	5	6,3	8
	PET 150	150,2	553	15,1	13	45,1	158
	PET 300	180,7	667	30,2	75	120,3	442
	PET 400	257,4	966	40,6	131	180,4	708
	PET 600	299,1	1154	45,6	143	254,3	975
	PP 600	376,2	1499	60,9	240	929,0	3701
	2 x PP 600	646,7	2570	132,0	489	1214,8	4834
PEAD 2,0	-	149,4	571	7,0	10	9,3	14
	PET 300	210,5	825	37,8	133	225,5	887
	PET 600	298,9	1145	59,5	202	884,7	3488
	PP 600	375,3	1491	91,5	357	1185,3	4719
	2 x PP 600	658,8	2585	105,0	392	1350,8	5393

A variação da resistência ao puncionamento hidrostático das geomembranas de PVC com espessuras de 1,0 mm e 2,0 mm, respectivamente, isoladas ou com a introdução das camadas de proteção, estão apresentadas nas Figuras 4.19 e 4.20.

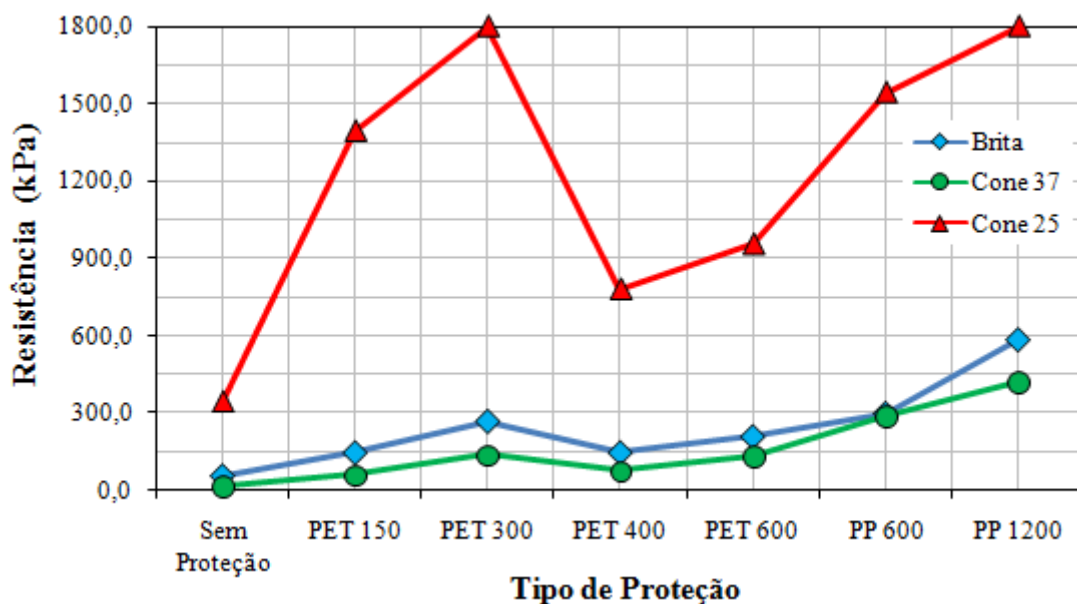


Figura 4.19 – Resistência ao puncionamento hidrostático – GM de PVC com 1,0 mm.

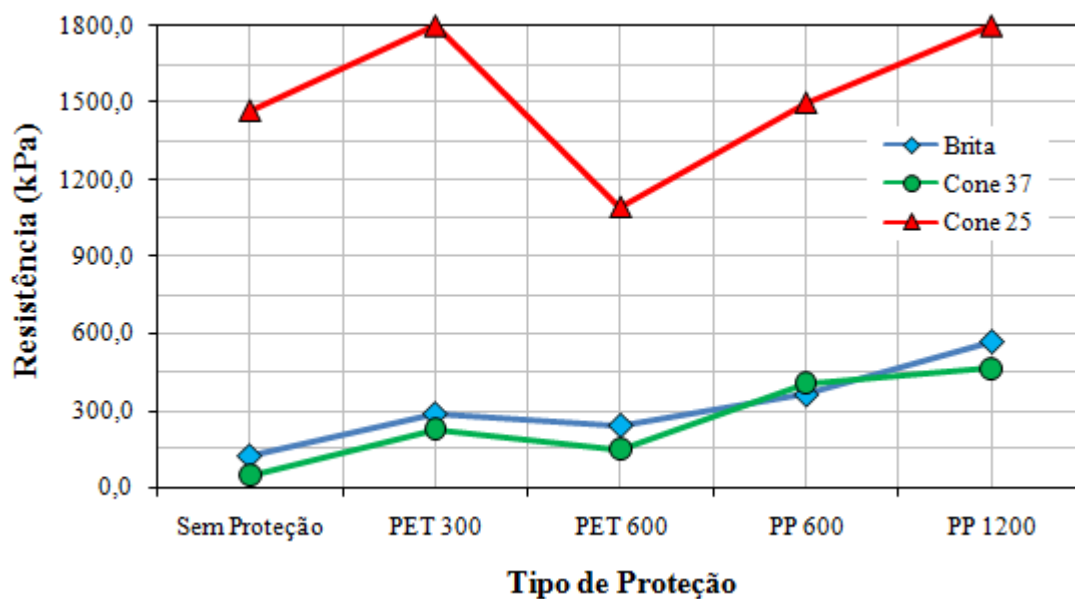


Figura 4.20 – Resistência ao puncionamento hidrostático – GM de PVC com 2,0 mm.

A resistência ao puncionamento hidrostático das geomembranas de PEAD com espessuras de 1,5 mm e de 2,0 mm, respectivamente, isoladas ou com camadas de proteção, estão apresentadas nas Figuras 4.21 e 4.22.

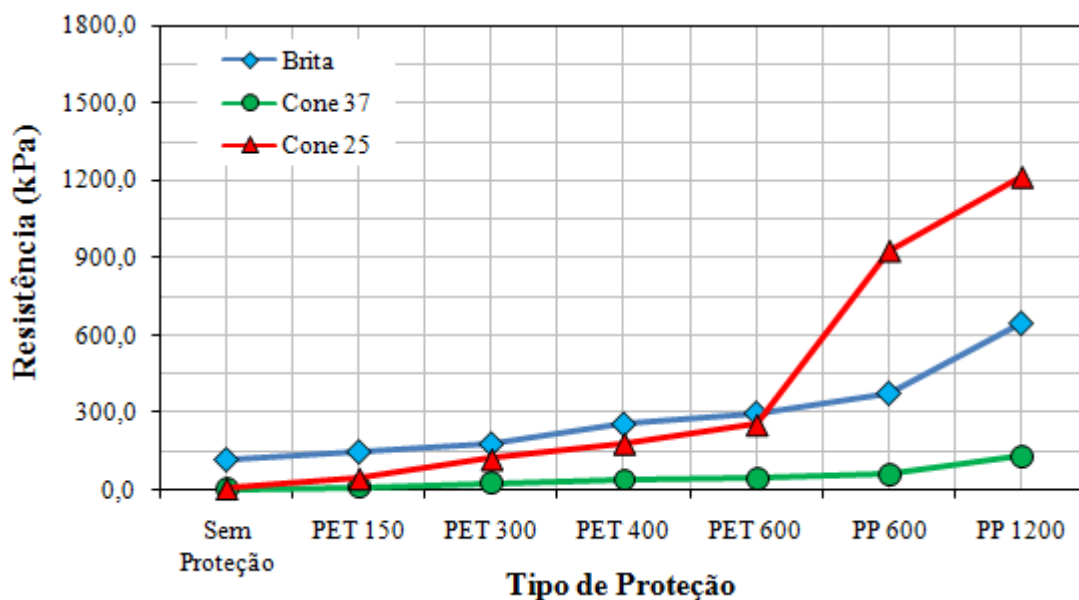


Figura 4.21 – Resistência ao puncionamento hidrostático – GM de PEAD com 1,5 mm.

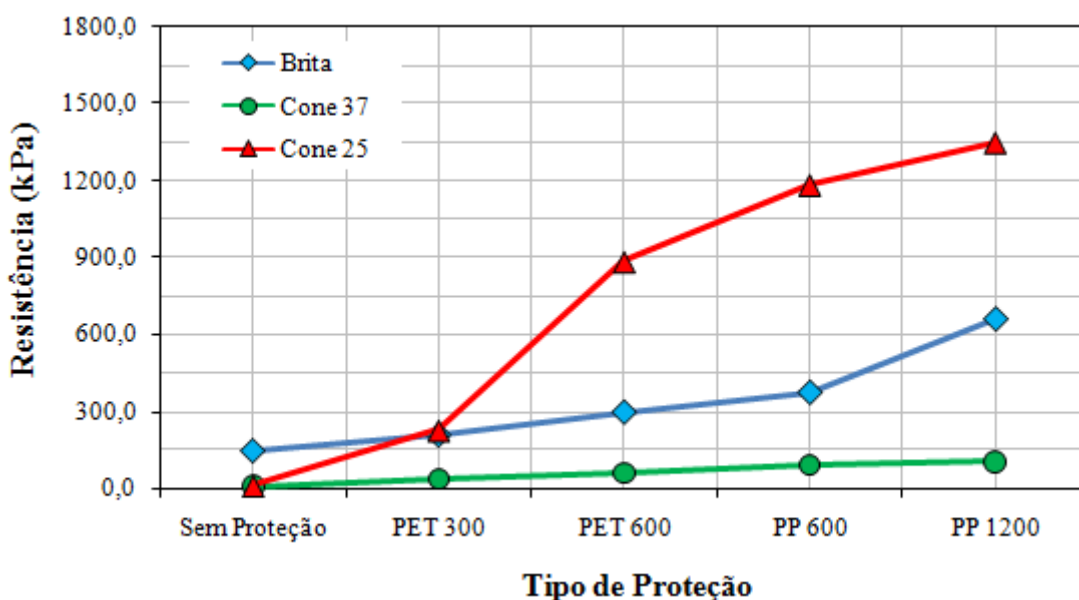


Figura 4.22 – Resistência ao puncionamento hidrostático – GM de PEAD com 2,0 mm.

As deformações ocorridas pelo contato das britas e/ou dos cones nas camadas de proteção e nas geomembranas de PVC com espessura de 1,0 mm após a realização dos ensaios de puncionamento hidrostático podem ser observadas na Figura 4.23.



(a) GM após ensaio com base de brita.



(b) GT PET300 após ensaio com base de brita.



(c) GM após ensaio com cones $H_c = 37$ mm.



(d) GT PET150 após ensaio com cones (37 mm).



(e) GM após ensaio com cones $H_c = 25$ mm.



(f) GT 2xPP600 após ensaio com cones (25mm).

Figura 4.23 – Deformações na superfície da geomembrana de PVC 1,0 mm e das camadas de proteção após o ensaio de puncionamento hidrostático.

A Figura 4.24 apresenta as deformações ocorridas pelo contato das britas e/ou dos cones nas geomembranas de PVC com espessura de 2,0 mm e nas camadas de proteção, após a realização dos ensaios de puncionamento hidrostático.



(a) GM após ensaio com base de brita.



(b) GT 2xPP600 após ensaio com base de brita.



(c) GM após ensaio com cones $H_c = 37$ mm.



(d) GT PET300 após ensaio com cones (37 mm).



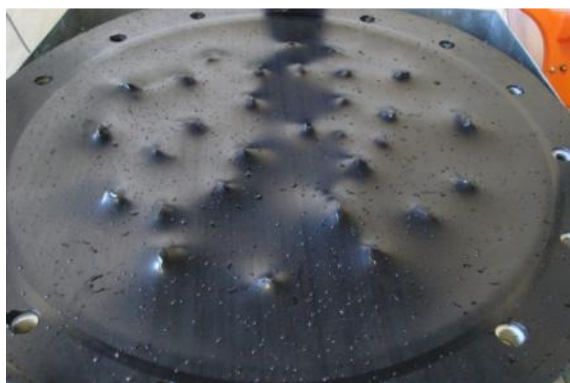
(e) GM após ensaio com cones $H_c = 25$ mm.



(f) GT PET600 após ensaio com cones (25 mm).

Figura 4.24 – Deformações na superfície da geomembrana de PVC 2,0 mm e das camadas de proteção após o ensaio de puncionamento hidrostático.

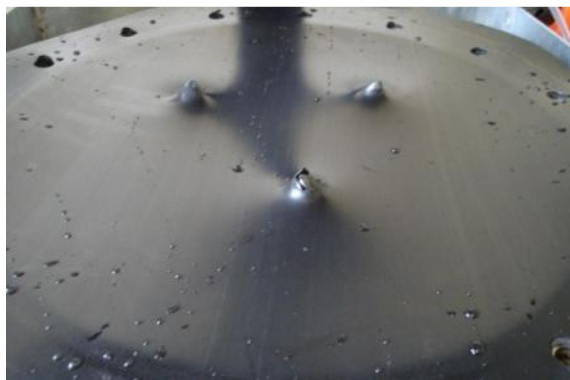
As deformações ocorridas pelo contato das britas e/ou dos cones nas camadas de proteção e nas geomembranas de PEAD com espessura de 1,5 mm após a realização dos ensaios de puncionamento hidrostático podem ser observadas na Figura 4.25.



(a) GM após ensaio com base de brita.



(b) GT PET150 após ensaio com base de brita.



(c) GM após ensaio com cones $H_c = 37$ mm.



(d) GT PP600 após ensaio com cones (37 mm).



(e) GM após ensaio com cones $H_c = 25$ mm.



(f) GT PET400 após ensaio com cones (25mm).

Figura 4.25 – Deformações na superfície da geomembrana de PEAD 1,5 mm e das camadas de proteção após o ensaio de puncionamento hidrostático.

A Figura 4.26 apresenta as deformações ocorridas pelo contato das britas e/ou dos cones nas geomembranas de PEAD com espessura de 2,0 mm e nas camadas de proteção, após a realização dos ensaios de puncionamento hidrostático.



(a) GM após ensaio com base de brita.



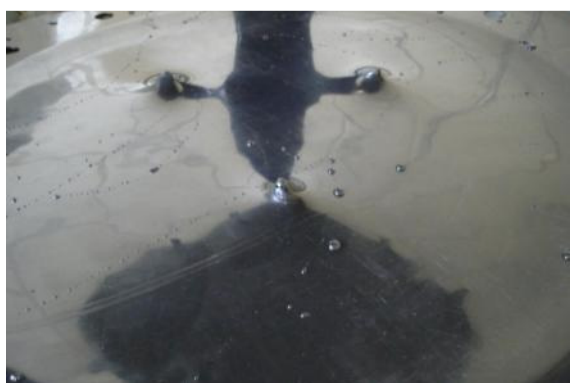
(b) GT P2xPP600 após ensaio com base de brita.



(c) GM após ensaio com cones $H_c = 37$ mm.



(d) GT PET300 após ensaio com cones (37 mm).



(e) GM após ensaio com cones $H_c = 25$ mm.



(f) GT PET300 após ensaio com cones (25mm).

Figura 4.26 – Deformações na superfície da geomembrana de PEAD 2,0 mm e das camadas de proteção após o ensaio de puncionamento hidrostático.

A variação da resistência ao puncionamento hidrostático dos conjuntos geomembrana/camada de proteção para a base com brita, em função da resistência à punção dos geotêxteis utilizados como camadas de proteção está apresentada na Figura 4.27.

