

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

Avaliação de Camadas de Proteção para Geomembranas de PVC e PEAD

Karla Maria Wingler Rebelo

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar.

São Carlos

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio que viabilizou todo o andamento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Empresa Ober, pela doação dos geotêxteis indispensáveis ao andamento da pesquisa. Em especial ao Engenheiro Carlos Vinicius por toda a atenção prestada.

À Empresa Sansuy, pela cooperação no fornecimento das geomembranas de PVC, indispensáveis ao andamento da pesquisa.

À empresa Etclass do Brasil, pelo empréstimo do aparelho de detecção de descontinuidade (*Spark Test*) e pelo treinamento de sua utilização.

Ao Departamento de Transportes, pela estrutura física na realização de ensaios de laboratório, em especial, ao Professor Dr. Glauco.

À Prefeitura do Campus da Escola de Engenharia de São Carlos, pela concessão da área utilizada na construção do aterro experimental.

Ao Departamento de Geotecnia e ao Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos, pela estrutura física necessária durante o andamento da pesquisa.

A todos os professores do Departamento de Geotecnia, pela contribuição pessoal e profissional.

A todos os funcionários do Departamento de Geotecnia, pelo apoio técnico e pela boa convivência. Em especial aos técnicos Oscar, José Luis, Clever, Dito e Antônio, e aos funcionários Maristela, Álvaro, Neiva e Herivelto pelo auxílio em todos as etapas do doutorado, pela presteza e pelo companheirismo.

A todos os colegas do Departamento de Geotecnia, pela boa convivência durante todos estes anos.

Aos infindáveis amigos que fiz aqui em São Carlos, agradeço pelo apoio incondicional. Não poderia deixar de citar meus queridos amigos: Neiva, Juliana / Marieli, Jeferson, Karina (Ká), Rodrigo (Rô), Ivan, Eduardo Amaral, Oscar, Maristela. *"Fácil é ser colega, fazer companhia a alguém, dizer o que ele deseja ouvir. Difícil é ser amigo para todas as horas e dizer sempre a verdade quando for preciso. E com confiança no que diz."* (C. Drummond de Andrade).

Ao professor Edmundo Esquivel, pela presteza e amizade durante os anos de convivência.

Ao meu orientador, mestre e amigo, Orencio Monje Vilar, pela orientação do trabalho, pelos ensinamentos, pela amizade, pelo companheirismo e pela compreensão em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Wagner, Vinicius e Victor, pelo amor e apoio à distância. Aos meus pais, Marizéa e Vagner (eternamente presente na minha vida), pelo incentivo, pelo amor incondicional, pelos esforços e, principalmente, pelo exemplo de caráter.

"Sonhe com aquilo que você quiser.
Seja o que você quer ser, porque você possui apenas uma vida e nela só se tem
uma chance de fazer aquilo que se quer.
Tenha felicidade bastante para fazê-la doce.
Dificuldades para fazê-la forte.
Tristeza para fazê-la humana
E esperança suficiente para fazê-la feliz.
As pessoas mais felizes não têm as melhores coisas.
Elas sabem fazer o melhor das oportunidades que aparecem em seus caminhos.
A felicidade aparece para aqueles que choram.
Para aqueles que se machucam.
Para aqueles que buscam e tentam sempre
E para aqueles que reconhecem a importância das pessoas
que passam por suas vidas.
O futuro mais brilhante é baseado num passado intensamente vivido.
Você só terá sucesso na vida quando perdoar os erros e as decepções do passado.
A vida é curta, mas as emoções que podemos deixar duram uma eternidade... "
(C. Lispector)

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	<i>i</i>
LISTA DE TABELAS	<i>vii</i>
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	<i>ix</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>x</i>
RESUMO	<i>xi</i>
ABSTRACT	<i>xii</i>
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	<i>1</i>
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	<i>5</i>
2.1. Introdução: Resíduos Sólidos, Aspectos Gerais e Formas de Disposição	<i>5</i>
2.2. Geomembranas	<i>10</i>
2.2.1. Aspectos Gerais	<i>10</i>
2.2.2. Polímeros	<i>14</i>
2.2.3. Stress Cracking (Fissuramento sob Tensão)	<i>19</i>
2.3. Geotêxteis	<i>26</i>
2.4. Proteção de Geomembranas	<i>29</i>
2.4.1. Danos Mecânicos em Geomembranas	<i>29</i>
2.4.2. Desempenho de Camadas de Proteção	<i>38</i>
2.4.3. Ensaios de Danos Mecânicos em Geomembranas	<i>64</i>
2.5. Considerações Finais	<i>71</i>
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	<i>75</i>
3.1. Descrição dos Materiais	<i>75</i>
3.1.1. Geossintéticos	<i>75</i>
3.1.2. Solos e Agregados	<i>77</i>
3.2. Ensaios de Laboratório para Avaliação das Camadas de Proteção	<i>80</i>
3.2.1. Ensaios Índices	<i>81</i>
3.2.2. Ensaios de Desempenho – Dano de Instalação	<i>83</i>
3.3. Ensaios de Danos de Instalação em Grande Escala – Ensaio de Campo	<i>85</i>
3.3.1. Procedimento de Campo	<i>85</i>
3.3.2. Ensaios Não Destrutivos para Detecção de Furos em Geomembranas	<i>99</i>
3.3.3. Critério para Estimar o Desempenho de Camadas de Proteção para Geomembranas	<i>101</i>
3.4. Ensaios Pós-Danos Realizados nas Geomembranas para Avaliação das Camadas de Desempenho	<i>103</i>
3.4.1. Ensaios Mecânicos	<i>103</i>
3.4.2. Ensaio de Fissuramento sob Tração (Stress cracking)	<i>108</i>
3.4.3. Ensaio Hidráulico - Transmissividade ao Vapor	<i>111</i>
CAPÍTULO 4. ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	<i>113</i>
4.1. Ensaios de Laboratório	<i>113</i>
4.1.1. Ensaios Índices	<i>113</i>
4.1.2. Ensaios de Desempenho: Danos de Instalação	<i>134</i>

4.2. Ensaio de Campo	153
4.2.1. Geomembranas de PEAD	153
4.2.2. Geomembranas de PVC	192
4.3. Avaliação do Desempenho dos Materiais de Proteção segundo o CFG (2001)	215
4.4. Comparação entre os Resultados dos Ensaio de Laboratório e de Campo	218
4.4.1. Ensaio de Campo <i>versus</i> Ensaio Índice	218
4.4.2. Ensaio de Campo <i>versus</i> Ensaio Cíclicos	219
4.5. Comparação dos Resultados de Campo com os Dados e Métodos da Literatura	223
4.5.1. Análise dos Danos de Instalação: Comparação com Reddy et al. (1996)	223
4.5.2. Metodologia proposta por Badu et al.(1998)	226
4.5.3. Metodologia proposta baseada no desempenho a curto prazo (Narejo et al, 1996)	227
CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO	233
Referências Bibliográficas	239

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Percentual da geração de resíduos sólidos por região brasileira (PNSB, 2000).</i>	6
<i>Figura 2. Evolução do destino final dos resíduos brasileiros.</i>	7
<i>Figura 3. Configurações típicas de barreiras impermeáveis (KOERNER, 1998).</i>	9
<i>Figura 4. Monômeros dos polímeros mais comuns.</i>	14
<i>Figura 5. Ilustração da estrutura linear.</i>	17
<i>Figura 6. Ilustração da estrutura ramificada.</i>	17
<i>Figura 7. Ilustração da estrutura reticulada.</i>	18
<i>Figura 8. Estrutura lamelar do PEAD (LAVOIE, 2006).</i>	21
<i>Figura 9. Stress cracking: (a) na borda de uma emenda (HSUAN, 2000); (b) propagação rápida (PEGGS, 1988).</i>	22
<i>Figura 10. Detalhes da ranhura feito nos CP's utilizados no ensaio NCLT: (a) dimensões da ranhura; (b) foto microscópica da ranhura.</i>	23
<i>Figura 11. Curvas obtidas através do método de ensaio NCLT (HSUAN AND KOERNER, 1998).</i>	24
<i>Figura 12. Tipos de fibras: geotêxteis tecidos: (a) monofilamentos; (b) multifilamentos; (c) laminetes; (d) fibrilas (BHATIA & SMITH, 1996).</i>	27
<i>Figura 13. Exemplos de geotêxteis tecidos (BHATIA & SMITH, 1996).</i>	27
<i>Figura 14. Exemplos de estruturas de geotêxteis não tecidos.</i>	28
<i>Figura 15. Ilustração do ensaio do jato ou poça d'água (CFG, 2003; LOPES, 2006).</i>	34
<i>Figura 16. Ilustração do ensaio da Faísca (CFG, 2003; LOPES, 2006).</i>	35
<i>Figura 17. Ilustração do ensaio com sistema fixo de detecção e localização de furos (CFG, 2003; LOPES, 2006).</i>	36
<i>Figura 18. Ilustração do ensaio da geomembrana condutora (CFG, 2003; LOPES, 2006).</i>	37
<i>Figura 19. Ilustração do ensaio da sonda móvel (CFG, 2003; LOPES, 2006).</i>	38
<i>Figura 20. Geometria utilizada na análise de punção em geomembranas (WILSON-FAHMY ET AL., 1996).</i>	41
<i>Figura 21. Forma deformada da geomembrana sob aumento de pressão (WILSON-FAHMY ET AL., 1996).</i>	44
<i>Figura 22. Mecanismo de carregamento (a) estágio de compressão inicial do geotêxtil; (b) Deformação da geomembrana e compressão do geotêxtil (JONES ET AL. 2000).</i>	52
<i>Figura 23. Área com ausência de geotêxtil.</i>	63
<i>Figura 24. Perfurações observadas nas geomembranas.</i>	63
<i>Figura 25. Ensaio de punção hidrostática com cones truncados.</i>	67
<i>Figura 26. Esquema do ensaio do cilindro (GALLAGHER ET AL., 1999).</i>	69
<i>Figura 27. Curva granulométrica do solo.</i>	78
<i>Figura 28. Resultado do ensaio de índice de forma: (a) brita 1; (b) brita 3.</i>	79
<i>Figura 29. Curva granulométrica dos agregados.</i>	80
<i>Figura 30. Ensaio de punção estática: (a) arranjo do corpo de prova; (b) vista geral.</i>	81
<i>Figura 31. Ensaio de punção estática: introdução de base de solo compactado.</i>	82
<i>Figura 32. Ensaio de punção dinâmica: (a) arranjo do corpo de prova; (b) vista geral.</i>	83

Figura 33. Ensaio de dano de instalação: (a) vista geral do equipamento; (b) detalhe da caixa. _____	84
Figura 34. Escavação da área: (a) início da escavação; (b) área final. _____	87
Figura 35. Preparação da base: (a) destorroamento do solo; (b) compactação do solo ____	88
Figura 36 (Continua). Detalhes do processo de compactação da base. _____	89
Figura 37. Controle de compactação no campo – método do cilindro de cravação. _____	91
Figura 38. Instalação das geomembranas. _____	94
Figura 39. Identificação das geomembranas. _____	95
Figura 40. Instalação das camadas de proteção: (a) vista geral; (b) camadas com solos naturais. _____	96
Figura 41 (Continua). Construção da camada de drenagem. _____	97
Figura 42. Retirada da brita. _____	98
Figura 43. Esquema do princípio do ensaio de Spark Test. _____	100
Figura 44. Realização do Spark Test em campo. _____	101
Figura 45. Detalhes do equipamento do Spark Test. _____	101
Figura 46. Ensaio do ensaio de tração: (a) normal; (b) faixa larga. _____	104
Figura 47. Ilustração do ensaio de rasgo em geomembrana de PEAD. _____	104
Figura 48. Ilustração do ensaio de punção estática em geomembrana: (a)visão geral; (b) detalhe do ensaio. _____	105
Figura 49. Ilustração do ensaio de tração multiaxial. _____	106
Figura 50. Vista do equipamento de FST: (a) vista frontal; (b) vista lateral do ensaio em andamento. _____	109
Figura 51. Ensaio de fissuramento sob tração (stress cracking): (a) detalhes da ranhura; (b) moldes para corte do prova. _____	109
Figura 52. Ilustração de algumas configurações com corpo de prova sem ranhura. _____	110
Figura 53. Ensaio de transmissividade ao vapor em geomembranas. _____	111
Figura 54. Curvas de punção - geomembrana de PVC, 1,0mm - GT/GM, GT PET. _____	113
Figura 55. Curvas de punção - geomembrana de PVC, 1,0mm - GT/GM, GT PP. _____	114
Figura 56. Curvas de punção - geomembrana de PEAD, 1,5 mm - GT/GM, GT PET. ____	114
Figura 57. Curvas de punção - geomembrana de PEAD, 1,5 mm - GT/GM, GT PP. _____	114
Figura 58. Curvas de punção - geomembrana de PELMD, 1,25 mm - GT/GM, GT PET. _	115
Figura 59. Curvas de punção - geomembrana de PELMD, 1,25 mm - GT/GM, GT PET. _	115
Figura 60. Efeito da gramatura na resistência à punção – GT sobre GM. _____	116
Figura 61. Efeito da gramatura na resistência à punção – GM sobre GT. _____	117
Figura 62. Efeito da gramatura na resistência à punção – GT/GM/GT. _____	117
Figura 63. Influência das características do geotêxtil. _____	118
Figura 64. Influência das características de tração da geomembrana e do geotêxtil no aumento na força de punção. _____	120
Figura 65. Influência da espessura - sistema GT/GM, GT PET 300 g/m ² . _____	121
Figura 66. Influência da espessura - sistema GT/GM, GT PET 300 g/m ² . _____	122
Figura 67. Efeito da disposição dos geotêxteis na resistência à punção do sistema. _____	124
Figura 68. Análise do efeito da introdução de base de solo compactado: GMs de PVC. __	125
Figura 69. Análise do efeito da introdução de base de solo compactado: GMs de PEAD. 125	
Figura 70. Análise do efeito da introdução de base de solo compactado: GMs de PELMD.126	
Figura 71. Resultados obtidos no ensaio de punção dinâmica - geomembrana de PVC, 1,0 mm - GT/GM. _____	127
Figura 72. Resultados obtidos no ensaio de punção dinâmica - geomembrana de PEAD, 1,5 mm - GT/GM. _____	127
Figura 73. Resultados obtidos no ensaio de punção dinâmica - geomembrana de PELMD, 1,25 mm - GT/GM. _____	128

Figura 74. Efeito do polímero nas geomembranas de PVC (1,0mm) e PEAD (1,5mm). ____	129
Figura 75. Análise dos ensaios realizados com geomembrana de PVC, 1,0mm: efeito da disposição. _____	130
Figura 76. Análise dos ensaios realizados com geomembrana de PEAD, 1,5mm: efeito da disposição. _____	131
Figura 77. Análise dos ensaios realizados com geomembrana de PELMD, 1,25mm: efeito da disposição. _____	132
Figura 78. Influência da camada de solo compactado - GT PET 300g/m ² . _____	133
Figura 79. Vista da superfície da geomembrana de PEAD (1,5 mm). _____	134
Figura 80. Curvas obtidas nos ensaios de punção para geomembrana de PEAD – carga de 200 kPa. _____	135
Figura 81. Curvas obtidas nos ensaios de punção para geomembrana de PEAD – carga de 400 kPa. _____	136
Figura 82. Curvas obtidas nos ensaios de rasgo para geomembrana de PEAD – carga de 200 kPa. _____	136
Figura 83. Curvas obtidas nos ensaios de rasgo para geomembrana de PEAD – carga de 400 kPa. _____	137
Figura 84. Curvas obtidas nos ensaios de tração para geomembrana de PEAD – carga de 200 kPa. _____	137
Figura 85. Curvas obtidas nos ensaios de tração para geomembrana de PEAD – carga de 400 kPa. _____	138
Figura 86. Resultados dos ensaios de punção realizados nas geomembranas de PEAD com proteção: ensaios cíclicos. _____	140
Figura 87. Resultados dos ensaios de rasgo realizados nas geomembranas de PEAD com proteção: ensaios cíclicos. _____	140
Figura 88. Resultados dos ensaios de tração realizados nas geomembranas de PEAD com proteção: ensaios cíclicos / valores no escoamento. _____	141
Figura 89. Resultados dos ensaios de tração realizados nas geomembranas de PEAD com proteção: ensaios cíclicos / valores na ruptura. _____	141
Figura 90. Curvas obtidas no ensaio de stress cracking: GM de PEAD 1,5 mm. _____	142
Figura 91. Vista da superfície da geomembrana de PVC (1,0 mm). _____	144
Figura 92. Curvas obtidas nos ensaios de punção para geomembrana de PVC – 200 kPa. _____	145
Figura 93. Curvas obtidas nos ensaios de punção para geomembrana de PVC – 400 kPa. _____	146
Figura 94. Curvas obtidas nos ensaios de rasgo para geomembrana de PVC – 200 kPa. _____	146
Figura 95. Curvas obtidas nos ensaios de rasgo para geomembrana de PVC – 400 kPa. _____	147
Figura 96. Curvas obtidas nos ensaios de tração para geomembrana de PVC – 200 kPa. _____	147
Figura 97. Curvas obtidas nos ensaios de tração para geomembrana de PVC – 400 kPa. _____	148
Figura 98. Resultados dos ensaios de punção realizados nas geomembranas de PVC sem proteção: ensaios cíclicos. _____	149
Figura 99. Resultados dos ensaios de rasgo realizados nas geomembranas de PVC sem proteção: ensaios cíclicos. _____	150
Figura 100. Resultados dos ensaios de tração realizados nas geomembranas de PVC sem proteção: ensaios cíclicos. _____	150
Figura 101. Resultados dos ensaios de transmissividade ao vapor (permeabilidade) em geomembranas de PVC. _____	152
Figura 102. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção e brita 3. _____	154
Figura 103. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 300 g/m ² e brita 3. _____	154
Figura 104. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 600 g/m ² e brita 3. _____	155
Figura 105. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PP 600 g/m ² e brita 3. _____	155
Figura 106. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 1200 g/m ² e brita 3. _____	155

Figura 107. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com camadas naturais e brita 3: (a) areia; (b) solo. _____	156
Figura 108. Danos visuais: GM de PEAD de 2,0 mm sem proteção e brita 3. _____	156
Figura 109. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção e brita 1. _____	156
Figura 110. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 300 g/m ² e brita 1. ___	157
Figura 111. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 600 g/m ² e brita 1. __	157
Figura 112. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 1200 g/m ² e brita 1. _	157
Figura 113. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com camadas naturais e brita 1: (a) areia; (b) solo. _____	158
Figura 114. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga: GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção / brita 3. _____	160
Figura 115. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 300 g/m ² / brita 3. _____	160
Figura 116. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 600 g/m ² / brita 3. _____	161
Figura 117. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PP 600 g/m ² / brita 3. _____	161
Figura 118. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 1200 g/m ² / brita 3. _____	162
Figura 119. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e areia / brita 3. _____	162
Figura 120. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e solo / brita 3. _____	163
Figura 121. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD de 2,0 mm sem proteção / brita 3. _____	163
Figura 122. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção / brita 1. _____	164
Figura 123. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 300 g/m ² / brita 1. _____	164
Figura 124. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 600 g/m ² / brita 1. _____	165
Figura 125. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 1200 g/m ² / brita 1. _____	165
Figura 126. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e areia / brita 1. _____	166
Figura 127. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e solo / brita 1. _____	166
Figura 128 (Continua). Mecanismo de ruptura nos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD. _____	167
Figura 129. Resultados de tração em faixa larga - GM de PEAD e brita 3: (a) escoamento; (b) ruptura. _____	170
Figura 130. Resultados de tração em faixa larga - GM de PEAD e brita 1: (a) escoamento; (b) ruptura. _____	171
Figura 131. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm virgem. _____	174
Figura 132. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção / brita 3. _____	175
Figura 133. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 300 g/m ² / brita 3. _____	175

Figura 134. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 600 g/m ² / brita 3. _____	176
Figura 135. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 1200 g/m ² / brita 3. _____	176
Figura 136. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e camada de areia/ brita 3. _____	177
Figura 137. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e camada de solo/ brita 3. _____	177
Figura 138. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção / brita 1. _____	178
Figura 139. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 300 g/m ² / brita 1. _____	178
Figura 140. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 600 g/m ² / brita 1. _____	179
Figura 141. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 1200 g/m ² / brita 1. _____	179
Figura 142. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e camada de areia / brita 1. _____	180
Figura 143. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e camada de solo / brita 1. _____	180
Figura 144. Resultados de tração multiaxial - GM de PEAD 1,5 mm. _____	181
Figura 145. Modo de ruptura nos ensaios de tração multiaxial: GM PEAD 1,5 mm / brita3. _____	183
Figura 146. Modo de ruptura nos ensaios de tração multiaxial: GM PEAD 1,5 mm / brita1. _____	184
Figura 147. Resultados do ensaio de stress cracking: (a) CPs com ranhura; (b) CPs sem ranhura. _____	186
Figura 148. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga em função do diâmetro dos agregados: GM de PEAD. _____	189
Figura 149. Resultados dos ensaios de tração multiaxial em função do diâmetro dos agregados: GM de PEAD. _____	190
Figura 150. Resultados dos ensaios de stress cracking em geomembranas de PEAD em função do diâmetro dos agregados: CP's sem ranhura. _____	191
Figura 151. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm sem proteção e brita 3. _____	193
Figura 152. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PET 300 g/m ² e brita 3. _____	193
Figura 153. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PET 600 g/m ² e brita 3. _____	194
Figura 154. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PP 600 g/m ² e brita 3. _____	194
Figura 155. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PET 1200 g/m ² e brita 3. _____	195
Figura 156. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com camadas naturais e brita 3. _____	195
Figura 157. Danos visuais: GM de PVC de 2,0 mm sem proteção e brita 3. _____	195
Figura 158. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm sem proteção e brita 1. _____	196
Figura 159. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PET 600 g/m ² e brita 1. _____	196
Figura 160. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com camadas naturais e brita 1: (a) areia; (b) solo. _____	196
Figura 161. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com geocomposto. _____	197
Figura 162. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga: GM de PVC de 1,0 mm sem proteção / brita 3. _____	199
Figura 163. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 300 g/m ² / brita 3. _____	199

<i>Figura 164. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 600 g/m² / brita 3.</i>	200
<i>Figura 165. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PP 600 g/m² / brita 3.</i>	200
<i>Figura 166. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 1200 g/m² / brita 3.</i>	201
<i>Figura 167. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e camada de areia / brita 3.</i>	201
<i>Figura 168. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e camada de solo / brita 3.</i>	202
<i>Figura 169. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga: GM de PVC de 2,0 mm sem proteção / brita 3.</i>	202
<i>Figura 170. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm sem proteção / brita 1.</i>	203
<i>Figura 171. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 600 g/m² / brita 1.</i>	203
<i>Figura 172. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e areia / brita 1.</i>	204
<i>Figura 173. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e solo / brita 1.</i>	204
<i>Figura 174. Mecanismo de ruptura nos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC.</i>	205
<i>Figura 175. Resultados de tração em faixa larga - GM de PVC: (a) brita 3; (b) brita 1.</i>	206
<i>Figura 176. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm sem proteção / brita 3.</i>	208
<i>Figura 177. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 300 g/m² / brita 3.</i>	208
<i>Figura 178. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 600 g/m² / brita 3.</i>	209
<i>Figura 179. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 1200 g/m² / brita 3.</i>	209
<i>Figura 180. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e camada de areia / brita 3.</i>	210
<i>Figura 181. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e camada de solo / brita 3.</i>	210
<i>Figura 182. Análise ensaio de tração multiaxial – GM de PVC e brita 3.</i>	211
<i>Figura 183. Modo de ruptura nos ensaios de tração multiaxial: GM PVC 1,0 mm / brita 3.</i>	212
<i>Figura 184. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga de GM de PVC (1,0mm) em função do diâmetro e formato dos agregados.</i>	214
<i>Figura 185. Estimativa da pressão disponível para geomembranas sem proteção (NAREJO et al, 1996).</i>	229

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1. Tipos de geomembranas: principais componentes e propriedades (adaptado de DANIEL e KOERNER, 1995).</i>	12
<i>Tabela 2. Ensaios realizados em geomembranas (modificado de Bueno e Vilar, 2004).</i>	13
<i>Tabela 3. Ensaios realizados em geotêxteis (modificado de BUENO e VILAR, 2004).</i>	29
<i>Tabela 4. Normas de ensaio para avaliação da resistência de emendas para vários tipos de geomembranas (DANIEL & KOERNER, 1995).</i>	31
<i>Tabela 5. Métodos de ensaios não destrutivos conforme os tipos de emendas e de geomembranas (DANIEL & KOERNER, 1995).</i>	32
<i>Tabela 6. Métodos de ensaios de verificação da estanqueidade da geomembrana após a sua colocação e ligação dos painéis (adaptado de CFGG 2003).</i>	33
<i>Tabela 7. Propriedades físicas e mecânicas dos geossintéticos utilizados.</i>	47
<i>Tabela 8. Pressão de ruptura obtida a partir de ensaios de punção para diferentes espessuras de geomembrana de PEAD.</i>	47
<i>Tabela 9. Pressão de ruptura obtida a partir de ensaios de punção usando cones truncados para uma geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura com vários tipos de materiais de proteção.</i>	47
<i>Tabela 10. Pressão no escoamento para camada de pedregulhos.</i>	48
<i>Tabela 11. Pressão de ruptura obtida a partir dos ensaios geostáticos com geomembrana de PEAD e vários geotêxteis não tecidos agulhados.</i>	48
<i>Tabela 12. Fatores modificados de forma.</i>	50
<i>Tabela 13. Fatores parciais de segurança para fluência.</i>	50
<i>Tabela 14. Valores sugeridos de fatores de segurança global contra ruptura no uso das equações de projeto.</i>	51
<i>Tabela 15. Propriedades físicas das camadas geossintéticas de proteção.</i>	57
<i>Tabela 16. Comparação dos resultados a partir dos ensaios em modelo de grande escala e ensaio de laboratório de desempenho para proteção.</i>	58
<i>Tabela 17. Sumário dos ensaios realizados em modelo de grande escala.</i>	59
<i>Tabela 18. Sumário das deformações obtidas a partir das medidas locais detalhadas.</i>	60
<i>Tabela 19. Ensaios de laboratório utilizados para verificação do desempenho de materiais de proteção para geomembranas.</i>	65
<i>Tabela 20. Aumento de carga para várias condições de ensaio.</i>	70
<i>Tabela 21. Ensaios de caracterização das geomembranas.</i>	76
<i>Tabela 22. Resultados dos ensaios de caracterização das geomembranas.</i>	76
<i>Tabela 23. Ensaios de caracterização dos geotêxteis.</i>	77
<i>Tabela 24. Resultados dos ensaios de caracterização dos geotêxteis.</i>	77
<i>Tabela 25. Características dos solos utilizados.</i>	78
<i>Tabela 26. Características dos agregados.</i>	79
<i>Tabela 27. Especificações técnicas dos equipamentos de terraplenagem utilizados.</i>	86
<i>Tabela 28. Condições de compactação no campo pelo método do cilindro de cravação.</i>	92
<i>Tabela 29. Configuração dos ensaios de campo.</i>	93

<i>Tabela 30. Resultados dos ensaios mecânicos pós-dano - GM PEAD (1,5 mm) sem proteção.</i>	138
<i>Tabela 31. Resultados dos ensaios mecânicos pós-dano - GM PEAD (1,5 mm) sem proteção.</i>	138
<i>Tabela 32. Sumário dos resultados - stress cracking: geomembranas de PEAD, 1,5 mm de espessura.</i>	142
<i>Tabela 33. Resultados dos ensaios mecânicos pós-dano - GM PVC (1,0 mm) sem proteção.</i>	148
<i>Tabela 34. Valores de permeabilidade recomendados.</i>	153
<i>Tabela 35. Danos visuais observados nas geomembranas de PEAD.</i>	158
<i>Tabela 36. Resultados dos ensaios de tração faixa larga realizados nas geomembranas de PEAD.</i>	172
<i>Tabela 37. Resultados dos ensaios de tração multiaxial realizados nas geomembranas de PEAD.</i>	174
<i>Tabela 38. Síntese dos resultados de stress cracking em geomembranas de PEAD.</i>	187
<i>Tabela 39. Danos visuais observados nas geomembranas de PVC.</i>	197
<i>Tabela 40. Resultados dos ensaios de tração faixa larga realizados nas geomembranas de PVC.</i>	207
<i>Tabela 41. Resultados dos ensaios de tração multiaxial realizados nas geomembranas de PVC.</i>	211
<i>Tabela 42. Desempenho dos elementos de proteção utilizados nas geomembranas de PEAD.</i>	216
<i>Tabela 43. Desempenho dos elementos de proteção utilizados nas geomembranas de PVC.</i>	217
<i>Tabela 44. Comparação dos danos visuais observados nas geomembranas de PEAD.</i>	220
<i>Tabela 45. Comparação dos danos visuais observados nas geomembranas de PVC.</i>	220
<i>Tabela 46. Comparação dos Ensaio de Tração Multiaxial.</i>	224
<i>Tabela 47. Comparação dos Ensaio de Tração Faixa Larga.</i>	224
<i>Tabela 48. Fatores de correlação utilizados para as condições do ensaio de campo.</i>	228
<i>Tabela 49. Cálculo da pressão admissível segundo a metodologia proposta por Narejo et al (1996).</i>	229

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHO	American Association of State Highway Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung
CFG	<i>Comité Français des Geosynthétiques</i>
EA	<i>Environmental Agency</i>
FS	Fator global de segurança
FST	Fissuramento sob Tensão
GB	Geocomposto bentonítico
GC	Grau de compactação
GM	Geomembrana
GRI	<i>Geosynthetic Research Institute</i>
Gr	Gramatura
GT	Geotêxtil
NBR	Norma Brasileira
NCLT	<i>Notched Constant Tensile Load Test</i>
NW	Não tecido
NP	Agulhado
PA	Poliamida
PEAD	Polietileno de elevada densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PEC	Polietileno clorado
PECS	Polietileno clorosulfonado
PELMD	Polietileno linear de média densidade
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PVC	Polivinil clorado
SCDF	Sistemas de captação e desvio de fluxo
SP - NCLT	<i>Single Point-Notched Constant Tensile Load Test</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔF_p	Acréscimo de resistência à punção
F_p	Força à punção
F_{yGM}	Tensão de tração da geomembrana
F_{yGT}	Tensão de tração do geotêxtil
ρ_d	Massa específica seca
ρ_s	Massa específica dos sólidos
ϕ_p	Diâmetro de perfuração
$\omega_{ótima}$	Umidade ótima
k	Permeabilidade
σ	Tensão de tração
ϵ	Deformação
δ	Relação entre a resistência à tração da geomembrana e a resistência à tração do geotêxtil
r_o	Raio da ponta protuberante
H	Altura da protuberância
p_i	Pressão hidrostática
F_i	Força total da geomembrana na posição instantânea i
d_ψ	Variação do ângulo tangente ao talude
d_s	Comprimento de corda do elemento
i	Posição instantânea da geomembrana
(R_{i-x})	Raio a partir do centro da protuberância para um elemento infinitesimal da geomembrana.
l_i	Comprimento da geomembrana em contato com a ponta protuberante num instante i .
Δl_i	Incremento de alongamento da geomembrana
ΔF_i	Incremento da força de tração da geomembrana
J_{GM}	módulo carga – deformação da geomembrana

RESUMO

REBELO, K.M.W. (2008). Avaliação de Camadas de Proteção para Geomembranas de PVC e PEAD, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC /USP), 245 páginas.

O presente trabalho investiga o desempenho de geotêxteis e de solos como elementos de proteção para geomembranas de Polivinil Clorado (PVC) e de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Foram utilizadas geomembranas de PVC com espessuras de 1,0 e 2,0 mm e de PEAD com espessuras de 1,5 e 2,0 mm. Como camadas de proteção utilizaram-se geotêxteis não tecidos de poliéster (PET), com gramaturas de 130, 300, 400 e 600 g/m², e de polipropileno (PP), com gramatura de 400 e 600 g/m², além de uma areia de granulometria fina a média e uma areia argilosa típica da Região Centro-Oeste do Estado de São Paulo. O estudo foi conduzido através da construção de um aterro experimental para simulação dos danos de instalação em campo e da realização de ensaios índice e de desempenho em laboratório. A eficiência dos materiais de proteção foi avaliada através da análise qualitativa e quantitativa das amostras de geomembranas danificadas. Os resultados dos ensaios de laboratório índice mostraram que a introdução do geotêxtil aumenta a resistência à punção da geomembrana, e que o acréscimo de resistência é função das características de resistência à tração do geotêxtil e da geomembrana. O maior incremento de resistência à punção foi observado na geomembrana com menor resistência à tração. Os resultados dos ensaios de campo mostraram que a introdução do elemento de proteção reduz os danos mecânicos apesar da alteração de algumas das propriedades físicas e de desempenho nas geomembranas. Da análise dos resultados, verificou-se que a eficiência dos geotêxteis no campo não é função de suas características de tração, conforme constatado nos ensaios índices. A análise também sugere que os danos mecânicos no campo foram mais intensos do que nos ensaios de desempenho em laboratório.

Palavras-chave: geomembranas; danos mecânicos; camadas de proteção; geotêxteis; ensaios de laboratório; ensaios de campo.

ABSTRACT

REBELO, K.M.W. (2008). Assessment of the Performance of Protective Layers for PVC and HDPE Geomembranes, Thesis (Doctorate), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC /USP), 245 p.

The performance of non-woven geotextiles and soils as protection elements of Polyvinyl Chloride (PVC) and High Density Polyethylene (HDPE) geomembranes is studied. The materials used comprised PVC geomembranes of 1,0 and 2,0 mm thickness and HDPE geomembranes of 1,5 and 2,0 mm thickness while the protective layers were of non-woven polyester (PET) geotextiles with mass per unit area of 130, 300, 400 e 600 g/m^2 and polypropylene (PP) with mass per unit area of 400 e 600 g/m^2 . It was also used protective layers made of a fine to medium sand and a typical clayey sand of central area of the State of São Paulo. The study was based on an experimental landfill built to simulate the damage associated to construction procedures and on index and performance laboratory tests. Through qualitative and quantitative analysis of damaged geomembranes, the behavior of each protective element was evaluated. Index laboratory test results have shown that the geotextile is able to increase the geomembrane puncture strength and that the strength increase is related to the tensile strength of geotextile and geomembrane. For similar geotextiles, the larger increase in puncture strength was observed for the geomembrane that presented the lower tensile strength. Visual observation of field tests has shown that the introduction of protective layers reduces the mechanical damage; however some physical and performance properties of geomembrane have changed. It was also observed that the performance of geotextiles in the experimental landfill does not depend on the tensile strength, as observed in laboratory index tests. Test results also suggest that field damage associated to the landfill construction are more intense than that observed in laboratory tests such as the dynamic puncture test.

Keywords: geomembranes, mechanical damage, protective layers; geotextiles; laboratory tests; field tests.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Tem-se tornado crescente a utilização de técnicas de gerenciamento que visam reduzir, reciclar e reaproveitar os resíduos produzidos pelas diferentes atividades humanas. Nestas estratégias de gerenciamento, sempre restam materiais que necessitam ser dispostos no meio físico. Uma das alternativas mais utilizadas para esse propósito consiste na disposição em aterros sanitários e industriais e em lagoas de efluentes.