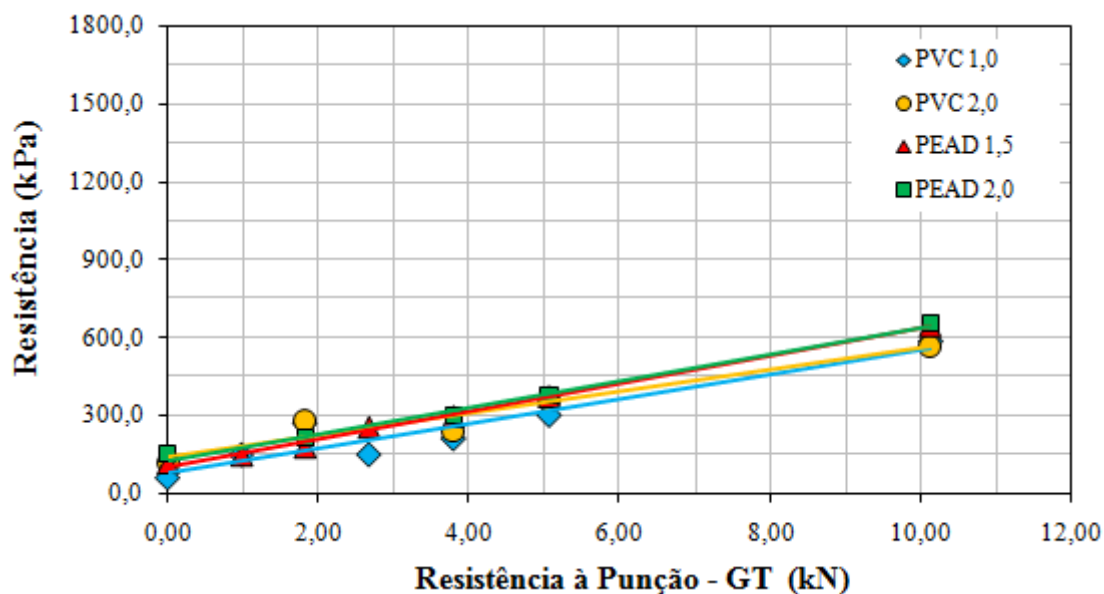


Figura 4.27 – Variação da resistência ao puncionamento hidrostático em função da resistência ao puncionamento estático – CBR das camadas de proteção, para a base de brita.

Com base no gráfico apresentado na Figura 4.27, determinou-se as equações da resistência ao puncionamento hidrostático do conjunto geomembrana/camada de proteção para a base com brita, em função da resistência ao puncionamento – CBR (RP) dos materiais utilizados como camada de proteção.

$$\text{PVC 1,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 47,63.(RP) + 80,16 \quad R^2 = 0,893 \quad (4.41)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 41,72.(RP) + 141,8 \quad R^2 = 0,921 \quad (4.42)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 53,42.(RP) + 103,4 \quad R^2 = 0,995 \quad (4.43)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 51,35.(RP) + 125,0 \quad R^2 = 0,991 \quad (4.44)$$

A Figura 4.28 apresenta a variação da resistência dos conjuntos geomembrana/camada de proteção ao puncionamento hidrostático, para a base com cones com altura (H_c) de 37 mm, em função da resistência à punção dos geotêxteis utilizados como camada de proteção.

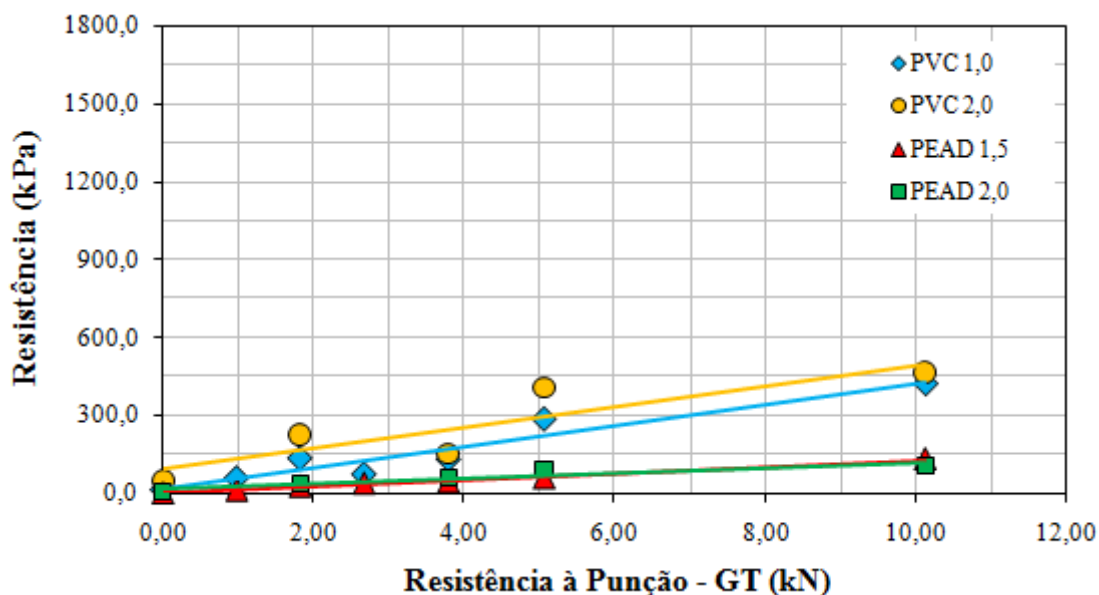


Figura 4.28 – Variação da resistência ao puncionamento hidrostático em função da resistência ao puncionamento estático – CBR das camadas de proteção, para cones ($H_c = 37$ mm).

As equações da resistência ao puncionamento hidrostático do conjunto geomembrana/camada de proteção para a base com cones ($H_c = 37$ mm), em função da resistência ao puncionamento – CBR (RP) dos materiais utilizados como camada de proteção, estão apresentadas a seguir:

$$\text{PVC 1,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 40,61.(RP) + 18,82 \quad R^2 = 0,917 \quad (4.45)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 40,00.(RP) + 92,26 \quad R^2 = 0,770 \quad (4.46)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 12,39.(RP) + 3,642 \quad R^2 = 0,991 \quad (4.47)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 9,606.(RP) + 20,21 \quad R^2 = 0,865 \quad (4.48)$$

A variação da resistência ao puncionamento hidrostático dos conjuntos geomembrana/camada de proteção para a base com cones ($H_c = 25 \text{ mm}$), em função da resistência à punção dos geotêxteis utilizados como camada de proteção está apresentada na Figura 4.29.

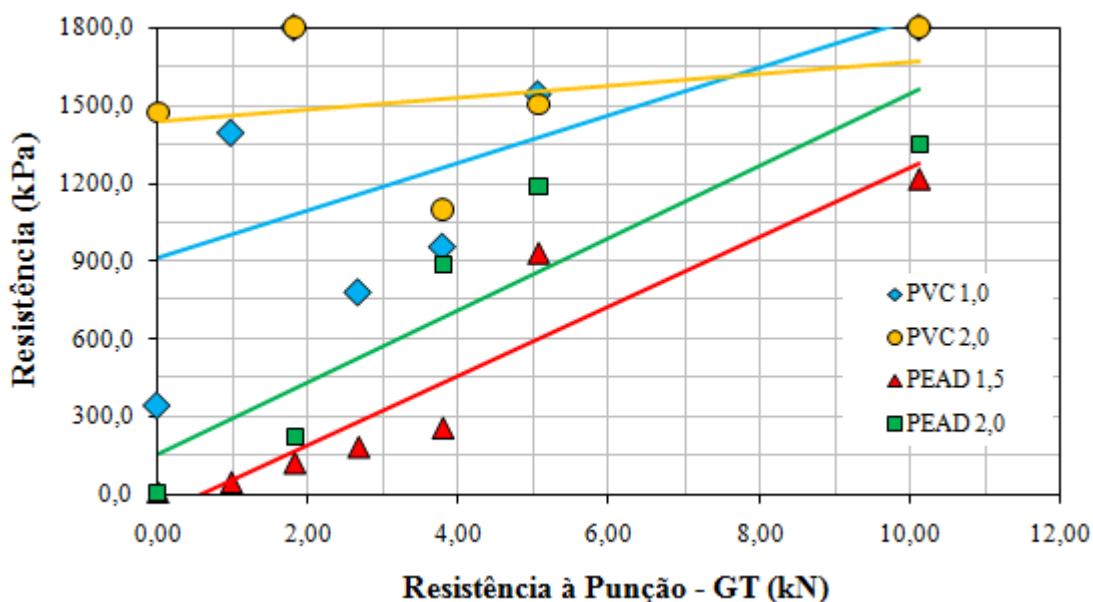


Figura 4.29 – Variação da resistência ao puncionamento hidrostático em função da resistência ao puncionamento estático – CBR das camadas de proteção, para cones ($H_c = 25 \text{ mm}$).

As equações da resistência ao puncionamento hidrostático do conjunto geomembrana/camada de proteção para a base com cones ($H_c = 25 \text{ mm}$), em função da resistência ao puncionamento – CBR (RP) dos materiais utilizados como camada de proteção, estão apresentadas a seguir:

$$\text{PVC 1,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 91,70.(RP) + 911,5 \quad R^2 = 0,313 \quad (4.49)$$

$$\text{PVC 2,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 22,97.(RP) + 1437, \quad R^2 = 0,092 \quad (4.50)$$

$$\text{PEAD 1,5} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 132,9.(RP) - 71,30 \quad R^2 = 0,881 \quad (4.51)$$

$$\text{PEAD 2,0} \quad R_{P_{\text{CONJ}}} = 138,9.(RP) + 153,4 \quad R^2 = 0,822 \quad (4.52)$$

4.3.2 Análise dos Resultados

Nos ensaios de punção hidrostática com a base de britas pontiagudas e lamelares, foi observado o mecanismo de ruptura das geomembranas de PVC e PEAD, além daquelas correspondentes aos geotêxteis empregados como camada de proteção.

As geomembranas de PVC, mais flexíveis, mostraram-se mais suscetíveis à ruptura por britas lamelares, ou seja, ruptura por rasgo. Durante a etapa de carregamento, a base com britas espaçadas permite a deformação da geomembrana de PVC nas regiões de vazios entre as britas e a base. No contato com as britas lamelares, ocorre a distribuição de tensões entre a superfície da geomembrana e a aresta destas britas. As deformações da geomembrana ocorridas na região próxima à face da brita geram solicitações de tração na superfície do material, ocasionando sua ruptura por rasgo.

Foi possível verificar, com a análise das amostras ensaiadas, deformações ocasionadas por punção (britas pontiagudas) na superfície das geomembranas de PVC. No entanto, devido à flexibilidade do material, as tensões concentradas na ponta da brita não foram suficientes para ocasionar sua ruptura. A Figura 4.30 apresenta a ruptura da geomembrana de PVC por rasgo na região de contato com a aresta de britas lamelares.

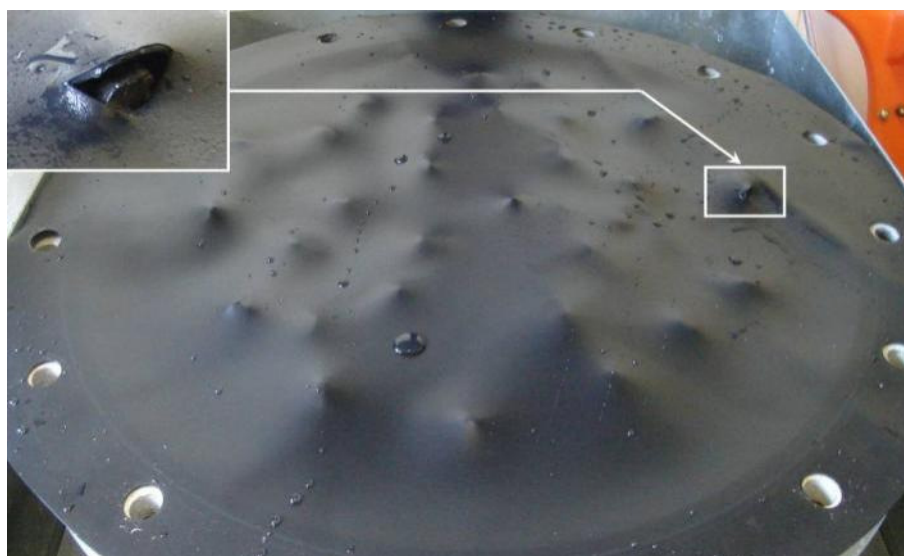


Figura 4.30 – Ruptura por rasgo em geomembrana de PVC.

As geomembranas de PEAD, mais rígidas, mostraram-se suscetíveis à ruptura por britas pontiagudas, ou seja, ruptura por puncionamento. Devido à pouca flexibilidade do material, durante a etapa de carregamento da geomembrana de PEAD, ocorre a concentração de tensões no contato da superfície da geomembrana com a ponta da brita. Esta concentração de tensões no contato ocasiona a ruptura por puncionamento da geomembrana, como pode ser observado na Figura 4.31.

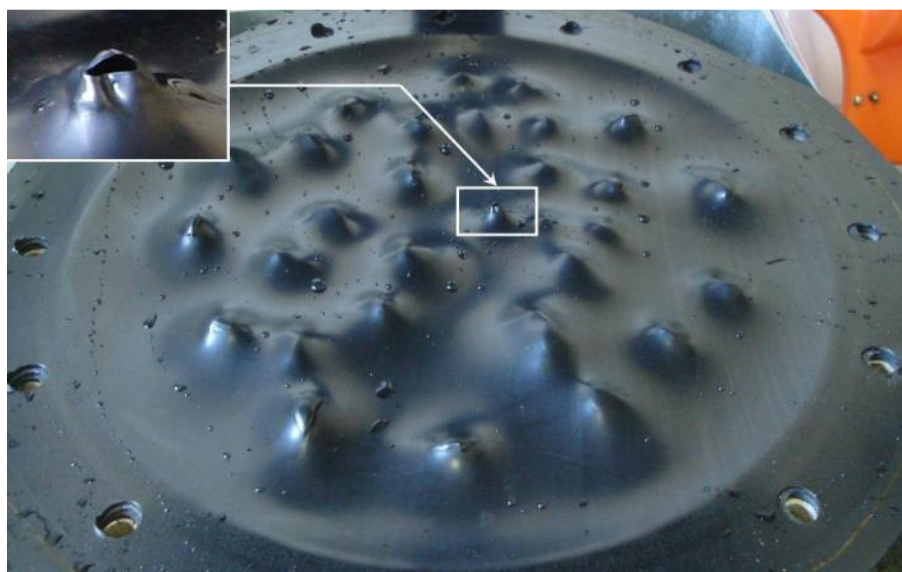


Figura 4.31 – Ruptura por puncionamento em geomembrana de PEAD.

Nos ensaios com a base de brita, verificou-se que geotêxteis mais flexíveis, como o PET 150 e o PET 300, deformam-se simultaneamente à geomembrana. Desta forma, com o incremento dos carregamentos e conseqüentemente deformação dos materiais, os geotêxteis envolviam as britas, o que impedia o contato direto da geomembrana com as arestas e pontas angulares das britas.

Este fato proporcionou acréscimo da resistência ao puncionamento do conjunto, pelo fato de impedir o contato direto da geomembrana com a brita e propiciar maior distribuição das tensões. Para estes casos, foi observado que o mecanismo de ruptura das geomembranas é similar ao ocorrido na configuração sem proteção, tanto para as geomembranas de PVC quanto para as geomembranas de PEAD.

Os geotêxteis de proteção menos flexíveis, devido ao processo de agulhamento, apresentaram ruptura por punção quando em contato com britas pontiagudas. Com o emprego destes elementos, como os geotêxteis de PET400 e PET600, verificou-se que a ruptura das geomembranas ocorria por puncionamento, já que, após a ruptura do elemento de proteção, ocorria o contato direto das britas pontiagudas com a superfície das geomembranas e conseqüente ruptura por puncionamento, independente do tipo de geomembrana.

No ensaio com a base de cones truncados com altura exposta de 37 mm, foi possível verificar que as geomembranas de PVC apresentaram desempenho superior quando comparadas às geomembranas de PEAD. O formato do cone truncado ocasiona uma concentração de tensões em sua ponta. Desta forma, foi possível observar para as geomembranas de PEAD, mais rígidas, uma redução da resistência ao puncionamento, quando comparadas às de PVC, mais flexíveis.

O emprego das camadas de proteção proporcionou um incremento da resistência ao puncionamento para as geomembranas de PVC e de PEAD. A introdução de geotêxteis de proteção, para o caso das geomembranas de PVC, impedia o contato direto da geomembrana com a ponta do cone truncado; assim, a ruptura da geomembrana ocorria após a ruptura do geotêxtil e conseqüente contato direto da geomembrana com o cone. Para a geomembrana de PEAD, foi verificada, em alguns casos, a ruptura do material independente da ruptura do geotêxtil de proteção. O incremento de resistência deve-se ao emprego de materiais de maior resistência e espessura, já que estes materiais, mesmo quando submetidos a esforços de compressão, geram um aumento do diâmetro do contato do cone com a superfície da geomembrana, e, em conseqüência, uma maior distribuição das tensões na superfície da geomembrana nestas regiões.

Este comportamento distinto para os dois materiais (PVC e PEAD) ficou mais evidente na análise dos resultados para cones com altura exposta de 25 mm, já que a ruptura

das geomembranas de PEAD ocorre com baixas deformações, enquanto que para as geomembranas de PVC a ruptura ocorre com maiores deformações.

Nestes ensaios com cones com altura exposta de 25 mm, a maior flexibilidade das geomembranas de PVC possibilita ao material deformar-se o suficiente para apoiar determinadas regiões na base da câmara, preenchida com material granular, o que proporciona aumento na resistência à punção, devido à distribuição das tensões pela superfície do material em contato com o cone. No caso das geomembranas de PEAD, as deformações ocorridas no material não são suficientes para proporcionar este contato, o que gera rupturas com pressões mínimas.

A Figura 4.32 ilustra a conformação das geomembranas isoladas de PVC (a) e PEAD (b) no contato com os cones truncados, o que influencia diretamente a distribuição de tensões junto aos contatos dos cones.

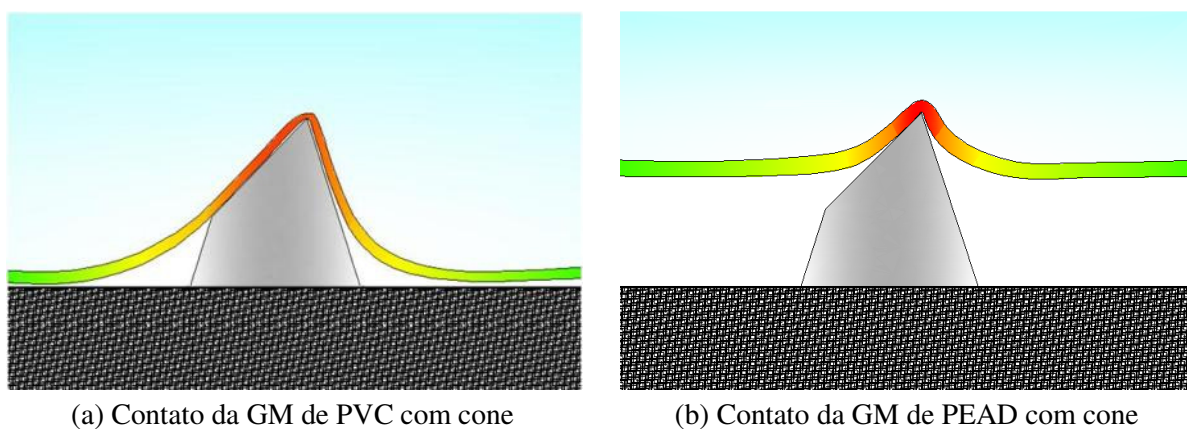


Figura 4.32 – Ilustração da distribuição das tensões no contato das geomembranas com o cone.

O emprego de camadas de proteção para as geomembranas de PVC, além de proporcionar melhor distribuição de tensões, restringe o contato direto da superfície do material com a ponta do cone, até o momento da ruptura do geotêxtil de proteção. Os geotêxteis mais flexíveis deformam-se em conjunto com a geomembrana, o que impede o contato direto da geomembrana com o cone, aumentando a resistência ao puncionamento do conjunto.

Notou-se que os geotêxteis menos flexíveis proporcionam a proteção da geomembrana até o momento da ruptura deste geotêxtil, permitindo, após este fato, o contato direto da ponta do cone com a geomembrana, o que ocasiona a ruptura do material.

A Figura 4.33 ilustra a distribuição de tensões para os casos em que não ocorreu a ruptura do elemento de proteção (a) e para o caso com a ruptura do elemento de proteção (b). A concentração de tensões no contato da ponta com o cone também é ilustrada.

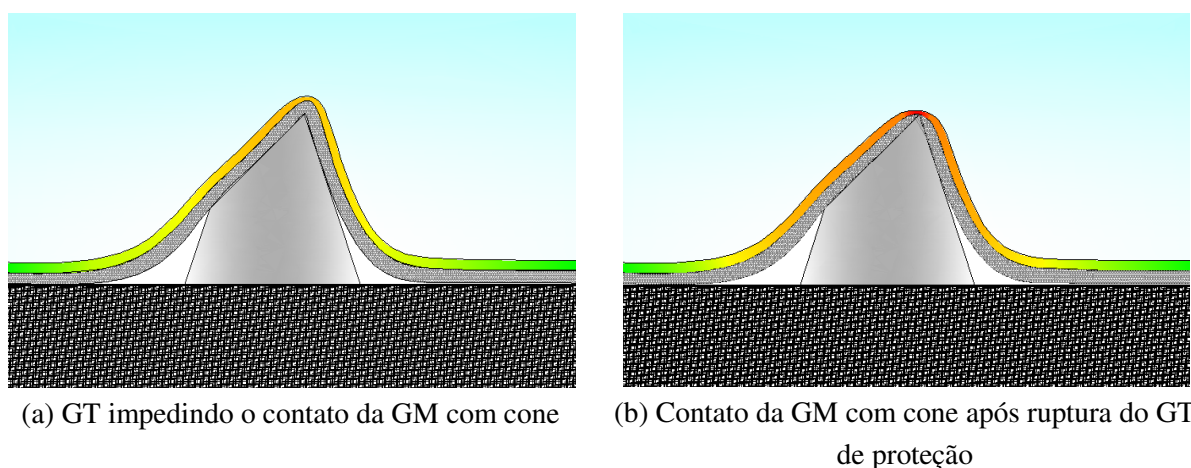


Figura 4.33 – Ilustração da distribuição das tensões para geomembranas de PVC.

Este fato pode ser observado na Figura 4.34, em que a ruptura da geomembrana (a) ocorre após a ruptura do elemento de proteção (b), o que permitiu o contato direto da ponta do cone com a superfície da geomembrana.

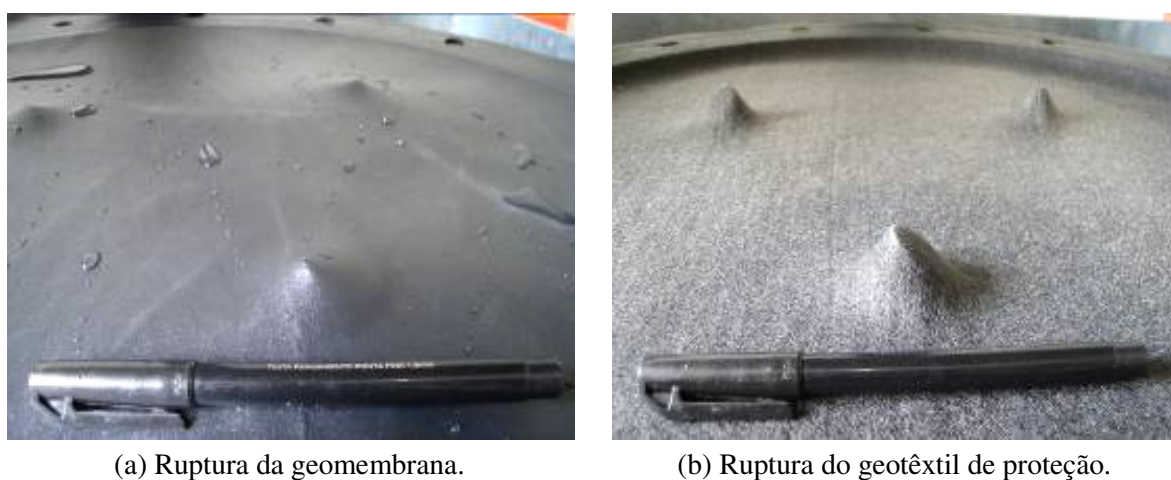


Figura 4.34 – Ruptura da geomembrana após a ruptura do geotêxtil no ensaio com cones.

Para as geomembranas de PVC no ensaio com cones de altura 25 mm, o melhor desempenho foi verificado para as configurações de proteção com geotêxteis não-tecidos de PET 300 e a camada dupla com PP 600. Para estas configurações de proteção, o ensaio foi conduzido até a máxima pressão do equipamento (1800 kPa), não sendo verificada a ruptura do material. Nestes casos, não foi observada presença de rasgos ou perfurações na superfície dos geotêxteis que possibilitassem o contato direto da ponta do cone com a superfície da geomembrana.

Para geomembranas de PEAD, verificou-se, no ensaio com cones de altura exposta de 25 mm, que parâmetros como a resistência e a espessura do elemento de proteção são mais relevantes para o aumento da resistência ao puncionamento do conjunto que a flexibilidade.

A espessura do material de proteção proporciona um aumento do diâmetro de contato da ponta do cone com a superfície da geomembrana, o que gera maior distribuição de tensões neste contato dos materiais. Os elementos de proteção com maior resistência, quando submetidos a esforços de compressão, apresentam maior espessura que os elementos de menor resistência. Este fato pode ser verificado pelo comportamento da geomembrana com a introdução das camadas de proteção de PET300 e PP600.

Os esforços de compressão, durante a realização do ensaio, ocasionam a redução da espessura do geotêxtil PET300. Este fato permite diminuir a área de contato da ponta do cone, o que aumenta a concentração de tensões na geomembrana. Desta forma, mesmo com a não ruptura do elemento de proteção, pode ocorrer a ruptura por puncionamento da geomembrana devido a este acúmulo de tensões.

Os geotêxteis de polipropileno apresentaram o melhor desempenho como elementos de proteção ao puncionamento quando comparados aos geotêxteis de poliéster, com aumento considerável da resistência do conjunto geomembrana/camada de proteção.

Estes materiais, além de serem espessos quando comparados aos outros geotêxteis, possuem alta resistência. Esta maior resistência permitiu a manutenção de uma espessura suficiente para gerar um incremento de resistência devido ao aumento do diâmetro de contato, ocasionando maior distribuição de tensões.

A Figura 4.35 ilustra a distribuição de tensões na geomembrana de PEAD para o caso em que não ocorreu a ruptura do elemento de proteção (a) e na situação com a ruptura do elemento de proteção (b).

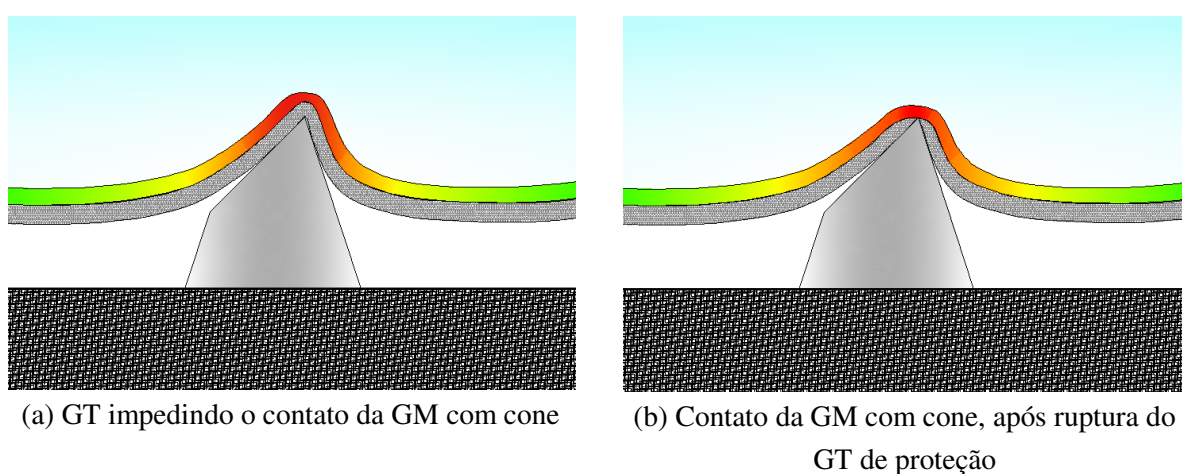


Figura 4.35 – Ilustração da distribuição das tensões para geomembranas de PEAD.

A Figura 4.36 apresenta o detalhe da ruptura da geomembrana (a) independente da ruptura do geotêxtil de proteção (b), para o caso em que foi empregado o geotêxtil PET 300.

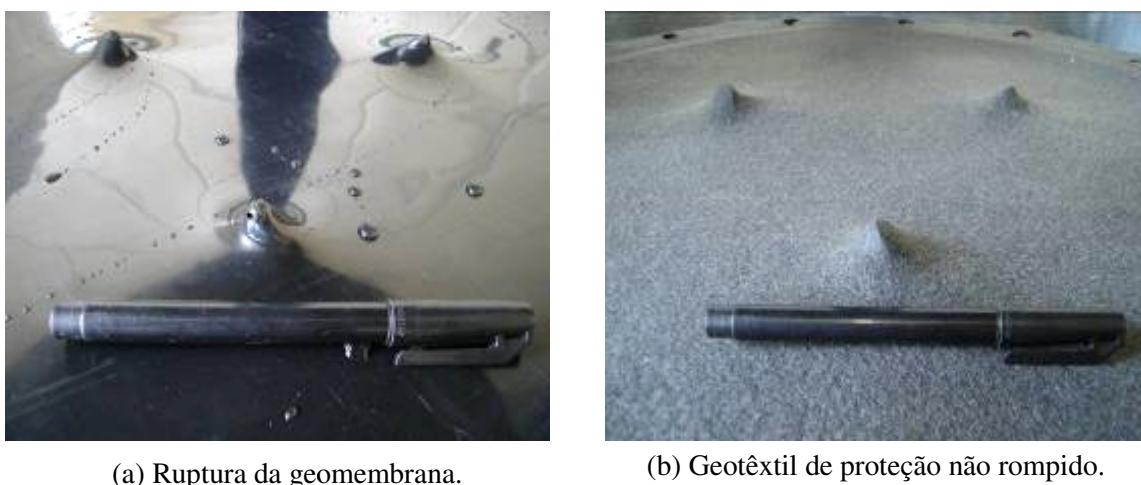


Figura 4.36 – Ruptura da geomembrana independente da ruptura do geotêxtil.