Nestas técnicas de disposição devem ser previstos um sistema de barreiras de controle e desvio de fluxo na fundação, cuja finalidade é evitar a contaminação do solo e águas subjacentes, e na cobertura, cuja função é diminuir a taxa de formação de percolados e proteger as células de resíduos. Além destas funções, essas barreiras contribuem para evitar a migração indesejável de gases para o entorno, sejam os solos de fundação ou a atmosfera.

As geomembranas são elementos presentes em grande parte das barreiras de controle e desvio de fluxo. Dependendo da configuração das barreiras, podem se apresentar em contato direto com diferentes materiais formados pelo solo da fundação, resíduos e materiais granulares provenientes do sistema de drenagem. Um dos problemas associados a barreiras de controle e desvio de fluxo consiste no efeito que estes materiais podem exercer sobre a geomembrana como, por exemplo, perfurações e deformações indesejáveis. Durante a fase de instalação, por exemplo, a geomembrana pode ser puncionada e perfurada por ferramentas,

maquinários, agregados ou protuberâncias no solo de fundação. Por outro lado, durante a vida útil do aterro (fase de operação), a geomembrana pode ser puncionada por recalque gradual devido à ação do peso dos resíduos, possibilitando também o aparecimento de furos ou provocando deformações excessivas.

Para minimizar estes problemas, tem-se recorrido ao uso de uma camada de proteção sobre a geomembrana, de forma a garantir a integridade do sistema durante as fases de instalação (construção) e vida útil (operação) do aterro. Dentre as alternativas comumente adotadas para camadas de proteção destacam-se os geotêxteis e, em algumas situações, os geocompostos.

Atualmente, duas alternativas têm sido utilizadas para o dimensionamento de uma camada de proteção. Uma delas é baseada na prevenção de danos a curto prazo, de modo a garantir que o alongamento não ultrapasse o ponto do escoamento (membranas de polietileno de alta densidade – PEAD), sem que ocorram perfurações na geomembrana. No entanto, existem vários questionamentos sobre este método porque além de não considerar o efeito de deformações locais nas geomembranas ao longo do tempo, as quais podem ocasionar rupturas por *stress cracking*, parte do princípio da seleção do geotêxtil baseada em sua gramatura. Assim, outros fatores como tipo e qualidade da fibra, métodos de fabricação de geotêxteis, resistência à tração e outras propriedades mecânicas, os quais podem estar relacionados ao desempenho, não são considerados nesta proposta. Além disto, o método é baseado em observações visuais, sem quantificação do dano.

A segunda alternativa consiste no critério adotado para avaliar o desempenho das camadas de proteção a longo prazo, de forma a evitar que deformações locais ocasionem rupturas por *stress cracking* na geomembrana. Este critério é baseado em regulamentações técnicas do *Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung* - BAM (Instituto Federal para Ensaio e Pesquisa de Materiais), e consiste na limitação de deformações para um valor

aceitável de 0,25%. Entretanto, existem muitas questões sobre a credibilidade e precisão deste valor de deformação limite adotado. Primeiro, pelo fato dos dados existentes na literatura indicarem que os materiais de proteção mais utilizados não são capazes de evitar deformações menores que o valor adotado pelo BAM. Segundo, por não considerarem alguns fatores que são imprescindíveis para uma análise de desempenho a longo prazo como envelhecimento do geotêxtil devido à degradação química e biológica, ação da temperatura e presença de soldas ou emendas, as quais compreendem um ponto crítico para o aparecimento de fissuras por *stress cracking*.

Em ambas as metodologias também não são consideradas os danos que ocorrem durante a fase de instalação (construção) dos SCDF, que correspondem aos danos mais recorrentes em geomembranas.

Neste contexto, nota-se uma escassez de informações e divergências de opiniões em nível mundial acerca da eficiência de camadas de proteção e que os conhecimentos sobre o assunto ainda não foram devidamente consolidados.

Diante deste cenário, pretende-se, neste trabalho, investigar o desempenho de algumas alternativas de elementos de proteção para geomembranas de PVC e de PEAD através da realização e interpretação de ensaios de laboratório e de campo, simulando as fases de instalação (construção) de barreiras impermeabilizantes. Serão investigadas as propriedades destas alternativas que sejam relevantes para projeto e correlacionados o comportamento de laboratório e de campo.

Cabe destacar que esta tese está associada a um projeto de pesquisa mais amplo que é complementado pela Dissertação de Mestrado de Geroto (2008), onde são apresentados e discutidos resultados que procuram retratar aspectos adicionais de danos de operação, representados por ensaios de punção hidrostática com cones isolados e camadas de pedregulhos naturais, dentre outros.

O objetivo geral deste projeto é investigar o desempenho de camadas de proteção para geomembranas de PEAD e PVC através de ensaios de laboratório e de campo. Para isto, constituem objetivos específicos desta pesquisa:

- Investigar o desempenho de geotêxteis como elementos de proteção através de ensaios índices de laboratório.
- Avaliar fatores e propriedades dos materiais utilizados que sejam relevantes para o desempenho dos elementos de proteção.
- Avaliar o desempenho de geotêxteis como elemento de proteção através de ensaios de danos cíclicos em laboratório.
- Investigar o desempenho de alternativas de proteção quanto a danos decorrentes durante a fase de instalação, através da construção de um aterro experimental.
- Associar os desempenhos observados aos ensaios índices de laboratório que buscam retratar as diferentes variáveis associadas a proteção de geomembranas.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução: Resíduos Sólidos, Aspectos Gerais e Formas de Disposição

Os resíduos sólidos são definidos como "resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, 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 de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível" (NBR 10.004).

Em função da sua natureza são diversos os problemas causados pela disposição inadequada como, por exemplo, os impactos ambientais gerados à atmosfera, ao lençol freático e ao ecossistema, além dos problemas econômicos gerados pela restrição e ocupação do local e arredores.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB, 2000), são coletadas aproximadamente 229.000 toneladas diárias de resíduos. Deste valor, 126.000 toneladas referem-se aos resíduos domiciliares. A Figura 1 ilustra o percentual de resíduos sólidos

gerados no Brasil por região. Observa-se que a Região Sudeste apresenta a maior produção de resíduos.

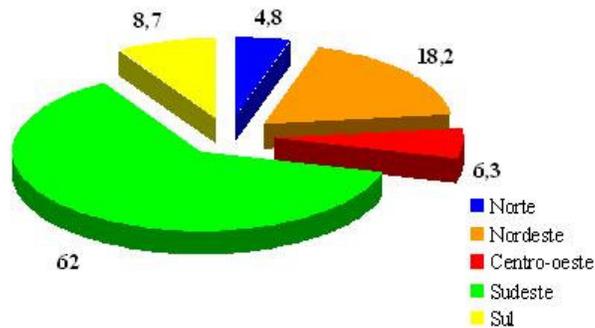


Figura 1. Percentual da geração de resíduos sólidos por região brasileira (PNSB, 2000).

Dados da pesquisa também indicam um aumento considerável na quantidade de resíduos gerados a partir da década de 1990 motivado pela redução nos índices inflacionários e pelo aumento do consumo por parte da população. No entanto, ao se analisar os cuidados referentes ao tratamento e destinação final dos resíduos, constata-se uma redução da quantidade de resíduos depositados em lixões e um aumento de aterros controlados e sanitários, além de um pequeno crescimento de outros tipos de tratamento, como reciclagem e compostagem.

A Figura 2 ilustra o destino final dos resíduos segundo os dados publicados pela Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2000). Observa-se uma situação totalmente favorável no que se refere à destinação adequada de resíduos, principalmente na forma de aterros sanitários.

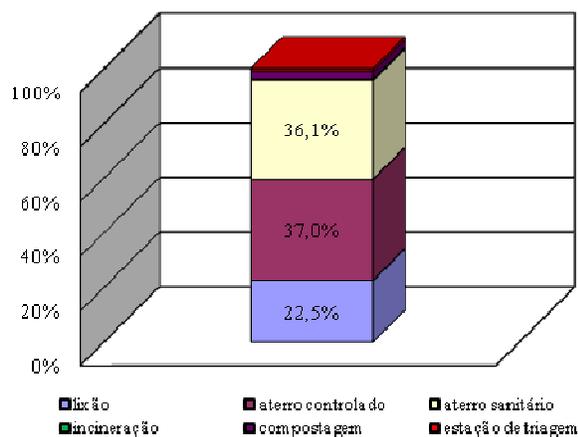


Figura 2. Evolução do destino final dos resíduos brasileiros.

Em algumas destas aplicações de Engenharia, como em aterros sanitários e industriais, além dos canais e lagoas de contenção de efluentes, devem ser previsto um sistema de barreiras impermeabilizantes. Atualmente, as barreiras impermeabilizantes são denominadas de sistemas de captação e desvio de fluxo (SCDF).

Os SCDF são empregados no sistema de confinamento basal, com a função de prevenir a migração de líquidos percolados junto ao solo e água subterrânea e superficial e, no sistema de cobertura, com a função de controlar a infiltração das águas superficiais e de evitar a migração não controlada de gases.

Os sistemas de impermeabilização antigos consistiam basicamente de solo local compactado. Atualmente, tais sistemas podem apresentar em sua constituição materiais poliméricos, como os geossintéticos, e camadas de argilas compactadas. A escolha dos materiais utilizados é influenciada pelo uso a que se destina, pelo meio ambiente físico, pela química da solução percoladora e da água subterrânea, pela vida útil do projeto, taxa de infiltração e restrições físicas.

As barreiras naturais compreendem os solos argilosos naturais de baixa condutividade hidráulica, variando entre 10^{-6} a 10^{-7} cm/s (DANIEL, 1993). Na grande maioria dos casos, as

barreiras naturais são utilizadas como complemento, mas podem ser apresentadas em sua forma simples.

As barreiras de argila compactada são constituídas essencialmente por solos compactados, podendo conter bentonita. Este tipo de material apresenta condutividade hidráulica adequada, são resistentes em longo prazo com relação às influências químicas dos percolados e podem apresentar alto potencial de retenção do contaminante (DANIEL, 1993).

As barreiras sintéticas são compostas de materiais poliméricos (geomembranas) que apresentam condutividade hidráulica extremamente baixa e elevada resistência química e física. Geralmente as geomembranas não são utilizadas sozinhas em função dos possíveis defeitos que podem apresentar e resultar em grandes fluxos de percolação (BOUAZZA *et al*, 2002). Acrescentam-se a este grupo os geocompostos bentoníticos (GB) ou *geosynthetic clay liners* (GCL). Os geocompostos bentoníticos são barreiras com condutividade hidráulica entre 10^{-10} e 10^{-8} cm/s, constituídas por uma camada de bentonita não hidratada aderida mecanicamente ou quimicamente a um geotêxtil ou geomembrana.

Os SCDF podem se apresentar na forma simples, quando constituídos por único material, ou na forma composta, quando são constituídos por uma combinação de diferentes materiais. E ainda podem ser duplos, quando apresentam uma camada dupla de revestimento, sendo esta configuração mais utilizada para disposição de rejeitos perigosos.

A Figura 3 apresenta algumas configurações típicas de barreiras de SCDF.

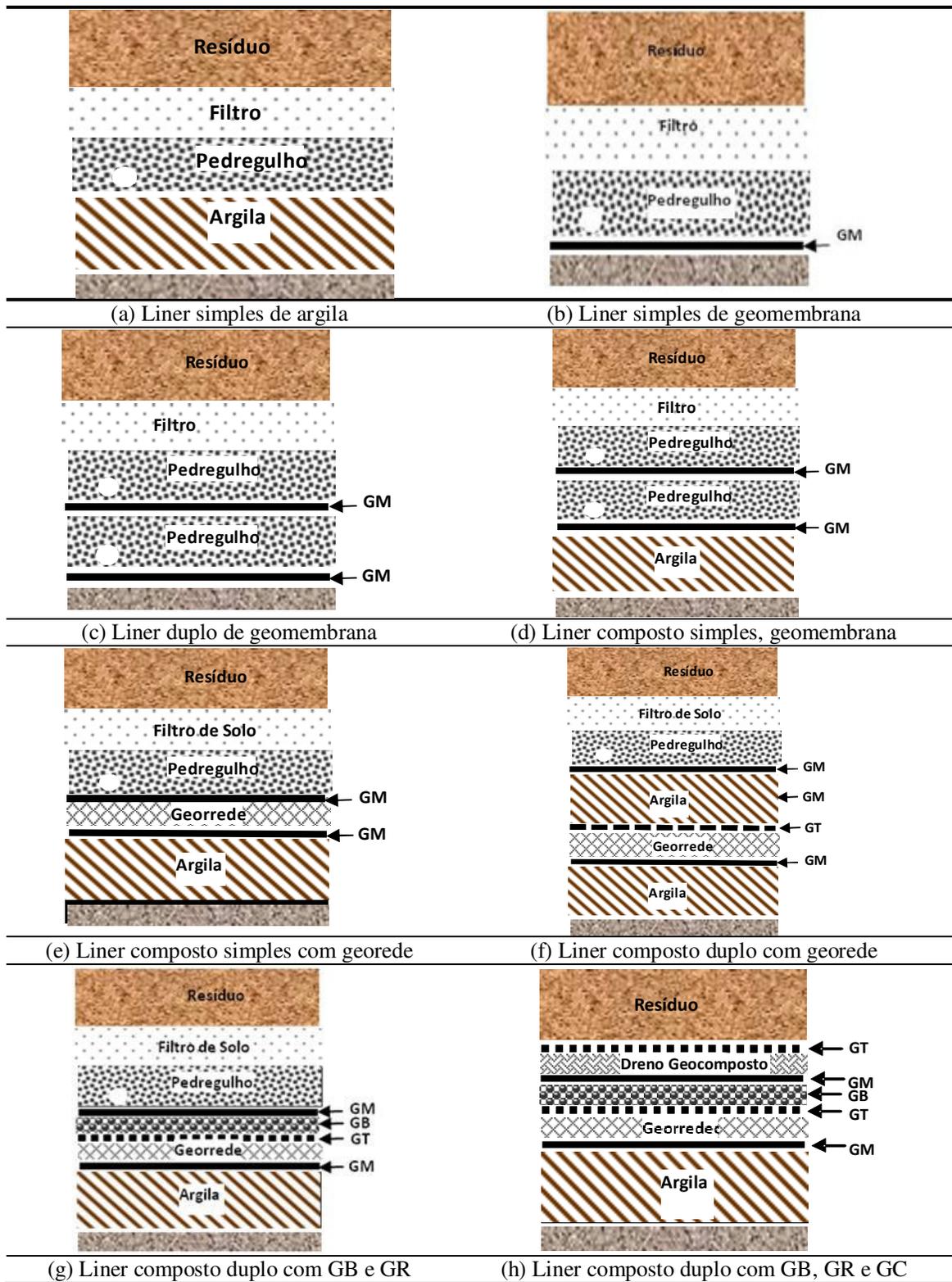


Figura 3. Configurações típicas de barreiras impermeáveis (KOERNER, 1998).

A camada de pedregulho tem como finalidade promover a drenagem e captação dos líquidos percolados. A ASSHO recomenda as seguintes faixas de granulometria dos materiais: 9 a 13 mm, 25 a 38 mm ou 50 a 64 mm. Também é recomendada a espessura mínima de 30 cm. O Instituto Federal para Ensaio e Pesquisa de Materiais - *Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung* - (BAM) recomenda a faixa de variação da curva granulométrica entre 16 e 32 mm.

Os produtos geossintéticos de drenagem são estruturas extrudadas de plástico manufaturadas de forma a promover a drenagem de percolados e gases. Compreendem as georredes (GR) e os drenos geocompostos. As georredes consistem de grupos de estruturas sintéticas planares paralelamente conectadas sobrepostos transversalmente (ou em outros ângulos) a grupos similares. Os drenos geocompostos consistem em uma composição de georredes e geotêxteis. São usados para prevenir a extrusão de solos ou outros materiais adjacentes.

Os geotêxteis (GT) são materiais sintéticos permeáveis, geralmente compostos por polímeros de poliéster (PET) e polipropileno (PP). Dentre as funções que podem exercer, citam-se a função de filtração e separação, como pode ser observado na figura anterior, e a função de proteção. Informações adicionais sobre os diferentes tipos de geossintéticos, suas funções e aplicações podem ser encontradas em Koerner (1998) e Vertematti (2004).

2.2. Geomembranas

2.2.1. Aspectos Gerais

As geomembranas são materiais poliméricos, de baixa condutividade hidráulica (da ordem de 10^{-12} cm/s) e de pequena espessura. Possuem como função primária controlar a percolação e o fluxo de líquidos e, em alguns casos, de gases.

As geomembranas surgiram como alternativa a materiais tradicionais devido à regulamentação de atividades ambientais e à maior distribuição de dados e informações sobre suas propriedades e eficácia.

Sua introdução no mercado só se tornou possível com a produção do PVC (polivinil clorado) no início de 1930, sendo apenas utilizado no início do ano de 1940 com aplicações na agricultura, na impermeabilização de canais, e somente utilizado como contenção de resíduos a partir de 1965 (LENGEN & SIEBKEN, 1996).

As geomembranas de polietileno (PE) tiveram sua produção no ano de 1943 na Alemanha, e o seu uso como geomembrana não foi desenvolvido até os anos 60 (LENGEN & SIEBKEN, 1996).

Atualmente, as geomembranas são aplicadas na impermeabilização de diversas obras, tais como: lagoas ornamentais e para piscicultura; lagoas de tratamento de efluentes; tanques e silos de armazenamento; reservatórios de água; base e cobertura de aterros sanitários e industriais; barreiras separadoras de barreiras; revestimento de túneis e barragens, dentre outras.

Especificamente em aterros de resíduos, as geomembranas de PEAD são as mais utilizadas nos SCDF devido à sua resistência química, mecânica e durabilidade, além de permitirem soldas resistentes do ponto de vista mecânico e hidráulico (LOPES, 2006).

No mercado brasileiro tem-se utilizado geomembranas de PVC e PEAD nos SCDF de bases de aterros e lagoas e, de PELMD (polietileno de baixa densidade) nos sistemas de coberturas de aterros.

As geomembranas são constituídas essencialmente por polímeros e, em menor escala, por aditivos. Os aditivos podem ser incorporados no processo de fabricação dos geossintéticos visando à melhoria de suas propriedades, reduzir o custo, facilitar o processamento, colorir, dentre outros aspectos.

Os plastificantes, por exemplo, são utilizados para aumentar a flexibilidade. Os *fillers*, que são pequenas partículas minerais (ex.: carbonato de cálcio), são utilizados para aumentar a rigidez. O negro de carbono aumenta a rigidez e retarda a degradação pelos raios ultravioletas (UV). Os aditivos como os fungicidas evitam o ataque de fungos e bactérias. E por último, os antioxidantes, que têm como função evitar a degradação por oxidação (DANIEL & KOERNER, 1995).

A Tabela 1 apresenta os tipos de geomembranas mais utilizadas em aterros de resíduos com seus principais componentes e propriedades.

Tabela 1. Tipos de geomembranas: principais componentes e propriedades (adaptado de DANIEL e KOERNER, 1995).

GM	Componentes (% em peso)					Propriedades
	Resina	Plastificante	Fillers	Negro de carbono	Aditivos	
PEAD	95-98	0		2-3	0,25-1	- mais alta resistência à tração - boa resistência química aos UV e temperatura - satisfatória a boa resistência à punção
PEBD	94-96	0	0	2-3	1-4	- boa resistência química - boa resistência à punção e tração - boa resistência aos UV - boa flexibilidade
PVC	50-70	25-35	0-10	2-5	2-5	- boa resistência química - fraca resistência aos UV - muito boa resistência à punção - excelente flexibilidade - mais fácil de instalar
PECS	40-60	0	40-50	5-40	5-15	- boa resistência química - boa resistência química aos UV e temperatura - satisfatória a boa resistência à punção e ao rasgo

Os ensaios em geomembranas são regulamentados por normas americanas (ASTM) e européias (ISO). Destacam-se, no contexto nacional, a regulamentação de algumas normas

brasileiras (ABNT). Os principais ensaios e suas respectivas normas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Ensaios realizados em geomembranas (modificado de Bueno e Vilar, 2004).

Propriedades	Norma	Observação
Físicas		
Espessura nominal	ASTM D 751 e 5199 ASTM 5994	Geomembrana texturizada
Densidade	ASTM D 792 ASTM D 1505 ASTM D 297 ISO 1183	Método do deslocamento Método do gradiente de densidade Método do picnômetro -
Dureza	ASTM D 2240, ISO 868	-
Estabilidade dimensional	ASTM D 1204	-
Mecânicas		
Resistência à tração		
Resistência ao puncionamento estático	NBR 13359 ASTM 4833 ISO 12236	Pistão CBR Pistão: 8 mm de diâmetro; corpo de prova: 45 mm de diâmetro
Resistência ao puncionamento dinâmico	NBR 14971	Cone de 500 g, altura de queda de 500 mm
Resistência a rasgo	ASTM D 1004 ISO 4674	Forma geométrica particular Formas variadas
Hidráulicas		
Permeabilidade ao vapor de água	ASTM E 96	-
Desempenho		
Resistência a radiação ultravioleta	ASTM G 26, ISO 4892	Ciclos de luz ultravioleta e vapor
Resistência química	ENV ISO 12960, ENV ISO 12225	Incubação de amostras em contato com meio agressivo em temperaturas de 23 e 50° C
Resistência a degradação biológica	PR EN ISO 13430	Incubação de amostras em contato com solo contendo microorganismos agressivos
Resistência a degradação térmica	ASTM D 794	Incubação de amostras em estufa sob elevadas temperaturas e circulação de ar
Resistência das soldas	ASTM D 4545 ASTM D 1693	Cisalhamento e descolamento Realizadas em tubos de ensaio
Resistência contra fissuração sob tensão (stress cracking)	ISO 4599 ASTM 5397 ISO 6252	Realizada sob carga de tração
Atrito de interface	ASTM D 5321	Cisalhamento direto ou plano inclinado

2.2.2. Polímeros

Para uma melhor compreensão das propriedades dos geossintéticos, faz-se necessário o conhecimento dos fundamentos relacionados aos polímeros, os quais são sintetizados a seguir.

Um polímero é uma macromolécula formada pela união ou encadeamento de pequenas e simples unidades químicas (monômeros) constituindo um padrão repetitivo. Já os monômeros são moléculas ou compostos químicos de massa molecular relativamente baixa que reagem entre elas ou com outros compostos similares para formar polímeros. Os monômeros possuem ligações covalentes duplas ou triplas, geralmente ligando átomos de carbono. A Figura 4 ilustra alguns dos monômeros mais comuns.

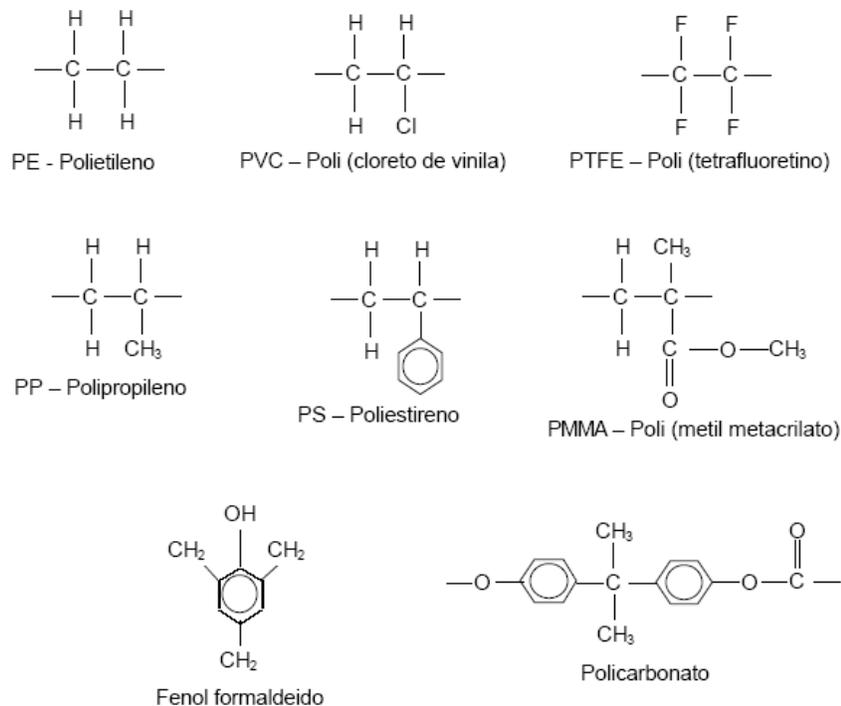


Figura 4. Monômeros dos polímeros mais comuns.

As principais fontes de matéria-prima para os polímeros podem ser divididas em três grupos: produtos naturais, hulha (carvão mineral) e petróleo.

No grupo dos produtos naturais encontra-se a celulose, a borracha natural, o óleo de mamona e o óleo de soja. A hulha após destilação seca produz gás de hulha, de onde é possível separar o etileno e metano. Do coque do alcatrão de hulha obtém-se acetileno (via reação CaO) que com água, por hidrogenação, produz etileno, ou por reação com ácido clorídrico (HCl), produz cloreto de vinila para a produção do Poli (Cloreto de Vinila). O petróleo aparece como a fonte mais importante de todos os produtos minerais. Após a destilação fracionada do petróleo, a fração que interessa para os polímeros é a nafta. Essa fração irá gerar várias frações contendo moléculas saturadas e insaturadas após sofrer um processo de craqueamento térmico apropriado. As moléculas insaturadas (etileno, propileno, butadieno, buteno, isobutileno, aromáticos, etc.) são separadas e aproveitadas para a síntese dos respectivos polímeros (AGNELLI, 2000; LODI, 2003).

A polimerização consiste na reação química através da qual os monômeros se transformam no polímero. Corresponde ao processo de união dos monômeros transformando-os em *meros*, que será a unidade repetitiva que aparecerá na macromolécula. Tal reação é extremamente importante na definição das características mecânicas dos polímeros, e é controlada por parâmetros processo industrial tais como temperatura, pressão no reator e presença de canalizadores.

Existem dois principais processos de polimerização, o primeiro formado pela **adição** de meros iguais, e o segundo formado pela **condensação** através da reação de mais de um monômero, gerando sempre um subproduto.

Os polímeros podem ser termoplásticos, termofixos ou elastômeros. Os polímeros termoplásticos podem ser amolecidos ou liquefeitos por aquecimento e endurecidos por resfriamento, repetidas vezes, sem perder as suas propriedades. As ligações entre as cadeias

dos termoplásticos são predominantemente secundárias. Assim, quando aquecidos, as ligações secundárias são enfraquecidas pela vibração das moléculas, tornando os materiais plásticos, podendo ser remoldados. Como exemplos, citam-se o polietileno, o poliestireno, o PVC, o nylon, etc. A estrutura molecular deste tipo de polímero é linear ou ramificada.

Os polímeros termofixos possuem ligações covalentes entre as cadeias. A energia necessária para o rompimento destas ligações é muito alta e os polímeros são “queimados” antes de se transformarem em materiais moldáveis, portanto não podem ser reciclados. O aquecimento é usado para dar formato a uma peça apenas uma vez, visto que, o mesmo não pode mais amolecer. Ao serem aquecidos, os termofixos formam as ligações cruzadas entre as cadeias lineares, criando uma estrutura de cadeia tridimensional estável que impede um novo deslocamento das moléculas do polímero. Com o aquecimento e pressão, somente haverá o rompimento da cadeia, resultando em degradação das propriedades. Como exemplos, citam-se as resinas fenólicas, melamínicas (revestimento) e alquídicas.

Por último, têm-se os elastômeros que são polímeros intermediários. Os elastômeros apresentam certo número de ligações cruzadas. Apresentam uma grande capacidade de deformação elástica em temperatura ambiente. Possuem cadeias predominantes lineares com alguma reticulação. A grande capacidade de deformação dos elastômeros está associada à configuração espiralada de suas cadeias poliméricas. Alguns exemplos de elastômeros são os silicões usados como selantes na construção civil e o policloropreno (neoprene) utilizado em pinturas, aparelhos de apoio e em impermeabilizações.

Dependendo da natureza química dos monômeros e da técnica empregada para a polimerização, os polímeros podem exibir diferentes tipos de estruturas. Os mais comuns são os de estrutura linear, ramificada ou em rede.

Nos polímeros lineares a seqüência de monômeros é contínua, seguindo em direção reta (linear), ou seja, a cadeia polimérica cresce em uma única dimensão. Estes polímeros são

obtidos tanto por polimerização em cadeia como por polimerização em etapas. A Figura 5 ilustra o polietileno de alta densidade (HDPE), uma molécula de cadeia longa e linear, feita pela polimerização do etileno.

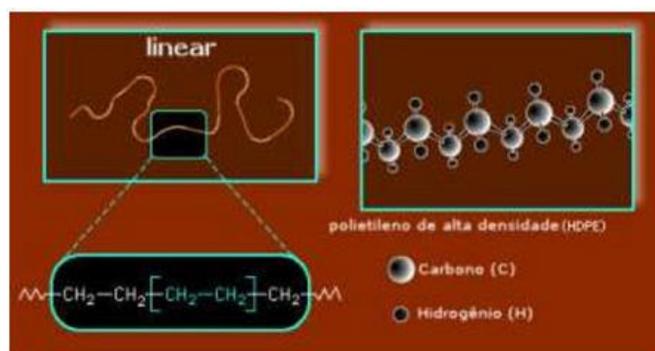


Figura 5. Ilustração da estrutura linear.

Os polímeros ramificados são aqueles que apresentam ramificações partindo da sua cadeia principal, formando uma configuração de “galhos de árvores”. Os polímeros ramificados não se agrupam em retículos cristalinos, como os lineares, e têm sua cristalinidade diminuída pela ramificação. Também podem ser obtidos por polimerização em cadeia e por etapas (Figura 6).



Figura 6. Ilustração da estrutura ramificada.

Os polímeros reticulados são estruturas tridimensionais que têm sua origem na ligação covalente das moléculas lineares, em pontos que não são os seus extremos. O agente de ligação usado entre as cadeias e o método de reticulação pode fazer com que elas variem em número e em comprimento. Os polímeros também são chamados de reticulados quando o número de ligações cruzadas entre as moléculas é suficientemente alto. Nesses polímeros, as ligações covalentes se desenvolvem nas três direções do espaço e, como resultado, tornam-se altamente insolúveis e infusíveis. A Figura 7 ilustra uma estrutura molecular do tipo reticulada.

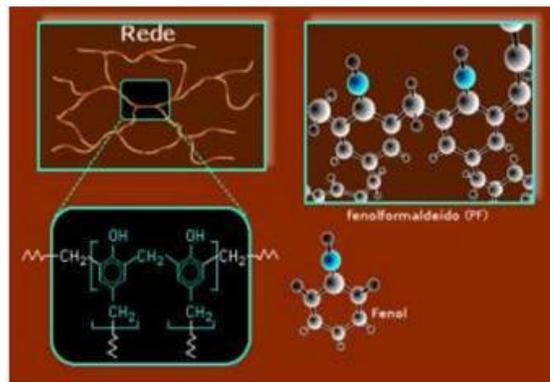


Figura 7. Ilustração da estrutura reticulada.

Os polímeros no estado amorfo são caracterizados pela disposição desordenada das moléculas, de formato irregular, não possuindo ordem estrutural em suas cadeias. Esse comportamento lembra visualmente uma “porção de espaguete cozido”, em razão das ondulações e da irregularidade.

Outro conceito importante relacionado a polímeros consiste na cristalinidade. Segundo Agnelli (2000), a cristalinidade em polímeros consiste no alinhamento de segmentos de cadeias em um arranjo tridimensional perfeito. No caso de polímeros termoplásticos, tal

propriedade nunca é total, podendo ser amorfos ou apresentar cristalinidade parcial (termoplásticos semicristalinos).

Algumas propriedades físicas e mecânicas relacionam-se diretamente com o grau de cristalinidade do polímero e da morfologia de suas regiões cristalinas. Quanto mais cristalinos os polímeros, maiores serão estas propriedades, como a rigidez, resistência química, densidade, estabilidade dimensional, resistência à abrasão, temperatura de fusão (T_m) e de transição vítrea (T_g), etc.

Entretanto, a cristalinidade causa a diminuição de outras propriedades como resistência ao impacto, alongamento na ruptura, claridade ótica e resistência ao fenômeno do *stress-cracking* (FST – fissuramento sob tensão).

Vários fatores favorecem a cristalinidade dos polímeros como a linearidade, taticidade e aditivos. O PEAD, por exemplo, com suas cadeias lineares apresenta um elevado grau de cristalinidade, em torno de 90%. Já o PEBD, que apresenta cadeias ramificadas, a cristalinidade se situa em 40%.

A taticidade é caracterizada por uma ordem na disposição do grupo lateral (regularidade) conferindo, portanto, cristalinidade ao polímero.

Outro aspecto importante consiste nos aditivos. Os aditivos aparecem como substâncias estranhas ao polímero alojando-se entre suas cadeias, dificultando o empacotamento e, portanto, sua cristalinidade. Quando se adicionam plastificantes ao PVC, sua cristalinidade nominal reduz de 10% para zero.

2.2.3. Stress Cracking (Fissuramento sob Tensão)

O fenômeno de *stress cracking* é definido pela ASTM D883 como “uma ruptura interna ou externa em um plástico causada por tensões de tração menores que sua resistência mecânica num curto espaço de tempo”.

As tensões que causam o *stress cracking* podem estar presentes internamente ou externamente ou ainda ser uma combinação dessas tensões. O desenvolvimento de tais fissuras é freqüentemente acelerado pelo meio ambiente ao qual o plástico é exposto.

A alta cristalinidade que confere ao PEAD excelente resistência química e características de resistência é também responsável pela susceptibilidade ao *stress cracking* (HSUAN, 2000).

O FST pode ser explicado através da Figura 8. 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, freqüentemente, se entrelaçam na lamela adjacente (Figura 8.a).

Quando se aplica uma tensão elevada a essa estrutura (Figura 8.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 8.c). Contudo, quando baixas tensões são aplicadas (Figura 8.d), as ligações entre as cadeias têm tempo suficiente para lentamente se soltarem, provocando a separação das lamelas e gerando uma ruptura frágil (Figura 8.e) em comparação ao escoamento/alongamento previstos na quebra dúctil (LAVOIE, 2006).