4.4 ENSAIO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO

O ensaio de carregamento estático simula as condições da carga sobrejacente de resíduos sobre as geomembranas durante o período de operação e desativação de um aterro sanitário. Neste ensaio, foi simulado o carregamento durante um período de 100 horas, onde o conjunto geomembrana/camada de proteção foi submetido a incrementos de carga da ordem de 125 kPa nas quatro horas iniciais, seguido de um carregamento máximo com 500 kPa por um período de 96 horas.

Neste ensaio, foram utilizadas geomembranas de PVC (espessura de 1,0 mm) e PEAD (espessura de 1,5 mm). As configurações de proteção foram compostas por geotêxteis não-tecidos de PET (gramaturas de 300 e 600 g/m²) e PP (gramaturas de 600 e 2 x 600 g/m²), além de uma camada de areia com espessura de 50 mm (gramatura de 85000 g/m²).

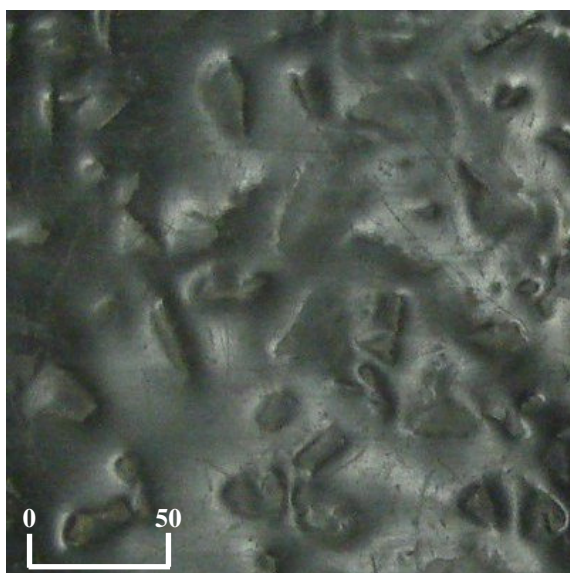
4.4.1 Análises Visuais dos Danos

Para a avaliação do desempenho das camadas de proteção, inicialmente foram realizadas análises visuais das geomembranas e da base com solo compactado. Foi posicionada sobre a base de solo compactado uma folha de papel alumínio com a finalidade de destacar as deformações ocorridas na base devidas ao puncionamento das britas.

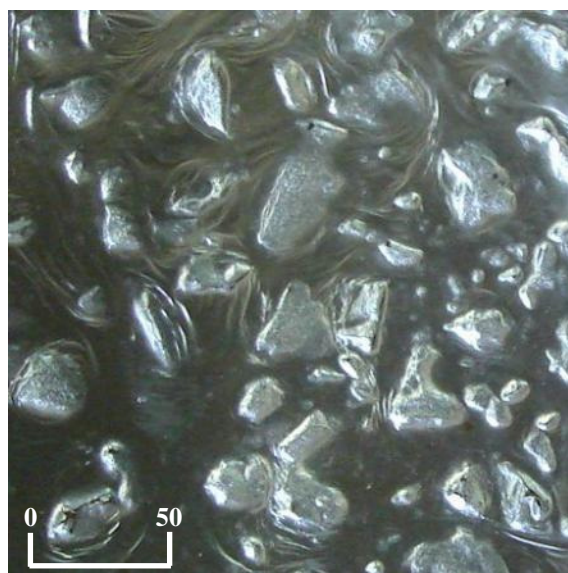
Para verificar a presença de perfurações na superfície da geomembrana, foi realizado o teste para detecção de furos, *spark test* (teste da faísca). Com base neste teste, foi verificado que não ocorreram perfurações ou descontinuidades na superfície das geomembranas de PVC e PEAD após a aplicação da sobrecarga durante a realização do ensaio de carregamento estático.

As análises visuais realizadas nas geomembranas e na base estão apresentadas nas Figuras 4.37 a 4.48. A escala gráfica utilizada apresenta as dimensões em milímetros.

A Figura 4.37 apresenta as deformações na geomembrana de PVC (a) e na base de solo compactado (b), submetidas ao carregamento sem o emprego de camadas de proteção.



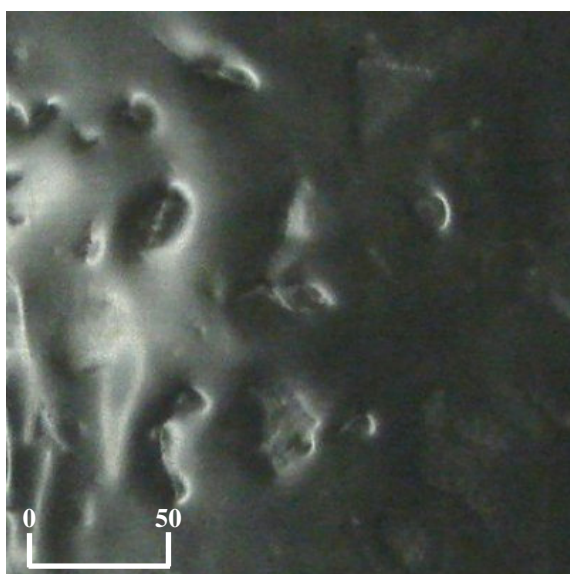
(a) Deformações na geomembrana



(b) Deformações na base compactada

Figura 4.37 – Deformações na geomembrana de PVC/Sem Proteção e na base compactada.

As deformações ocorridas na geomembrana de PVC (a) e na base de solo compactado (b), protegidas com geotêxtil PET 300 estão apresentadas na Figura 4.38.



(a) Deformações na geomembrana



(b) Deformações na base compactada

Figura 4.38 – Deformações na geomembrana de PVC/PET300 e na base compactada.

As análises visuais realizadas na geomembrana de PVC e na base compactada protegidas com geotêxtil PET 600 estão apresentadas na Figura 4.39.

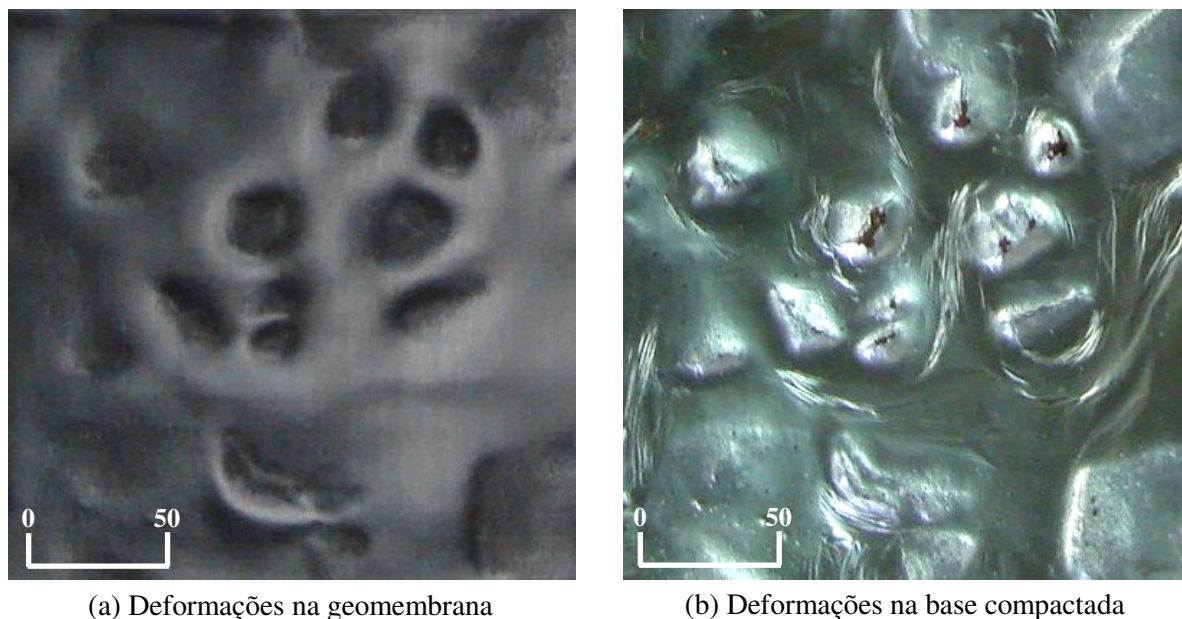


Figura 4.39 – Deformações na geomembrana de PVC/PET600 e na base compactada.

A Figura 4.40 apresenta as deformações na geomembrana de PVC (a) e na base de solo compactado (b), protegidas com um geotêxtil não-tecido de PP 600.

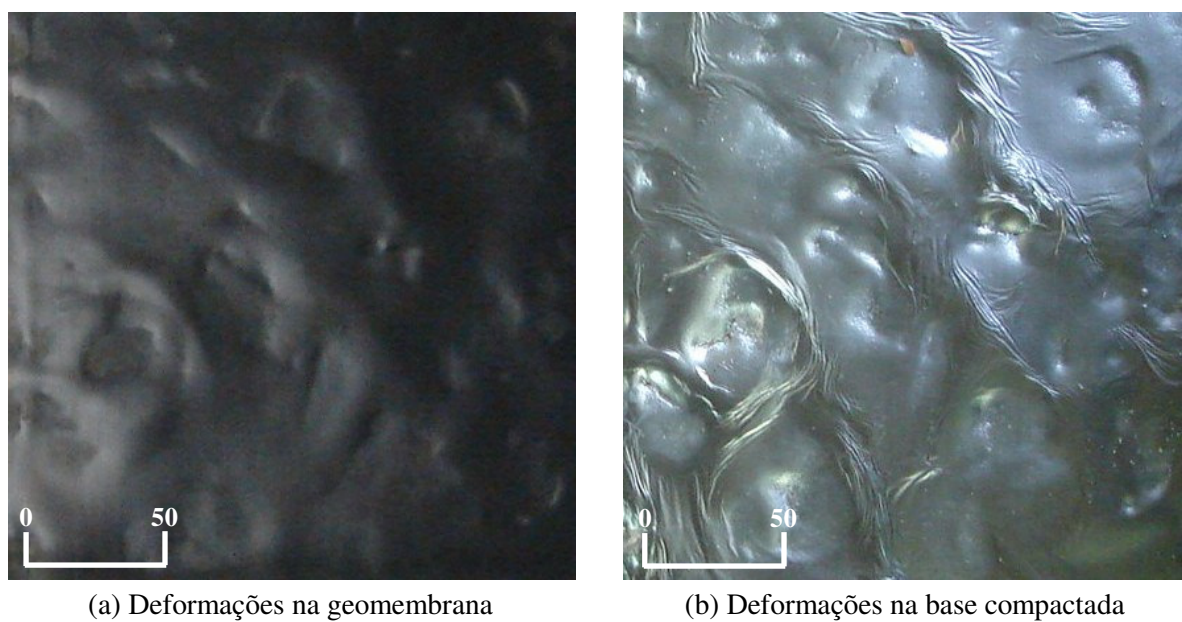
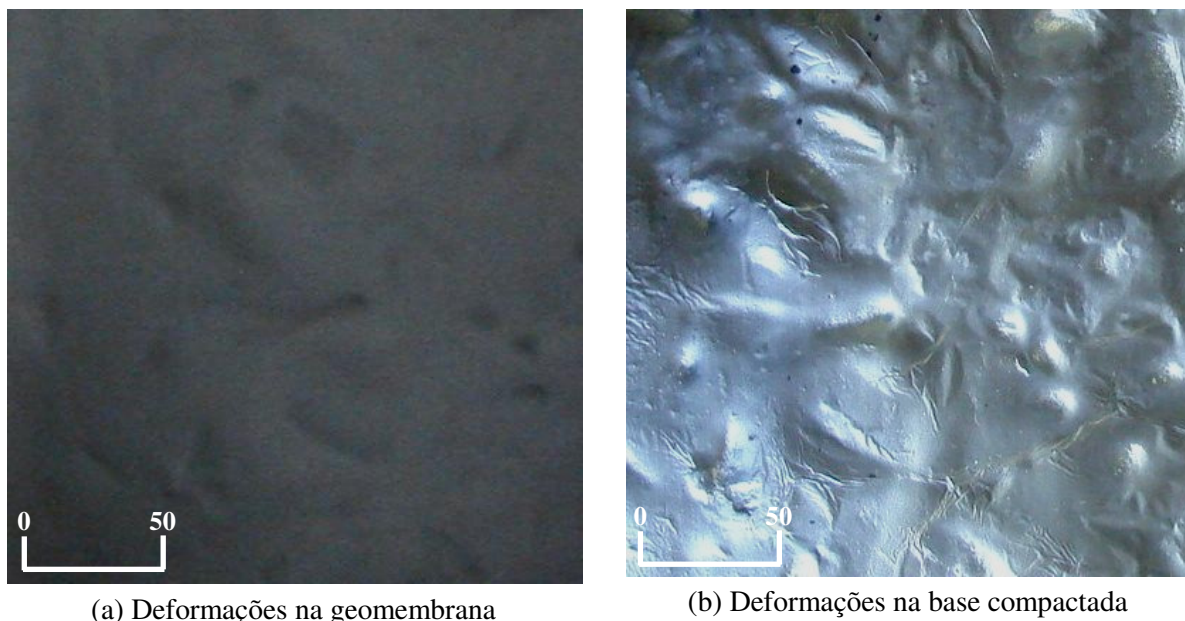


Figura 4.40 – Deformações na geomembrana de PVC/PP600 e na base compactada.

As deformações ocorridas na geomembrana de PVC (a) e na base compactada (b), protegidas com camada dupla de geotêxtil PP 600, estão apresentadas na Figura 4.41.

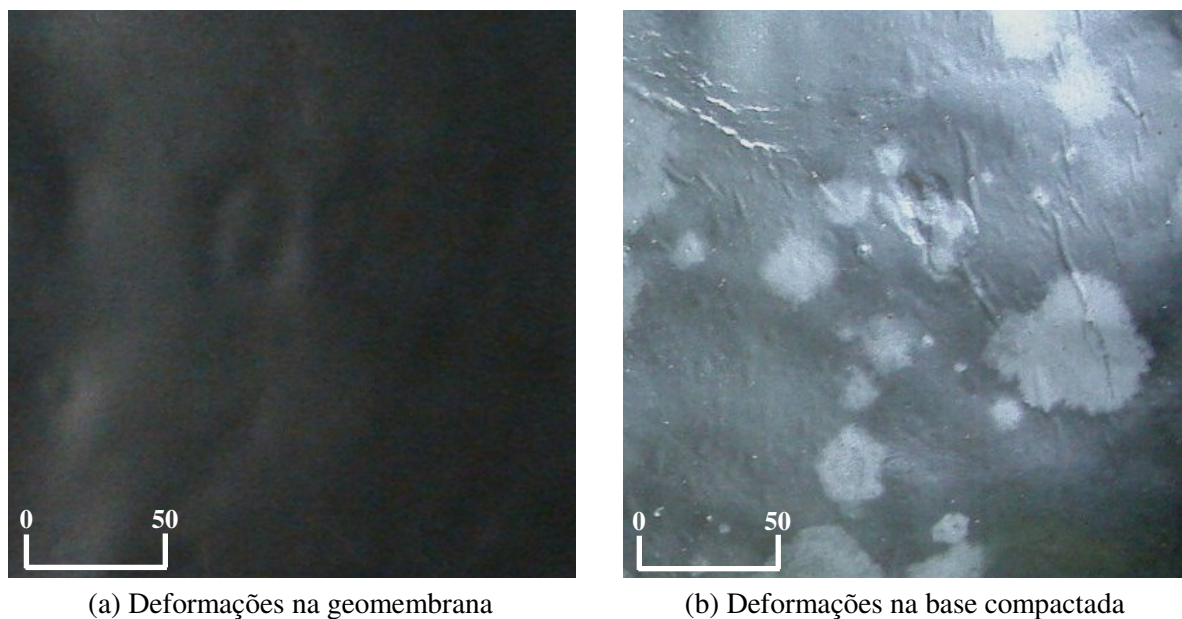


(a) Deformações na geomembrana

(b) Deformações na base compactada

Figura 4.41 – Deformações na geomembrana de PVC/2xPP600 e na base compactada.

A Figura 4.42 apresenta as deformações nas geomembrana de PVC (a) e na base compactada (b), submetidas ao carregamento estático e protegidas com uma camada de areia com espessura de 50 mm.



(a) Deformações na geomembrana

(b) Deformações na base compactada

Figura 4.42 – Deformações na geomembrana de PVC/Areia e na base compactada.

A Figura 4.43 apresenta as deformações nas geomembrana de PEAD (a) e na base compactada (b), submetidas ao carregamento estático sem o emprego de camadas de proteção.

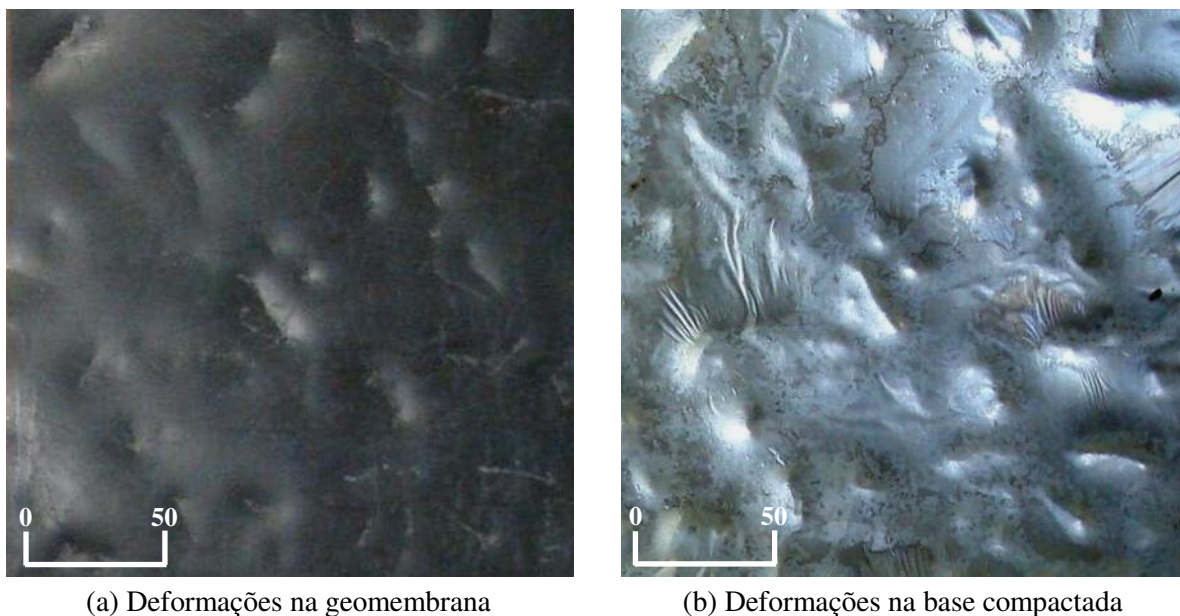


Figura 4.43 – Deformações na geomembrana de PEAD/Sem Proteção e na base compactada.

As deformações ocorridas na geomembrana de PEAD (a) e na base de solo compactado (b), protegidas com geotêxtil PET 300, estão apresentadas nas Figuras 4.44.

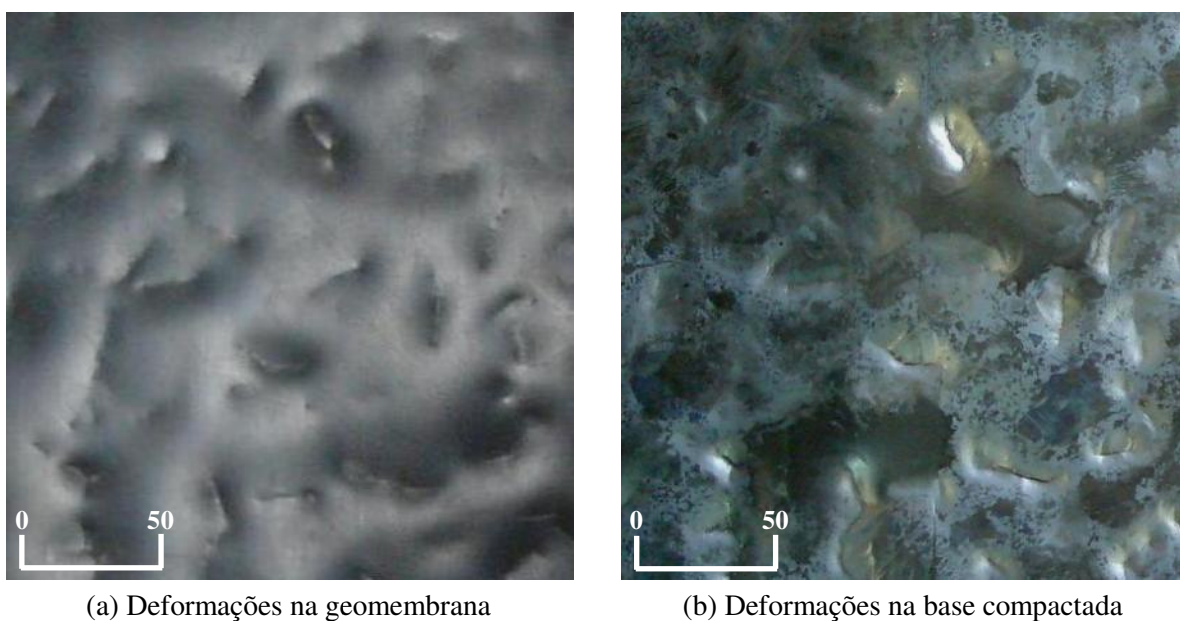


Figura 4.44 – Deformações na geomembrana de PEAD/PET300 e na base compactada.

As análises visuais realizadas na geomembrana de PEAD, protegida com geotêxtil PET 600 e submetida a carregamento estático, estão apresentadas na Figura 4.45.

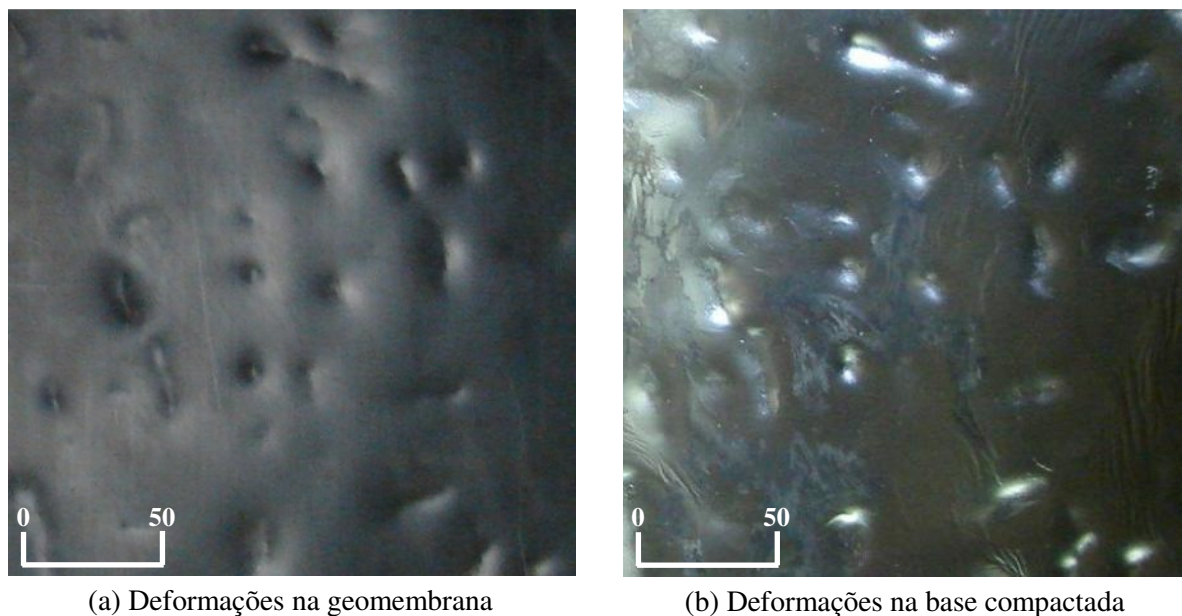


Figura 4.45 – Deformações na geomembrana de PEAD/PET600 e na base compactada.

A Figura 4.46 apresenta as deformações na geomembrana de PEAD (a) e na base de solo compactado (b), protegidas com um geotêxtil de PP 600 e submetidas ao carregamento estático..

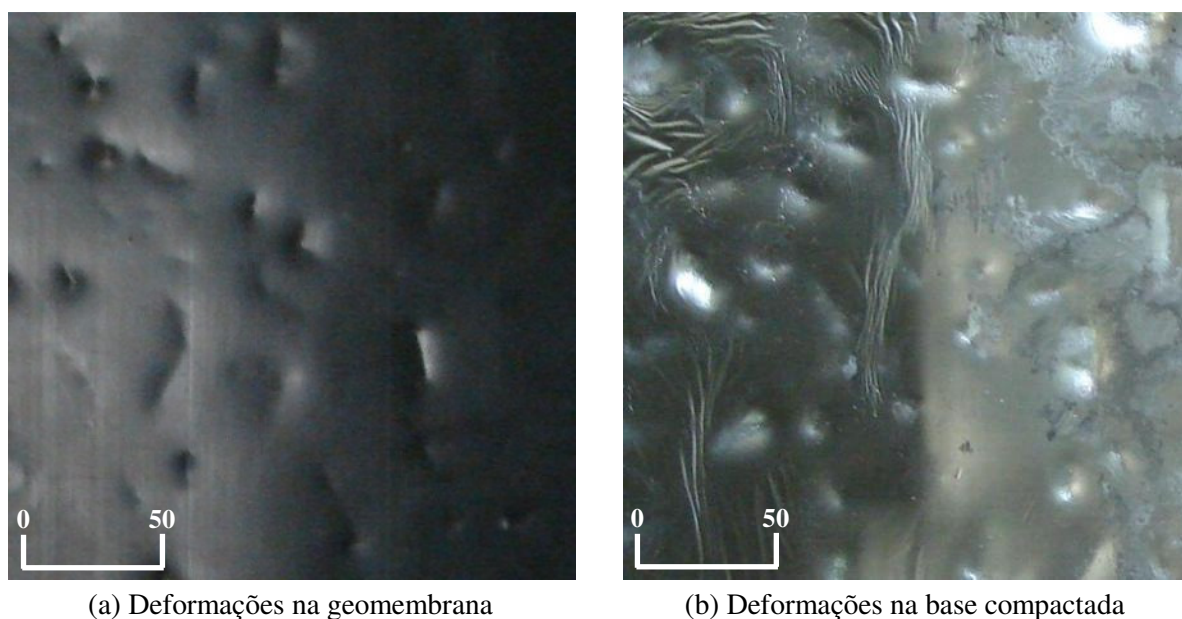


Figura 4.46 – Deformações na geomembrana de PEAD/PP600 e na base compactada.

As deformações ocorridas na geomembrana de PEAD (a) e na base compactada (b), protegidas com camada dupla de geotêxtil PP 600, estão apresentadas nas Figuras 4.47.

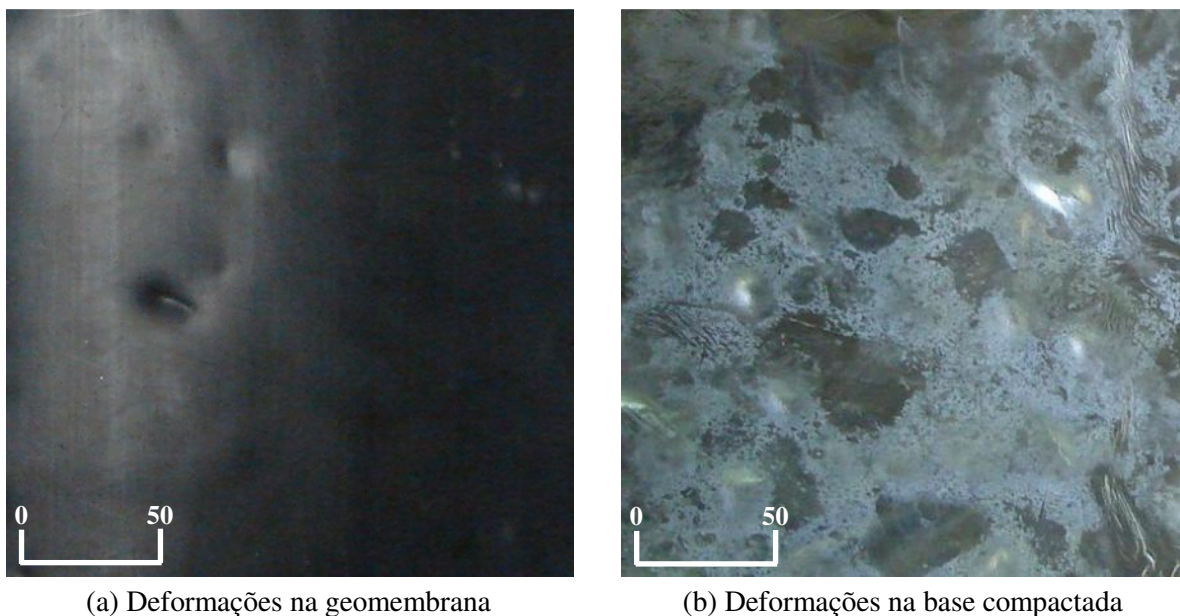


Figura 4.47 – Deformações na geomembrana de PEAD/2xPP600 e na base compactada.

A Figura 4.48 apresenta as deformações nas geomembrana de PEAD (a) e na base compactada (b), submetidas ao carregamento estático e protegidas com uma camada de areia com espessura de 50 mm.

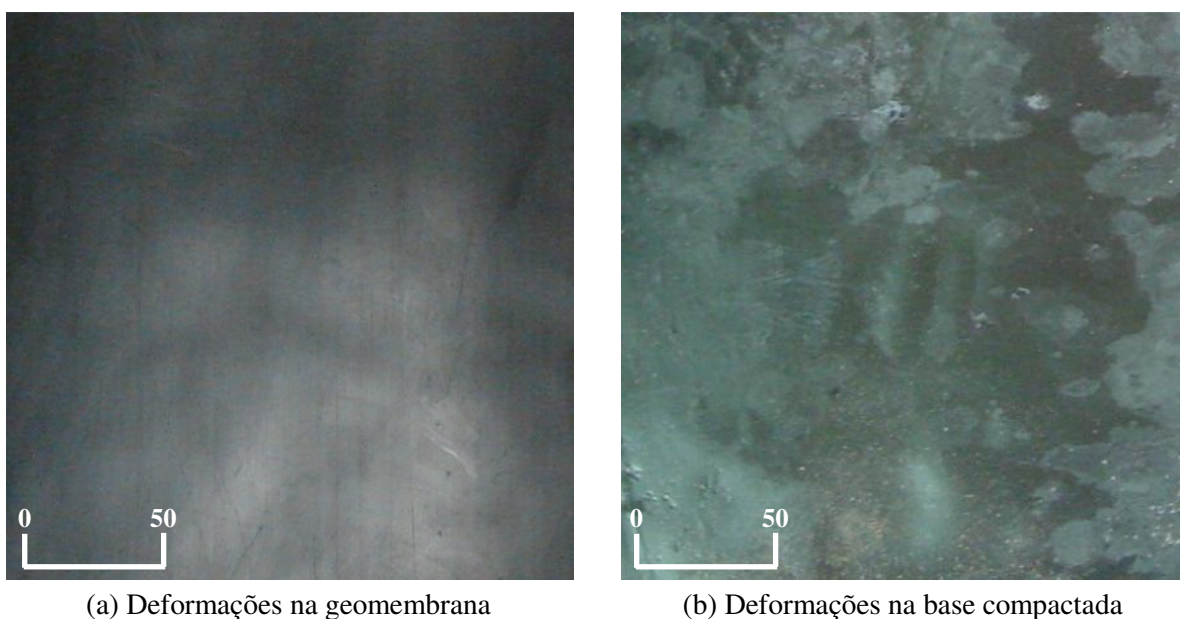


Figura 4.48 – Deformações na geomembrana de PEAD/Areia e na base compactada.