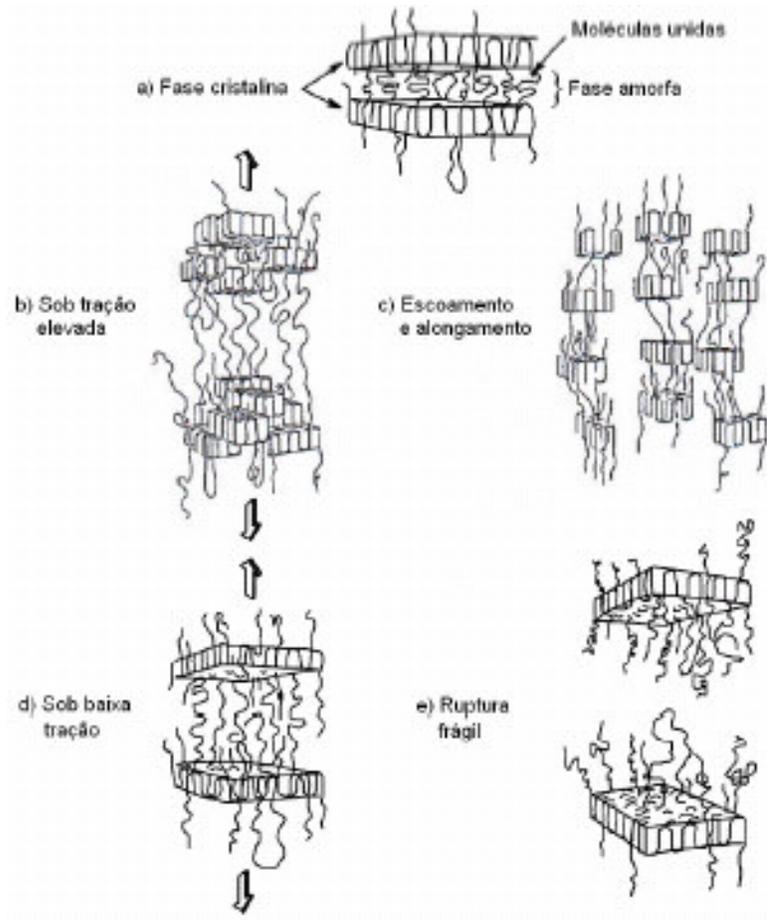


Figura 8. Estrutura lamelar do PEAD (LAVOIE, 2006).

Os polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos, como o polietileno (PE), o poliéster (PET) e o PVC (polivinil clorado) estão sujeitos ao fenômeno de *stress cracking*. No entanto, os polímeros de PVC e o PET apresentam menor susceptibilidade ao FST do que o polímero de PE e o PP.

Segundo Reddy & Butul (1999), existem dois diferentes modos de ruptura por stress cracking: propagação rápida de fissuras ou propagação lenta de fissuras. A propagação rápida logicamente está associada a velocidades muito altas (acima de 300 m/s), e pode se espalhar em centenas de metros de comprimento. A propagação lenta de fissuras apresenta velocidades menores que 0,1 m/s, e ocorre numa proporção específica durante a vida útil da

geomembrana. A velocidade de propagação é função do material polimérico, tensão aplicada, e temperatura.

A Figura 9 mostra alguns exemplos do fenômeno de *stress cracking*.

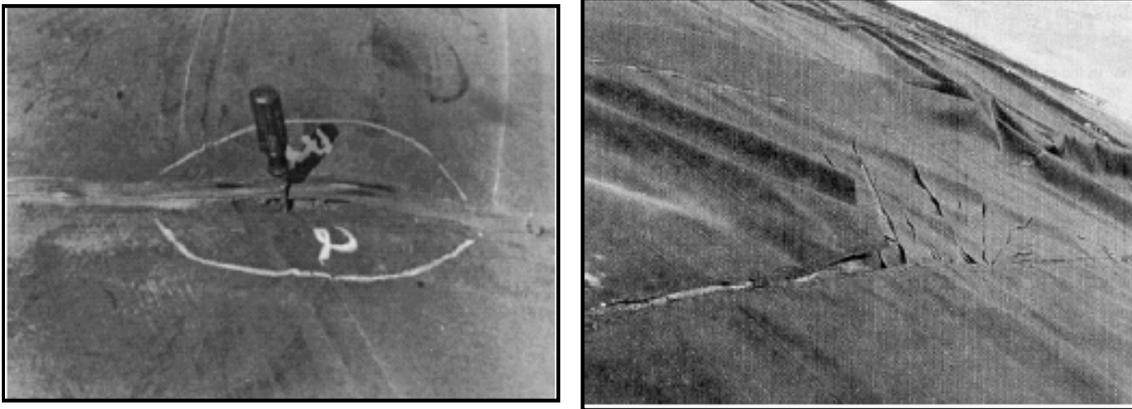


Figura 9. *Stress cracking*: (a) na borda de uma emenda (HSUAN, 2000); (b) propagação rápida (PEGGS, 1988).

Existem vários aspectos que afetam o comportamento do FST. Um deles consiste na temperatura. Com a aceleração da temperatura ocorre uma diminuição da resistência ao FST, evidenciada pela diminuição do tempo de ruptura. Além disto, a combinação do aumento da temperatura com agentes químicos pode reduzir ainda mais o tempo de ruptura de plásticos susceptíveis ao FST.

O fenômeno de FST pode ser avaliado através de ensaios de laboratório em geomembranas submetidas a solicitações mecânicas e em contato com fluidos agressivos. Um tipo de ensaio bastante utilizado para avaliação do FST consiste no ensaio de fluência. Este método é o mais recomendado, pois envolve a aplicação de tensões de tração, o monitoramento do tempo de ruptura, juntamente a sua imersão no fluido agressivo. Como exemplos de ensaio de fluência citam-se o método NCLT e SP – NCLT.

O método NCLT (*Notched Constant Tensile Load Test* - ASTM D5397) consiste em aplicar vários estágios de carga (de 20% a 65% da carga de escoamento da geomembrana) em corpos de prova padrão, imersos numa solução de Igepal CO 630 com concentração de 10% em volume e 90% de água, sob temperatura constante de 50°.

Os corpos de prova apresentam uma ranhura na região central, a qual corresponde a 20% da espessura da geomembrana. A Figura 10 mostra detalhes da ranhura realizados nos corpos de prova e uma foto microscópica da ranhura na geomembrana.

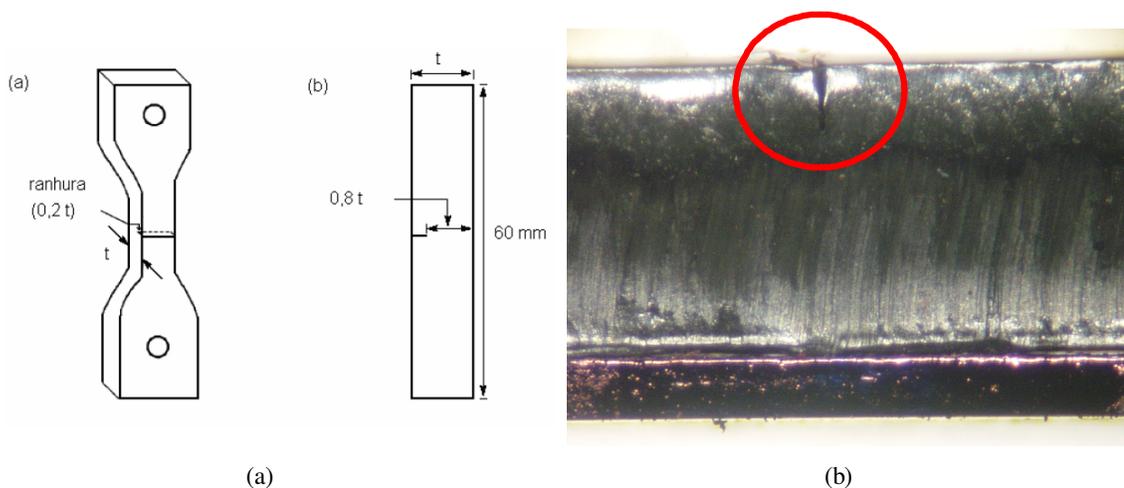


Figura 10. Detalhes da ranhura feito nos CP's utilizados no ensaio NCLT: (a) dimensões da ranhura; (b) foto microscópica da ranhura.

O resultado do ensaio consiste numa curva das tensões aplicadas *versus* seus respectivos tempos de ruptura. As curvas são divididas em duas partes. A primeira, de comportamento dúctil, apresenta um suave declive; enquanto a segunda, de comportamento frágil, apresenta um declive acentuado. A transição entre as duas partes das curvas pode ser do tipo degrau, joelho ou nariz (Figura 11).

Uma informação importante desta curva é o tempo de transição (T_t). O ponto de transição (T_t) pode ser identificado como o ponto inicial da região frágil da curva. Quanto

maior o tempo de transição (T_t), menor a susceptibilidade de ocorrência do stress cracking na geomembrana. Koerner *et al.* (1993) recomendam um valor do tempo de transição mínimo de 100 horas.

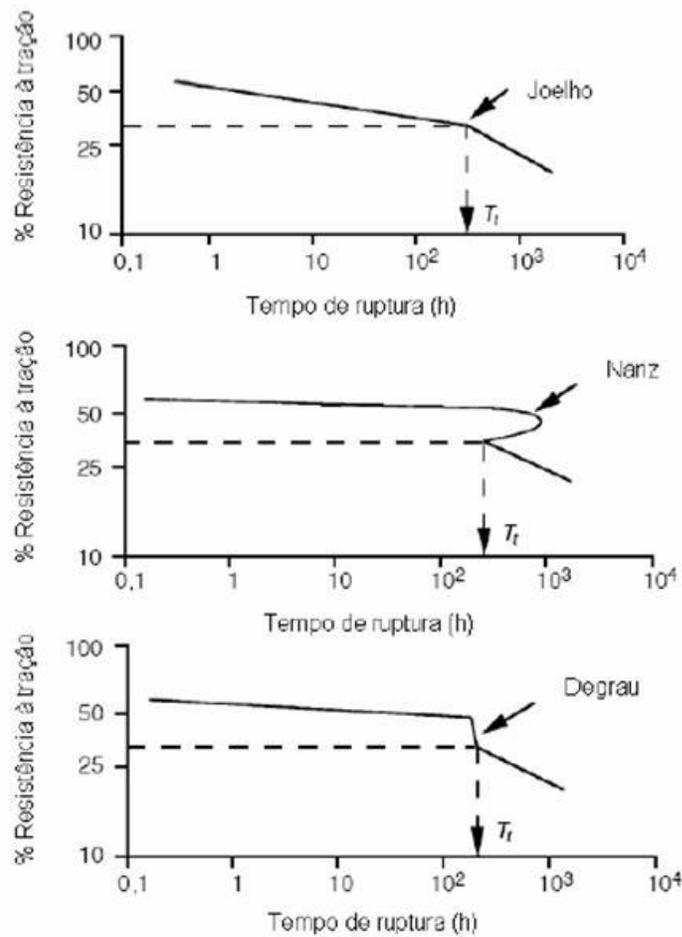


Figura 11. Curvas obtidas através do método de ensaio NCLT (HSUAN AND KOERNER, 1998).

Devido ao tempo total requerido neste método de ensaio, uma alternativa proposta prescrita pela norma ASTM D 5397 consiste no método SP - NCLT (*Single Point-Notched Constant Tensile Load Test*). Neste método é utilizado apenas um estágio de carga (30% da resistência a tração no escoamento da geomembrana). São utilizados cinco corpos de prova e

o tempo mínimo de ruptura deve ser de 200 horas. O valor da carga foi estabelecido a partir de um estudo de Hsuan & Koerner (1995), onde se verificou que tal estágio de carga se apresentava na parte frágil da curva obtida pelo ensaio.

O Instituto de Pesquisa de Geossintéticos (GRI – *Geosynthetic Research Institute*) especifica a norma GM 10 (2003) para a avaliação do fenômeno do FST. O critério para aceitação ou recusa de uma amostra é baseado em ciclos de ensaios. No primeiro ciclo (ciclo A) são ensaiados cinco corpos de prova e o critério de aceitação estabelece que pelo menos quatro corpos de prova apresentem um tempo de ruptura (T_r) mínimo de 300 horas. Caso ocorra o descumprimento do critério, as amostras são re-ensaiadas (ciclo B). Em último caso, utiliza-se o ciclo C, que corresponde ao ensaio NCLT, sendo que o tempo de transição (T_t) deva ser superior a 100 horas.

Lavoie (2006) realizou um amplo estudo do fenômeno do FST em geomembranas virgens e degradadas sob diferentes condições. Neste trabalho, as geomembranas foram degradadas pela exposição à radiação ultravioleta, por envelhecimento térmico em estufa e pela compatibilidade química com soda cáustica e vinhaça. Os resultados dos ensaios NCLT mostraram que os processos de degradação a que as geomembranas foram submetidas são considerados catalisadores do fenômeno FST, pois ocorreram reduções da ordem de 50 a 60% no tempo de ruptura. Outra informação importante foi que os ensaios SP – NCLT mostraram o mesmo comportamento observado nos ensaios NCLT.

Vilar (2003) e Azambuja (2003) enfatizam que a presença de ranhuras e arranhões, deformações localizadas e a superposição de soldas por extrusão também podem ser a causa da ruptura por *stress cracking*.

2.3. Geotêxteis

Geotêxteis são “produtos têxteis permeáveis utilizados com fundação, solo, rocha, ou qualquer outro material relacionado à engenharia geotécnica, como parte integrante de um projeto, estrutura ou sistema feito artificialmente” (ABNT 12.553).

Atualmente, os geotêxteis apresentam diversas funções em obras geotécnicas como separação, proteção, filtração, drenagem e reforço. Cita-se também a função de impermeabilização quando são impregnados por betume.

A maior parte dos geotêxteis é feito de polímeros de poliéster (PET) e polipropileno (PP). Em menor grau, são feitos de polímeros de polietileno (PE) e poliamida (PA).

Os geotêxteis são agrupados em função do arranjo estrutural de suas fibras: geotêxteis tecidos e não-tecidos.

Os geotêxteis tecidos são constituídos por 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 urdume corresponde aos fios dispostos longitudinalmente.

Nesta categoria são utilizados quatro tipos principais de fibra: monofilamento, multifilamento, laminete e fibrilas. Os monofilamentos podem atingir centenas ou milhares de metros e constituem fibras individuais fabricadas com seção transversal circular ou oval. Por outro lado, os multifilamentos são formados pela associação de diversos filamentos (Figura 12b). Quando o produto extrusado apresenta-se lamelar, pode-se cortá-lo em fitas estreitas, originando os laminetes, ou cortá-los em pequenos elementos que, quando unidos, constituem as fibrilas.

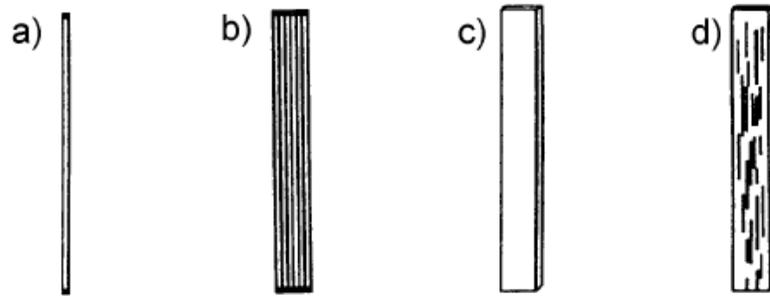


Figura 12. Tipos de fibras: geotêxteis tecidos: (a) monofilamentos; (b) multifilamentos; (c) laminetes; (d) fibrilas (BHATIA & SMITH, 1996).

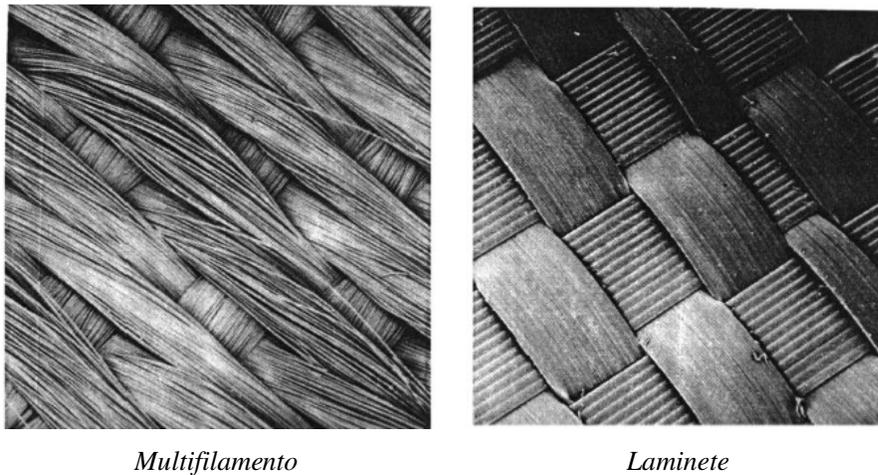
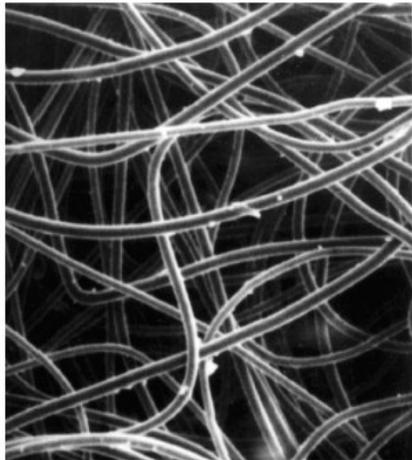


Figura 13. Exemplos de geotêxteis tecidos (BHATIA & SMITH, 1996).

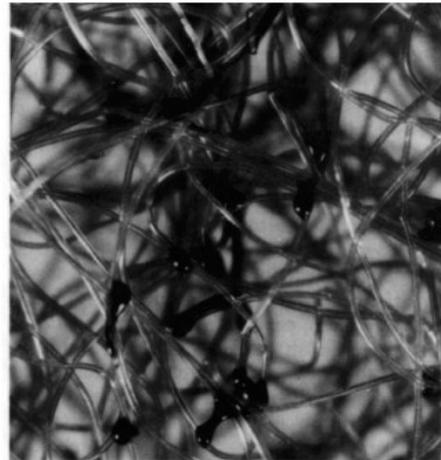
Os geotêxteis não tecidos são compostos por fibras ou filamentos distribuídos aleatoriamente e interligados por processos mecânicos, térmicos e/ou químicos. Nesta categoria são utilizados dois tipos de fibras: as cortadas e os filamentos contínuos, ambas com seção transversal triangular. Os filamentos contínuos possuem grande extensão, enquanto as fibras apresentam comprimento reduzido.

O processo de fabricação dos geotêxteis não tecidos é denominado “*spunbonding*”, que abrange desde a produção das fibras até a obtenção do produto final (mantas).

Conforme o tipo de ligação das fibras, os geotêxteis podem ser do tipo agulhado, termoligado e resinado. No processo de agulhagem, as fibras dispostas na esteira rolante passam sob uma prancha constituída por uma série de agulhas dentadas. A ligação acontece mediante a penetração de agulhas, repetidas vezes, em toda a profundidade do material a fim de provocar entrelaçamento das fibras. Nos geotêxteis termoligados, a ligação acontece através da fusão parcial das fibras. E, nos geotêxteis resinados, a ligação ocorre através de alguma substância química como, por exemplo, resina acrílica aplicada por imersão ou pulverização. A Figura 14 ilustra algumas estruturas de geotêxteis não tecidos.



Agulhado



Termoligado

Figura 14. Exemplos de estruturas de geotêxteis não tecidos.

Os ensaios em geotêxteis também são regulamentados por normas americanas (ASTM), européias (ISO) e, por normas brasileiras (ABNT). Os principais ensaios em geotêxteis são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Ensaios realizados em geotêxteis (modificado de BUENO e VILAR, 2004).

Propriedades	Norma
Físicas	
Massa por unidade de área (Gramatura)	NBR 12568, ISO 9864, ASTM D 3776
Espessura nominal	NBR 12569, ISO 9863, ASTM D 964
Porosidade	-
Mecânicas	
Compressibilidade	-
Resistência à tração	
- faixa larga	NBR 12824, ASTM D 4595, ISO 10319
- faixa restrita ou grab	ASTM D 4632
- multidirecional	ASTM D 5716
Resistência ao puncionamento	-
- estático (CBR)	NBR 13359, ISO 12236
- dinâmico (queda do cone)	NBR 13359, ISO 12236
Resistência a propagação de rasgo	ASTM D 4533
Resistência a estouro	ASTM D 3786
Fluência	**PNBR 02.153.19-015, ISO 13431, ASTM D 5262
Hidráulicas	
Permissividade	ISO 11058
Transmissividade	ISSO 12958
Filtração	
- abertura de filtração	**PNBR 02.153.19-021, ISO 12956
- abertura aparente	ASTM D 4751
Desempenho	
Resistência à tração confinada	-
Fluência confinada	-
Resistência de interface:	
- arrancamento	
- cisalhamento direto	ISO 13427 e ASTM D 5321
- plano inclinado	
Resistência a abrasão	ISSO 13427
Filtração de longa duração	ASTM D 5101
Danos de Instalação	ISO 10722, ASTM D 5818

** Projetos de normas brasileiras

2.4. Proteção de Geomembranas

2.4.1. Danos Mecânicos em Geomembranas

Os danos ou defeitos existentes na geomembrana podem ocorrer por deficiente fabricação ou pelas atividades de construção (instalação) e operação do aterro.

Os danos ou defeitos de fabricação correspondem a pequenos orifícios, variação de espessura e baixa resistência ao *stress cracking*.

As atividades de construção compreendem o transporte, armazenamento, instalação, soldagem e colocação da camada drenante sobrejacente a geomembrana. Comumente, os danos decorrentes da construção se manifestam na forma de sulcos, cortes, rasgos, orifícios, furos, descolagens, tensões e ruptura da geomembrana.

Os danos de operação se devem ao contato de pedras ou pedregulhos com a geomembrana sob tensões normais estáticas provenientes do carregamento dos resíduos. Os tipos de danos que podem ocorrer nesta fase são orifícios, rasgos, sulcos e rupturas.

Segundo os primeiros estudos sobre danos em geomembranas apresentados por Nosko *et al.* (1996) apud Lopes (2006), 25% dos danos ocorrem durante a instalação da geomembrana, 73% durante a fase de colocação da camada drenante e 2% durante a fase de operação do aterro.

Dos danos que ocorrem durante a instalação das geomembranas, os pesquisadores atribuem 61% a extrusões deficientes, 18% a fusões deficientes por sobreaquecimento, 17% a punção devido a pedras existentes no solo subjacente e 4% a cortes decorrentes das operações de colocação e ensaios.

Dos danos ocorridos durante a fase de colocação da camada drenante, 68% são devidos a pedras angulosas, a inaceitáveis dimensões das partículas constituintes da camada drenante ou ao deficiente dimensionamento do geotêxtil de proteção; 16% devido ao equipamento pesado usado para espalhar a camada drenante, e 16% devido à incorreta utilização do utensílio utilizado para verificar a espessura da camada drenante.

Desta forma, para que a geomembrana garanta um bom desempenho ao longo da vida útil do aterro, torna-se necessário verificar a sua integridade e conformidade durante as fases de construção e de operação do aterro.

Os ensaios de conformidade asseguram que as características da geomembrana fornecida se encontram em conformidade com as especificações técnicas dos fabricantes, e também para verificar possíveis defeitos de fabricação.

Os ensaios de verificação de integridade asseguram que a integridade da geomembrana não será afetada durante a construção dos aterros. São divididos em dois grupos: o primeiro usado para detecção de defeitos durante a instalação e ligação dos painéis das geomembranas, e o segundo usado após a colocação e ligação dos painéis de geomembranas (para detectar defeitos decorrentes da colocação da camada drenante sobrejacente à geomembrana).

Segundo Lopes (2006), depois de efetuado o controle de qualidade de fabricação não há razões para ocorrerem defeitos nos painéis das geomembranas, a não serem os ocorridos durante o transporte e colocação. Portanto, os ensaios de verificação da integridade da geomembrana durante a colocação e ligação dos painéis de geomembrana referem-se principalmente a integridade das emendas.

Os ensaios para verificação da resistência das emendas (ensaios destrutivos) dependem do tipo de geomembrana, que pode condicionar o tipo de emenda. Tais ensaios são realizados em emendas efetuadas por extrusão e termofusão, sobre amostras cortadas nas emendas existentes. Tem como objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento e ao arrancamento das emendas. Na Tabela 4 são apresentadas as normas de ensaios mais utilizadas para avaliação destas propriedades.

Tabela 4. Normas de ensaio para avaliação da resistência de emendas para vários tipos de geomembranas (DANIEL & KOERNER, 1995).

Tipo de geomembrana	Ensaio de resistência ao cisalhamento	Ensaio de resistência ao arrancamento
PEAD	ASTM D 4437	ASTM D 4437
PEBD	ASTM D 6392	ASTM D 6392
CSPE	ASTM D 751	ASTM D 413
PVC	ASTM D 3083	ASTM D 413
	ASTM D 6392	ASTM D 6392

Os ensaios de verificação da continuidade das emendas também dependem do tipo de geomembrana e do tipo de emenda e, são realizados ao longo de todo o comprimento das emendas e em todos os tipos de emendas. A Tabela 5 apresenta os tipos de ensaio de acordo com os tipos de emendas e geomembranas.

Tabela 5. Métodos de ensaios não destrutivos conforme os tipos de emendas e de geomembranas (DANIEL & KOERNER, 1995).

Métodos de ensaios mais comuns	Tipo de emenda	Tipo de geomembrana
Jato de ar	Química colagem	Todas exceto PEAD
Haste metálica	Todas	Todas
Pressão de ar	Termofusão dupla	Todas
Vácuo	Todas	Todas
Arame elétrico	Todas	Todas
Vibração	Química Colagem Termofusão	PEAD, PEBD, PVC
Impedância plana	Química Colagem Termofusão	PEAD, PEBD, PVC
Sombra	Termofusão Extrusão	PEAD, PEBD

Os ensaios realizados após a colocação e ligação dos painéis de geomembranas destinam-se a detectar somente os defeitos resultantes das operações de construção que implicam na fuga de fluidos. Os métodos são divididos em dois grupos conforme a geomembrana se encontra coberta ou não pelas camadas sobrejacentes.

A Tabela 6 apresenta uma síntese dos métodos de ensaios mais comuns. Descrevem-se a seguir o mecanismo de funcionamento destes métodos.

Tabela 6. Métodos de ensaios de verificação da estanqueidade da geomembrana após a sua colocação e ligação dos painéis (adaptado de CFGG 2003).

Métodos de ensaio	Geomembrana não coberta	Geomembrana coberta	Observações
Jato ou poça de água	sim	não	- só para GMs não condutoras - materiais em contato com a superfície inferior da GM têm de ser condutores - 200 a 300 m ² /h/operador - defeitos da ordem de milímetros
Faísca Elétrica	sim	não	- só para GMs não condutoras - materiais em contato com a superfície inferior da GM têm de ser condutores - 5000 a 8000 m ² /h/operador - defeitos da ordem de milímetros
Sistema fixo de detecção e localização de orifícios	sim	sim	- colocação prévia de sensores no solo de suporte - só para GMs não condutoras - materiais em contato com a superfície inferior e superior da GM têm de ser condutores - 5 a 12 minutos (área máxima de prospecção 10000 m ²)
Geomembrana condutora	sim	sim *	- necessidade de GMs condutoras - GM deve estar seca - 6000 a 8000 m ² /dia/máq./ 2 operadores - defeitos da ordem de milímetros
Sonda elétrica móvel	não	sim *	- só para GMs não condutoras - materiais em contato com a superfície inferior e superior da GM têm de ser condutores - 150 a 250 m ² /h/operador - defeitos da ordem de milímetros

* desde que a geomembrana se mantenha seca

Ensaio do Jato ou Poça de Água

Este método de ensaio utiliza dois eletrodos, um passivo ligado ao subsolo e outro ativo ligado a um jato d'água ou a uma ferramenta utilizada para espalhar a água, sendo que ambos os eletrodos estão ligados a um gerador de corrente contínua. Se houver um orifício sobre a geomembrana, a água entra em contato com o solo carregado negativamente e o

circuito se fecha. Um sinal sonoro avisa ao operador da existência do defeito. A Figura 15 ilustra o método do jato ou poça d'água.

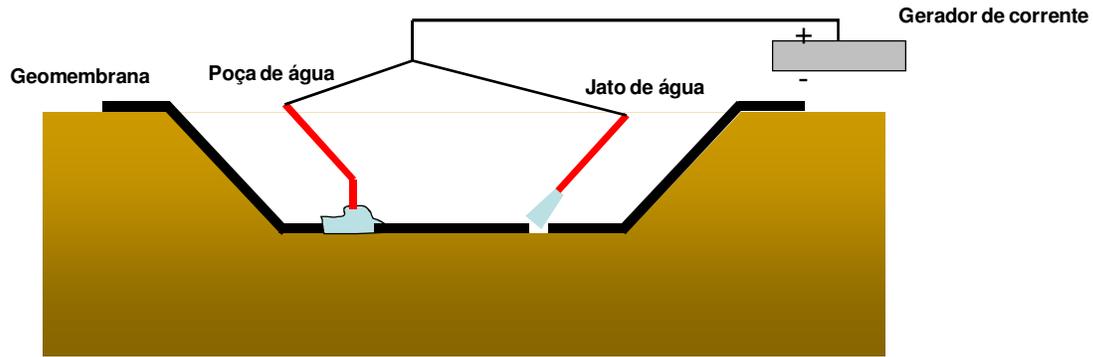


Figura 15. Ilustração do ensaio do jato ou poça d'água (CFG, 2003; LOPES, 2006).

Ensaio da Faísca Elétrica

Este método de ensaio também se utiliza um gerador de baixa corrente elétrica e elevada tensão ligados a dois eletrodos. Um eletrodo (passivo) é ligado ao subsolo e o outro (ativo) é ligado a uma haste com escova ou barra metálica na ponta, que é passada lentamente sobre a superfície superior da geomembrana.

A geomembrana (não condutora) funciona como um isolante. Assim, se houver um orifício sobre a geomembrana, o circuito se fecha e uma faísca é emitida, acompanhada de um sinal sonoro.

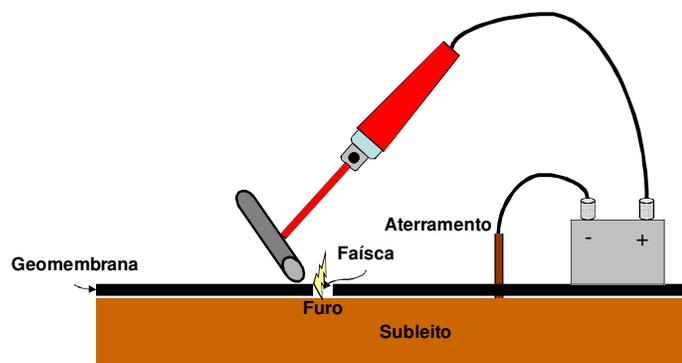


Figura 16. Ilustração do ensaio da Faísca (CFG, 2003; LOPES, 2006).

Ensaio com Sistema Fixo de Detecção e Localização de Furos

Ao contrário dos ensaios descritos acima, o ensaio com sistema fixo de detecção e localização de furos permite a verificação de furos após a cobertura da geomembrana.

Neste ensaio, faz-se necessário, antes da colocação da geomembrana, a introdução de uma rede de sensores no solo segundo uma malha pré-definida. Cada sensor é ligado através de um cabo elétrico a um aparelho de aquisição de dados. Após a colocação da geomembrana, ou também da camada de proteção e da camada drenante, instala-se um gerador de corrente elétrica ligado a dois eletrodos. Um eletrodo é colocado acima da geomembrana e o outro é ligado ao solo de fundação. Aplicando-se uma corrente elétrica, pode-se medir a densidade da corrente sob a geomembrana através dos diversos sensores. Qualquer perfuração da geomembrana provoca uma anomalia na distribuição da densidade da corrente elétrica. Este método permite localizar os orifícios da geomembrana com bastante precisão (Figura 17).

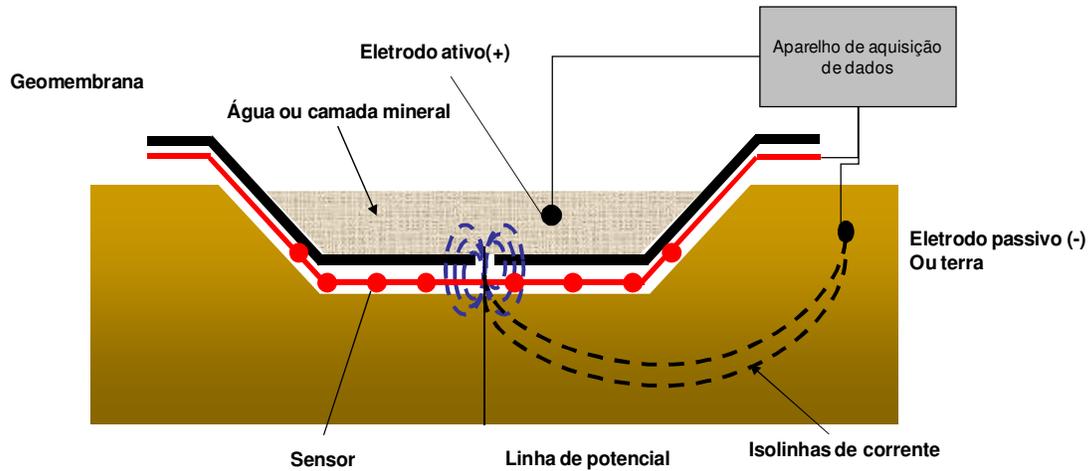


Figura 17. Ilustração do ensaio com sistema fixo de detecção e localização de furos (CFG, 2003; LOPES, 2006).

Ensaio com Geomembrana Condutora

O ensaio da geomembrana condutora utiliza uma camada condutora fina (0,1 mm) abaixo da geomembrana. Começa-se por carregar uma placa condutora de neoprene, colocada sobre a superfície superior da geomembrana, com uma tensão variando de 15 a 30 kV. Esta tensão é transmitida para a camada condutora através do efeito capacitivo. Em seguida, com ao auxílio de uma vassoura elétrica, faz-se a prospecção da superfície superior não condutora da geomembrana. Se houver um orifício, estabelece-se uma corrente, gerando uma faísca e/ou sinal sonoro (Figura 18).

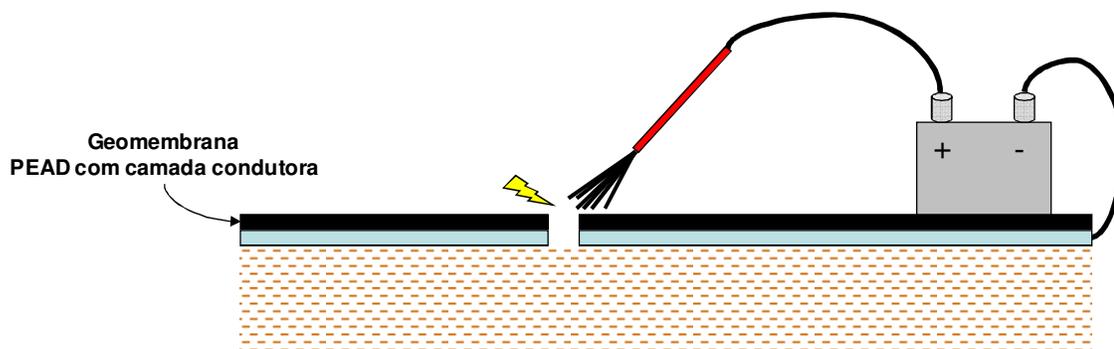


Figura 18. Ilustração do ensaio da geomembrana condutora (CFG, 2003; LOPES, 2006).

Ensaio da Sonda Elétrica Móvel

O ensaio da sonda elétrica móvel só pode ser utilizado em geomembranas cobertas. Este ensaio também utiliza dois eletrodos ligados a um gerador de corrente contínua. Um eletrodo é colocado no solo da fundação e outro, é colocado no material que cobre a superfície superior da geomembrana, estabelecendo-se uma diferença de potencial entre o solo exterior e o meio interior.