A partir das análises visuais das geomembranas e da base de solo compactado, foram gerados histogramas de frequência de danos na superfície das geomembranas com base na Tabela 3.15. O histograma com o grau de ocorrência de danos para a geomembrana de PVC está apresentado na Figura 4.49.

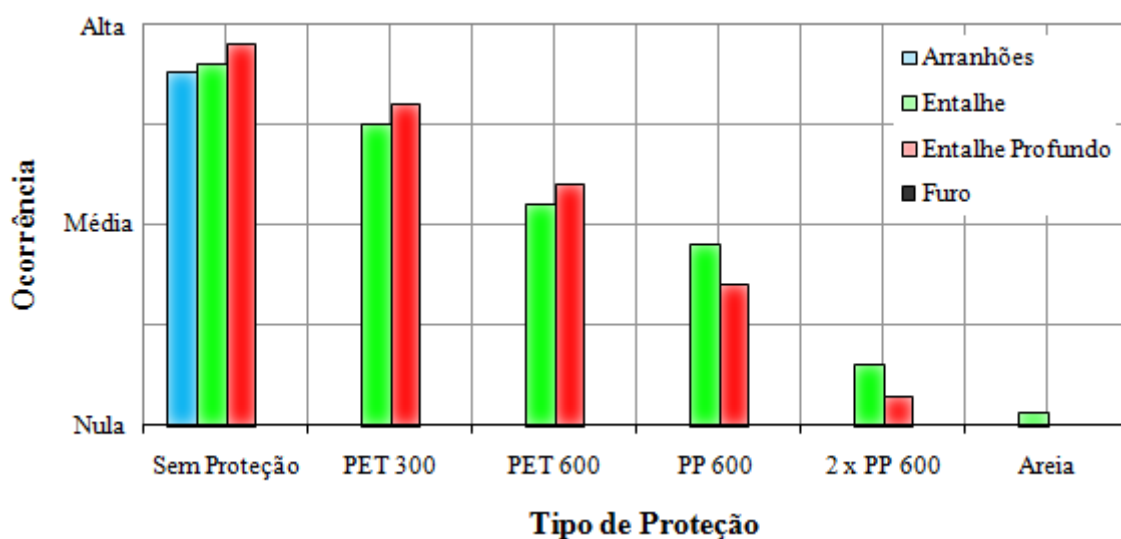


Figura 4.49 – Ocorrência de danos na geomembrana de PVC em função do tipo de proteção.

A Figura 4.50 apresenta o histograma de ocorrência de danos na superfície da geomembrana de PEAD.

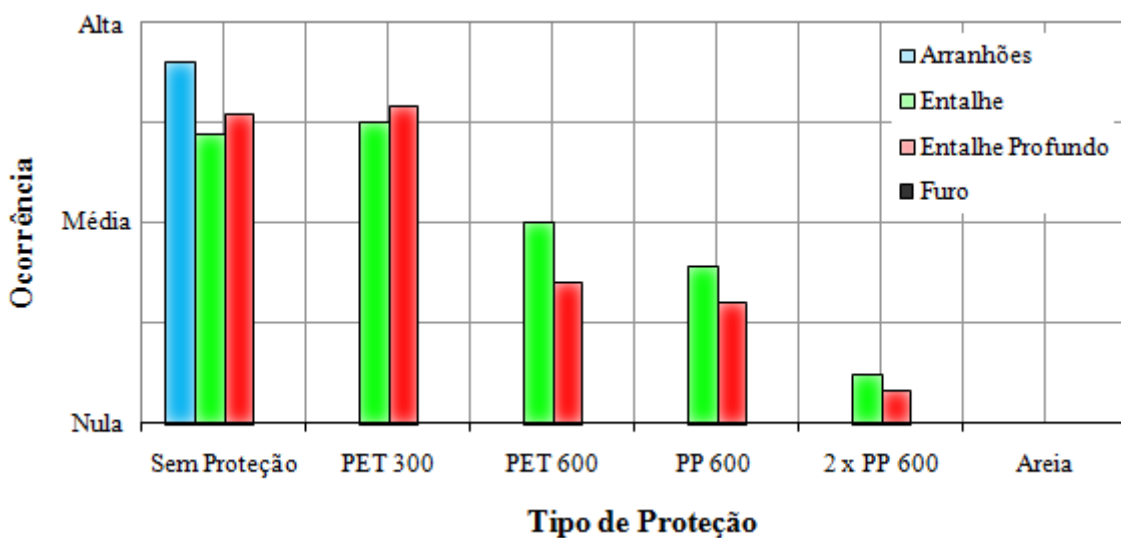


Figura 4.50 – Ocorrência de danos na geomembrana de PEAD em função do tipo de proteção.

4.4.2 Análise das Propriedades Hidráulicas

Para a avaliação das possíveis variações da permeabilidade das geomembranas após a execução do ensaio de carregamento estático, foram realizados ensaios de permeabilidade a vapor d'água nestas geomembranas danificadas. Os valores de permeabilidade obtidos nestes ensaios estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Permeabilidade a vapor d'água das geomembranas de PVC e PEAD danificadas.

GM	Unidade	Tipo de Proteção					
		Sem Proteção	PET 300	PET 600	PP 600	2xPP600	Areia
PVC 1,0	g/Pa.s.m	1,36 ⁻¹²	1,04 ⁻¹²	1,11 ⁻¹²	1,14 ⁻¹²	1,06 ⁻¹²	1,29 ⁻¹²
	cm/s	1,00 ⁻¹²	7,64 ⁻¹³	8,13 ⁻¹³	8,37 ⁻¹³	7,79 ⁻¹³	9,47 ⁻¹³
PEAD 1,5	g/Pa.s.m	3,85 ⁻¹³	2,64 ⁻¹³	2,29 ⁻¹³	3,06 ⁻¹³	3,35 ⁻¹³	2,31 ⁻¹³
	cm/s	2,83 ⁻¹³	1,94 ⁻¹³	1,68 ⁻¹³	2,25 ⁻¹³	2,46 ⁻¹³	1,70 ⁻¹³

A Figura 4.51 apresenta os valores de permeabilidade a vapor d'água para amostras de geomembranas de PVC com espessura de 1,0 mm, danificadas mecanicamente e amostras intactas.

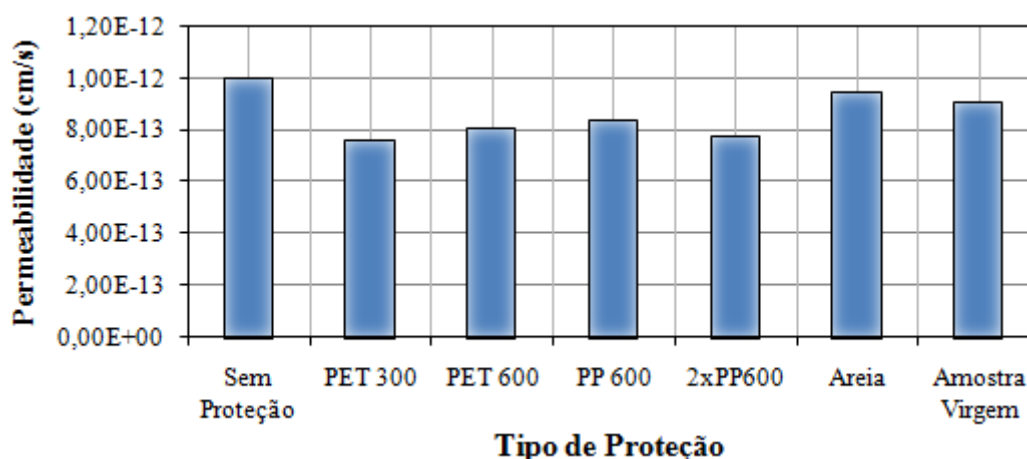


Figura 4.51 – Permeabilidade de amostras de geomembranas de PVC com 1,0 mm, danificadas e intacta.

Os valores de permeabilidade a vapor d'água para amostras de geomembranas de PEAD com espessura de 1,5 mm, danificadas e amostras intactas, estão apresentados na Figura 4.52.

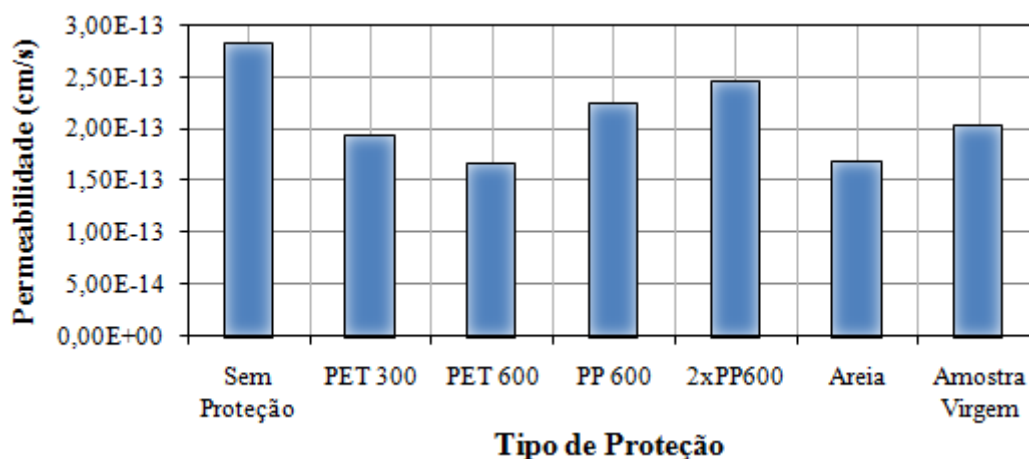


Figura 4.52 – Permeabilidade de amostras de geomembranas de PEAD de 1,5 mm, danificadas e intacta.

4.4.3 Análise das Propriedades Mecânicas

Foram realizados os ensaios mecânicos para verificar possíveis alterações das propriedades das geomembranas danificadas após a realização do ensaio de carregamento estático. Os valores de resistência das geomembranas de PVC, submetidas aos ensaios mecânicos pós-dano, estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas das geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas.

Ensaio	Unidade	Tipo de Proteção						
		Sem Proteção	PET 300	PET 600	PP 600	2xPP600	Areia	
Tração Ruptura	Long.	N/mm	15,07	15,69	16,03	15,92	16,33	16,33
		%	294,80	326,50	338,70	339,00	346,80	361,20
	Transv.	N/mm	12,70	12,94	13,10	13,10	13,28	13,76
		%	305,70	311,10	328,80	323,00	327,60	356,60
Rasgo	Long.	N	40,40	40,93	42,55	42,95	43,90	43,49
	Transv.	N	48,74	49,82	51,30	51,03	52,65	52,92
Estouro (adaptado)	kPa	200,00	200,00	200,00	200,00	212,50	212,50	
	mm	62,00	63,50	63,00	64,00	63,50	63,50	

A variação da tensão de ruptura no ensaio de resistência à tração das geomembranas de PVC com espessura de 1,0 mm em relação ao valor determinado para as amostras virgens está apresentada na Figura 4.53.

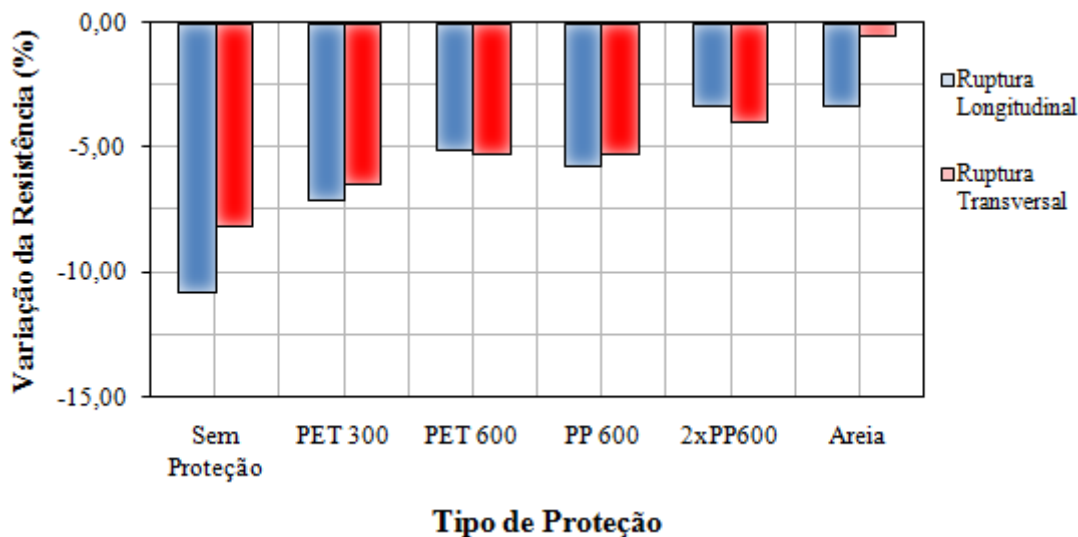


Figura 4.53 – Variação percentual da tensão de ruptura das geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

A variação da resistência à propagação de rasgos para as geomembranas de PVC com espessura de 1,0mm danificadas quando comparadas às amostras intactas estão apresentadas na Figura 4.54.

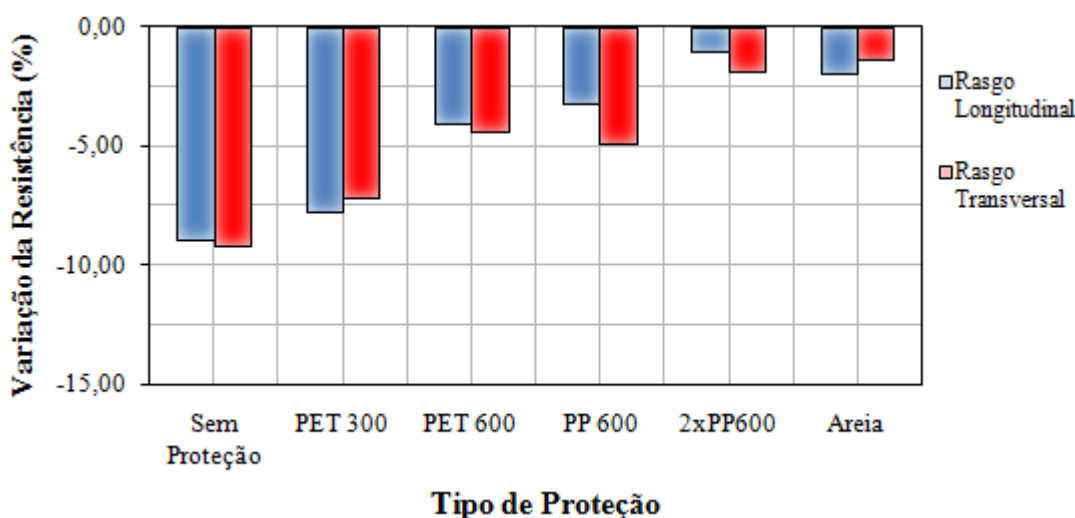


Figura 4.54 – Variação percentual da resistência à propagação de rasgos para as geomembranas de PVC danificadas em relação às amostras intactas.

A Figura 4.55 apresenta a variação da resistência ao estouro das geomembranas de PVC de 1,0 mm quando comparadas às amostras intactas.

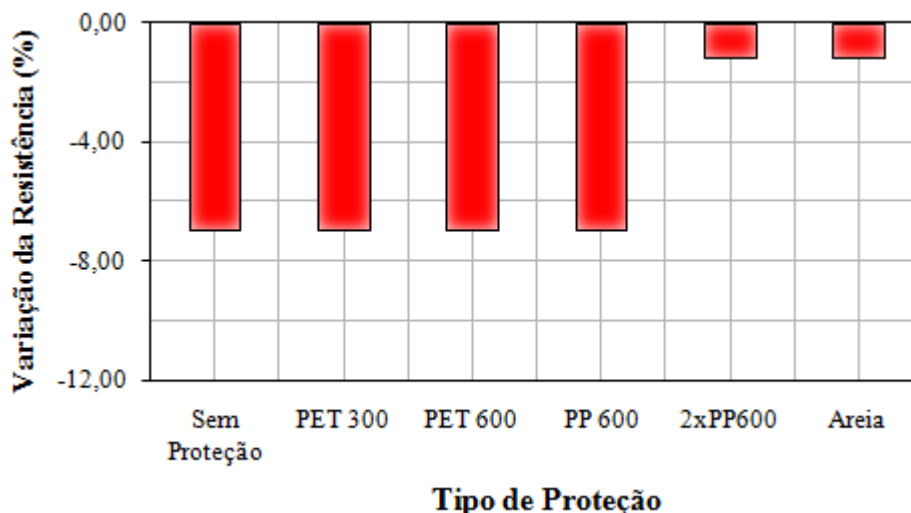


Figura 4.55 – Variação percentual da resistência ao estouro para as geomembranas de PVC de 1,0 mm danificadas em relação às amostras intactas.

A Tabela 4.5 apresenta os valores de resistência mecânica das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas após a execução do ensaio de carregamento estático.

Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas.

Ensaio	Unidade	Tipo de Proteção						
		Sem Proteção	PET 300	PET 600	PP 600	2xPP600	Areia	
Tração Escoamento	Long.	N/mm	31,09	30,84	31,92	32,37	32,77	33,29
		%	15,22	15,13	13,76	15,68	15,16	15,62
	Trans.	N/mm	32,41	33,40	33,50	33,96	34,67	34,55
		%	13,32	13,64	14,20	14,31	14,34	14,28
Tração Ruptura	Long.	N/mm	39,25	40,28	41,67	44,20	46,33	47,88
		%	684,80	688,70	702,60	737,50	766,50	784,60
	Trans.	N/mm	39,59	39,69	42,30	44,07	44,90	46,37
		%	704,40	690,10	727,70	741,90	750,30	770,80
Estouro (adaptado)	kPa	875,00	850,00	900,00	912,50	925,00	912,50	
	mm	41,50	42,00	42,50	42,00	43,00	43,00	

A variação da tensão de escoamento determinada no ensaio de resistência à tração para as geomembranas de PEAD com espessura de 1,5 mm em relação ao valor determinado para as amostras intactas estão apresentadas na Figura 4.56.

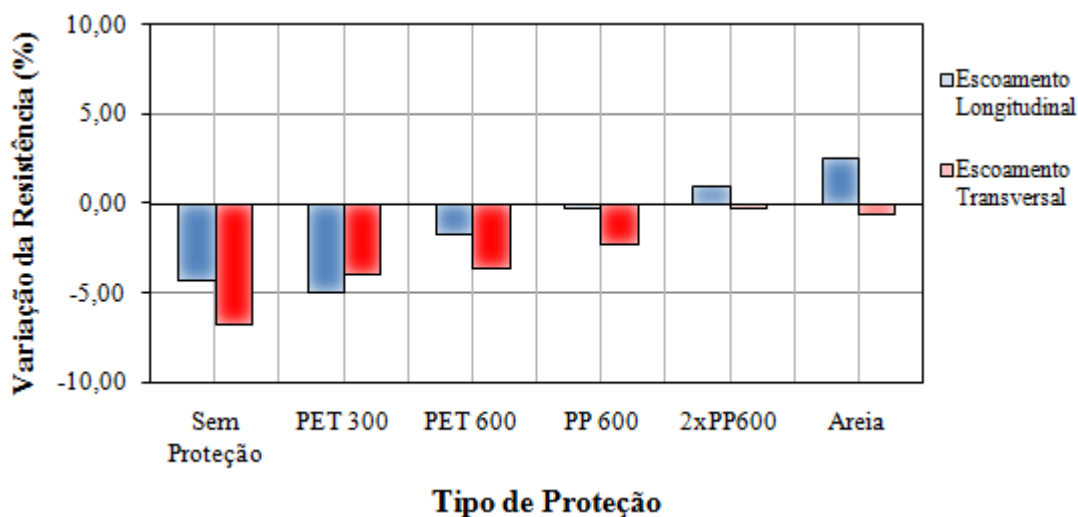


Figura 4.56 – Variação percentual da tensão de escoamento das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas em relação às amostras intactas.

A Figura 4.57 apresenta a variação da tensão de ruptura, determinada no ensaio de resistência à tração para as geomembranas de PEAD com espessura de 1,5 mm, em relação ao valor determinado para as amostras intactas.

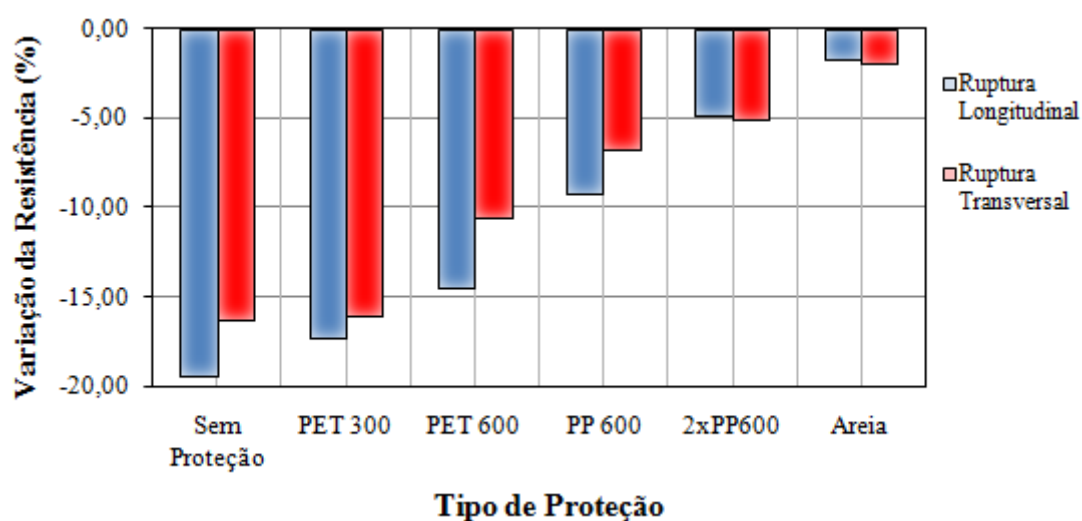


Figura 4.57 – Variação percentual da tensão de ruptura das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas em relação às amostras intactas.

A variação da resistência ao estouro das geomembranas de PEAD de 1,5 mm quando comparadas às amostras intactas está apresentada na Figura 4.58.

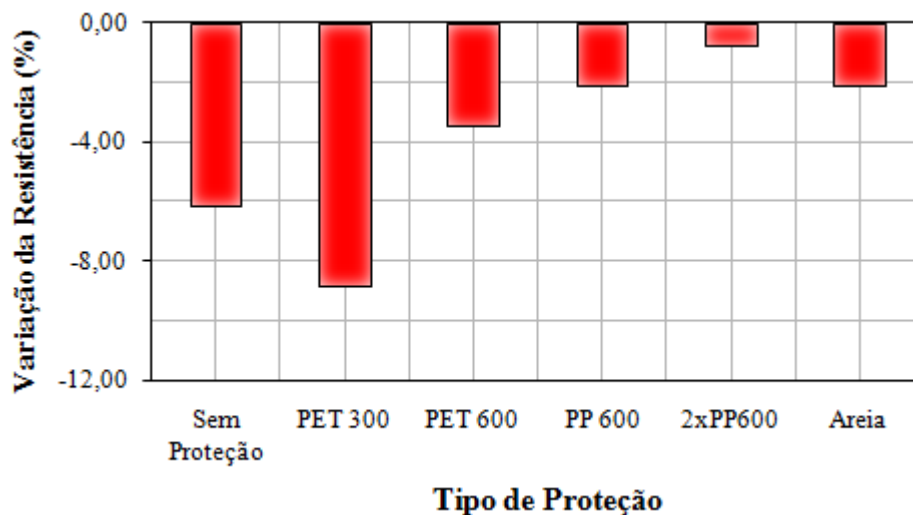


Figura 4.58 – Variação percentual da resistência ao estouro das geomembranas de PEAD 1,5 mm danificadas em relação às amostras intactas.

4.4.4 Análise das Propriedades de Desempenho sob FST (*Stress Cracking*)

Os danos na superfície das geomembranas podem ocasionar aceleração do processo de fissuramento sob tensão. Desta forma, foi realizado o ensaio de FST para avaliar a ocorrência deste fenômeno nas geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas.

A Tabela 4.6 apresenta os valores do tempo de ruptura durante a realização do ensaio de FST em amostras ranhuradas, submetidas a uma carga de 30% da tensão de escoamento determinada no ensaio de tração.

Tabela 4.6 – Tempo de ruptura das geomembranas de PEAD de 1,5 mm danificadas.

Avaliação	Unidade	Tipo de Proteção					
		Sem Proteção	PET 300	PET 600	PP 600	2xPP600	Areia
Ruptura	horas	77,33	69,33	117,33	128,00	168,00	178,67

A variação do tempo de ruptura para as amostras de PEAD com espessura de 1,5 mm danificadas, quando comparadas às amostras virgens está apresentada na Figura 4.59.

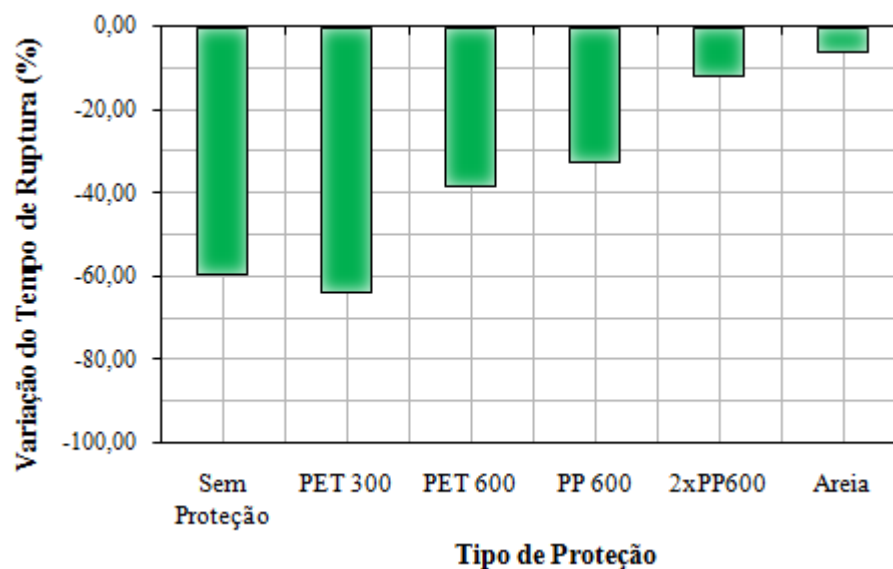
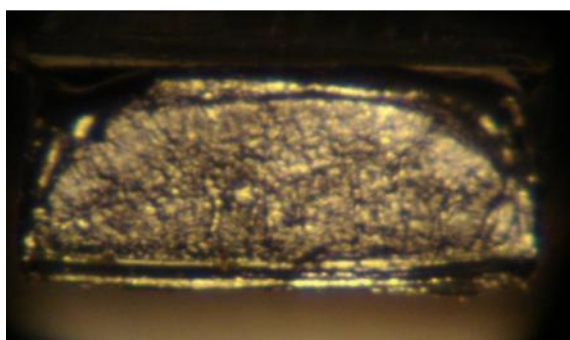


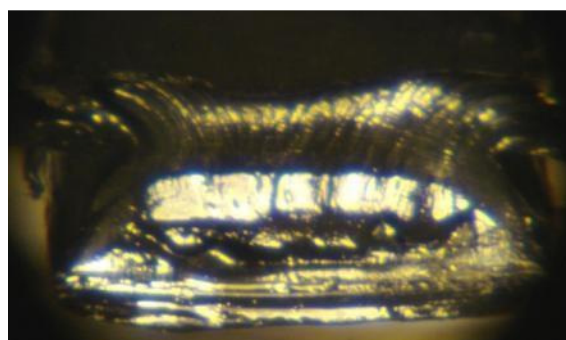
Figura 4.59 – Variação percentual do tempo de ruptura sob FST para geomembranas de PEAD com 1,5 mm danificadas em relação às amostras virgens.

Foram realizadas análises visuais por microscopia da ruptura das amostras de PEAD após o ensaio de FST. Nestas análises, verificou-se a ruptura frágil acelerada para as geomembranas submetidas ao carregamento estático, isoladas ou protegidas com o PET 300, enquanto que para as geomembranas em que foram empregados outros elementos de proteção, foi observado um pequeno escoamento das fibras do elemento (ruptura semi frágil).

A Figura 4.60 ilustra a ruptura frágil acelerada (a) e a ruptura semi frágil (b) das geomembranas de PEAD danificadas.



(a) Ruptura frágil acelerada.



(b) Ruptura semi frágil.

Figura 4.60 – Rupturas das geomembranas de PEAD de 1,5 mm, observadas por microscopia, após o ensaio de fissuramento sob tensão.

4.4.5 Análise dos Resultados Obtidos

No ensaio de carregamento estático, pode-se verificar que a introdução das camadas de proteção impediu a ocorrência de arranhões e minimizou a ocorrência de entalhes rasos e profundos na superfície.

Para esta análise, o melhor desempenho foi observado para a camada de proteção com uma camada de areia com espessura de 50 mm, onde não foi verificada a presença de qualquer tipo de entalhes nas geomembranas de PVC e PEAD. Em relação aos materiais sintéticos, apenas a camada dupla com PP600 apresentou desempenho satisfatório, restringindo a ocorrência de danos profundos na superfície dos materiais.

Não foi verificada em nenhuma das configurações dos ensaios, a ocorrência de furos ou descontinuidades nas geomembranas de PVC e de PEAD, com base nos testes para a detecção de perfurações (*Spark Test*) realizados.