Com a ajuda de uma sonda elétrica móvel são efetuadas medidas de potencial elétrico, segundo uma densidade pré-determinada. Uma mudança de sinal nos valores medidos pode indicar a presença de um orifício. Como o campo de potencial diminui à medida que a sonda se afasta do eletrodo, se verificar um aumento de potencial, significa que a sonda está próxima de um orifício.

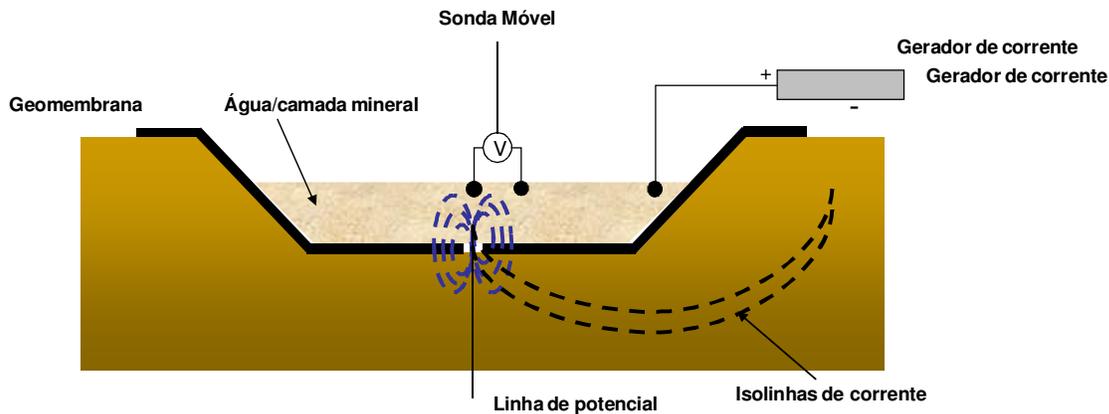


Figura 19. Ilustração do ensaio da sonda móvel (CFG, 2003; LOPES, 2006).

2.4.2. Desempenho de Camadas de Proteção

Frente às diferentes solicitações durante as fases de instalação e operação de aterros, vários autores como Tognon *et al.* (2000), Bouazza *et al.* (2002) e Seeger & Müller (1996), dentre outros, sugerem a introdução de uma camada de proteção de forma a prevenir danos mecânicos e também minimizar as tensões e deformações induzidas na geomembrana.

Vários produtos geossintéticos são comumente utilizados como camadas de proteção de geomembranas. As especificações variam de país para país dependendo da filosofia de projeto adotada. Nos Estados Unidos, por exemplo, são freqüentemente utilizados geotêxteis não tecidos com baixa gramatura (200 g/m² a 600 g/m²). Ao contrário, em países da Europa, na Alemanha em particular, geotêxteis não tecidos com elevada gramatura (> 2000 g/m²) são geralmente utilizados em casos de aterros de pequenos tamanhos, onde há situação de baixo carregamento. Para aterros de elevada altura (situação de carregamento pesado) são utilizados materiais alternativos como camadas de geotêxteis preenchidas com areia e produtos geossintéticos de amortecimento sem material de preenchimento (BOUAZZA *et al.* 2002; TOGNON, 1999).

Narejo (1995) também sugere como materiais de proteção para geomembranas tapetes pneumáticos, geocompostos bentoníticos, georedes, tapetes domésticos ou industriais, e composição dos materiais acima.

No entanto, para avaliar o desempenho destas camadas de proteção, torna-se necessário o estabelecimento de um estado limite aceitável para as deformações que ocorrem na geomembrana. A seleção deste valor tem sido discutida recentemente por alguns pesquisadores, apresentando distintas opiniões com relação ao modo como estas deformações devem ser limitadas.

Segundo Bouazza *et al.* (2002) duas metodologias têm sido utilizadas, uma baseada na prevenção de punção na geomembrana a curto prazo e a outra para garantir o desempenho da geomembrana a longo prazo. O aspecto a curto prazo corresponde à prevenção de danos como rasgos profundos, alongamento além do ponto de escoamento ou perfurações na geomembrana durante os processos de fabricação, transporte e instalação. Esta aproximação é bastante utilizada e comanda, na maior parte, os casos de aprovação das camadas de proteção, principalmente nos Estados Unidos. O método de projeto se baseia na seleção de uma camada de proteção de geotêxtil com gramatura (massa por unidade de área) suficiente para fornecer um fator de segurança global contra o escoamento da geomembrana.

A longo prazo, o critério para estimativa do desempenho das camadas de proteção consiste na limitação de deformações locais na geomembranas para um valor aceitável, de forma que não ocorra o fenômeno de *stress cracking* (aparecimento de fissuras sob tensão). Segundo as regulamentações técnicas para certificação das camadas de proteção do Instituto Federal para Ensaio e Pesquisa de Materiais - *Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung* - (BAM), o valor limite para deformações em geomembranas é 0,25% (SEEGER & MÜLLER, 1996; GALAGHER *ET AL.*, 1998; ZANZINGER, 1999; ROWE, 1998).

2.4.2.1. Método baseado no desempenho a curto prazo

Segundo Reddy & Saichek (1998), os estudos iniciais sobre proteção de geomembranas é baseado na introdução de geotêxteis de diferentes gramaturas (massa por unidade de área) sobre ou abaixo da geomembrana em ensaios de impacto e punção, constatando-se o aumento da resistência à punção e ao impacto devido à introdução do geotêxtil.

Por sua vez, Koerner e seus co-pesquisadores da University of Drexel desenvolveram uma aproximação teórica, um extensivo programa experimental de laboratório e um procedimento de projeto simplificado para estimar o desempenho de uma camada de proteção para geomembranas. Este desenvolvimento foi publicado numa série de três artigos divididos em análise teórica (WILSON-FAHMY *ET AL.*, 1996), parte experimental (NAREJO *ET AL.*, 1996) e exemplos de projeto (KOERNER *ET AL.*, 1996).

A análise teórica apresentada por Wilson-Fahmy *et al.* (1996) é baseada na teoria de uma geomembrana tracionada, sobreposta a uma protuberância isolada e elevada sobre um subleito rígido. O objeto de punção é caracterizado pela sua forma e altura acima da superfície do subleito. O comportamento da geomembrana é considerado em termos de seu comportamento carga-alongamento, e o material de proteção é caracterizado pela sua espessura (gramatura) e o comportamento carga-alongamento.

A geometria utilizada na análise é apresentada na Figura 20, onde r_o é o raio da ponta da protuberância esférica; H é a altura da protuberância; p_i é pressão hidrostática submetida à geomembrana; F_i é a força total na geomembrana; d_ψ é a variação do ângulo tangente ao talude; d_s é o comprimento de corda do elemento; i se refere à posição instantânea da geomembrana e (R_{i-x}) corresponde ao raio a partir do centro da protuberância para um elemento infinitesimal da geomembrana.

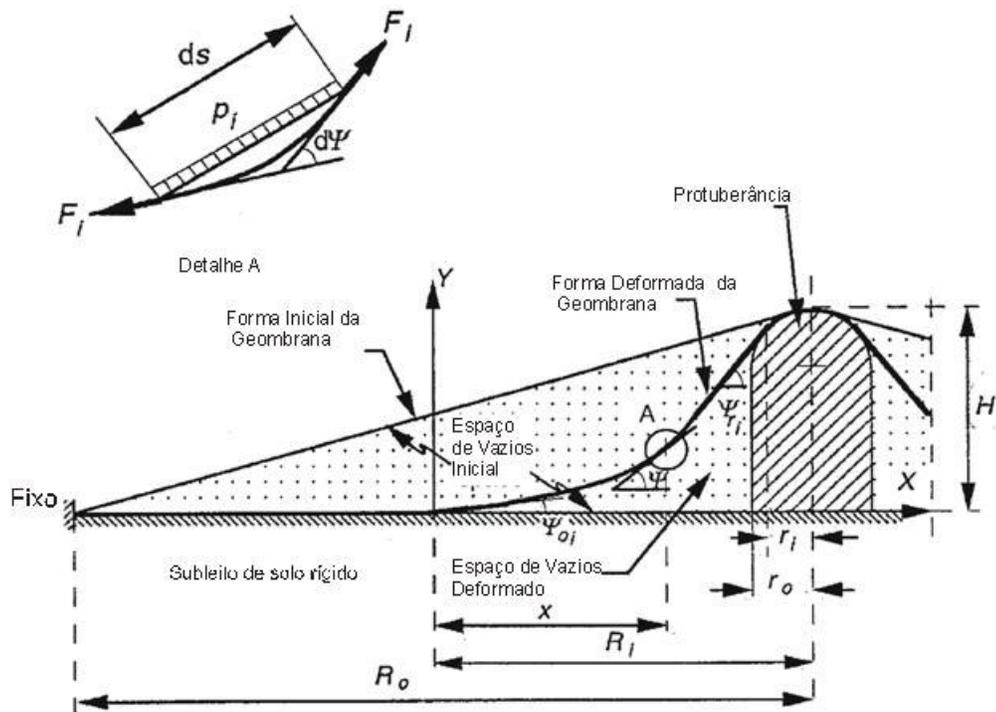


Figura 20. Geometria utilizada na análise de punção em geomembranas (WILSON-FAHMY ET AL., 1996).

Inicialmente, a geomembrana assume a forma cônica a partir de uma posição fixa no subleito sobre o espaço vazio, conforme mostrado na figura. Apenas no topo a geomembrana assume a forma esférica da ponta protuberante. A extremidade externa da geomembrana é considerada estar restrita pela carga normal aplicada.

Esta teoria admite que o carregamento da geomembrana seja hidrostático. Com o aumento da pressão, a geomembrana se deforma reduzindo o espaço vazio, ao mesmo tempo em que sua superfície muda de forma cônica para uma forma assimétrica. A deformação aumenta com o aumento da pressão até a geomembrana encontrar a tensão de escoamento ou de ruptura ou até se adaptar completamente ao objeto protuberante e ao subleito adjacente.

Para simplificar a análise, Wilson-Fahmy *et al.* (1996) assumem as seguintes hipóteses:

- A geomembrana não possui rigidez à flexão.
- O comportamento carga – alongamento da geomembrana é elástico linear.
- A parte da geomembrana em contato com a ponta protuberante é assumida estar num estado de tensões isotrópicas por analogia a teoria da membrana sujeita a carregamento hidrostático.
- O contato entre a geomembrana e a ponta protuberante não possui atrito.
- As deformações por tração deixam de acontecer após a geomembrana adaptar-se ao subleito.
- A parte suspensa da geomembrana está num estado de tensões isotrópicas.
- O efeito do coeficiente de Poisson é negligenciado.

Assim, a equação abaixo é derivada a partir da força de equilíbrio de um elemento infinitesimal de uma geomembrana, assumindo a forma de um arco de círculo e submetido à pressão hidrostática p_i :

$$2 \cdot \pi \cdot (R_i - x) \cdot p_i \cdot ds = 2 \cdot F_i \cdot \sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right) \text{ Equação 1}$$

Onde:

- $(R_i - x)$ → raio a partir do centro do objeto protuberante para um elemento infinitesimal da geomembrana;
- ds → comprimento de corda do elemento;
- F_i → força total na geomembrana num instante i ;
- $d\psi$ → variação do ângulo tangente da inclinação.

Como $d\psi$ é um ângulo pequeno, assume-se que $\sin(d\varphi/2)$ é igual a $d\varphi/2$. Assim, a Equação 1 se reduz para:

$$\left(\frac{d\varphi}{ds}\right) = \frac{2 \cdot \pi \cdot (R_i - x) \cdot p_i}{F_i} \quad \text{Equação 2}$$

E,

$$\left(\frac{d\varphi}{ds}\right) = \left(\frac{d\varphi}{dx}\right) \cdot \left(\frac{dx}{ds}\right) = \cos \varphi \cdot \left(\frac{d\varphi}{dx}\right) \quad \text{Equação 3}$$

Combinando as Equações 2 e 3, tem-se que

$$\frac{\pi \cdot p_i \cdot (2R_i - x^2)}{F_i} = \sin \varphi + C \quad \text{Equação 4}$$

Sendo C uma constante.

As condições de contorno da geometria são definidas da seguinte maneira: na posição $x=0$, $\varphi = \varphi_o$; e na posição $x=R_i-r_i$, $\varphi = \varphi_{r_i}$. Assumindo-se $\varphi_{o_i} = 0$ e introduzindo-se as condições de contorno, a Equação 4 assume a forma:

$$\sin \varphi = \frac{x \cdot (2R_i - x) \cdot \sin \varphi_{r_i}}{(R_i^2 - r_i^2)} \quad \text{Equação 5}$$

Desta forma, a inclinação tangente da forma curva da geomembrana deformada (φ) em qualquer distância x pode ser expressa pela Equação 6.

$$\frac{dy}{dx} = \tan \varphi = \frac{1}{\sqrt{\frac{(R_i^2 - r_i^2)^2}{[x \cdot (2R_i - x) \cdot \sin \varphi_{r_i}]^2} - 1}} \quad \text{Equação 6}$$

A Figura 21 ilustra a forma curva da geomembrana deformada sob aumento de pressão.

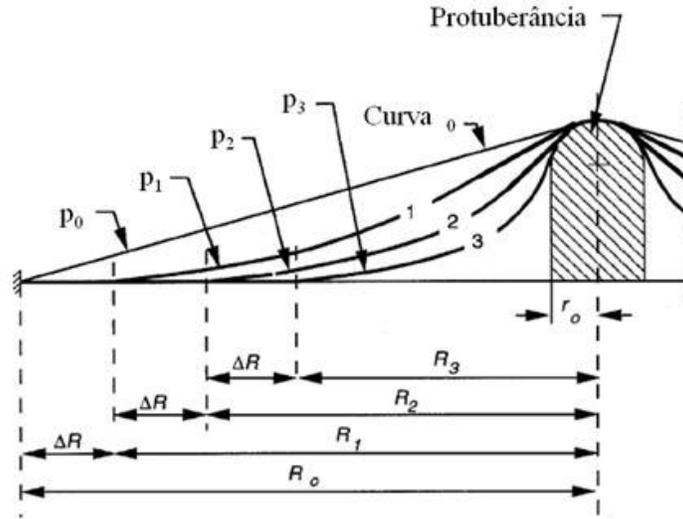


Figura 21. Forma deformada da geomembrana sob aumento de pressão (WILSON-FAHMY ET AL., 1996).

O incremento do alongamento da geomembrana corresponde à diferença de comprimento entre duas curvas consecutivas e, o incremento da força de tração que faz com que a geomembrana tome a forma da curva subsequente é dado pela Equação 7.

$$\Delta L_i = \frac{\Delta F_i}{2\pi J_{GM}} \cdot \left[\left(\sum_N \frac{\Delta l}{(R_i - x)} \right) + \left(\frac{l_i}{r_i} \right) \right] \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

- $\Delta l_i \rightarrow$ incremento de alongamento da geomembrana;
- $\Delta F_i \rightarrow$ incremento da força de tração da geomembrana;
- $N \rightarrow$ número de elementos da geomembrana a partir do ponto tangente com o subleito ao ponto tangente com a ponta da protuberância;

- $\Delta l \rightarrow$ comprimento do elemento da geomembrana;
- $J_{GM} \rightarrow$ módulo carga – deformação da geomembrana;
- $l_i \rightarrow$ comprimento instantâneo da geomembrana em contato com a ponta da protuberância.

Assim, conhecendo a relação p_i/F_i e o incremento de força de tração ΔF_i , pode-se obter a força de tensão total e pressão correspondente para qualquer raio R_i . Desta forma, variando o raio com acréscimos de incrementos, pode-se estabelecer a relação entre a pressão aplicada e força de tração. Para qualquer força de tração, F_i , a tensão máxima na geomembrana pode ser determinada para qualquer pressão aplicada.

Com base nesta geometria e nas equações derivadas, Wilson-Fahmy *et al.* (1996) desenvolveram dois procedimentos de solução teórica para geomembranas: o primeiro para geomembranas sem proteção, e o segundo para geomembranas com proteção. Estas análises teóricas implicaram nas seguintes observações:

- A geometria da protuberância tem um efeito significativo na resistência à punção da geomembrana, sendo que tal resistência aumenta com:
 - Aumento da espessura da geomembrana;
 - Aumento do raio do objeto protuberante, r_o ;
 - Diminuição da altura do objeto protuberante, H ;
 - Redução do comprimento não ancorado da geomembrana, R_o ;
- A resistência a punção da geomembrana pode ser melhorada com as seguintes condições:
 - Aumento da espessura da geomembrana;
 - Utilização de um elemento de proteção;
 - Aumento da espessura (gramatura) do material de proteção;
 - Aumento da resistência à tração do material de proteção.

No entanto, esta análise teórica é baseada em configurações idealizadas do objeto protuberante, da geomembrana e do material de proteção. Assim, a correlação com condições de campo seria primariamente difícil devido à natureza aleatória dos objetos protuberantes com relação à forma, tamanho e arranjo das partículas. Por isto, como continuidade desta análise, os mesmos pesquisadores desenvolveram uma aproximação experimental publicada na parte II desta série de *papers* (NAREJO *et al.*,1996).

A aproximação experimental consistiu em estimar a resistência à punção de geomembranas de PEAD com e sem geotêxteis não tecidos agulhados como materiais de proteção. Para isto, foram realizados os seguintes ensaios:

- Ensaios de punção hidrostática usando cones truncados (ASTM D 5514);
- Ensaios similares de punção usando pedregulhos isolados ao invés de cones;
- Ensaios hidrostáticos com camadas de pedregulhos;
- Ensaios geostáticos.

As características das geomembranas e dos geossintéticos utilizados são apresentadas na Tabela 7. Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos ensaios de punção envolvendo apenas geomembranas; enquanto na Tabela 9 são apresentados os resultados dos ensaios envolvendo diferentes camadas de proteção. A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios utilizando uma camada de pedregulhos ao invés de pedras isoladas ou de cones truncados. E, por último, a Tabela 11 mostra os resultados dos ensaios realizados em condição geostática.

Tabela 7. Propriedades físicas e mecânicas dos geossintéticos utilizados.

Geomembrana	Espessura (mm)	Carga de escoamento (kN/m)	Deformação no escoamento (%)	Força de punção (kN)
GM 1	2.0	30	18	0.63
GM 2	1.5	23	18	0.44
GM 3	1.0	14	18	0.28

Material de proteção	Gramatura (g/m ²)	Espessura (mm)	Resistência (kN/m)	Módulo (kN/m)	Deformação (%)	Força de Punção (kN)
NW-NP-PET-1	130	1.3	10	37	60	0.2
NW-NP-PET-2	270	2.5	19	61	60	0.4
NW-NP-PET-3	550	4.8	41	69	60	0.8
NW-NP-PET-4	1080	9.6	75	142	70	1.5
NW-NP-PP- 1	300	3.0	28	42	40	0.5
NW-NP-PP- 2	680	5.6	51	78	40	1.1
NW-NP-PP- 3	1350	11.0	96	137	40	2.3

Fonte: modificado de Narejo *et al.* (1996).

Legenda: NW = não tecido; NP = agulhado; PET = poliéster; PP = polipropileno.

Tabela 8. Pressão de ruptura obtida a partir de ensaios de punção para diferentes espessuras de geomembrana de PEAD.

Espessura da geomembrana (mm)	Pressão de Ruptura (kPa)			
	Altura do cone (mm)			
	50	38	25	12
1.0	21	28	28	110
1.5	34	55	69	140
2.0	48	62	100	310

Fonte: Narejo *et al.* (1996).

Tabela 9. Pressão de ruptura obtida a partir de ensaios de punção usando cones truncados para uma geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura com vários tipos de materiais de proteção.

Condição de Ensaio	Pressão de ruptura (kPa)			
	Altura do cone (mm)			
	50	38	25	12
GM	34	55	69	140
NW-NP-PET-1	69	83	100	410
NW-NP-PET-2	69	83	320	830
NW-NP-PET-3	83	103	450	> 1100
NW-NP-PET-4	150	365	610	> 1100
NW-NP-PP- 1	76	210	320	990
NW-NP-PP- 2	120	280	500	> 1100
NW-NP-PP- 3	290	470	> 1100	> 1100

Fonte: Narejo *et al.* (1996).

Tabela 10. Pressão no escoamento para camada de pedregulhos.

Número das pedras AASHTO	Tamanho máximo (mm)	d₅₀ (mm)	Pressão no escoamento (kPa)	Pressão de ruptura (kPa)
3	50-64	38	70	> 1100
57	25-38	12	170	> 1100
8	9-13	10	690	> 1100

Fonte: modificado de Narejo *et al.* (1996).

Tabela 11. Pressão de ruptura obtida a partir dos ensaios geostáticos com geomembrana de PEAD e vários geotêxteis não tecidos agulhados.

Condição do Ensaio	Pressão de ruptura (kPa)			
	Altura do cone (mm)			
	50	38	25	12
GM sem proteção	240	310	450	700
NW-NP-PET-2	380	510	> 700	> 700
NW-NP-PET-3	580	> 700	> 700	> 700
NW-NP-PET-4	> 700	> 700	> 700	> 700

Fonte: Narejo *et al.* (1996).

Legenda: NW- não tecido; NP- agulhado; PET- poliéster; PP- polipropileno; GM- geomembrana.

Os resultados dos ensaios de laboratório realizados mostram que a resistência à punção da geomembrana aumenta com o acréscimo da massa por unidade de área (gramatura) do geotêxtil. Além disto, a resistência à punção da geomembrana utilizando pedregulhos angulares é semelhante à resistência à punção utilizando cones truncados. Os resultados também mostram que a resistência à punção da geomembrana nos ensaios utilizando pedregulhos de forma arredondada ou sub-arredondada foi maior do que nos ensaios com pedregulhos de forma angular. Quanto menor a altura dos cones, maior a resistência da geomembrana. Constatou-se também que a resistência à punção é maior nas configurações utilizando camada de pedregulhos e nas configurações com carregamento geostático.

Esta pesquisa, principalmente no que diz respeito aos dados experimentais, permitiu o desenvolvimento de um método de projeto para seleção de geotêxteis como camada de proteção, e verificação do fator global de segurança em situações onde a resistência à punção deve ser verificada. Este método se concentra na seleção de um geotêxtil não tecido com gramatura suficiente para fornecer um fator global de segurança contra o escoamento da geomembrana.

Primeiro, a ruptura a curto prazo do sistema é determinada através de ensaios de punção hidrostática (ensaio do cone), e fatores são então aplicados para correlacionar estes dados às condições de campo. Tais fatores estão associados ao formato e arranjo dos grãos, e a processos como fluência, degradação química e biológica.

A equação básica do projeto apresenta a seguinte forma:

$$P' = P_{\text{disponível}} \left(\frac{1}{MF_S \times MF_{PD} \times MF_R} \right) \cdot \left(\frac{1}{FS_{CR} \times FS_{CBD}} \right) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

- $P_{\text{disponível}}$ - pressão máxima obtida do ensaio de cone;
- $P'_{\text{admissível}}$ - pressão máxima admissível para condições específicas;
- MF_S - fator modificado para o formato dos grãos;
- MF_{PD} - fator modificado para a densidade;
- MF_R - fator modificado para o arqueamento do solo;
- FS_{CR} - fator parcial de fluência;
- FS_{CBD} - fator parcial de degradação biológica e química.

Na Tabela 12 são apresentados os valores dos fatores modificadores de forma; enquanto na Tabela 13 são apresentados os fatores parciais de segurança para fluência.

Quanto aos fatores de degradação química/ biológica, Narejo *et al.* (1996) sugerem valores entre 1,0 e 2,0, com um valor médio de 1,5.

Tabela 12. Fatores modificados de forma.

Forma das protuberâncias (MF _S)		Disposição das protuberâncias (MF _{PD})		Arqueamento do solo (MF _A)	
Angular	1.0	Isoladas	1.0	Nenhum	1.0
Subarredondada	0.50	Acondicionadas	0.50	Moderado	0.75
Arredondada	0.25	-	-	Máximo	0.25

Fonte: modificado de Narejo *et al.* (1996)

Tabela 13. Fatores parciais de segurança para fluência.

Gramatura do geotêxtil (g/m ²)	Fatores parciais de segurança para fluência (FSc _r)			
	Altura da Protuberância (mm)			
	38	25	12	6
Sem geotêxtil	N/R	N/R	N/R	>> 1.5
270	N/R	N/R	> 1.5	1.5
550	N/R	1.5	1.3	1.2
1100	1.3	1.2	1.1	1.0
> 1100	~1.2	~1.1	~1.0	1.0

Fonte: Narejo *et al.* (1996)

Legenda: N/R= não recomendado.

Adotado um fator de segurança de projeto e os fatores de correlação, determina-se a gramatura adequada para o geotêxtil, segundo a Equação 9.

$$P_{disponível} = 450 \cdot \frac{M}{H^2} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

- M - massa por unidade de área ou gramatura (g/m^2);
- H - altura de penetração dos grãos (mm).

O fator global de segurança é definido como:

$$FS = \frac{P_{disponível}}{P_{requerida}} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo p_{req} a pressão máxima atuante no sistema.

Este fator de segurança global é introduzido para reduzir incertezas quanto às situações de campo. Koerner *et al.* (1996) sugerem alguns valores de segurança global contra ruptura, sendo este fator superior a 3,0, os quais são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Valores sugeridos de fatores de segurança global contra ruptura no uso das equações de projeto.

Arranjo das Pedras	Altura efetiva da protuberância (mm)	Fator global de segurança
Pedras isoladas	6	3.0
	12	4.5
	25	7.0
	38	10.0
Pedras acondicionadas	38 ou menor	3.0

Fonte: Narejo *et al.* (1996)

No entanto, Reddy & Saichek (1998) fazem algumas críticas à metodologia proposta por Narejo *et al.* (1996). Os autores afirmam que os danos observados nos ensaios somente são observados visualmente, faltando uma quantificação das mudanças físicas ocorridas na

geomembrana para diferentes tipos de agregados. Além disto, o procedimento de projeto é considerado conservador porque são baseados em ensaios com cones ou pedras isoladas, sendo atribuídos fatores de modificação e fatores parciais de segurança.

Outro aspecto citado por Reddy & Saichek (1998) e Reddy *et al.* (1996) é que os efeitos do carregamento devido à construção da barreira impermeabilizante (danos de instalação) não são retratados na metodologia proposta por Narejo *et al.* (1996).

Jones *et al.* (2000) também questionam a influência de outros aspectos no desempenho de camadas de proteção como, por exemplo, o tipo e a qualidade das fibras e os processos de fabricação dos geotêxteis. Para validar tal teoria, realizaram uma investigação experimental através de ensaios índice e de desempenho com geotêxteis de mesma gramatura, mas de diferentes materiais. Os resultados dos ensaios revelaram que os geotêxteis com mesma gramatura apresentaram comportamentos distintos.

Desta forma, Jones *et al.* (2002) propõem a teoria de que o desempenho de um geotêxtil não tecido está fortemente relacionado ao atrito entre fibras, dividindo o mecanismo de carregamento do sistema em dois estágios, apresentados na Figura 22.

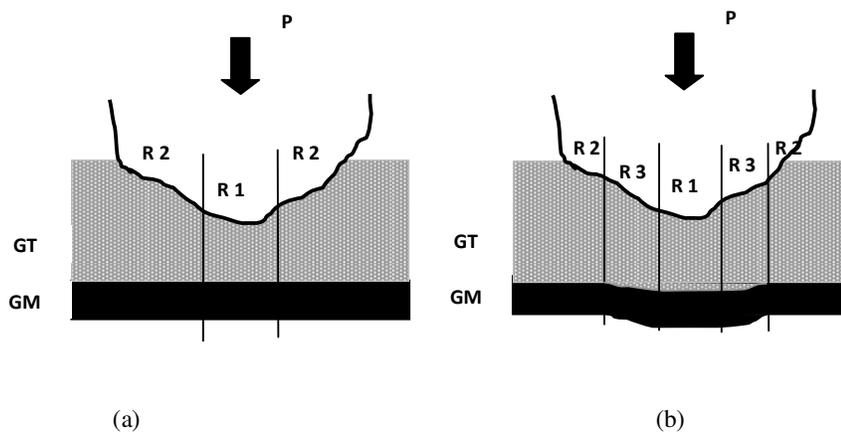


Figura 22. Mecanismo de carregamento (a) estágio de compressão inicial do geotêxtil; (b) Deformação da geomembrana e compressão do geotêxtil (JONES ET AL. 2000).

O primeiro estágio compreende a fase de compressão inicial do geotêxtil, onde duas regiões de influência são desenvolvidas. Na região 1, apesar de se verificar uma compressão do geotêxtil, as fibras permanecem com o mesmo arranjo. Entretanto, na região 2, ocorre o desenvolvimento de duas componentes do carregamento atuando na direção normal e paralela à interface do grão/geotêxtil. Estas componentes geram forças de cisalhamento que são transmitidas ao geotêxtil como uma combinação de forças de tração em torno das fibras e de forças de atrito entre fibras.

O segundo estágio compreende um mecanismo combinado de deformação da geomembrana e subsequente compressão do geotêxtil. Neste estágio, ocorre a deformação da geomembrana e forças adicionais de atrito são geradas na interface GM/GT. Dependendo da estrutura do geotêxtil, tem-se uma matriz rígida junto a esta interface. Assim, o carregamento aplicado é distribuído para as fibras do geotêxtil e a magnitude das deformações na geomembrana pode ser reduzida.

Assim, a capacidade de um geotêxtil em gerar forças de tração ao longo das fibras e elevado atrito entre fibras depende do tipo e qualidade das fibras utilizadas junto ao processo de fabricação. Esta teoria da interação da fibra é considerada por alguns pesquisadores essencial para o desempenho das camadas de proteção.

2.4.2.2. Método baseado no desempenho da geomembrana a longo prazo

Neste método, o desempenho dos elementos de proteção é verificado através do ensaio do cilindro, o qual consiste em submeter uma geomembrana a condições de carregamento e verificar as deformações induzidas na geomembrana. Se as deformações induzidas forem menores que 0,25%, então a camada de proteção é adequada para prevenir fissuras na geomembrana devido ao stress cracking (SEEGER & MÜLLER, 1996).

Este limite de deformação foi determinado através de ensaios de fluência conduzidos pelo grupo *Quo Vadis Schutzlagen* (Alemanha) em geomembranas de PEAD, de acordo com as regulamentações técnicas do BAM (*Bundesanstalt für Materialforschung und – puefung*).

A partir das curvas de tensão *versus* deformação obtidas em diferentes velocidades de deformação verificou-se, para a menor velocidade (0,1%/hora) e para uma tensão de 10 N/mm², um alongamento de 6% na geomembrana. Esta deformação foi descrita como a deformação limite. Aplicando-se um fator de segurança de 2, foi obtida uma deformação máxima de 3%. Também foi estimado um valor de deformação devido ao recalque do subsolo em 2,75%, conduzindo para 0,25% o máximo de deformação local que pode ocorrer na geomembrana (GALLAGHER *et al.*, 1999).

No entanto, esta relação entre a deformação crítica de geomembranas cristalinas como o PEAD, geralmente adotada como 6%, e o critério de ruptura de 0,25% usado no ensaio de cilindro não tem sido comprovada. Apesar disto, este critério tem sido utilizado até hoje, e também foi estendido aos projetos de aterros na Inglaterra.

Segundo Gallagher *et al.* (1999), desde 1997 os pesquisadores britânicos têm adquirido mais experiência com o ensaio do cilindro, criando um novo protocolo (ENVIRONMENTAL AGENCY, 1998) para metodologia do ensaio.

Através das pesquisas conduzidas pela EA (ENVIRONMENTAL AGENCY, 1998), verificou-se que os resultados dos ensaios são sensíveis a diversos fatores, tais como tipo de subleito; rigidez/espessura da placa de metal utilizada para gravar as deformações; método de tomada de medidas; definição da extensão das deformações individuais, e método do cálculo de deformações locais, e que estes fatores podem influenciar a confiabilidade dos resultados (GALLAGHER *et al.*, 1999).

Uma das questões levantadas neste método consiste nos métodos usados para calcular as deformações locais. Tal aspecto foi retratado por Tognon *et al.* (1999; 2000), que além de

questionar o limite de deformação proposto pelo BAM, também questiona a complexidade das medidas de tais deformações.

Segundo o BAM, o cálculo da deformação máxima na geomembrana é obtido admitindo-se um segmento circular crítico para representar a indentação do pedregulho com curvatura homogênea ao longo do perfil deformado. No entanto, esta simplificação pode não representar adequadamente as deformações porque não consideram o efeito de deformações localizadas em cada ponto da geomembrana.

Tognon (2000) propõe uma alternativa para interpretar as deformações induzidas nas geomembranas considerando o efeito da ação combinada membrana / flexão. A proposta desta alternativa é considerar as deformações localizadas em cada ponto da geomembrana, considerando que a geomembrana atua como um elemento de viga. Para validar esta teoria, os mesmo autores realizaram ensaios de punção de grande escala com diferentes camadas de proteção, utilizando-se as duas formulações (método do arco e método da ação combinada membrana / flexão).

Os resultados desta investigação mostraram que o método do alongamento do arco somente providencia uma magnitude aproximada das deformações que ocorrem na geomembrana, além de não representar adequadamente a distribuição de deformação ou deformações de pico.

Por sua vez, o método considerando a deformação da membrana / flexão apresenta uma estimativa mais apropriada da distribuição de tensões e das deformações de pico. Os resultados dos ensaios mostraram que as tensões e deformações localizadas foram significativamente maiores do que as calculadas pelo método do alongamento do arco. Estes resultados apontam a importância e a complexidade das medidas de deformações induzidas em geomembranas.

Zanzinger (1990) sugere que o método do alongamento do arco é mais adequado nos ensaios índices, como CBR, *Rod Plunger Test*, onde as deformações são impostas por um corpo de prova isolado e com corpo de prova de pequenas dimensões, de forma que não a amostra não consegue atuar como um elemento de viga (flexão). Diferente destes, nos ensaios em grande escala, onde a geomembrana pode ser comportar como um elemento de viga, torna-se mais apropriado usar o método da ação combinada membrana/flexão.

Em suma, Gallagher *et al.* (1999) e Zanzinger (1999) afirmam que o ensaio de cilindro compreende uma ferramenta de projeto para seleção de um geoprotetor adequado em situações particulares.

Zanzinger (1999) também propõe ensaios com modelo em grande escala para verificação do desempenho de camadas de proteção, e com objetivo de simular uma condição mais próxima ao comportamento *in situ*.

Em função disto, conduziram ensaios em modelo de grande escala e de desempenho (ensaio do cilindro) com diferentes camadas de proteção. Os ensaios em grande escala foram realizados durante um período de nove meses, com treze fases de carregamento até atingir 800 kPa. No final da compressão, aplicou-se um carregamento de 1.000 kPa durante duas semanas. Já no ensaio do cilindro, aplicou-se um carregamento de 1.350 kPa, correspondente a 60 m de coluna de resíduos, e considerando um fator de segurança igual a 1,5. O tempo de duração do ensaio foi de 100 horas.

Os materiais utilizados como elementos de proteção são apresentados na Tabela 15 e os resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 15. Propriedades físicas das camadas geossintéticas de proteção.