Nos ensaios de permeabilidade a vapor d'água nas geomembranas danificadas, não foram observadas variações significativas na permeabilidade das geomembranas, quando comparadas às geomembranas virgens.

Com a realização dos ensaios pós-dano para verificar as propriedades mecânicas das geomembranas de PEAD e PVC, foi possível verificar variações das resistências mecânicas destes materiais. Neste aspecto, destaca-se a redução da resistência ao escoamento da geomembrana de PEAD da ordem de 20% para as configurações sem proteção e protegida com geotêxtil não-tecido PET 300, submetidas ao carregamento estático, isoladas ou com camadas de proteção de baixa gramatura.

Para as geomembranas protegidas com areia ou camada dupla de PP 600, as variações de resistência podem ser consideradas nulas. Para as configurações com PP 600 e PET 600, foram observadas reduções das resistências às solicitações mecânicas das geomembranas,

enquanto que para as configurações com proteções de PET300 e sem proteção, foram verificadas reduções significativas das resistências a tais solicitações.

Em relação a ocorrência do fissuramento sob tensão (*Stress Cracking*), foi observada uma redução significativa do tempo de ruptura dos materiais. Para as configurações sem proteção ou protegidas com PET 300, a redução do tempo de ruptura foi superior a 60%. Nas configurações protegidas com PET 600 e PP 600, a redução do tempo de ruptura foi da ordem de 30%, e para as configurações com as geomembranas protegidas com a camada dupla de PP 600 e areia, a redução do tempo de ruptura foi da ordem de 10%.

Desta forma, após as análises das propriedades hidráulicas e mecânicas e do ensaio de fissuramento sob tensão, para as geomembranas de PEAD, verificou-se que apenas as configurações de proteção com a camada de 50 mm de areia e com a camada dupla de PP600 apresentaram desempenhos satisfatórios, com variações insignificantes das propriedades quando comparadas às geomembranas virgens.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foi avaliado o comportamento de geomembranas de PVC e de PEAD sob solicitações de puncionamento, após a introdução de camadas de proteção constituídas por geotêxteis não-tecidos e areia. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados, ensaios índices de puncionamento, além de ensaios em grande escala de puncionamento hidrostático e carregamento estático.

Nos ensaios índices, verificou-se que a introdução de geotêxteis como camada de proteção proporciona incrementos de resistência ao dano às geomembranas. Os resultados obtidos demonstraram que as propriedades que melhor refletem o incremento de resistência ao puncionamento do conjunto geomembrana/camada de proteção são as propriedades de resistência mecânica, como a resistência à punção – CBR e a resistência à tração transversal, dos materiais empregados como camadas de proteção, em detrimento de propriedades como a gramatura e a espessura das camadas de proteção.

O melhor desempenho no ensaio de puncionamento estático foi verificado pela configuração com camada dupla de geotêxteis de PP com gramatura de 600 g/m², com acréscimo de resistência da ordem de 300% para geomembranas de PEAD com espessuras de 1,5 e de 2,0 mm e de PVC com espessura de 2,0 mm, e acréscimo de resistência acima de 600% para as geomembranas de PVC com espessura de 1,0 mm.

No ensaio de puncionamento dinâmico, o melhor desempenho foi verificado para as camadas de proteção em que foi empregado o geotêxtil de PP 600, além das configurações com camada dupla (2 x PP 600 e 2 x PET 600), onde não foram verificadas perfurações na geomembrana.

No ensaio de punção hidrostática, foi observado que os materiais de maiores diâmetros (britas e cones com altura exposta de 37 mm) são mais agressivos às geomembranas quando comparados aos materiais de menor diâmetro (cones com altura exposta de 25 mm).

Para a situação crítica associada a estes materiais de maior diâmetro, foi verificado um incremento de resistência gradual, em função da maior resistência mecânica dos materiais empregados como camadas de proteção. Para o ensaio em que foram utilizados os cones com altura exposta de 25 mm, foi verificado que propriedades como a flexibilidade do material, para o caso das geomembranas de PVC, e espessura e resistência mecânica, para as geomembranas de PEAD, influem significativamente no desempenho destas camadas de proteção.

Para o cenário crítico, com cones de maior altura e britas de maior diâmetro, verificou-se melhor desempenho para as configurações com geotêxteis de maior resistência mecânica. Para a configuração com cones de 25 mm, o melhor desempenho, para o caso das geomembranas de PEAD, foi observado com o emprego de geotêxteis de polipropileno que, além de possuírem alta resistência mecânica, possuem maior espessura quando comparados ao geotêxteis de PET. Para as geomembranas de PVC, o melhor desempenho foi verificado para as configurações com geotêxteis mais flexíveis, como o PET 300, além da configuração com camada dupla de PP com gramatura de 600 g/m².

A partir dos resultados obtidos no ensaio de punção hidrostática, constata-se que o projeto de camadas de proteção para geomembranas de PEAD e PVC, deve ser realizado por métodos distintos, devido ao comportamento diferenciado destas geomembranas, frente às solicitações últimas.

Salienta-se que as equações obtidas nos ensaios índices e de punção hidrostática, ilustram as condições e materiais empregados nestes ensaios, apresentando

indícios do comportamento e das propriedades dos geotêxteis, que influenciam no seu desempenho como camada de proteção. Qualquer extrapolação para as condições reais deve ser realizada com os devidos critérios.

No ensaio de carregamento estático, foi possível estabelecer uma análise qualitativa acerca da eficiência das camadas de proteção. Foram realizados testes para a detecção de possíveis furos ou descontinuidades na superfície das geomembranas danificadas, sendo que, por estes testes, não foram verificados estes tipos de danos.

As análises do desempenho das camadas de proteção foram realizadas através de inspeções visuais e ensaios pós-danos. Foi verificada uma redução da ocorrência de danos na superfície da geomembrana e da magnitude destes danos, após as análises visuais. Através dos ensaios pós-danos, verificou-se que introdução de camadas de proteção minimiza a influência deletéria dos danos nas propriedades das geomembranas e conseqüentemente no seu desempenho.

As geomembranas submetidas a carregamentos estáticos, sem proteção ou protegidas com PET 300, apresentaram redução significativa de suas propriedades quando comparadas aos resultados obtidos para as geomembranas virgens. Os melhores resultados foram obtidos para as configurações que empregaram areia como camada de proteção para e a configuração com camada dupla com geotêxteis de PP 600. Para estes casos, foi verificada uma redução mínima das propriedades mecânicas e de desempenho (*stress cracking*) das geomembranas.

Desta forma, conclui-se que o emprego de camadas de proteção para geomembranas é de grande importância para garantir maior resistência destes materiais aos esforços de puncionamento, além de minimizar a ocorrência de danos em sua superfície que podem ocasionar perfurações e reduzir a resistência mecânica e o desempenho final destes materiais, quando empregados como parte integrante de barreiras de controle e desvio de fluxo.

REFERÊNCIAS

ABNT - NBR 6502 (1995). “Rochas e solos”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 6508 (1984). “Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 7181 (1984). “Solo - Análise granulométrica”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 7182 (1986). “Solo - Ensaio de compactação”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 7809 (2006). “Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 7211 (2005). “Agregado para concreto – Especificação”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 8419 (1992). “Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 10004 (2004). “Resíduos sólidos – Classificação”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 12004 (1990). “Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 12051 (1991). “Solo - Determinação do índice de vazios mínimos de solos não-coesivos”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 12553 (2003). “Geossintéticos – Terminologia”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 12568 (2003). “Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 12569 (1992). “Geotêxteis - Determinação da espessura”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 12824 (1993). “Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 13359 (1995). “Geotêxteis - Determinação da resistência ao puncionamento estático - Ensaio com pistão tipo CBR”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT - NBR 14971 (2003). “Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da resistência à perfuração dinâmica (queda de cone) - Método de ensaio”. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ASTM D 792 (2008). “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 882 (2002). “Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 1004 (2007). “Standard Test Method for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 2487 (2006). “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 4533 (2004). “Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 4632 (2008). “Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 4833 (2007). “Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 5199 (2001). “Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 5397 (2007). “Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 5514 (2006). “Standard Test Method for Large Scale Hydrostatic Puncture Testing of Geosynthetics”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 6693 (2004). “Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM D 7007 (2003). “Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM E 96 (2005). “Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM E 928 (2003). “Standard Test Method for Purity by Differential Scanning Calorimetry”. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

BAGCHI, A. (1994). “Design, Construction and Monitoring of Landfills”. John Wiley & Sons, New York, 2ª ed., 361p.

BAM (1994). “Guidelines for the certification of geomembranes as a component of composite liners for municipal and hazardous waste landfills and for lining contaminated land”. Bundesanstalt für Materialforschung undprüfung (Instituto Federal para Ensaio e Pesquisa de Materiais), Berlin.

BATHIA, S. K.; SMITH, J. L. (1996). “Geotextile characterization and pore-size distribution: Part 1. A review of manufacturing processes”. *Geosynthetics International*, Vol. 3, nº 1, pp. 85-105.

BRIGHT, D.G. (1993). “The Environmental Stress Cracking of Polymers Used In Geosynthetic Products”. *In: Geosynthetics*, Vancouver, pp. 925-933.

BUDKA, A.; BLOQUET, C.; BENNETON, J. P.; CROISSANT, D.; GIRARD, H.; KHAY, M. (2007). “Efficiency of Different Geotextile for the Protection of Geomembrane at Landfills”. *11º International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, 12p.

BUENO, B.S. (2004). “Matérias-Primas”. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Editora Edgard Blücher, São Paulo, pp. 13-25.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M.; BENVENUTO, C. (2004). “Aplicações em Barreiras Impermeabilizantes”. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Editora Edgard Blücher, São Paulo, pp. 335-379.

CARVALHO, M. F. (1999). “Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos”. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 278p.

CASSIDY, P. E.; MORES, M.; KERWICK, D. J.; KOECK, D. J.; VERSCHOOR, K. L.; WHITE, D. F. (1992). "Chemical Resistance of Geosynthetic Materials". *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 11, nº 1, pp. 61-98.

COOKE, T. F.; REBENFELD, L. (1988). "Effect of Chemical Composition and Physical Structure of Geotextiles on their Durability". *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 7, nº 1, pp. 7-22.

DANIEL, D.E. (1993). "Geotechnical practice for waste disposal". Chapman & Hall, New York, 683p.

DNER - ME083 (1998). "Agregados – Análise granulométrica". Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.

ENGECORPS – Corpo de Engenheiros Consultores (1996). "Estado da Arte dos Aterros Sanitários - Parte II". 233p.

ENGECORPS – Corpo de Engenheiros Consultores (2006). "Centro de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu". Arquivo Fotográfico.

GARTUNG, E. (1996). "Landfill liners and covers". *Geosynthetics: applications, design and construction*, De Groot, Den Hoedt & Termaat (eds), pp. 55-70.

GRI GM 13 (2003). "Test Properties, Testing Frequency and Recommended Warranty for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes". Geosynthetic Research Institute, Drexel University, EUA, 14p.

HORROCKS, A. R.; D'SOUZA, J. A. (1992). "Degradation of polymers in geomembranes and geotextiles". *Handbook of Polymer Degradation*, Cap. 15, New York, pp. 433-505.

HSUAN, Y.G. (2000). "Data Base of Field Incidents Used to Establish HDPE Geomembrane Stress Crack Resistance Specifications". *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, pp. 1-22.

IBGE (2000) “Pesquisa Nacional de Saneamento Básico”. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.

JACQUELIN, T.; BONE, S. C.; MARCOTTE, P. M.; ROLLIN, A. (2008). “Recent Results in Geoelectrical Leak Location in the Chilean Mining Industry”. *The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition*, Cancun, pp. 1556-1562.

JONES, M. (1985). “Engineer’s Dilemma: Using the Right Product for the Job in Hand is no Easy Task”. *International Construction*, London, pp. 81-85.

JONES, D.R.V.; SHERCLIFF, D.A.; DIXON, N. (2000). “Difficulties associated with the specification of the protection geotextiles using only unit weight”. *2º European Geosynthetics Conference*, Bologna, pp. 551-555.

KOERNER, R. M. (1998). “Designing with geosynthetics”. *Englewood Cliffs*, New Jersey, Prentice Hall, 4th Ed.

KOERNER, R. M.; WILSON-FAHMY, R. F.; NAREJO, D. (1996). “Puncture Protection of Geomembranes. Part 3: Examples”. *Geosynthetics International*, Vol. 3, nº 5, pp. 655-675.

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, 157p.

LINS, E. A. M. (2003). “A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da muribeca”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 125p.

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W. F.; BOUAZZA, A. (1996). “Waste Disposal and Containment”. *In: Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Vol. 3, pp. 1425-1474.

MANRICH, S., FRATTINI, G., ROSALINI, C. (1997). “Identificação de polímeros: uma ferramenta para a reciclagem”. EDUFSCar, São Carlos, 49p.

MARK, H. F.; BIKALES, N. M.; OVERBERGER, C. G.; MENGES, G. (1986). “Encyclopedia of Polymer Science and Engineering”. Vol. 6 e Vol. 10.

MARQUES, A. C. M. (2001). “Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos”. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 408p.

NAREJO, D.; KOERNER, R. M.; WILSON-FAHMY, R. F. (1996). “Puncture Protection of Geomembranes. Part 2: Experimental”. *Geosynthetics International*, Vol. 3, nº 5, pp. 629-653.

NASCIMENTO, J. C. F. (2007). “Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 160p.

NOSKO, V.; TOUZE-FOLTZ, N. (2000). “Geomembrane Through Liners Failure: Modeling of its Influence on Contaminant Transfer”. *2º European Conference on Geosynthetics*, Bologna, pp. 557-560.

OLIVEIRA, D. A. F. (2002). “Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos”. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 154p.

REDDY, K. R.; SAICHEK, R. E. (1998). “A Rational Design for the Protection of Landfill Geomembrane Liners”. *6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, pp. 289-294.

SANTEK (2006). “Anatomy of a landfill”. Santek Environmental. Disponível em: <<http://www.santekenviro.com/StkAnofLandfill.html>>. Acesso em: julho de 2006.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; FANTINI JÚNIOR, W.; de AGUIAR, E. M. (1990). “Aterro Sanitário: Considerações do Sítio, Projeto, Implantação, Operação, e Monitoramento”. 7º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, pp. 123-126.

SEEGER, S.; MÜLLER, W. (1996). "Requirements and Testing of Protective Layer Systems for Geomembranes". *Geotextiles and Geomembranes*, nº 14, pp. 365-376.

SHARMA, H.D.; LEWIS, S.P. (1994). "Waste containment System, waste stabilization and landfills: design and evaluation". John Wiley & Sons, New York, 585p.

SHERCLIFF, D. A. (1998). "Design with the Cylinder Test". *The Polluted and Marginal Land Conference*, London, 8p.

SUGUIO, K. (1973). "Introdução à Sedimentologia". Editora Edgar Blücher, Universidade de São Paulo, São Paulo, 318p.

TIVERON, V. P. M.; MARQUES, A. C. M.; NAHAS, C. M.; FRANÇOSO, N. C. T.; GODOI, M. O. (1995). "Disposição de Resíduos Sólidos no Município de São Paulo: Aterros Sanitários". I Seminário Luso-Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Lisboa, 15p.

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*, Vol. 126, nº 12, pp. 1194-1208.

VILAR, O. M. (2003). "Geossintéticos em Aplicações Ambientais". 4º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Porto Alegre, pp. 203-218.

WILSON-FAHMY, R. F.; NAREJO, D.; KOERNER, R. M. (1996). "Puncture Protection of Geomembranes. Part 1: Theory". *Geosynthetics International*, Vol. 3, nº 5, pp. 605-628.