Sistema de Proteção	Descrição	Matéria prima	Gramatura (g/m ²)	Espessura sob 2 kPa (mm)
1	Geocomposto (geotêxtil/geomat/borracha)	PET/PA/borracha	6.650	12,2
2	Geocomposto * (geotêxtil/geodreno/geotêxtil)	PEAD e PP	2.030*	12,9*
3	Geocontainer ** (geotêxtil tecido conectado com fios espaçadores preenchidos com areia)	PEAD/areia	70.000	50
4	Geocontainer ** (geotêxtil tecido conectado com fios espaçadores preenchidos com areia)	PEAD/areia	56.000	40
5	Geotêxtil* (não tecido, agulhado)	PP	4.270*	26,8*
6	Geotêxtil (não tecido, agulhado)	PP	2.140	13,4
7 e 8	Geocomposto ** (geotêxtil/tapete sintético/areia/ geotêxtil tecido e não tecido)	PP/areia/PEAD	48.000	26

Fonte: Zanzinger (1999).

Tabela 16. Comparação dos resultados a partir dos ensaios em modelo de grande escala e ensaio de laboratório de desempenho para proteção.

Camada de Proteção	Ensaio em Modelo de Grande Escala		Ensaio de Desempenho de Proteção (cilindro)	
	Deformação média (%)	Deformação máxima, ϵ (%)	Deformação média (%)	Deformação máxima, ϵ (%)
	1	0,08	0,41	0,04
2	0,08	0,66	0,02	0,07
3	0,11	0,75	0,34	0,99
4	0,05	0,46	0,02	0,19
5	0,09	0,58	0,06	0,17
6	0,10	0,92	0,09	0,26
7	0,07	0,79	0,07	0,62
8	0,05	0,78	-	-

Notas: *Amostra retirada de um aterro (condições de ensaio: carga vertical = 1.350 kPa; temperatura = 40° C; duração do carregamento = 1.000h).

Fonte: Zanzinger (1999).

Os resultados dos ensaios indicaram, em geral, que as deformações obtidas nos ensaios de desempenho em cilindro foram menores que 0,25%. Contudo, nos ensaios em grande escala, as deformações máximas foram maiores que 0,25%.

Zanzinger (1999) e Zanzinger & Gartung (1998) atribuem este comportamento às características de tensão / relaxação dos geossintéticos com o tempo. Enquanto o ensaio de cilindro foi realizado durante um período de 100 (cem) horas; o ensaio em grande escala foi realizado durante um período de nove meses. Outra justificativa consiste nas diferenças de configurações entre os ensaios como, por exemplo, a utilização de placas elásticas nos ensaios de desempenho em cilindro e camadas de argilas compactadas nos ensaios de grande escala.

Apesar das diferenças constatadas entre ambos os ensaios, os resultados indicam que as deformações foram menores que 1%, abaixo da deformação de escoamento típica em

geomembranas de PEAD, e que os materiais apresentaram desempenho satisfatório, sem danos, rasgos e/ou perfurações na geomembrana.

Tognon (1999) também conduziu ensaios em grande escala para verificar o desempenho de diferentes materiais de proteção. Além da escolha da deformação limite, estes autores questionam outros aspectos como os métodos de cálculo para deformações e as formas geométricas utilizadas nos demais ensaios, uma vez que tendem a simplificar a sua execução. Deste modo, questionam a correlação entre o comportamento de tensão e deformação de laboratório com o comportamento de campo. O sumário dos ensaios realizados é apresentado na Tabela 17, e os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 17. Sumário dos ensaios realizados em modelo de grande escala.

Ensaio	Camada de proteção	Descrição	Massa total por unidade de área (g/m^2)	Espessura total (mm)	Pressão (kPa)	Duração do ensaio (min)
A	GT1	NW, NP	435	2	250	200
B	GT1	NW, NP	435	2	250	200
C	GT2 (duas camadas de 600 g/m^2)	NW, NP	1200	4,4 ^b	900	720
D	Geocushion preenchido com areia	Camada GT (NW, NP), preenchimento de areia com fios de polímeros, e GT (NW, NP)	70.000	25	650	520
E	Geocushion preenchido com areia	Camada GT (NW, NP), preenchimento de areia com fios de polímeros, e GT (NW, NP)	70.000	25	900	720
F	Tapete sintético de borracha 1	Camada GT (NW, NP), matriz de borracha, e GT (NW, NP)	6.000	10	600	480
7 e 8	Tapete sintético de borracha 2	Camada GT (NW, NP), matriz de borracha, e grelha de poliéster	6.000	10	600	480

Fonte: modificado de Tognon (2000) Legenda: NW = não tecido; NP= agulhado

Tabela 18. Sumário das deformações obtidas a partir das medidas locais detalhadas.

Ensaio	Pressão (kPa)	M _A (g/m ²)	Tamanho do embricamento médio		Tamanho de embricamento máximo	
			Alongamento do arco* (%)	Deformação de pico** (%)	Alongamento do arco* (%)	Deformação de pico** (%)
A-B	250	435	1,9	4	3,8	8
C	900	1.200	1	5	10	13
D	650	70.000	0,5	0,52	0,29	0,8
E	900	70.000	0,19	0,52	1,4	0,9
F	600	6.000	1	3,6	3,6	7,5
G	600	6.000	0,12	1,1	0,16	1,5

Fonte: modificado de Tognon (2000)

Legenda: * maior comprimento de arco usado na determinação do alongamento do arco; ** calculada usando ação combinada flexão/membrana.

Observa-se que nenhuma das camadas de proteção pôde limitar a deformação máxima para menos que 0,25%. Além disto, constatou-se que o pior desempenho foi observado nas camadas de geotêxteis selecionados segundo o critério de Narejo *et al.* (1996). Verificou-se também que os materiais mais rígidos apresentaram melhor desempenho, o que sugere que a característica de rigidez pode ser tão importante quanto o efeito da massa por unidade de área (gramatura).

Além destes questionamentos, os autores ainda sugerem alguns fatores adicionais que afetam a deformação a longo prazo, como vida útil, temperatura, exposição ambiental, presença de emendas e tempo de execução do ensaio, no estudo do desempenho de camadas de proteção.

2.4.2.3. Critério proposto por Badu – Tweneboah *et al.* (1998).

Seguindo a mesma filosofia de proteção da geomembrana a curto prazo, Badu-Tweneboah *et al.* (1998) propõem uma aproximação baseada no uso de ensaios de tração

multiaxial (ensaio de estouro). O objetivo é estabelecer um critério para estimar danos mecânicos na geomembrana dentro de um limite aceitável.

Se forem observados danos na geomembrana após um estágio de exposição qualquer, então a geomembrana não funcionará como barreira hidráulica efetiva. Neste caso, o nível de danos é inaceitável e não é necessário avaliar as propriedades da geomembrana através do ensaio multiaxial.

Entretanto, outros tipos de danos podem diminuir a habilidade da geomembrana para resistir à ruptura quando sujeitas a cargas de trabalhos e deformações desenvolvidas durante a sua vida útil. Neste caso, é necessário avaliar os danos existentes na geomembrana através do ensaio multiaxial.

Este raciocínio conduz a seguinte definição de nível aceitável para danos: as características de deformação à tração da geomembrana não precisam ser significativamente afetadas. Contudo, o modo de ruptura é a característica mais importante. Segundo os autores, a geomembrana precisa romper no topo da abóbada (centro da amostra) porque este é o local onde as tensões são maiores. Se a geomembrana não rompe na abóbada, isto indica que a amostra foi previamente enfraquecida no local onde a ruptura ocorreu.

Desta forma, surge o critério proposto por Badu-Tweneboah *et al.* (1998): o dano mecânico submetido à geomembrana é denominado inaceitável se a amostra de geomembrana testada por ensaios de tensão multiaxial de grande diâmetro exibir ruptura em local diferente do centro da abóbada e se a localização de danos é visível.

Para validar este critério, os autores realizaram ensaios de compressão estática e de tração multiaxial em geomembranas de PEAD submetidas ao contato com diferentes solos. Os ensaios de compressão estática foram realizados com materiais granulares de diferentes granulometrias. Realizou-se o mesmo procedimento em cada configuração, compactando-se uma base de solo argiloso, seguido da colocação da geomembrana e do material granular. Em

seguida, aplicou-se uma carga de 860 kPa durante um período de 72 horas. Após a realização dos ensaios, as amostras de geomembranas foram inspecionadas visualmente e submetidas aos ensaios de tração multiaxial.

Os resultados dos ensaios indicam que as propriedades obtidas pelo ensaio não forneceram informações precisas para correlacioná-las com os danos visíveis nas geomembranas, principalmente em termos de tensão de tração na ruptura. Contudo, o modo de ruptura forneceu o melhor indicativo de danos na geomembrana, sem a necessidade de atribuir valores aceitáveis para as propriedades das geomembranas. Na configuração com geomembrana mais danificada, a ruptura ocorreu exatamente nos pontos danificados. Ao contrário, na configuração com poucos sinais de danos, a ruptura foi semelhante à geomembrana virgem, localizada no centro da amostra.

2.4.2.4. Desempenho de geotêxteis sob Carregamento de Construção

Todos os critérios utilizados para seleção de camadas de proteção apresentados anteriormente são baseados em ensaios estáticos, ou seja, simulam a fase de operação do aterro. No entanto, existem poucos estudos sobre o desempenho de geotêxteis durante a fase de instalação, a qual envolve a colocação da geomembrana, da camada drenante e o carregamento de maquinários pesados.

Segundo Snow *et al.* (1999), a dimensão dos danos de construção superam os danos provenientes por outras causas. Neste trabalho, retratam um aterro sanitário localizado na Califórnia, onde foi verificado um vazamento da ordem de 400 litros por dia, provocado por danos existentes na geomembrana. Após a detecção do vazamento, realizou-se a escavação da área, verificando-se a ausência do geotêxtil de proteção devido ao seu deslocamento durante a construção. Foram encontrados treze perfurações na geomembrana e outros tipos de danos como ranhuras, todos atribuídos a operação dos maquinários juntamente sobre uma camada de

solo de proteção fina ou inexistente. As Figuras abaixo ilustram os danos observados após a escavação da área.

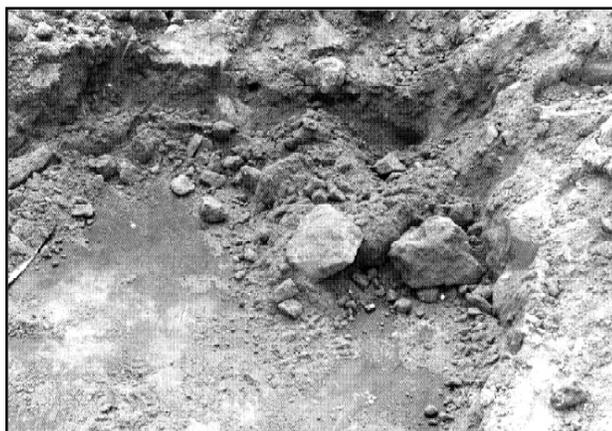


Figura 23. Área com ausência de geotêxtil.

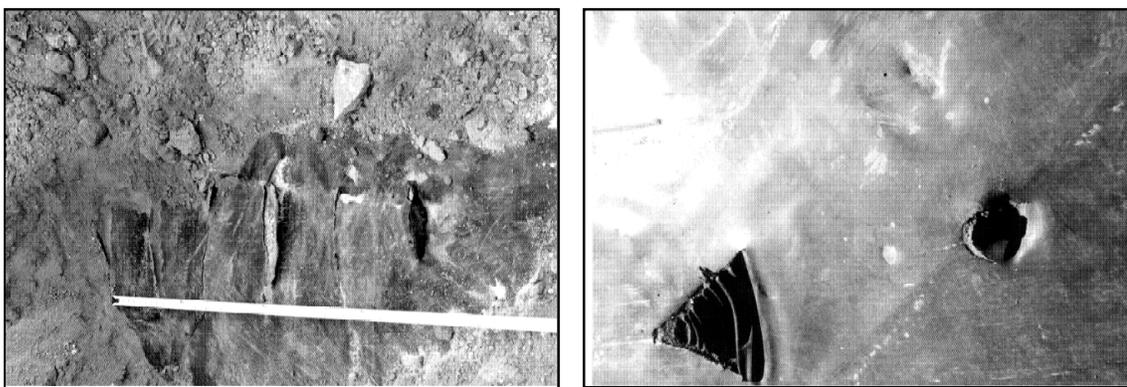


Figura 24. Perfurações observadas nas geomembranas.

Conforme já mencionado, Lopes (2006) relatam que a maior porcentagem de danos ocorre durante a fase de colocação da camada drenante em função da dimensão das partículas da camada drenante, do deficiente dimensionamento do geotêxtil e do equipamento pesado usado para espalhar a camada drenante.

Para quantificar este tipo de dano em laboratório, cita-se o ensaio de dano de instalação sob carregamento cíclico ISO 10. 722. Entretanto, ressalta-se que não existem estudos utilizando este tipo de ensaio para simular o carregamento de maquinários em aterros.

Reddy *et al.* (1996) desenvolveram um estudo experimental de campo para estudar o desempenho de camadas de proteção sob carregamento de construção para geomembranas de PEAD de 1,5 mm. Neste estudo foram variadas a granulometria dos agregados, a carga dos tratores e a introdução do elemento de proteção.

Após a aplicação de repetitivos carregamentos de construção, amostras de geomembranas foram exumadas, observadas visualmente e ensaiadas em laboratório. Os ensaios de laboratório foram empregados com o objetivo de se quantificar as mudanças físicas nas propriedades das geomembranas. Foram realizados ensaios de tração faixa larga, tensão multiaxial e transmissividade ao vapor.

Os resultados dos ensaios mostraram que as principais mudanças nas propriedades físicas das geomembranas foram em termos de alongamento no estouro a partir dos ensaios de tração multiaxial e, tensão e deformação na ruptura a partir dos ensaios de tração faixa larga. Além disto, para as condições utilizadas nos ensaios, verificou-se que um geotêxtil não tecido agulhado de 270 g/m² fornece proteção suficiente para a geomembrana sob ação de carregamento de construção.

2.4.3. Ensaio de Danos Mecânicos em Geomembranas

Os ensaios de danos mecânicos em geomembranas correspondem a ensaios de compressão estáticos ou dinâmicos, sob a forma de um mecanismo de punção.

Os métodos utilizados para determinação da resistência à punção em geossintéticos se dividem em ensaios índice e ensaios de desempenho.

Os ensaios índice são geralmente de pequena escala e são utilizados principalmente durante o processo de fabricação dos materiais para controle de qualidade. São ensaios rápidos e de fácil execução. Entretanto, não são utilizados na previsão da capacidade do geossintético resistir a tensões de instalação e condições de serviço.

Os ensaios de desempenho procuram simular no laboratório as condições e tensões que um geossintético experimentará em obra. Estes ensaios, ao contrário dos ensaios índice, podem ser lentos e, algumas vezes, difíceis de serem executados. Não obstante, são necessários para prever precisamente o desempenho de campo e são frequentemente utilizados nos projetos (FROBEL & RIGO, 1991).

A Tabela 19 apresenta os tipos de ensaios de laboratório utilizados para determinar a resistência de camadas de proteção para geomembranas.

Tabela 19. Ensaio de laboratório utilizados para verificação do desempenho de materiais de proteção para geomembranas.

Ensaio	Norma
Índice	
Punção estática - Rod Plunger Test	ASTM D 4833
Punção estática - CBR	ISO 12236 / NBR 13359
Punção estática com pirâmide	ASTM D 5494
Punção dinâmica queda do cone	ISO 13433 / NBR 14971
Desempenho	
Punção hidrostática em grande escala (ensaio dos cones truncados)	ASTM D 5514
Ensaio do cilindro	BAM
Ensaio de danos durante a instalação	ISO 10722

Como a maior parte dos ensaios será descrita em capítulo a parte (Capítulo 3 – Materiais e Métodos), somente serão descritos aqui o ensaio de punção hidrostática e o ensaio do cilindro.

2.4.3.1. Ensaio de punção hidrostática em grande escala

O ensaio de punção hidrostática em grande escala, também denominado ensaio dos cones truncados, é conduzido de acordo com a norma americana ASTM D 5514. Este ensaio estima as propriedades de tensão / deformação de geossintéticos usando uma pressão hidrostática para comprimir o geossintético sobre uma base natural ou sintética constituídas de pirâmides / cones manufacturados, pedras, solos ou vazios.

Existem dois procedimentos de ensaios. No primeiro, a base do equipamento é constituída de pirâmides ou cones, assemelhando-se a um ensaio de semi-desempenho. Também são conduzidos para comparar dados de laboratório e, podem ser usados como um guia geral para ensaios de rotina de vários materiais.

Segundo Narejo et al. (1996), apesar de este ensaio apresentar formas geométricas idealizadas, o modo de ruptura é similar às condições de campo nas quais a geomembrana é colocada sobre ou abaixo de possíveis protuberâncias. O dispositivo de ensaio é apresentado na Figura 25.



Figura 25. Ensaio de punção hidrostática com cones truncados.

Os cones são montados sobre uma plataforma rígida em disposição triangular. O material de proteção é colocado sobre os cones e, por sua vez, a geomembrana é colocada sobre o material de proteção. A tampa superior é colocada sobre a geomembrana. Introduce-se água ou ar a partir do topo e a pressão é aumentada no recipiente numa velocidade de aproximadamente 7 kPa/min, até que ocorra a ruptura da geomembrana. A ruptura da geomembrana pode ser detectada através de sensores elétricos presentes nos cones. Um cronômetro também é utilizado para medir o tempo de ruptura da geomembrana. Os cones apresentam alturas de 12, 25, 38 e 50 mm. Esta gama de variações permite investigar o efeito da altura da protuberância sobre a resistência à punção.

No segundo procedimento é permitida a utilização de pedregulhos isolados ao invés de cones; como também de camadas de pedregulhos de diâmetros variados. Este ensaio consiste num ensaio de desempenho, com procedimento similar ao ensaio com cones. No entanto, apresentam a vantagem de se conformarem mais adequadamente às condições de campo, com

solos e subleitos específicos. Uma desvantagem deste tipo de ensaio é que a repetibilidade pode ser pobre, uma vez que a resistência à punção da geomembrana parecer ser sensível à orientação e a densidade do objeto protuberante (NAREJO ET AL., 1996).

2.4.3.2. Ensaio do Cilindro (*Cylinder Test*)

O ensaio do cilindro, também conhecido como ensaio sobre placa ou ensaios de placa para deformações a longo prazo, consiste num ensaio de desempenho utilizado para determinar a eficiência de geossintéticos como proteção para geomembranas de PEAD.

Tal equipamento foi desenvolvido pela Sociedade Geotécnica Alemã (*Deutsche Gesellschaft für Geotechnik*, DGGT) por volta de 1990 como um modo de se quantificar o grau para o qual uma geomembrana de PEAD, em conjunto com uma camada particular de proteção e um pedregulho para drenagem específico, numa temperatura e carregamento comparáveis com a base do aterro, pode estar sujeita a condições ambientais de *stress cracking* a longo prazo.

Segundo Gallagher *et al.* (1999), o método de ensaio foi primeiro aprovado pelo *German Quo Vadis Schutzlagen* e regulamentado pelo Instituto Federal para Ensaio e Pesquisa de Materiais (*Bundesanstalt für Materialforschung Undprüfung* - BAM).

De acordo com as regulamentações do BAM, neste ensaio uma camada de geomembrana é colocada sobre uma placa flexível de espessura entre 0,5-1,0 mm contida num recipiente cilíndrico de diâmetro entre 30 e 50 cm. Esta placa por sua vez é colocada sobre outra placa, porém mais rígida, com espessura aproximadamente igual a 2 cm. Uma amostra da camada de proteção é colocada sobre a geomembrana e coberta com uma camada de pedregulho para drenagem, uma camada de separação de geotêxtil não tecido e, finalmente, uma camada de areia para distribuição da carga. A carga especificada é exercida por meio de uma placa de carga e monitorada através de células de carga.

Para exprimir as condições de carregamento do aterro junto aos parâmetros experimentais, tem sido aplicada uma carga de ensaio equivalente a 1,5 vezes a máxima sobrecarga esperada no aterro, para uma temperatura de 40°C e durante um período de 1.000 horas. As deformações são examinadas após 10, 100 e 1.000 horas. Após um período de carregamento de 1.000 horas, a placa é removida e os embricamentos são estimados. Um mínimo de três ensaios é exigido para determinar a dispersão devido ao efeito da variação dos grãos na camada de pedregulhos. A Figura 26 apresenta o esquema do ensaio de cilindro.

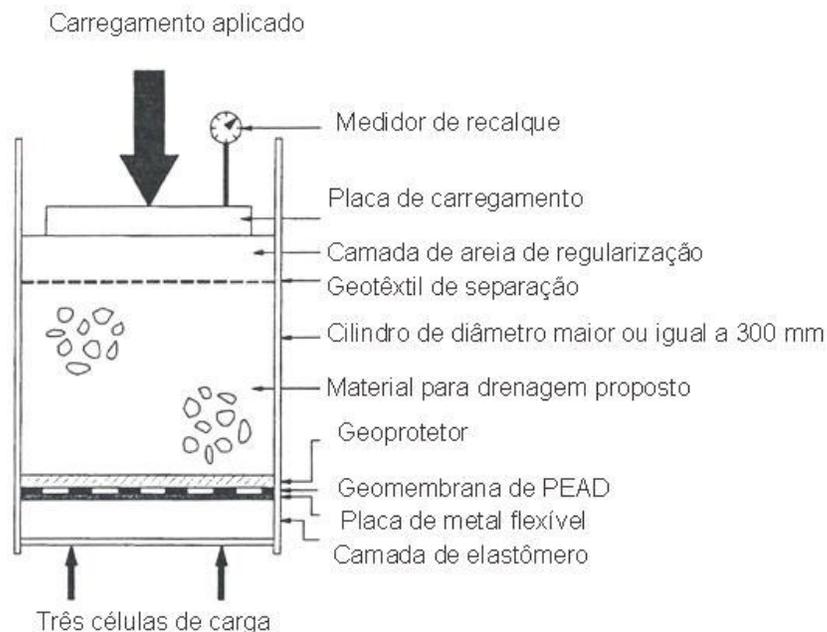


Figura 26. Esquema do ensaio do cilindro (GALLAGHER ET AL., 1999).

O critério para estimativa do desempenho da camada de proteção é baseado na geomembrana, sendo estabelecidas as seguintes condições para um nível aceitável: nenhum dano à superfície superior em forma de fissuras; nenhuma forma de deformação angular, e uma deformação local máxima permitida de 0,25%.

Na Alemanha, geralmente é utilizada uma camada de drenagem de 200 mm de espessura, com diâmetro do pedregulho variando de 16 a 32 mm, e uma geomembrana de

PEAD de 1,5 mm de espessura. O peso específico do resíduo é tomado com regra e equivale a 15 kN/m^3 . Na Inglaterra, adota-se geomembranas de PEAD com 2,0 mm de espessura e, o peso específico do resíduo é tomado como 10 kN/m^3 .

Nesta metodologia do desempenho de camadas de proteção a longo prazo, admite-se que tanto a temperatura quanto o aumento do carregamento contribuem para acelerar as condições experimentais através de um fator de correção de carga.

A Tabela 20 apresenta os fatores de correção de carga para a temperatura e o tempo de ensaio. No entanto, cabe ressaltar que o fator de carregamento e de temperatura aqui mencionado não reflete o comportamento de fluência dos geossintéticos durante a vida útil do aterro.

Tabela 20. Aumento de carga para várias condições de ensaio.

Condições de ensaio	Fator de correção de carga
1.000h, 40° C	1,5
1.000h, 23° C	2,25
100h, 23° C	2,5

Uma das propostas para verificar o comportamento de materiais de proteção para geomembranas submetidas a danos de instalação e de operação consiste nos ensaios de grande escala e de campo.

Como exemplo de ensaios em grande escala, citam-se os trabalhos de Zanzinger (1999); Zanzinger & Gartung (1998) e Tognon (1999), cujos objetivos consistiram em simular danos devido ao carregamento do resíduo (fase de operação), e o trabalho de Reddy *et al.* (1996), voltado para avaliação dos danos mecânicos em geomembranas devido ao carregamento da construção.

2.5. Considerações Finais

Uma das questões relevantes na utilização de geomembrana em sistemas de captação e desvio de fluxo (SCDF) consiste na seleção e desempenho de camadas de proteção mecânica contra danos à sua integridade.

No entanto, as informações relatadas na literatura se mostram escassas e divergentes quanto aos métodos de projeto e ao modo como a avaliação dos elementos deve ser conduzida.

Na filosofia proposta por Koerner *et al.* (1996), por exemplo, a seleção do geotêxtil como elemento de proteção é baseada somente na sua gramatura. No entanto, outras propriedades mecânicas como resistência à tração e à punção não são consideradas. Tais propriedades estão relacionadas à composição polimérica, ao tipo e qualidade da fibra, e aos métodos de fabricação que, por sua vez, podem estar relacionados ao desempenho de geotêxteis como elemento de proteção.

Outra consideração acerca desta filosofia de projeto consiste nos fatores de redução aplicados para correlacionar os dados de laboratório com as condições de campo, os quais podem não corresponder às condições específicas de campo.

Na filosofia baseada no desempenho a longo prazo, o valor limite admitido para deformações nas geomembranas é discutível. Além do questionamento do critério de derivação de tal limite, resultados de ensaios de grande escala realizados por Tognon *et al.* (2000) mostram que nenhum dos tipos de proteção mais utilizados foi capaz de apresentar deformações locais inferiores a 0,25%, apesar das geomembranas não apresentarem danos visíveis. Além disto, alguns autores relatam que os danos mais recorrentes em geomembranas ocorrem durante a fase de instalação (construção), o que não minimiza a relevância dos danos que podem ocorrer durante a fase de operação de aterros. No entanto, a fase de instalação

não é simulada em nenhuma das filosofias citadas acima. Assim, as formulações aplicadas à fase de operação do aterro são estendidas para a fase de instalação, podendo não se adequar a este tipo de solicitação.

Para simular os danos de instalação, tem-se o método de ensaio proposto pela norma européia ISO 10.722. O princípio do ensaio consiste em submeter um geossintético a carregamentos cíclicos para posterior avaliação de suas propriedades. Neste ensaio pode ser variado o carregamento e o número de ciclos. Apesar de este ensaio simular a condição de fadiga na geomembrana, apresenta a limitação de não simular os movimentos operacionais de maquinários durante a construção da camada de drenagem.

A literatura também mostra que existem vários ensaios para avaliar o desempenho de geotêxteis como camada de proteção, divididos em ensaios índices, de desempenho e de campo ou em grande escala. Os estudos já realizados mostram que as diferenças de configurações interferem na avaliação do elemento de proteção e, que os critérios usualmente utilizados podem não ser representativos do comportamento em campo.

As geomembranas de PEAD possuem elevada resistência à punção e podem apresentar danos principalmente sob a forma de arranhões e entalhes. Conforme já mencionado, tais danos podem acelerar o mecanismo de *stress cracking*. O critério proposto pelo BAM se baseia na limitação de deformações para que tal mecanismo não seja desencadeado. No entanto, faltam dados de ensaios de *stress cracking* em geomembranas danificadas para quantificar a influência dos danos de instalação e de operação no mecanismo de *stress cracking*.

Em face às suas características, vários trabalhos na literatura relatam um bom desempenho de geomembranas de PVC em obras geotécnicas ambientais. Contudo, percebe-se que todos os trabalhos se referem apenas às geomembranas de PEAD e, que faltam

informações sobre o comportamento de geotêxteis como proteção para geomembranas de PVC.

Enquanto nas geomembranas de PEAD os danos se manifestam principalmente sob a forma de arranhões e entalhes, nas geomembranas de PVC se manifestam na forma de deformações ou furos. Percebe-se que cada geomembrana se comporta de maneira diferente e, que maiores estudos devem ser realizados antes de estender as considerações do PEAD para as geomembranas de PVC.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição dos Materiais

3.1.1. Geossintéticos

Foram empregadas geomembranas de PVC (polivinil clorado) de 1,0 e 2,0 mm de espessura, PEAD (polietileno de alta densidade) com espessuras de 1,0 mm e 1,5 mm e, PELMD (polietileno linear de baixa densidade) com espessura de 1,25 mm. Os ensaios de caracterização e suas respectivas normas são apresentados na Tabela 21, enquanto os resultados são apresentados na Tabela 22.

Foram utilizados como camadas de proteção geotêxteis não tecidos de poliéster (PET) com gramaturas de 130, 300, 400 e 600 g/m², e de polipropileno (PP) com gramatura de 400 e 600 g/m². Os ensaios de caracterização realizados e os resultados são apresentados na Tabela 23 e Tabela 24, respectivamente.

Foram utilizados dois lotes de fabricação para todos os materiais assim divididos: lote A (materiais empregados em campo) e lote B (materiais empregados em laboratório).

Tabela 21. Ensaio de caracterização das geomembranas.

Ensaio	Norma
Espessura nominal	ASTM 5199
Massa específica (densidade)	ASTM D 792
Tração	ASTM D 882 / D 6693
Rasgo	ASTM D 1004
Punção estática	NBR 13359 / ASTM D 4833
Permeabilidade a vapor d'água	ASTM E 96

Tabela 22. Resultados dos ensaios de caracterização das geomembranas.

Ensaio	Lote	Geomembrana					Unidade	
		PEAD 1,5 mm	PEAD 2,0 mm	PELMD 1,25 mm	PVC 1,0 mm	PVC 2,0 mm		
Espessura	A	1,52	1,95	-	1,01	1,92	mm	
	B	1,56	2,08	1,25	1,08	2,09		
Densidade	A	0,949	0,947	-	1,320	1,295	g/cm ³	
	B	0,946	0,937	0,925	1,296	1,233		
Permeabilidade ao vapor	A	2,72x10-12	1,75x10-12	-	1,21x10-11	1,13x10-11	cm/s	
	B	-	-	-	1,34x10-12	-		
Punção	A	709,8	744,0	-	314,8	559,6	N	
		19,2	12,5	-	23,0	22,5	mm	
	B	642	811	359	329	600	N	
		21,2	12,0	13,21	26,9	19,6	mm	
Rasgo	A	Long	242,7	289,2	-	44,4	79,3	N
		Transv	247,6	294,0	-	53,7	90,4	
	B	Long	230,6	318,3	161	66,8	117,6	N
		Transv	225,4	318,4	148	60,5	110,2	
Tração	A	Long	32,5	36,3	-	-	-	N/mm
		Long	15,5	16,4	-	-	-	%
		Transv	34,8	38,6	-	-	-	N/mm
	B	Long	14,25	15,55	-	-	-	%
		Long	28,8	38,0	12,8	-	-	N/mm
		Long	14,4	17,6	19,1	-	-	%
Escoamento	B	Transv	29,2	39,68	12,7	-	-	N/mm
		Transv	13,5	16,0	19,1	-	-	%
		Long	48,72	60,30	-	16,89	29,95	N/mm
Tração Ruptura	A	Long	790,70	766,90	-	394,20	474,50	%
		Transv	47,29	57,19	-	13,83	27,07	N/mm
		Transv	784,90	784,80	-	364,60	482,20	%
	B	Long	50,1	63,5	42,9	18,4	38,6	N/mm
		Long	829	836	1080	422	494	%
		Transv	44,2	63,9	41,9	15,9	37,2	N/mm
		818	887	1017	401	489	%	

Lote A – campo e lote B – laboratório

Tabela 23. Ensaio de caracterização dos geotêxteis.

Ensaio	Norma
Espessura	ABNT NBR 12569
Massa por unidade de área (gramatura)	ABNT NBR 12568
Tração Faixa Larga	ABNT NBR 12824
Rasgo	ASTM D 4533
Punção estática	ABNT NBR 13359 / ASTM D 4833

Tabela 24. Resultados dos ensaios de caracterização dos geotêxteis.

Ensaio	Lote	Geotêxtil						Unidade	
		PET 150	PET 300	PET 400	PET 600	PP 400	PP 600		
Gramatura	A	168	293	353	576	-	593	g/m ²	
	B	143	286	342	582	415	538	g/m ²	
Punção	A	0,98	1,82	2,67	3,79	-	5,06	kN	
		51,37	58,85	50,67	58,05	-	56,45	mm	
	B	0,22	0,43	0,55	0,94	0,95	1,20	kN	
		14,2	15,6	15,5	16,2	18,6	22,0	mm	
Rasgo	A	Long	195	364	480	621	-	730	N
		Transv	184	235	271	488	-	451	N
	B	Long	-	-	-	-	-	-	N
		Transv	-	-	-	-	-	-	N
Tração	A	Long	7,1	9,9	10,9	21,9	-	21,9	N/mm
			69	93	74	78	-	82	%
		Transv	6,8	13,2	21,6	26,7	-	37,2	N/mm
			99	93	55	76	-	62	%
	B	Long	4,7	12,1	10,9	21,2	25,8	27,9	N/mm
			47	67	51	57	80	83	%
		Transv	6,8	15,9	20,2	31,4	25,6	31,8	N/mm
			64	69	69	55	96	93	%

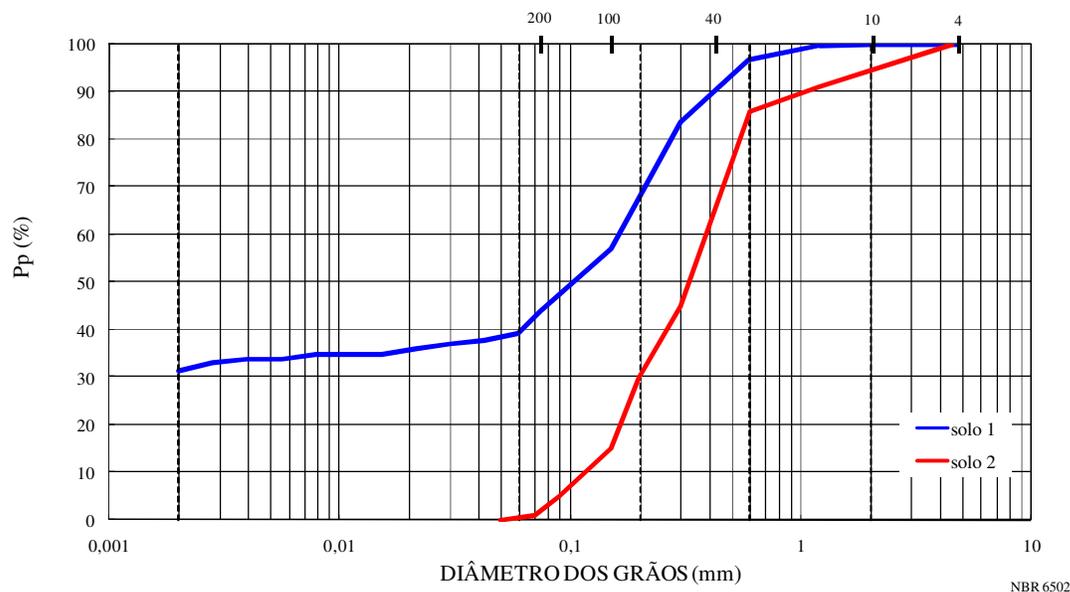
* Lote A (campo) – ABNT NBR 13359 e lote B (laboratório) – ASTM D 4833

3.1.2. Solos e Agregados

As características dos solos utilizados nos ensaios de laboratório (solo 1) e nos ensaios de campo (solo 1 e 2) são apresentadas na Tabela 25. A curva granulométrica é apresentada na Figura 27.

Tabela 25. Características dos solos utilizados.

Propriedade	Solo 1	Solo 2
Classificação	SC (areia argilosa)	SW (areia bem graduada)
Massa específica dos sólidos, ρ_s	2,690 g/cm ³	2,671 g/cm ³
Proctor Normal		-
Peso específico seco máximo ($\rho_{d\text{máximo}}$)	1,820 g/cm ³	-
Umidade ótima ($w_{\text{ótima}}$)	14,5%	-
Condições da compactação de campo		-
Peso específico seco campo ($\rho_{d\text{campo}}$)	95%	-
Desvio de umidade (Δw)	+ 1,4%	-
Permeabilidade (k)	1,2 x10 ⁻⁷ cm/s	-
Limites de consistência		-
Limite de liquidez (LL)	38%	-
Índice de Plasticidade (IP)	17%	-
Índice de vazios máximo	-	0,78
Índice de vazios mínimo	-	0,52



Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	

Figura 27. Curva granulométrica do solo.

Foram utilizadas duas granulometrias de agregados na construção da camada de drenagem, cujas principais características são apresentadas na Tabela 26. O resultado dos ensaios de índice de forma é apresentado na Figura 28, enquanto a Figura 29 apresenta a curva granulométrica dos agregados.

Tabela 26. Características dos agregados.

Propriedade	Brita 1	Brita 3
Classificação	Pedregulho médio	Pedregulho grosso
Faixa granulométrica	10 a 27 mm	15 a 110 mm
D ₁₀ (mm)	11	25
D ₃₀ (mm)	13	29
D ₆₀ (mm)	15	38
Coefficiente de uniformidade, C _u	1,4	1,5
Coefficiente de curvatura, C _c	1,0	0,9
Classificação Unificada	GP	GP
Índice de forma	Cúbico	Cúbico-lamelar

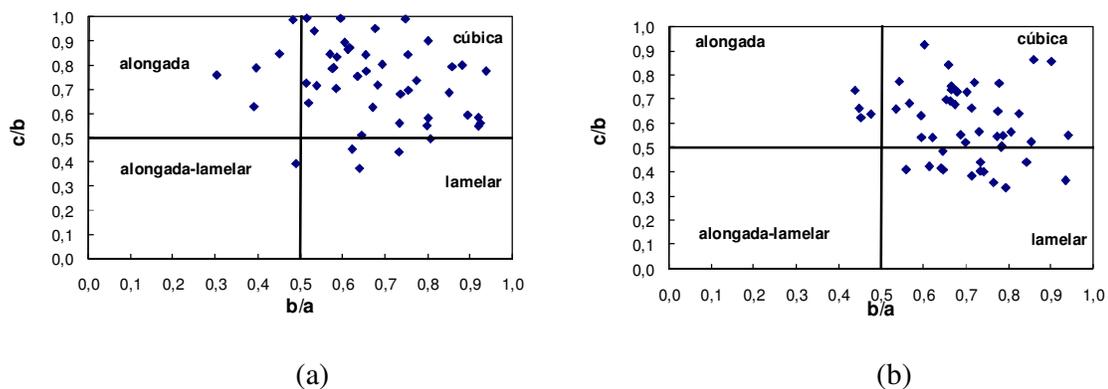


Figura 28. Resultado do ensaio de índice de forma: (a) brita 1; (b) brita 3.

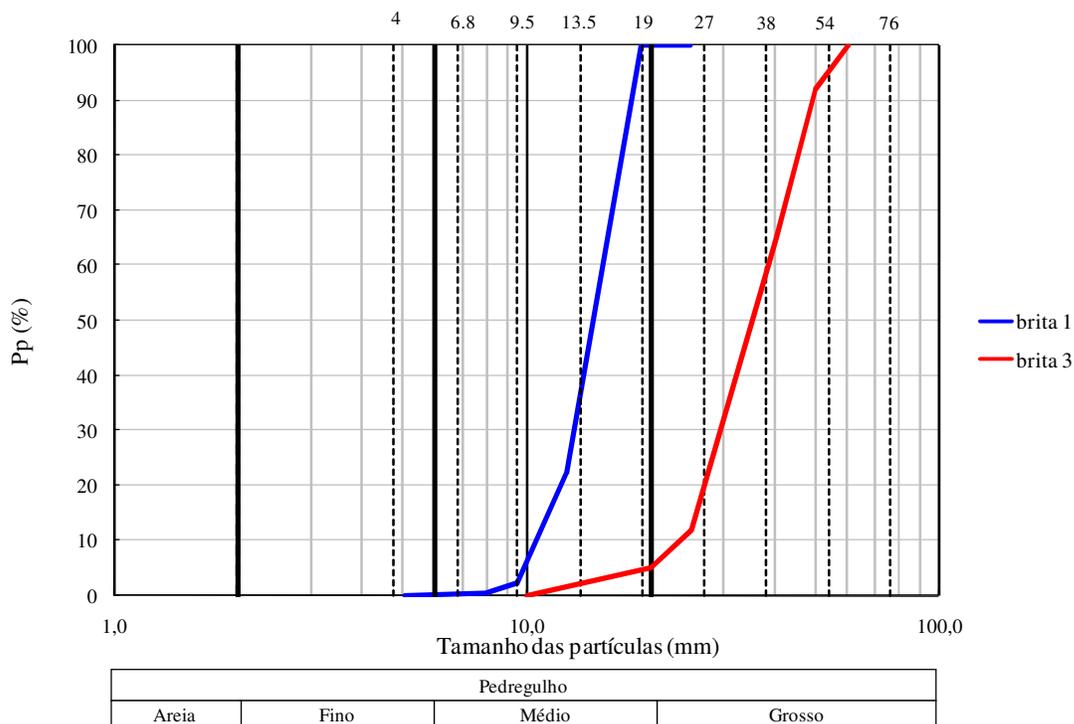


Figura 29. Curva granulométrica dos agregados.

3.2. Ensaios de Laboratório para Avaliação das Camadas de Proteção

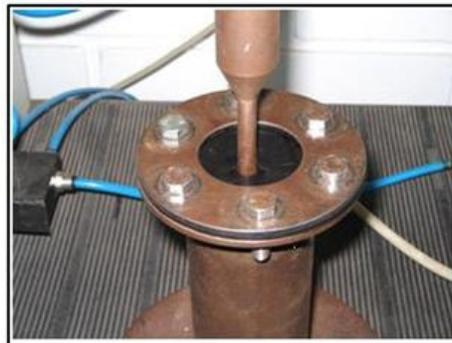
Os ensaios de laboratório realizados foram divididos em ensaios índices e de desempenho. Nos ensaios índices foram realizados ensaios de punção estática (ASTM D4833 - *Rod Plunger Test*) e de punção dinâmica (ABNT NBR 14.971 – queda do cone). Nesta etapa foram variados o polímero e espessura da geomembrana; polímero, gramatura e disposição do geotêxtil, bem como se procurou verificar o efeito da introdução de uma base de solo compactado.

O ensaio de desempenho realizado foi o de dano de instalação, segundo a norma ISO 10.722-1. Este ensaio tem como objetivo simular danos cíclicos em geossintéticos em contato com agregados. Nesta etapa foram avaliados os danos sobre a geomembrana submetida a carregamento cíclico sem elemento de proteção sob diferentes cargas e número de ciclos.

Também foram avaliados os danos sobre a geomembrana submetida a carregamento com proteção de geotêxtil. Após a realização do ensaio, amostras das geomembranas danificadas foram submetidas a ensaios mecânicos, hidráulicos e de degradação para quantificação do dano através da mudança de suas propriedades.

3.2.1. Ensaio Índices

O princípio do ensaio de punção estática (*Rod Plunger Test*) consiste em submeter uma amostra, colocada num molde cilindro vazado de 45 mm de diâmetro, a um ensaio de compressão. A amostra é solicitada por uma haste biselada de 8 mm de diâmetro com uma velocidade de 300 mm/min. A resistência ao puncionamento é tomada como a carga máxima registrada durante o ensaio. A Figura 30 ilustra o equipamento utilizado para realização do ensaio. Na Figura 31 são apresentados detalhes do ensaio onde se introduziu uma base de solo argiloso compactado.



(a)



(b)

Figura 30. Ensaio de punção estática: (a) arranjo do corpo de prova; (b) vista geral.

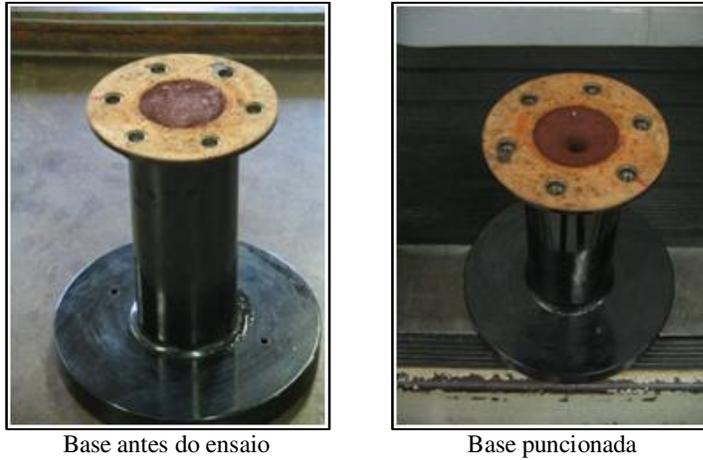
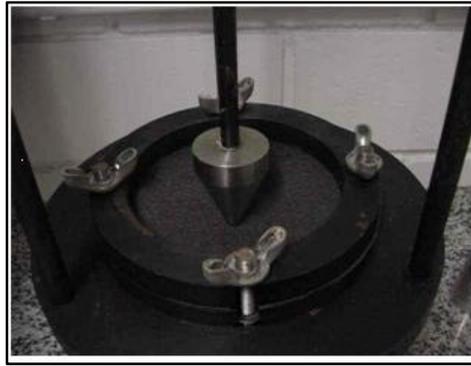


Figura 31. Ensaio de punção estática: introdução de base de solo compactado.

No ensaio de punção dinâmica, um cone de aço de 500 g com ângulo e forma definidos é desprendido a partir de uma altura de 500 mm acima da amostra. O diâmetro do furo criado é medido por meio de outro cone de alumínio de peso definido (500g) e menor ângulo, com escala medida em milímetros. A Figura 32 apresenta o esquema ilustrativo do ensaio.

Os ensaios, tanto estático quanto dinâmicos, foram realizados com os geotêxteis dispostos em diferentes configurações: geotêxtil sobre geomembrana (GT/GM), geomembrana sobre geotêxtil (GM/GT), sistema composto geotêxtil/geomembrana/geotêxtil (GT/GM/GT).



(a)



(b)

Figura 32. Ensaio de punção dinâmica: (a) arranjo do corpo de prova; (b) vista geral.

3.2.2. Ensaios de Desempenho – Dano de Instalação

O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia, utilizando-se uma Prensa Servo – Controlada.

O equipamento consiste em duas caixas bipartidas de dimensões de 30 x 30 x 7,5 cm, cada uma, onde são colocados os materiais a serem ensaiados.

A norma ISO 10.722 (Procedimento para simulação de danos de instalação – Parte 1: Instalação em materiais granulares) prevê a colocação de agregado nas caixas inferior e superior. No entanto, algumas modificações foram realizadas durante o ensaio com o intuito de simular um comportamento mais próximo da situação de campo.

Assim, na caixa inferior foi compactada uma camada de solo argiloso sob condições pré-estabelecidas ($w_{ótima} = 15\%$ e $GC = 98\%$, $\gamma_d = 17,6 \text{ kN/m}^3$). Sobre a camada de solo foi colocada a geomembrana e, posteriormente, fixou-se a caixa superior, preenchendo-a com a brita. Após a colocação de todo o material, instalou-se a placa de carregamento. Uma carga inicial de 200 kPa foi aplicada para acomodação da brita. Após, o carregamento cíclico foi aplicado através de uma pressão sinusoidal de 200 e 400 kPa, ambas na frequência de 1 Hz (um carregamento por segundo). O número de ciclos foi variado, sendo aplicados 200 (recomendado pela norma), 500 e 1000 ciclos.

Após o ensaio, as geomembranas danificadas foram avaliadas por meio de inspeção visual e de ensaios mecânicos, hidráulicos e de *stress cracking*. Na inspeção visual foi verificada a existência de furos, marcas profundas ou rasgos. A Figura 33 mostra uma visão geral do equipamento.

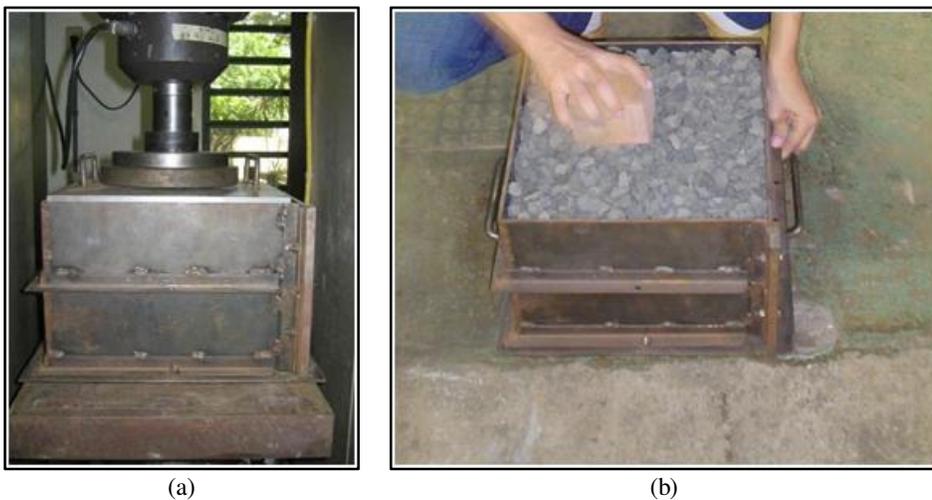


Figura 33. Ensaio de dano de instalação: (a) vista geral do equipamento; (b) detalhe da caixa.

3.3. Ensaio de Danos de Instalação em Grande Escala – Ensaio de Campo

Esta etapa teve como objetivo simular os danos mecânicos que podem ocorrer na geomembrana durante a fase de instalação e construção da camada de drenagem sobre a geomembrana. Para isto, foi construído um aterro experimental em jazida localizada no campus II da USP de São Carlos.

Inicialmente, executou-se a preparação da base escavando e compactando-se o solo em condições pré-estabelecidas. Após esta etapa, geomembranas de diferentes polímeros foram instaladas, seguido das camadas de proteção e, finalmente, da camada de drenagem.

A partir dos resultados obtidos em campo, pôde-se avaliar de forma qualitativa e quantitativa o desempenho dos materiais de proteção utilizados. Em primeiro momento, foram registrados os tipos de danos existentes na geomembrana segundo o guia proposto pelo Comitê Francês de Geossintéticos (CFG, 2001) – Guia para a realização de placas de testes de danos em geossintéticos. Após, as amostras das geomembranas foram submetidas a ensaios de laboratório (ensaios pós-danos) para quantificação da mudança de suas propriedades mecânicas.

3.3.1. Procedimento de Campo

Para realização dos serviços de terraplenagem e construção da camada de drenagem foram utilizados os seguintes maquinários, cujas principais especificações técnicas são apresentadas na Tabela 27:

- Motoniveladora (patrol) modelo 135 H Caterpillar;
- Pá carregadeira modelo 924 G Caterpillar;
- Rolo vibratório pé de careiro modelo CS 431C Caterpillar.

Tabela 27. Especificações técnicas dos equipamentos de terraplenagem utilizados.

Propriedades dos equipamentos	Motoniveladora (patrol) (135 H)	Pá carregadeira (924 G)	Rolo vibratório pé de carneiro (CS 431C)
Massa total (kg)	13.080	10.968	20.755
Comprimento das rodas/esteira (m)	1,20	1,50	-
Largura das rodas/esteira (m)	0,40	0,60	-
Largura da lâmina	3,60	3,60	-
Diâmetro tambor (m)	-	-	1,03
Diâmetro externo (m)	-	-	1,42
Pontas por roda	-	-	60
Tensão de contato com o solo (kPa)	$\cong 50$	$\cong 30$	-

A escavação do solo local foi realizada com a retro-escavadeira hidráulica, numa área de 20 x 55 m² com 80 cm de profundidade. A Figura 34 mostra os detalhes executivos do processo de escavação.

Após a escavação, o solo foi destorroado com a patrol (motoniveladora) e a base foi nivelada para o lançamento das camadas a serem compactadas (Figura 35).



(a)



(b)

Figura 34. Escavação da área: (a) início da escavação; (b) área final.



(a)



(b)

Figura 35. Preparação da base: (a) destorroamento do solo; (b) compactação do solo

O solo retirado foi revolvido e compactado em três camadas de 20 cm cada uma, totalizando uma profundidade de 60 cm. As camadas foram compactadas com GC de 95% e umidade de 15% ($\Delta w = \pm 2\%$). A primeira camada foi compactada com três fechas; a segunda com quatro e a terceira com cinco, sendo que em cada fecha foram realizadas 18 passadas. Ao final da terceira camada, utilizou-se a motoniveladora para aplainar e selar a camada. Os detalhes do processo de compactação são mostrados na Figura 36. O termo fecha consiste em

movimentos seqüenciais e longitudinais de avanço e recuo do trator, com sobreposição da passagem da roda em cada movimento, até completar toda a largura da área.



Lançamento do solo



Lançamento do solo

Figura 36 (Continua). Detalhes do processo de compactação da base.



Espalhamento do solo



Espalhamento do solo



Compactação do solo

Figura 36 (Continuação). Detalhes do processo de compactação da base.



Compactação do solo

Figura 36 (Final). Detalhes do processo de compactação da base.

Em cada camada foram verificadas as condições de compactação com o método do cilindro de cravação. Foram realizados quatro ensaios em cada camada. Os resultados finais são apresentados na Tabela 28.



Figura 37. Controle de compactação no campo – método do cilindro de cravação.

Tabela 28. Condições de compactação no campo pelo método do cilindro de cravação.

Camada	CG (%)	Δw(%)
1ª camada	90	+ 3,9
2ª camada	91	+ 1,9
3ª camada	95	+ 1,4

Após a fase de terraplenagem, iniciou-se a construção da barreira de impermeabilização (barreira de captação e desvio de fluxo). Esta etapa compreendeu a instalação da geomembrana, a instalação da camada de proteção e a construção da camada de drenagem.

Os materiais utilizados (geomembranas e camadas de proteção) foram dispostos conforme se especifica na Tabela 29. A camada com proteção de colchão de areia foi formada utilizando-se uma areia de granulometria fina a média, lançada sobre a geomembrana até atingir uma altura de 15 cm (2x diâmetro da brita). O colchão de solo foi constituído por uma camada do solo local (mesmo solo da fundação), também com altura de 15 cm.

Tabela 29. Configuração dos ensaios de campo.

Identificação da baía	Configuração		Brita
	Geomembrana	Camada de Proteção	
1	PEAD 1,5 mm	Sem proteção	
2	PEAD 1,5 mm	GET PET 300	
3	PEAD 1,5 mm	GET PET 600	
4	PEAD 1,5 mm	GET PP 600	
5	PEAD 1,5 mm	GET PET 2 x 600	
6A	PEAD 1,5 mm	Colchão de areia	
6B	PEAD 1,5 mm	Colchão de solo	
7	PEAD 2,0 mm	Sem proteção	
8	PVC 1,0 mm	Sem proteção	3
9	PVC 1,0 mm	GET PET 300	
10	PVC 1,0 mm	GET PET 600	
11	PVC 1,0 mm	GET PP 600	
12	PVC 1,0 mm	GET PET 2 x 600	
13A	PVC 1,0 mm	Colchão de areia	
13B	PVC 1,0 mm	Colchão de solo	
14	PVC 2,0mm	Sem proteção	
15	GC PVC/GT	-	
16	PEAD 1,5 mm	Sem proteção	
17	PEAD 1,5 mm	GET PET 300	
18	PEAD 1,5 mm	GET PET 600	
19	PEAD 1,5 mm	GET PET 2 x 600	
20	PEAD 1,5 mm	Colchão de areia	1
21	PEAD 1,5 mm	Colchão de solo	
22	PVC 1,0 mm	Sem proteção	
23	PVC 1,0 mm	GET PET 600	
24	PVC 1,0 mm	Colchão de areia	
25	PVC 1,0 mm	Colchão de solo	

As geomembranas foram instaladas em fileiras e mantidas esticadas, sem apresentar qualquer tipo de rugas ou ondulações. Sacos de solo foram colocados nas extremidades das geomembranas para mantê-las esticadas e evitar o descolamento das placas sob a ação do vento (Figura 38).



Figura 38. Instalação das geomembranas.

Após a instalação, as geomembranas foram devidamente identificadas conforme a tabela de configuração dos ensaios apresentada anteriormente (Tabela 29).



Figura 39. Identificação das geomembranas.

Ensaio de detecção de furo (*Spark Test*) foram realizados em cada de placa de manta. O objetivo deste ensaio foi o de verificar a existência de algum furo devido aos processos de fabricação e transporte da geomembrana. As camadas de proteção somente foram colocadas após a liberação deste ensaio. A disposição das camadas de proteção também obedeceu à seqüência apresentada na Tabela 29.



(a)



(b)

Figura 40. Instalação das camadas de proteção: (a) vista geral; (b) camadas com solos naturais.

A camada de drenagem foi construída com o auxílio da pá-carregadeira. Os agregados foram inicialmente amontoados ao pé das baias, e depois espalhados ao longo das mantas até atingir a altura de 30 cm. Ao final da construção da camada de drenagem, foram realizadas 10 passadas em cada sentido (avançando e recuando) também com a pá-carregadeira (Figura 41).



(a) Início da construção da camada



(b) Construção da camada



(c) Fechamento da camada

Figura 41 (Continua). Construção da camada de drenagem.



(d) Compactação da camada

Figura 41 (Final). Construção da camada de drenagem.

Finalizada a compactação da camada de drenagem, removeu-se toda a brita sendo que os vinte primeiros centímetros foram retirados com o auxílio da pá-carregadeira. Os centímetros finais foram retirados manualmente com o auxílio de pás e enxadas (Figura 42).



Figura 42. Retirada da brita.

Ao término da retirada da brita, os materiais geossintéticos, em especial as geomembranas, foram avaliados visualmente. Para isto, realizou-se novamente o ensaio de detecção de furos em geomembranas (*Spark Test*) em todas as geomembranas. Dados como

furos, rasgos, deformações e outros tipos de danos foram documentados em planilha de campo. As geomembranas foram amostradas e identificadas seguindo a nomenclatura apresentada na Tabela 29. Ao final de todo o ensaio de campo, os materiais foram transportados em placas (mantas de PEAD) e rolos (mantas de PVC) para o laboratório com caminhão basculante.

3.3.2. Ensaio Não Destrutivo para Detecção de Furos em Geomembranas

Para verificação da existência de furos, rasgos, fissuras ou danos similares nas geomembranas utilizou-se o método da faísca elétrica (*Spark Test*), seguindo as recomendações da norma americana ASTM D 6747.

O princípio básico das técnicas elétricas consiste em aplicar um potencial elétrico sobre a geomembrana, e então localizar áreas onde a corrente elétrica passa devido à presença de descontinuidades na geomembrana.

No caso do método da faísca elétrica, existe um gerador de alta tensão e baixa corrente elétrica. Este gerador é acoplado a dois eletrodos, um passivo ligado ao solo, e outro ligado a uma haste com uma escova ou barra metálica na ponta. Esta haste é passada lentamente pela superfície superior da geomembrana. Quando existe uma descontinuidade na manta, o circuito se fecha e uma faísca é produzida, conforme esquematizado na Figura 43. Para facilitar a localização da descontinuidade, o equipamento inclui um alarme sonoro.

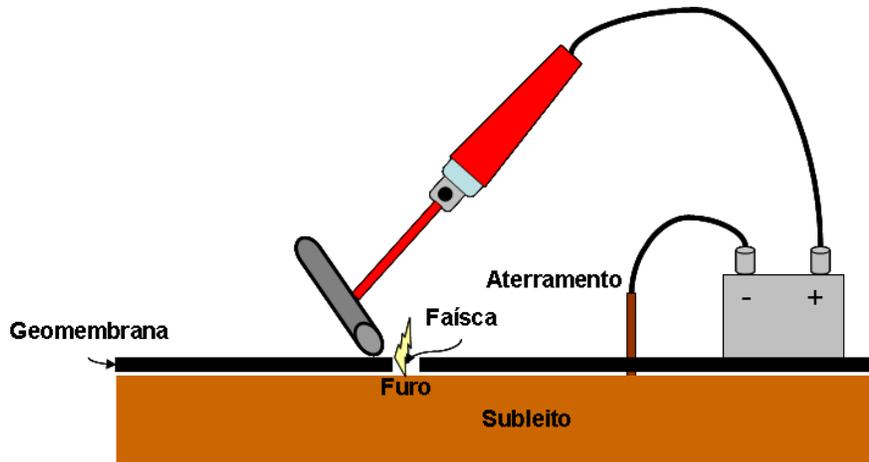


Figura 43. Esquema do princípio do ensaio de *Spark Test*.

A voltagem do equipamento se situa entre 20 kV e 100 kV. No entanto, a ASTM D6747 não faz referência à voltagem que deve ser emitida. Na ausência de uma regulamentação específica, foram seguidas as sugestões do fabricante do equipamento para materiais aplicados à construção civil (10 kV para cada milímetro de espessura do material).

O equipamento foi calibrado para os dois tipos de geomembranas, obtendo-se como resultado final uma voltagem de 15 kV para as geomembranas de PVC (de 1,0 a 2,0 mm de espessura), e 30 kV para as geomembranas de PEAD (de 1,5 a 2,0 mm de espessura).

A Figura 44 e a Figura 45 mostra a execução do ensaio em campo e detalhes do equipamento.



Figura 44. Realização do *Spark Test* em campo.



Figura 45. Detalhes do equipamento do *Spark Test*.

3.3.3. Critério para Estimar o Desempenho de Camadas de Proteção para Geomembranas

Para avaliar o desempenho dos elementos utilizados como camada de proteção seguiram-se as recomendações propostas pelo Comitê Francês de Geossintéticos - *Comité Français des Geosynthétiques* (2001).

Primeiramente, os danos observados visualmente nas amostras de geomembranas foram classificados em cinco categorias de danos:

- Arranhão → ranhura superficial;
- Entalhe → arranhão mais profundo, sem perfuração da geomembrana;
- Indentação → punção pontual profunda remanescente e sem perfuração da geomembrana, com um importante decréscimo de espessura (marca do pedregulho);
- Furo → furo ou rasgo da geomembrana;
- Deformação → deformação da geomembrana devido à irregularidade da superfície ou devido à proeminência de um elemento graúdo, remanescente ou não, e sem redução visível de espessura.

O guia ainda recomenda a classificação das geomembranas em função dos tipos de danos identificados, dividindo-os em três níveis:

- Nível I: A geomembrana apresenta furos (1 ou vários).
- Nível II: A geomembrana apresenta um ou várias indentações, entalhes, deformações ou arranhões.
- Nível III: A geomembrana não apresenta nenhum tipo de dano.

Os níveis podem ainda ser refinados e subclassificados em função do nome e dimensão dos danos observados, e seguindo uma numeração por dano decrescente.

As geomembranas enquadradas no nível I podem ser subdivididas conforme o número de furos existentes. Por exemplo, a classificação I-1 seria atribuída à manta com maior número de furos. O nível I é considerado totalmente inaceitável pelo CFG e, em geral, não necessita ensaios complementares, nem sobre a geomembrana como nem sobre os outros geossintéticos.

Os níveis II e III dependem de resultados de ensaios de laboratório. Nestes níveis, as modificações de propriedades importantes são consideradas. O guia sugere um mínimo de 25% de decréscimo nas propriedades analisadas para que a geomembrana seja considerada danificada. O nível II analisa as mudanças nas propriedades das geomembranas; enquanto o nível III sugere que sejam analisadas as características residuais dos geotêxteis (elementos de proteção).

3.4. Ensaios Pós-Danos Realizados nas Geomembranas para Avaliação das Camadas de Desempenho

3.4.1. Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados nas geomembranas foram:

- Ensaio de tração do tipo “gravatinha” (ASTM D 882 e D 6693) e faixa larga (ABNT NBR 12824)
- Ensaio de rasgo (ASTM D1004)
- Ensaio de punção (ASTM D4833)

3.4.1.1. Ensaio de Tração

Devido ao tamanho das amostras, as geomembranas submetidas a carregamentos cíclicos em laboratório foram ensaiadas seguindo as normas ASTM D 882 e D 6693; enquanto nas geomembranas de campo foram realizados ensaios de tração em faixa larga (ABNT NBR 12824). Foram utilizados três corpos de prova em cada direção. As informações obtidas a partir deste ensaio foram: tensões de escoamento (PEAD) e ruptura e as deformações no escoamento ou ruptura.

Na Figura 46 é apresentada uma ilustração do ensaio de tração do tipo gravatinha e em faixa larga.

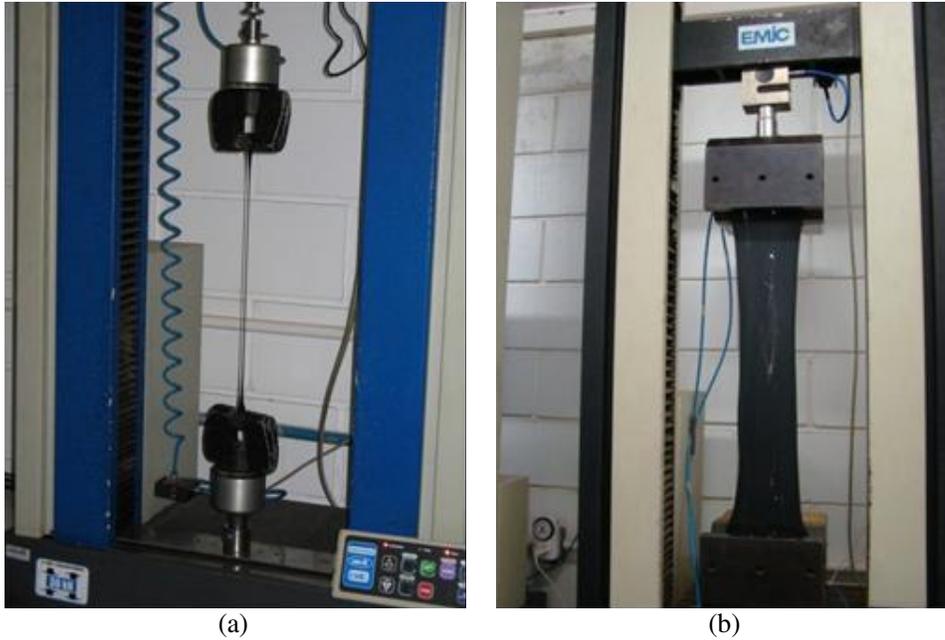


Figura 46. Ensaio do ensaio de tração: (a) normal; (b) faixa larga.

3.4.1.2. Ensaio de Rasgo

Os ensaios de rasgo foram realizados nas amostras de geomembranas submetidas a carregamentos cíclicos em laboratório. Foram realizados ensaios nas duas direções, sendo utilizados três corpos em cada direção. O ensaio fornece como resultado final a força necessária para iniciar o mecanismo de rasgo do corpo de prova. A Figura 47 ilustra o ensaio.

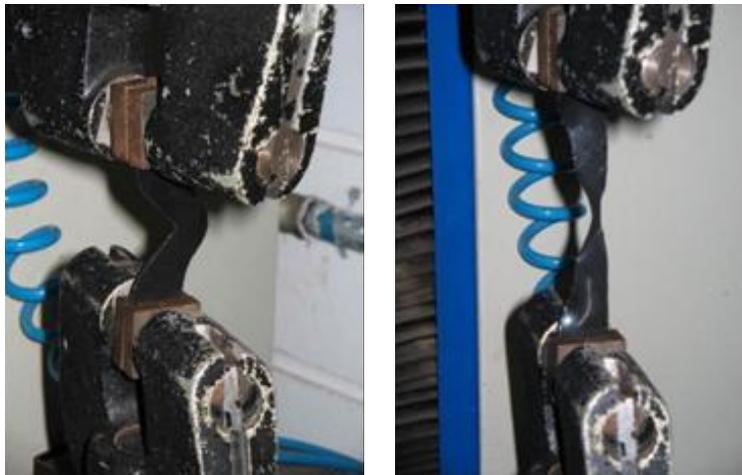


Figura 47. Ilustração do ensaio de rasgo em geomembrana de PEAD.

3.4.1.3. Ensaio de Punção

Os ensaios de punção também foram realizados nas amostras de geomembranas submetidas a carregamentos cíclicos em laboratório. Foram ensaiados três corpos de prova para cada configuração de ensaio. O ensaio fornece como resultado final a força e deslocamento máximos para perfurar a geomembrana. A Figura 48 ilustra o ensaio.

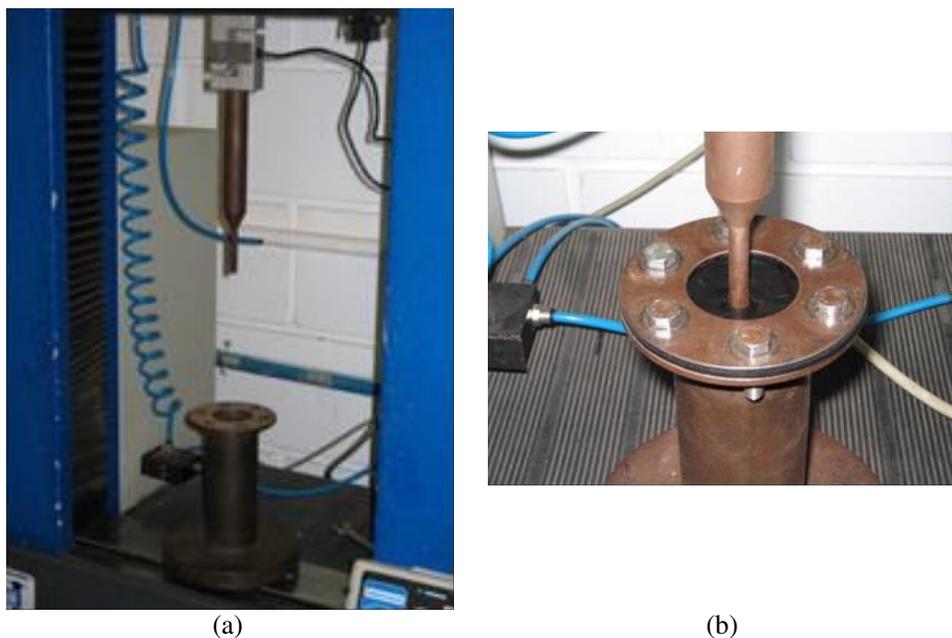


Figura 48. Ilustração do ensaio de punção estática em geomembrana: (a)visão geral; (b) detalhe do ensaio.

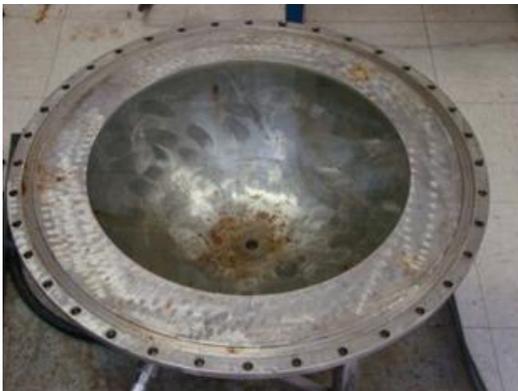
3.4.1.4. Ensaio de Tração Multiaxial (estouro)

Segundo Bueno e Vilar (2004), existem situações particulares nas quais os geossintéticos podem ser tracionados multidirecionalmente e, ao se deformar, adquirem a conformação de uma calota.

O ensaio de tração multiaxial tem como objetivo simular tal condição, que pode ocorrer em geomembranas utilizadas no sistema de impermeabilização basal. O procedimento

do ensaio segue a norma da ASTM D5617 e consiste em aplicar uma pressão de água sobre uma amostra de geomembrana até que ocorra a ruptura. Durante o ensaio são medidas a pressão aplicada e a deflexão no ponto central da geomembrana.

A norma prevê um diâmetro mínimo de 450 mm para o corpo de prova. Além disto, a velocidade de aplicação da pressão deve ser controlada seguindo o valor de 20 mm/min. A Figura 49 apresenta uma ilustração do ensaio.



(a) parte inferior



(b) vista geral do equipamento

Figura 49. Ilustração do ensaio de tração multiaxial.

O resultado do ensaio consiste numa curva pressão aplicada *versus* deflexão ou tensão *versus* deformação. Para o cálculo da tensão e deformação é considerado que a geomembrana assume uma forma esférica depois de deformada.

Segundo a norma ASTM D5617 e Koerner (1998), a geomembrana pode assumir a forma de arco ou de elipse, de acordo com as dimensões do corpo de prova e da deflexão da geomembrana ao longo do ensaio.

Para deflexões menores do que o raio do corpo de prova ($\delta < L/2$), a geomembrana assume a forma de arco, e a deformação da geomembrana é calculada pela Equação 11.

$$\varepsilon = \left\{ \frac{\left[\arctan\left(\frac{4 \cdot L \cdot \delta}{L^2 - 4 \cdot \delta^2}\right) \right] \cdot \left(\frac{L^2 + 4 \cdot \delta}{4 \cdot L}\right) - L}{L} \right\} \times 100(\%) \quad \text{Equação 11}$$

Para deflexões maiores ou iguais ao raio do corpo de prova ($\delta \geq L/2$), a geomembrana assume a forma de elipse e a deformação da geomembrana é calculada pela Equação 12.

$$\varepsilon = \left\{ \frac{\left[\arctan\left(\frac{4 \cdot L \cdot \delta}{L^2 - 4 \cdot \delta^2}\right) \right] \cdot \left(\frac{L^2 + 4 \cdot \delta}{4 \cdot L}\right) - L}{L} \right\} \times 100(\%) \quad \text{Equação 12}$$

Para qualquer deflexão, a tensão atuante sobre a geomembrana é calculada pela Equação 13.

$$\sigma = \frac{(L^2 + 4 \cdot \delta^2) \cdot p}{16 \cdot \delta \cdot L^2 \cdot t} \quad \text{Equação 13}$$

Devido à grande dimensão dos corpos de prova, o ensaio de tração multiaxial foi realizado somente nas amostras de geomembranas ensaiadas em campo.

3.4.2. Ensaio de Fissuramento sob Tração (Stress cracking)

Foram realizados dois tipos de ensaio de FST, ambos seguindo as prescrições recomendadas nas ASTM D 5397 e na GM 10:

- Método NCLT (*Notched Constant Tensile Load Test*): As cargas variaram entre 65 % 25% da tensão de tração da geomembrana virgem, e foram aplicadas nas geomembranas virgens e danificadas. Em média foram utilizados três corpos de prova para cada estágio de carga. Este método de ensaio foi aplicado para quantificação das geomembranas submetidas a danos de instalação em laboratório.

- Método SP – NCLT (*Single Point-Notched Constant Tensile Load Test*): Este método de ensaio utilizou apenas um estágio de carga, correspondente a 30% da tensão de tração da geomembrana virgem. Foram utilizadas em média três corpos de prova, sendo que o ensaio apresentou duas configurações. Na primeira, as geomembranas apresentaram a ranhura requerida pela norma. Na segunda configuração, as geomembranas não foram ranhuradas, tomando o dano existente como o agente catalisador do FST.

Utilizou-se o equipamento projetado e construído por Lavoie (2006). A Figura 50 apresenta o esquema do equipamento.



Figura 50. Vista do equipamento de FST: (a) vista frontal; (b) vista lateral do ensaio em andamento.

Os corpos de prova apresentam uma ranhura na região central, a qual corresponde a 20% da espessura da geomembrana. A Figura 51 mostra detalhes da ranhura e os moldes para corte do corpo de prova.

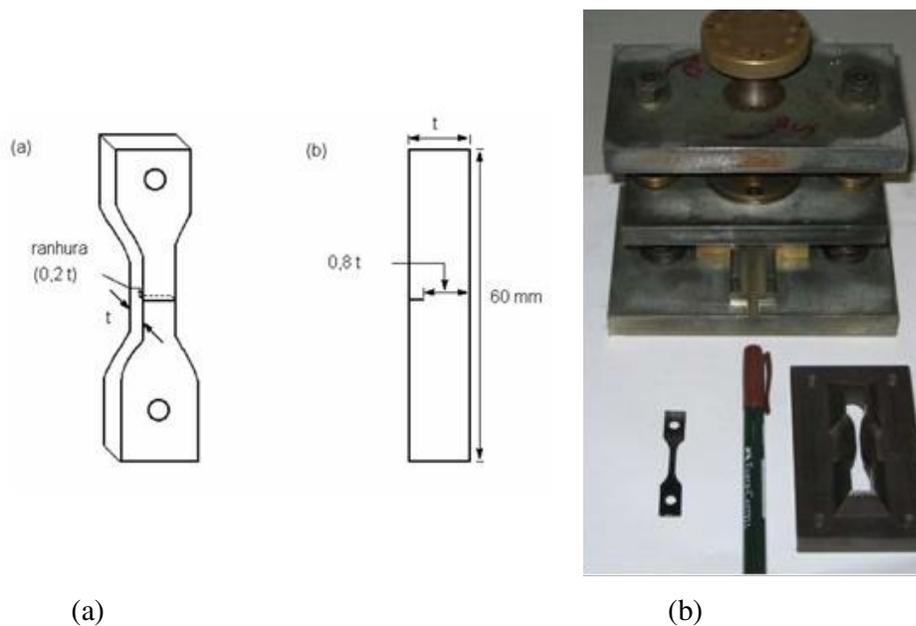
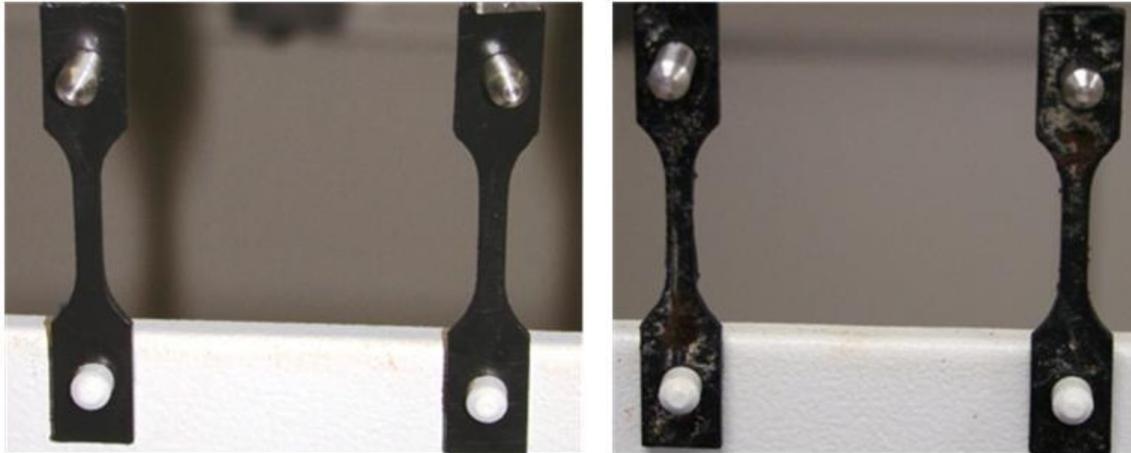


Figura 51. Ensaio de fissuramento sob tração (stress cracking): (a) detalhes da ranhura; (b) moldes para corte do prova.



GM Virgem

GM sem proteção

Figura 52. Ilustração de algumas configurações com corpo de prova sem ranhura.

A força aplicada em cada corpo de prova é calculada segundo a Equação 14.

$$f_{aplicada} = \frac{A \cdot \sigma_Y \cdot w \cdot t_L}{MA}$$

Equação 14

Onde:

- $f_{aplicada}$: força aplicada ao corpo de prova;
- A: porcentagem da resistência ao escoamento;
- σ_Y : resistência ao escoamento do material;
- w: largura do pescoço do corpo de prova;
- t_L : espessura ligante do corpo de prova;
- MA: fator de multiplicação de carga.

3.4.3. Ensaio Hidráulico - Transmissividade ao Vapor

O ensaio de transmissividade ao vapor foi realizado nas geomembranas submetidas a carregamentos cíclicos em laboratório. O princípio do ensaio consiste em colocar uma amostra de geomembrana sobre uma caneca de alumínio preenchida com água (100% de umidade relativa), mantendo-a numa sala com temperatura controlada e menor umidade relativa. Devido a esta diferença de umidade, ocorre a passagem de vapor d'água através da geomembrana por difusão. A Figura 53 mostra uma visão geral do aparato.



Figura 53. Ensaio de transmissividade ao vapor em geomembranas.

O resultado do ensaio resulta numa curva tempo (dias) versus perda de massa (g), de onde são calculadas a transmissividade ao vapor (WVT), a permeância e a permeabilidade (por difusão) da geomembrana.

CAPÍTULO 4. ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1. Ensaio de Laboratório

4.1.1. Ensaio Índices

4.1.1.1. Ensaio Estáticos

As Figura 54 a Figura 59below apresentam os resultados dos ensaios estáticos (*Rod Plunger Test*) realizados nas geomembranas de PVC (1,0 mm), PEAD (1,5 mm) e PELMD (1,25 mm), utilizando geotêxteis de PET e PP como elemento de proteção e em diferentes configurações.

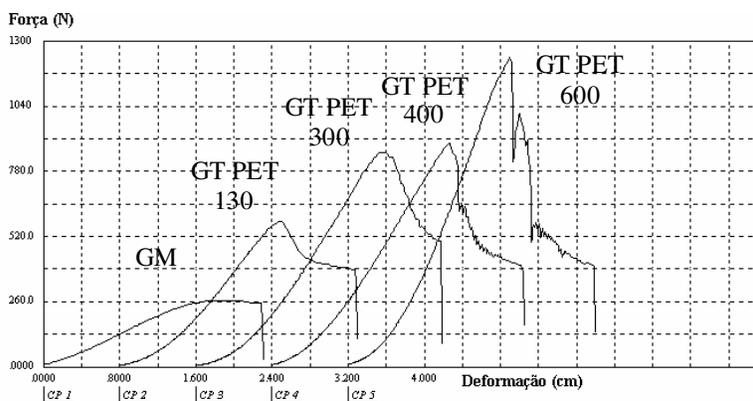


Figura 54. Curvas de punção - geomembrana de PVC, 1,0mm - GT/GM, GT PET.

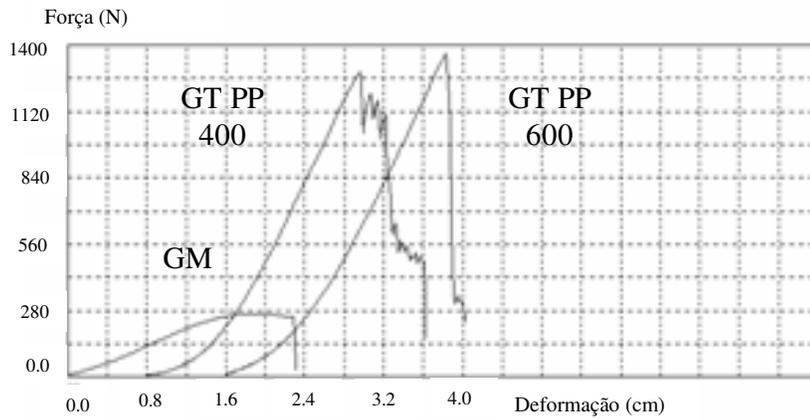


Figura 55. Curvas de punção - geomembrana de PVC, 1,0mm - GT/GM, GT PP.

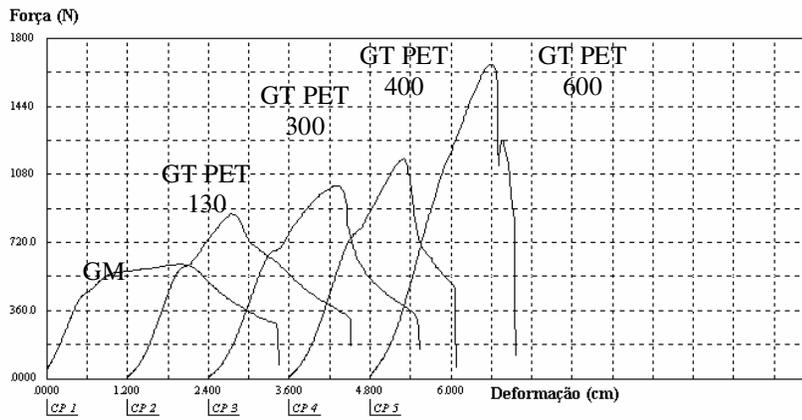


Figura 56. Curvas de punção - geomembrana de PEAD, 1,5 mm - GT/GM, GT PET.

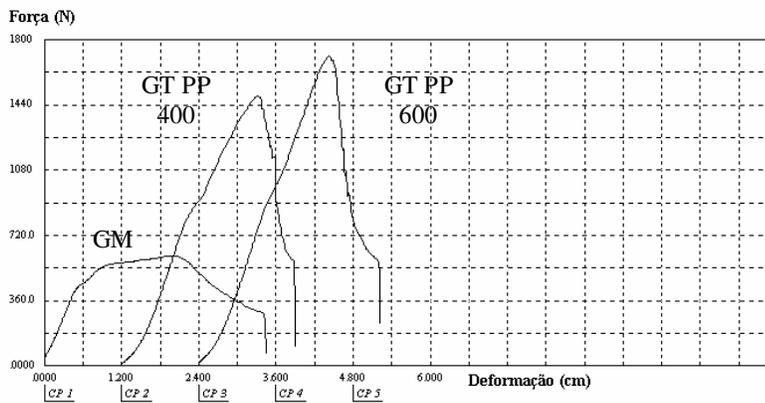


Figura 57. Curvas de punção - geomembrana de PEAD, 1,5 mm - GT/GM, GT PP.

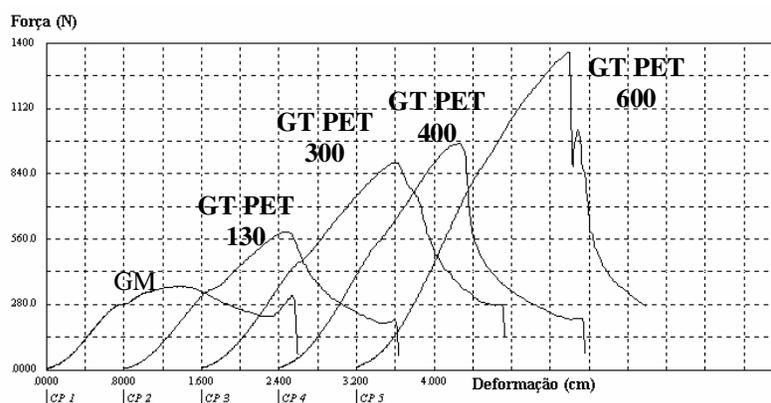


Figura 58. Curvas de punção - geomembrana de PELMD, 1,25 mm - GT/GM, GT PET.

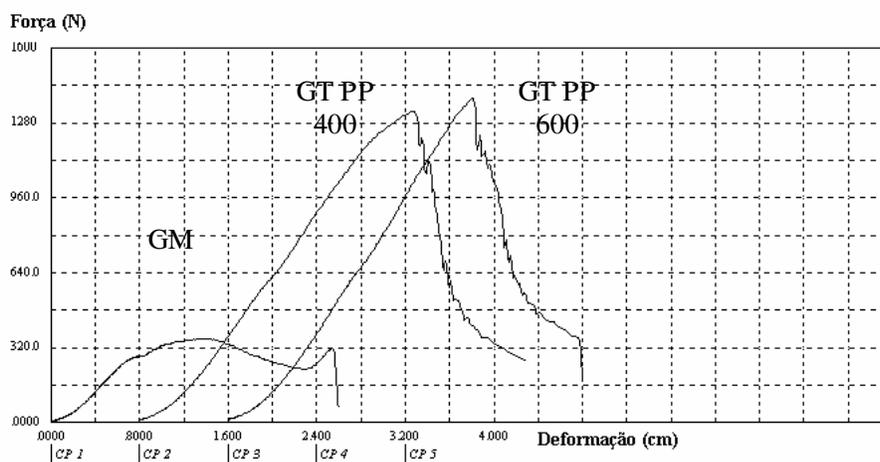


Figura 59. Curvas de punção - geomembrana de PELMD, 1,25 mm - GT/GM, GT PET.

Nos ensaios realizados na geomembrana de PVC sem proteção foi obtida uma força de punção de 329 N. Nos ensaios com geotêxteis de PET foram obtidos valores de 515, 844, 869 e 1249 N para as gramaturas de 130, 300, 400 e 600 g/m², respectivamente. A relação entre a força de punção do conjunto geomembrana mais geotêxtil e a força de punção da geomembrana foi de 1,6, 2,6, 2,6 e 3,8 para as respectivas gramaturas citadas acima. Nos ensaios realizados com geotêxtil de PP, os valores obtidos foram de 1221 (relação de 3,7) e 1413 N (4,3) para as gramaturas de 400 e 600 g/m², respectivamente.

O valor da força de punção obtido na geomembrana de PEAD sem proteção foi de 652 N. Nos ensaios com geotêxteis de PET foram obtidos valores de 884 (1,4), 1016 (1,6), 1157 (1,8) e 1669 N (2,6) para as gramaturas de 130, 300, 400 e 600 g/m^2 , respectivamente. Nos ensaios realizados com geotêxtil de PP, os valores obtidos foram de 1476 (2,3) e 1712 N (2,6), para as gramaturas de 400 e 600 g/m^2 .

O valor da força de punção obtida na geomembrana de PELMD sem qualquer proteção foi de 336 N. Nos ensaios com geotêxteis de PET foram obtidos valores de 584 (1,7), 877 (2,6), 970 (2,9) e 1357 N (4,0) para as gramaturas de 130, 300, 400 e 600 g/m^2 , respectivamente. Nos ensaios realizados com geotêxtil de PP, os valores obtidos foram de 1221 (3,6) e 1382 N (4,1), para as gramaturas de 400 e 600 g/m^2 .

As Figuras abaixo mostram o efeito da gramatura do geotêxtil no acréscimo de resistência à punção (ΔF_p) para diferentes geomembranas e geotêxteis. Nestas figuras, ΔF_p corresponde a razão entre a força de punção do conjunto geotêxtil/geomembrana e a força de punção da geomembrana sem elemento de proteção, expressa em porcentagem.

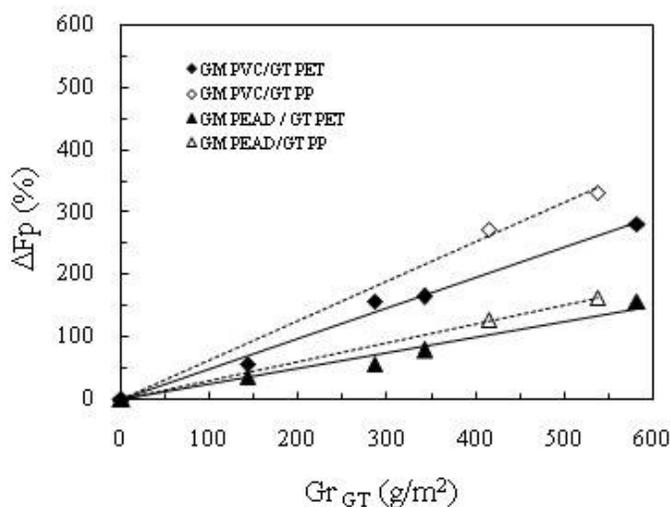


Figura 60. Efeito da gramatura na resistência à punção – GT sobre GM.

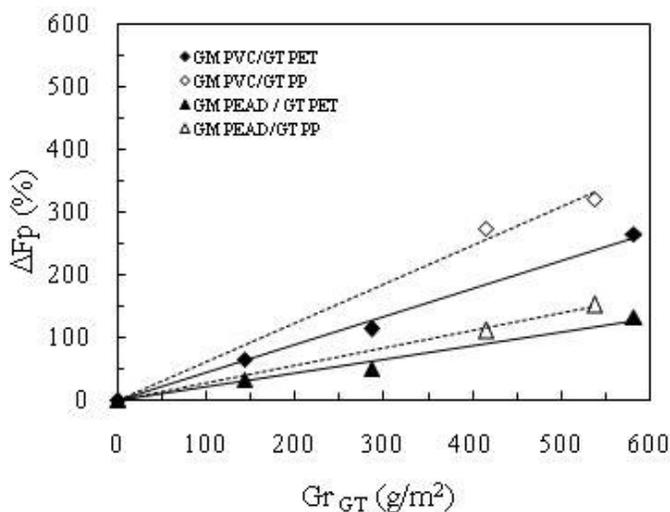


Figura 61. Efeito da gramatura na resistência à punção – GM sobre GT.

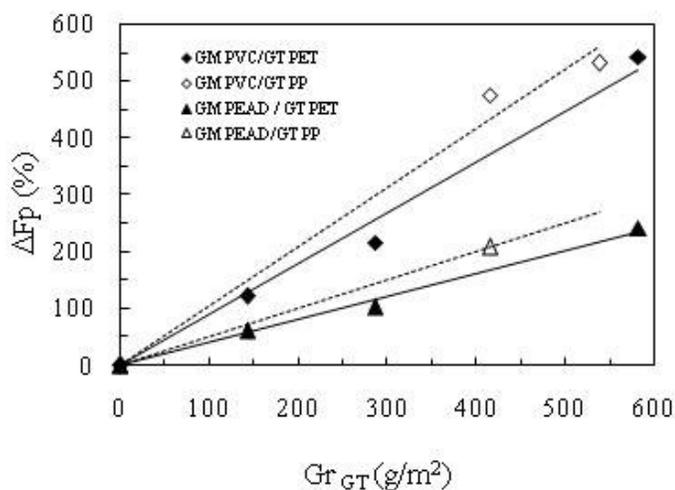


Figura 62. Efeito da gramatura na resistência à punção – GT/GM/GT.

Observa-se, em todas as configurações, que a resistência à punção das geomembranas é proporcional a gramatura do geotêxtil. Além disto, as curvas apresentadas mostram que as geomembranas de PVC foram mais sensíveis à presença de geotêxtil do que as geomembranas de PEAD, pois o aumento da força de punção nas geomembranas de PVC foi cerca de 100% maior do que o aumento obtido na geomembrana de PEAD. Somente nos ensaios com

geotêxteis de baixa gramatura (130 g/m^2) o aumento foi de menor magnitude, em torno de 50%.

Os resultados também mostram que os geotêxteis de polipropileno (PP) introduziram maiores ganhos de resistência à punção do que os geotêxteis de poliéster (PET), o que indica que a gramatura do geotêxtil não é única característica responsável pelo seu desempenho como proteção.

A Figura 63 apresenta uma análise do desempenho de geotêxteis correlacionando as propriedades de gramatura (Gr), tensão de tração do geotêxtil (F_{yGT}) e o aumento da força de punção do conjunto (ΔF_p).

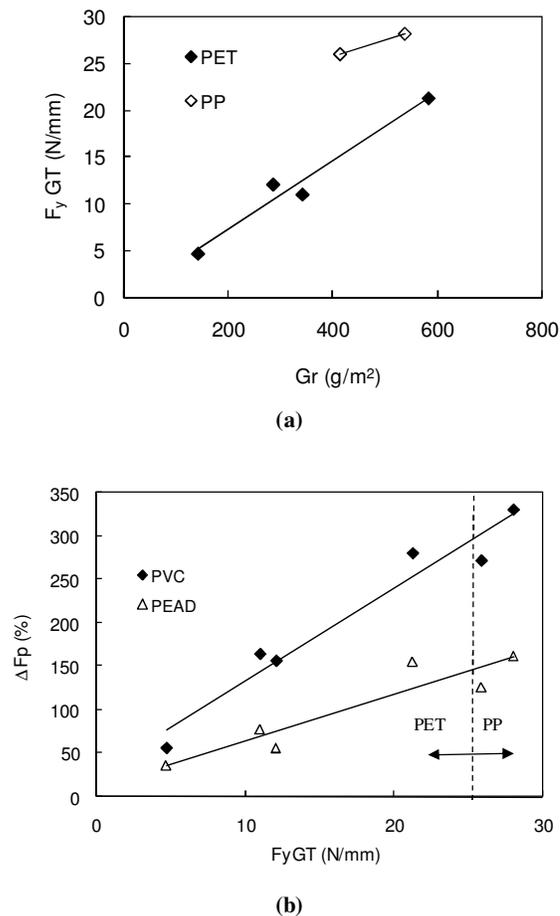


Figura 63. Influência das características do geotêxtil.

Os resultados apresentados na Figura 63a mostram que a resistência à tração do geotêxtil é proporcional a sua gramatura. Além disto, pode-se observar que os geotêxteis de polipropileno (PP) forneceram maiores valores de resistência à tração do que os de poliéster (PET).

Ao se analisar a (Figura 63b), constatou-se que a resistência à punção do conjunto geotêxtil/geomembrana também é proporcional à resistência a tração do conjunto. No entanto, observa-se que os geotêxteis de polipropileno (PP) forneceram maiores valores de acréscimo de resistência do que os geotêxteis de poliéster (PET). Tais resultados indicam que a resistência à tração constitui um parâmetro importante na avaliação do desempenho de geotêxtil, uma vez que este parâmetro expressa a gramatura e variação do tipo de geotêxtil em termos de acréscimo de resistência à punção para o conjunto geotêxtil/geomembrana.

A princípio, percebem-se duas características importantes que influenciam no desempenho de geotêxteis como elemento de proteção: a resistência à tração da geomembrana e a resistência à tração do geotêxtil. Atribuindo um fator adimensional δ , o qual representa a relação entre a resistência à tração de ruptura (F_{YGM}) da geomembrana e a relação entre a força de tração de ruptura do geotêxtil (F_{tGT}), pôde-se realizar uma análise do acréscimo de resistência a punção (ΔF_p) em função deste fator. A Figura 64 ilustra a correlação proposta.

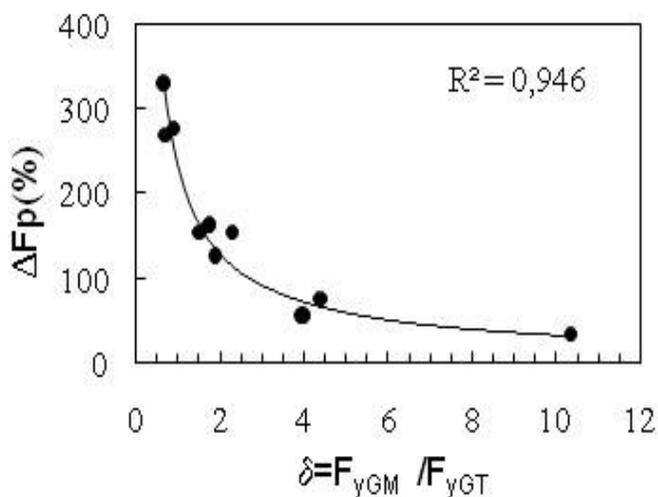


Figura 64. Influência das características de tração da geomembrana e do geotêxtil no aumento na força de punção.

Observa-se que o fator δ apresentou uma boa correlação com os resultados dos ensaios. Verificou-se, por exemplo, que valores mais baixos de δ geram elevados valores de acréscimo de resistência à punção. Além disto, observa-se que o acréscimo de resistência foi bastante influenciado pelo aumento da resistência à tração do geotêxtil. Tal situação representa o comportamento típico verificado nas geomembranas de PVC (baixos valores de resistência à tração).

Em contrapartida, para elevados valores de δ foram gerados baixos valores de acréscimo de resistência à punção. Observou-se ainda que a resistência à punção é pouco influenciada pelo aumento da resistência a tração do geotêxtil. Este comportamento foi constatado nas geomembranas de PEAD.

A Figura 65 ilustra o efeito do aumento da espessura da geomembrana (e) na força de punção (F_p) do conjunto GT/GM realizados nas geomembranas de PVC e PEAD, utilizando-se geotêxteis de PET 300 g/m².

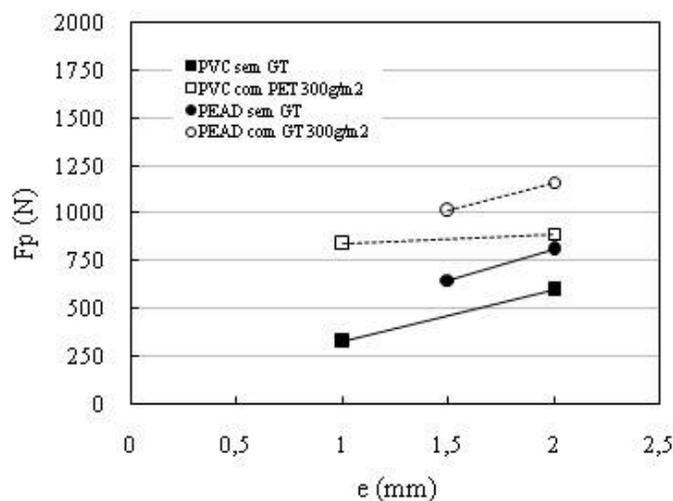


Figura 65. Influência da espessura - sistema GT/GM, GT PET 300 g/m².

No ensaio realizado com geomembrana de PVC de 1,0 mm sem proteção foi obtida a força de punção de 329 N, valor que atinge 600 N para a geomembrana de 2,0 mm, um aumento de aproximadamente 80%. No ensaio realizado com geomembrana de PEAD, obtiveram-se força de punção de 652 N e 811 N para as espessuras de 1,5 mm e 2,0 mm, respectivamente, num aumento de aproximadamente 25%. Nota-se que o aumento de resistência foi proporcional ao aumento da espessura.

Ao se analisar a introdução do geotêxtil na geomembrana de PVC, obteve-se uma resistência à punção de 844 N ($\Delta F_p \cong 160\%$) na geomembrana de 1,0 mm; enquanto na geomembrana de 2,0 mm, o valor obtido foi de 1000 N ($\Delta F_p \cong 66\%$). Na geomembrana de PEAD com proteção de GT PET 300 g/m² foram obtidas resistências à punção de 1016 N ($\Delta F_p \cong 60\%$) e 1165 N ($\Delta F_p \cong 45\%$) para geomembranas de 1,5 mm e 2,0 mm, respectivamente. Em geral, verifica-se que quanto maior a espessura da geomembrana (e), menor o acréscimo de resistência à punção com a introdução do geotêxtil (ΔF_p), comportamento este mais evidenciado na geomembrana de PVC.

A Figura 66a correlaciona a força de tração e a espessura das geomembranas de PVC e PEAD, enquanto a Figura 66b mostra a correlação entre a espessura da geomembrana e o parâmetro δ .

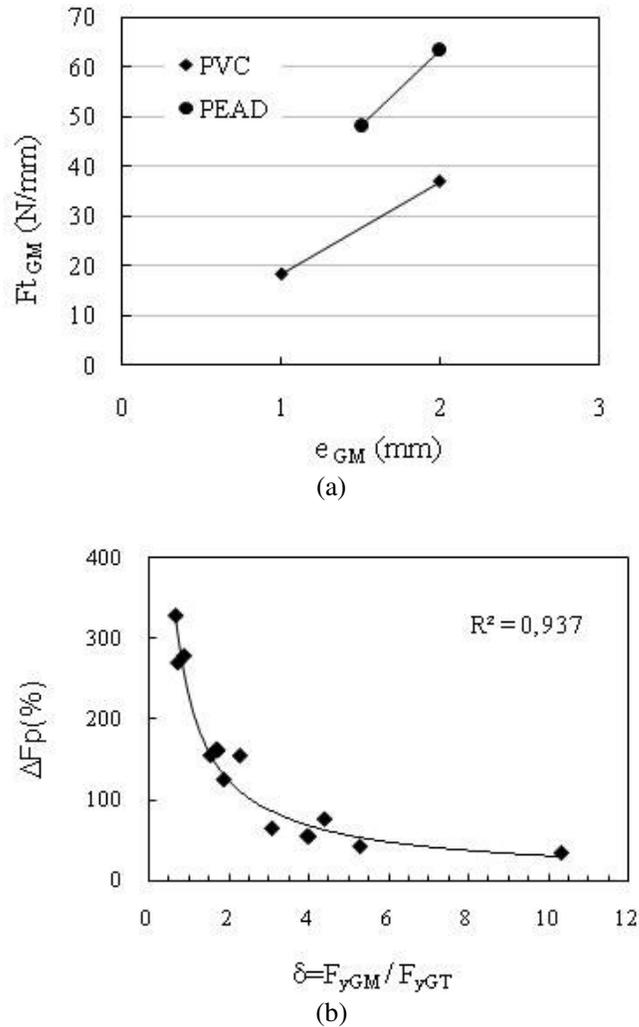


Figura 66. Influência da espessura - sistema GT/GM, GT PET 300 g/m².

Analisando-se as propriedades de tração das geomembranas (Figura 66a), verifica-se que a espessura da geomembrana é diretamente proporcional a resistência à tração da geomembrana. Deste modo, verifica-se que a espessura da geomembrana está diretamente relacionada ao parâmetro δ e, conseqüentemente ao valor de ΔF_p .

No caso das geomembranas de PVC com geotêxtil, ao se aumentar a espessura de 1,0 mm para 2,0 mm obteve-se um aumento de δ de 1,5 para 3,1. Concomitantemente, o acréscimo de resistência à punção com a introdução do geotêxtil passou de 160% para 65%. Nas geomembranas de PEAD, o valor, o valor de δ aumentou de 4,0 para 5,3 ao se aumentar a espessura de 1,5 mm para 2,0 mm; enquanto o valor de ΔF_p passou de 60% para 45%.

A Figura 66b corrobora a constatação acima. Observa-se, nas geomembranas de PVC, uma elevada redução no valor do ΔF_p com o aumento da espessura; enquanto as geomembranas de PEAD apresentaram uma menor redução no valor de ΔF_p .

Em síntese, os resultados apresentados indicam que a variação da composição polimérica e da espessura da geomembrana pode ser expressa em termos de resistência à tração na ruptura (F_{yGM}) no comportamento de geotêxteis como elemento de proteção. Além disto, verifica-se que a variação do tipo e da gramatura do geotêxtil pode ser expressa em termos de sua resistência à tração (F_{yGT}).

A Figura 67 apresenta os resultados dos ensaios realizados com geomembranas de PVC e PEAD com geotêxteis de PET e PP, dispostos em diferentes configurações: geotêxtil sobre geomembrana (GT/GM), geomembrana sobre geotêxtil (GM/GT) e geotêxtil / geomembrana / geotêxtil (GT/GM/GT), respectivamente. Tais resultados são expressos em função do parâmetro δ *versus* acréscimo de resistência à punção (ΔF_p). As curvas forças *versus* deslocamento seguem as feições típicas mostradas nas Figuras 54 a 59 e também serão omitidas na discussão que se segue.

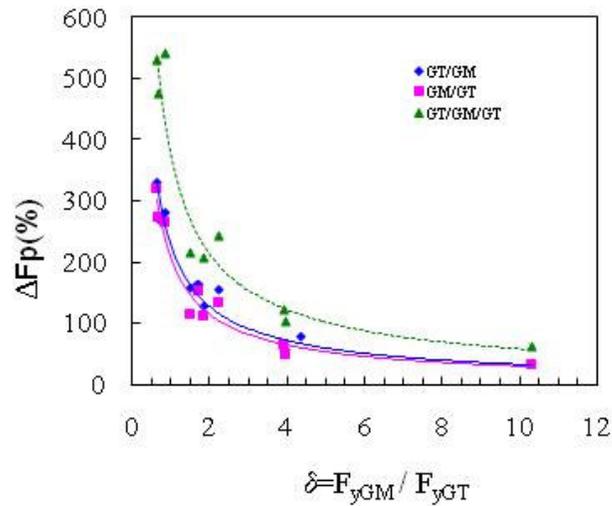


Figura 67. Efeito da disposição dos geotêxteis na resistência à punção do sistema.

Os resultados mostram que todas as formas de disposição contribuíram para aumentar a força de punção para a geomembrana. Verificou-se, nos diferentes tipos de geomembranas geotêxteis utilizados, que o sistema geotêxtil sobre geomembrana (GT/GM) apresentou força de punção ligeiramente maior do que o sistema geomembrana sobre geotêxtil (GM/GT). Conforme se esperava o sistema duplo de geotêxteis (GT/GM/GT) apresentou o melhor desempenho com elevados valores de força de punção.

Na Figuras abaixo são apresentados os resultados dos ensaios realizados apoiados sobre uma base de solo argiloso compactado com GC 95% ($\rho_d=1,510 \text{ g/m}^3$) e umidade ótima ($w=17,0\%$). Tais resultados se referem ao sistema GT/GM, com geotêxtil de PET 300 g/m^2 .

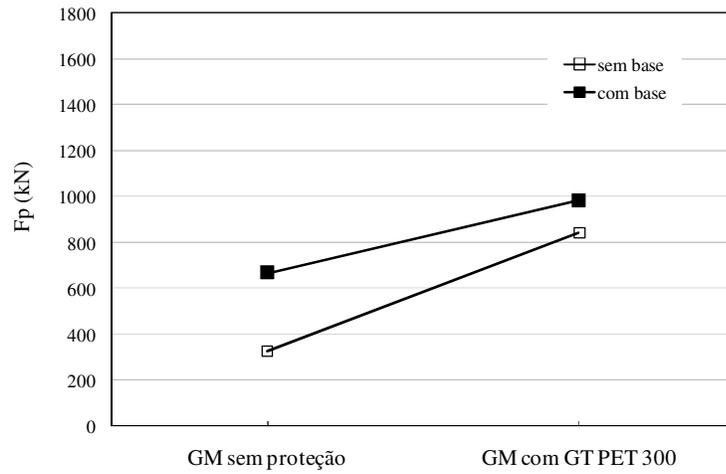


Figura 68. Análise do efeito da introdução de base de solo compactado: GMs de PVC.

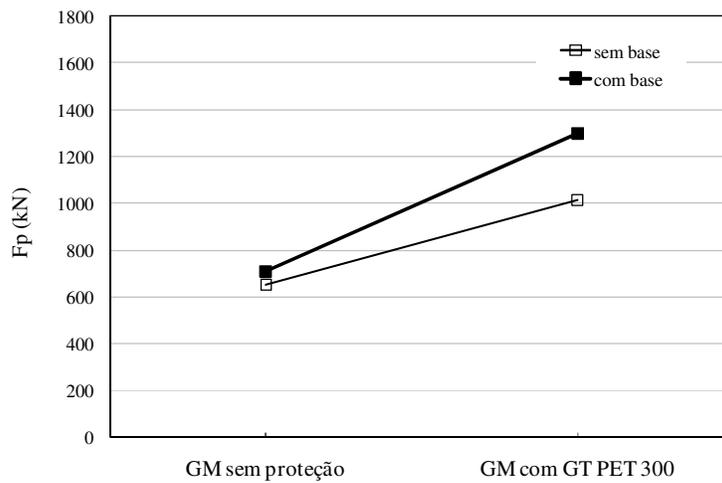


Figura 69. Análise do efeito da introdução de base de solo compactado: GMs de PEAD.

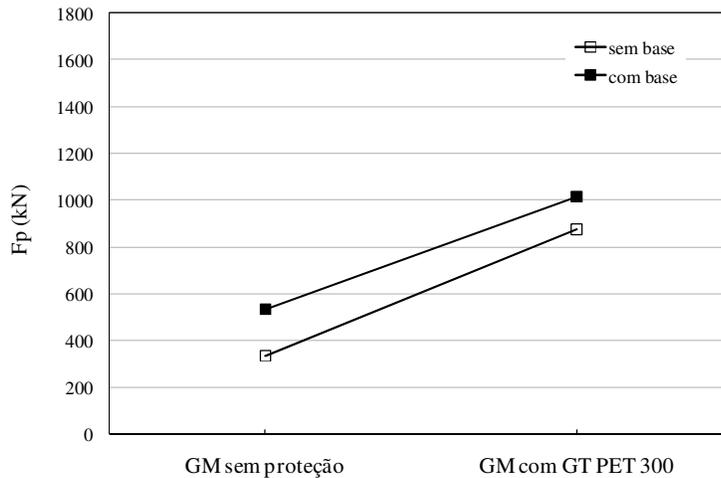


Figura 70. Análise do efeito da introdução de base de solo compactado: GMs de PELMD.

As geomembranas de PVC sem proteção mostraram um aumento de 100% na força de punção (ΔF_p) pela presença da base de solo compactado. Com a introdução do geotêxtil de PET 300 g/m², obteve-se um acréscimo de ΔF_p em torno de 160% nos ensaios realizados sem base de solo compactado e, 47% nos ensaios realizados com base de solo compactado.

As geomembranas de PEAD sem proteção apresentaram um aumento de apenas 10% na força de punção devido à base de solo compactado. Com a introdução de geotêxtil de PET, obteve-se um acréscimo de ΔF_p em torno de 56% nos ensaios realizados sem base de solo compactado e, 83% nos ensaios realizados com base de solo compactado.

As geomembranas de PELMD sem proteção apresentaram um aumento de aproximadamente 60% na força de punção devido à base de solo compactado. Com a introdução de geotêxtil de PET, ao acréscimo de ΔF_p obtido nos ensaios sem base de solo compactado foi de 160%; enquanto nos ensaios com base de solo compactado o acréscimo foi 90%.

4.1.1.2. Ensaios Dinâmicos

As Figuras abaixo mostram os resultados dos ensaios dinâmicos (queda do cone) realizados nas geomembranas de PVC (1,0 mm), PEAD (1,5 mm) e PELMD (1,25 mm), respectivamente, com geotêxteis de PET e PP como elemento de proteção, referentes ao sistema GTGM. Nestas figuras ϕ_p e Gr representam o diâmetro de perfuração na geomembrana e a gramatura do geotêxtil empregado, respectivamente.

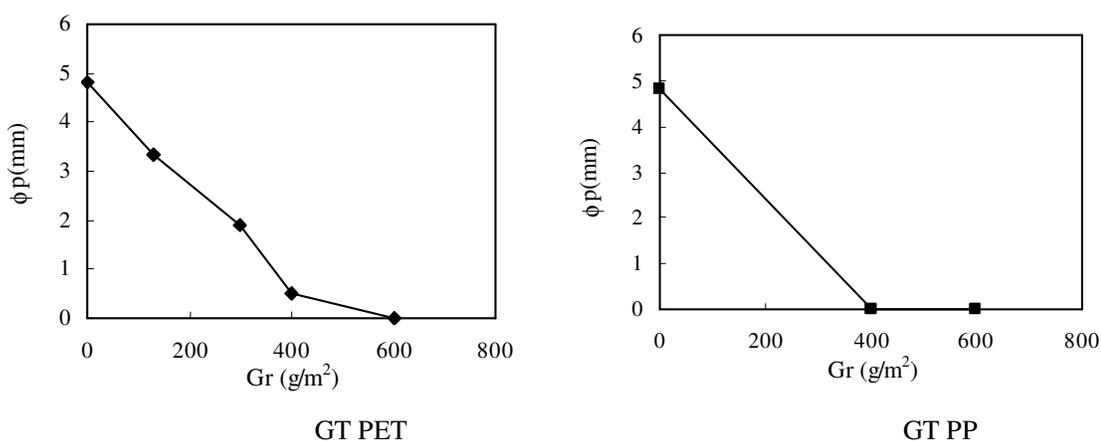


Figura 71. Resultados obtidos no ensaio de punção dinâmica - geomembrana de PVC, 1,0 mm - GT/GM.

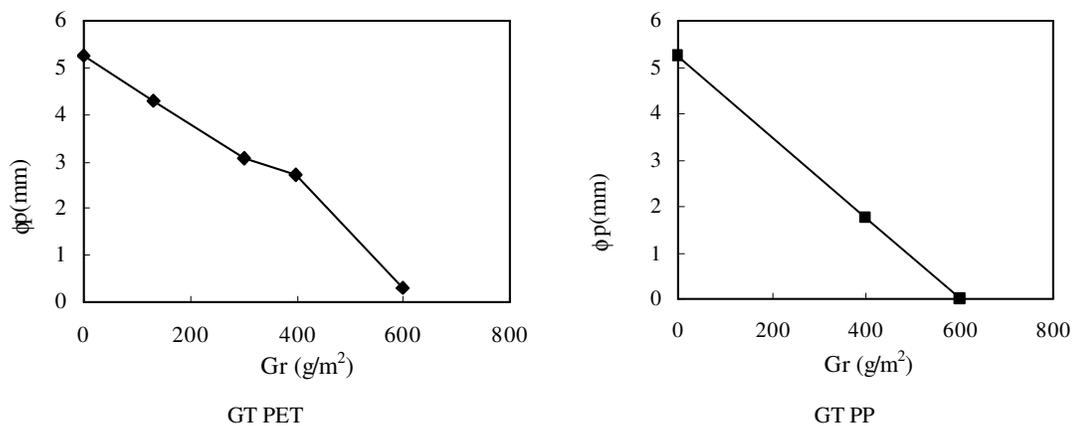


Figura 72. Resultados obtidos no ensaio de punção dinâmica - geomembrana de PEAD, 1,5 mm - GT/GM.

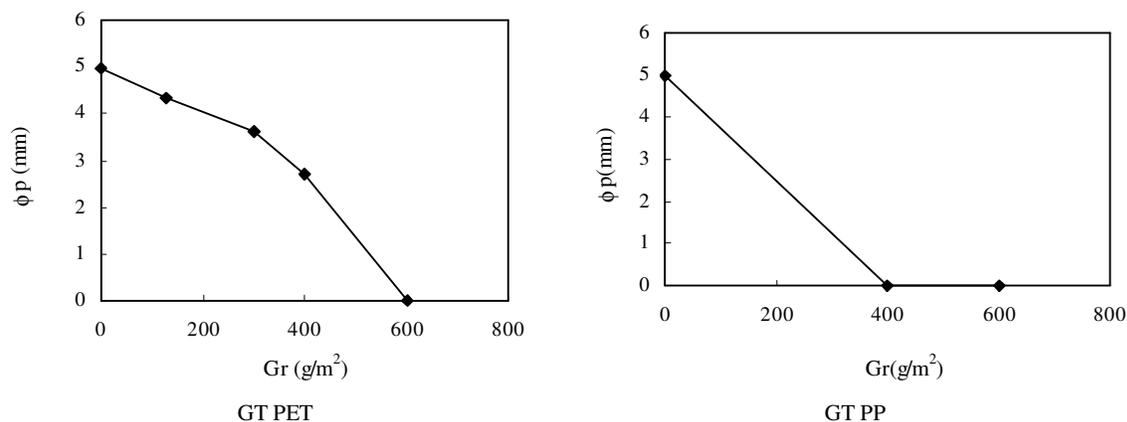
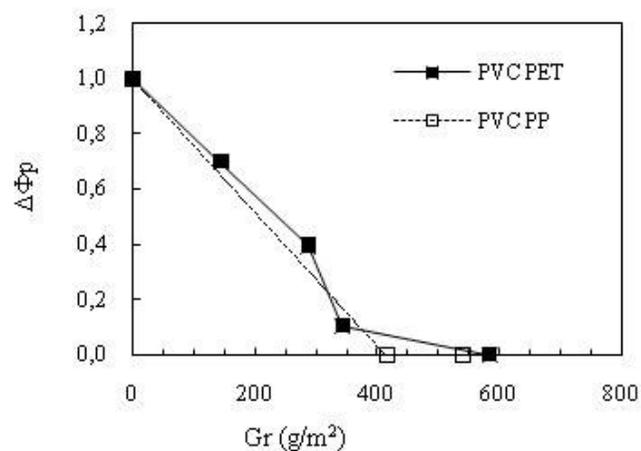


Figura 73. Resultados obtidos no ensaio de punção dinâmica - geomembrana de PELMD, 1,25 mm - GT/GM.

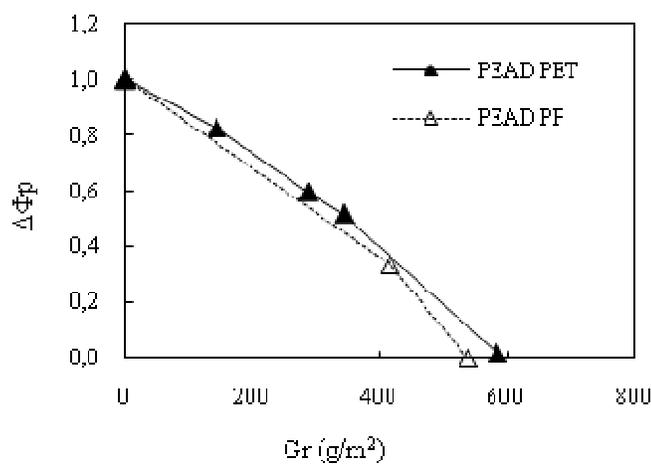
Os resultados apresentados mostram que todas as geomembranas sem proteção apresentaram um diâmetro de perfuração da ordem de 5 mm. Constatou-se que a introdução do geotêxtil diminuiu o diâmetro de perfuração em todas as geomembranas. Também se constatou que quanto maior a gramatura do geotêxtil, menor o diâmetro de perfuração na geomembrana.

Verificou-se que apenas os ensaios realizados com geotêxtil de PET de gramatura de 600g/m² não apresentaram furos nas geomembranas de PVC e PELMD. No caso da geomembrana de PEAD, nenhum geotêxtil de PET foi capaz de garantir a integridade da geomembrana. A mesma tendência de diminuição do diâmetro de perfuração com o aumento da gramatura foi observado com os geotêxteis de PP.

Na Figura 74 são apresentados os gráficos comparativos dos ensaios dinâmicos realizados com geomembrana de PVC (1,0mm) e PEAD (1,5mm), respectivamente, e geotêxteis de PET e PP com diferentes gramaturas. Nesta figuras, $\Delta\phi_p$ corresponde à relação entre o diâmetro perfurado no conjunto geotêxtil/geomembrana e o diâmetro perfurado na geomembrana e, **Gr** corresponde à gramatura do geotêxtil utilizado.



(a)



(b)

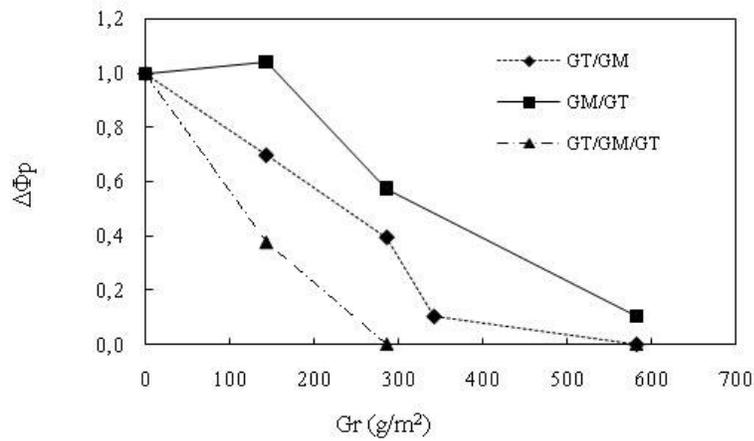
Figura 74. Efeito do polímero nas geomembranas de PVC (1,0mm) e PEAD (1,5mm).

Analisando-se a Figura 74a, verificou-se, no caso da geomembrana de PVC, que o geotêxtil de PP 400 g/m² apresentou melhor desempenho do que o geotêxtil de PET de mesma gramatura, não sendo constatado nenhum furo na geomembrana. Ao se comparar a gramatura de 600 g/m², ambas as variações de geotêxteis foram capazes de prevenir furos na geomembrana.

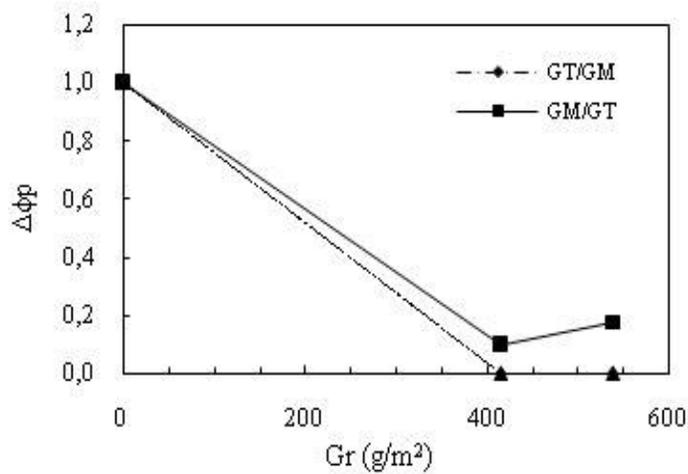
Para a geomembrana de PEAD, verificou-se que os geotêxteis de PP apresentaram melhor desempenho do que os geotêxteis de PET para ambas as gramaturas, constatando-se

menores diâmetros de perfuração. No entanto, salienta-se a existência de furos, excetuando-se as configurações com PET e PP de 600 g/m².

Na Figura 75, Figura 76 e Figura 77 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com geomembranas de PVC (1,0mm), PEAD (1,5mm) e PELMD (1,25mm) e geotêxteis de PET e PP dispostos em diferentes configurações: GT/GM, GM/GT e GT/GM/GT.

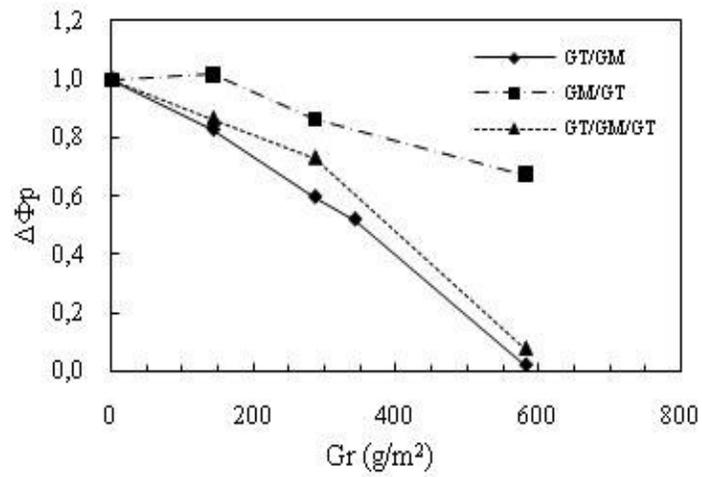


(a) PET

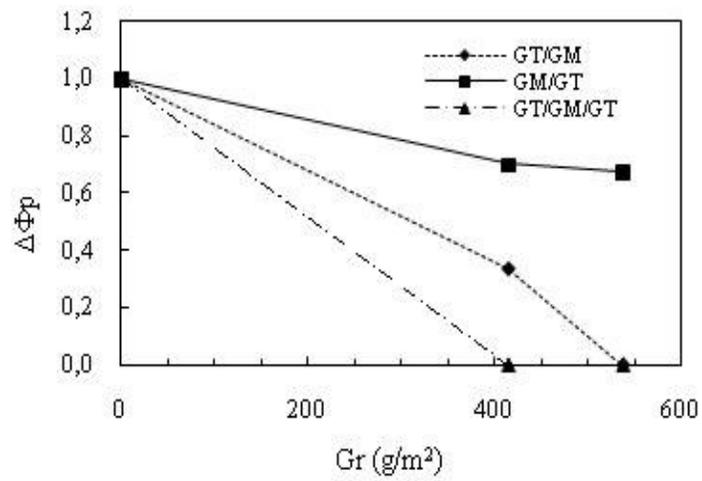


(b) PP

Figura 75. Análise dos ensaios realizados com geomembrana de PVC, 1,0mm: efeito da disposição.



(a) PET



(b) PP

Figura 76. Análise dos ensaios realizados com geomembrana de PEAD, 1,5mm: efeito da disposição.

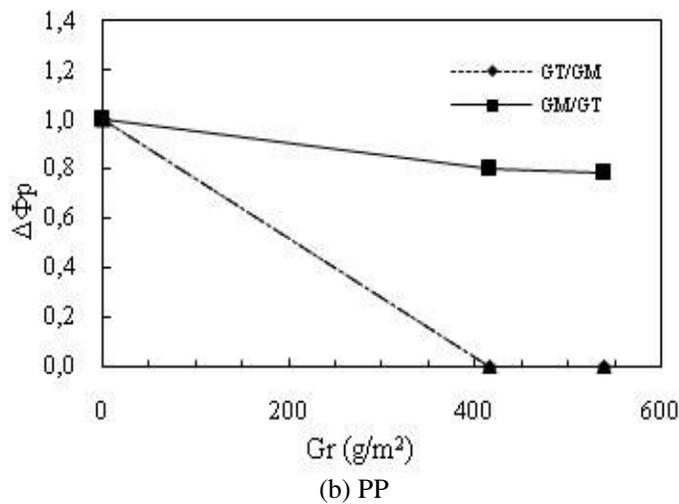
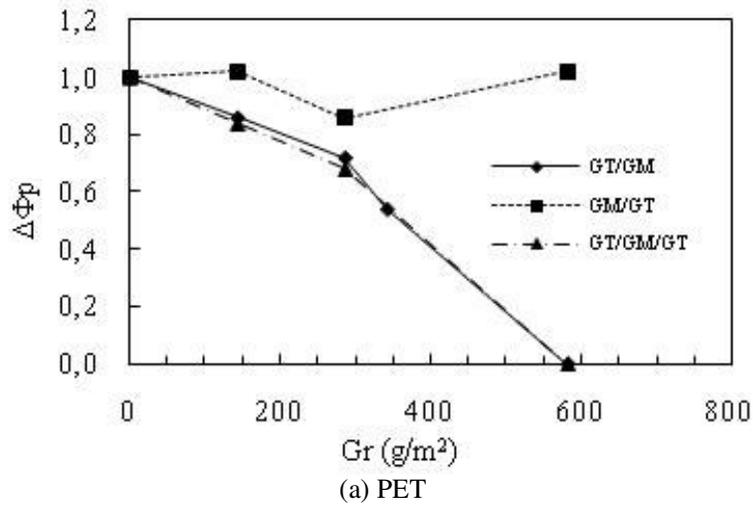


Figura 77. Análise dos ensaios realizados com geomembrana de PELMD, 1,25mm: efeito da disposição.

Em geral, os resultados mostram que os sistemas GT/GM e GT/GM/GT apresentaram menores diâmetros de perfuração na geomembrana. Apesar do sistema GM/GT ter diminuído os diâmetros de perfuração, em nenhuma situação foi capaz de impedir furos na geomembrana.

Observou-se nas geomembranas de PVC que o sistema composto GT/GM/GT foi o que apresentou melhor desempenho nos ensaios realizados com geotêxtil de PET. Nos ensaios realizados com geotêxtil de PP, ambos os sistemas GT/GM e GT/GM/GT apresentaram comportamento similar.

No caso das geomembranas de PEAD e PELMD, notou-se que os sistemas GT/GM e GT/GM/GT apresentaram desempenho semelhante. Observou-se também que a geomembrana de PEAD parece ser mais sensível a este tipo de solicitação, sendo constatada a presença de furos mesmo nas geomembranas protegidas com geotêxtil e com sistema duplo de proteção.

Na Figura 78 é apresentado um gráfico comparativo do diâmetro de perfuração para geomembranas de PVC (1,0 mm) e PEAD (1,5 mm) com geotêxteis de PET (300 g/m²), apoiados sob uma base de solo argiloso compactado com GC 95% ($\gamma_d=1,510$ g/m³) e umidade ótima ($w=15,0\%$).

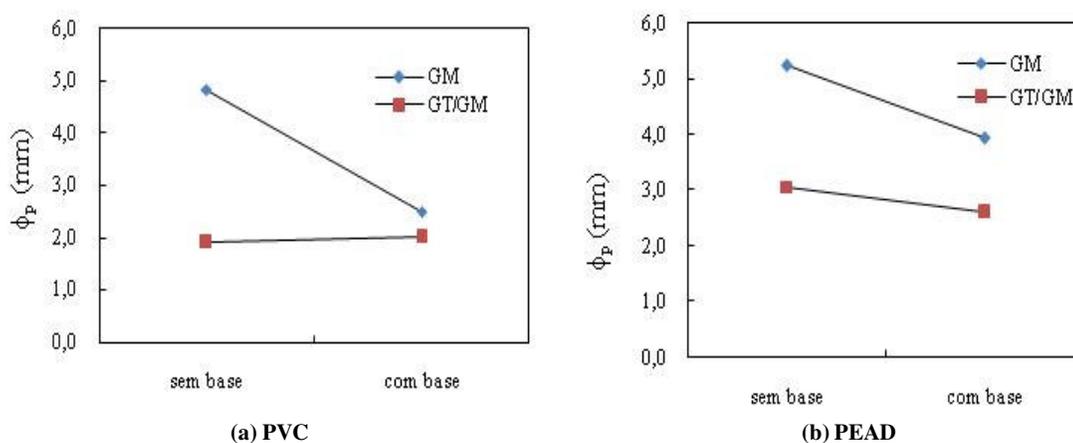


Figura 78. Influência da camada de solo compactado - GT PET 300g/m².

Na geomembrana de PVC sem proteção, a introdução da base de solo compactado diminuiu o diâmetro de perfuração em torno de 50%. Na geomembrana com GT PET 300g/m², o diâmetro de perfuração se manteve o mesmo ao se introduzir a base de solo compactado.

No caso da geomembrana de PEAD também foi verificada uma diminuição no diâmetro de perfuração com a introdução da base de solo compactado nos ensaios com e sem proteção. Constata-se, desta forma, que a introdução de uma base de solo compactado não influenciou no comportamento dinâmico em ensaios realizados com geotêxteis.

4.1.2. Ensaios de Desempenho: Danos de Instalação

4.1.2.1. Geomembranas de PEAD

A Figura 79 mostra a superfície das geomembranas de PEAD de 1,5 mm antes e após submetida a carregamento dinâmico e sob diferentes solicitações.



(a) GM virgem



(b) GM sem proteção 200 kPa, 200 ciclos



(c) GM sem proteção 400 kPa, 200 ciclos



(d) GM com GTPET 600 200 kPa, 1000 ciclos

Figura 79. Vista da superfície da geomembrana de PEAD (1,5 mm).

Em todas as configurações foram verificados arranhões nas superfícies das geomembranas depois de submetidas ao carregamento dinâmico. Até mesmo nos ensaios com geotêxtil de proteção foram verificados os mesmos danos, porém em menor quantidade.

Também não foram observados furos, indentações ou rasgos visíveis nas geomembranas devido a esta solicitação.

As Figuras abaixo apresentam os resultados dos ensaios mecânicos (punção, tração e rasgo) realizados na geomembrana de PEAD (1,5 mm) sem proteção, depois de submetidas ao carregamento dinâmico. Os ensaios incluem as geomembranas virgens e as geomembranas após ensaio de danos, sob diferentes cargas e número de ciclos. A Tabela 30 e a Tabela 31 apresentam o sumário dos resultados dos ensaios.

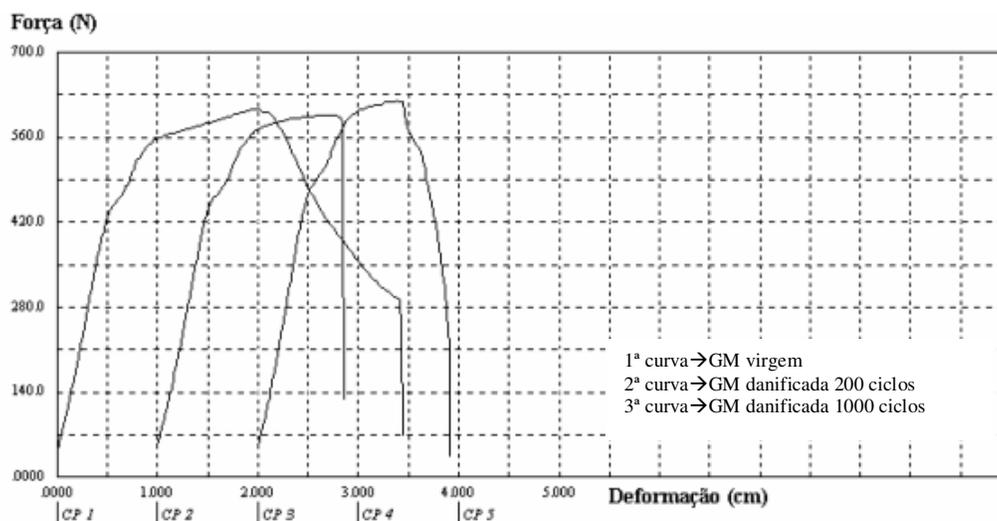


Figura 80. Curvas obtidas nos ensaios de punção para geomembrana de PEAD – carga de 200 kPa.

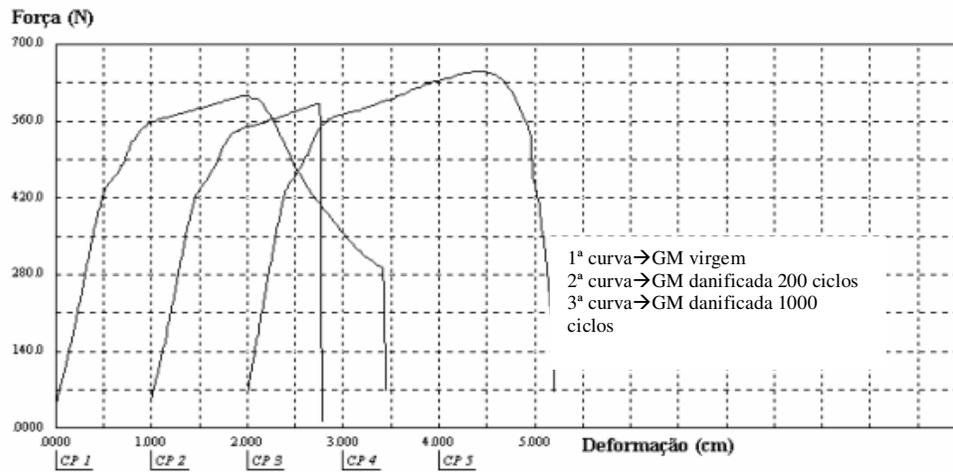


Figura 81. Curvas obtidas nos ensaios de punção para geomembrana de PEAD – carga de 400 kPa.

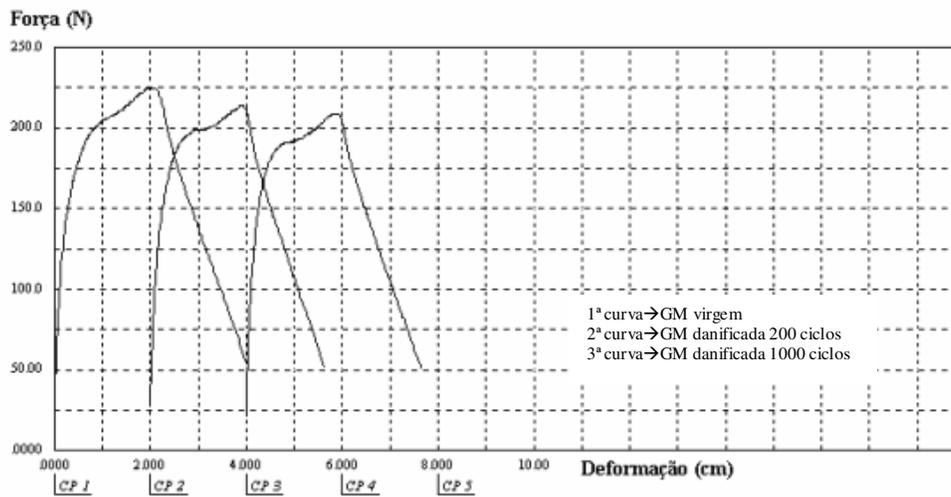


Figura 82. Curvas obtidas nos ensaios de rasgo para geomembrana de PEAD – carga de 200 kPa.

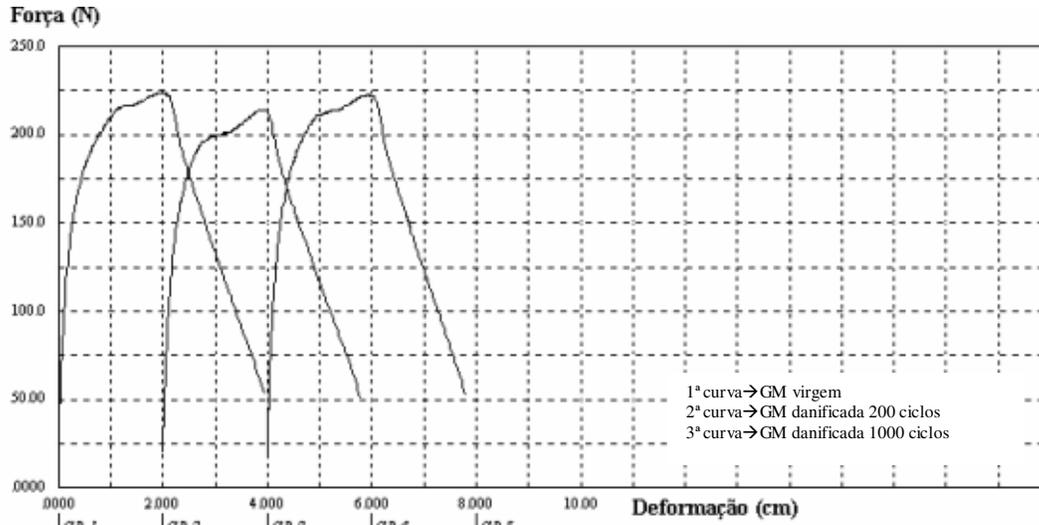


Figura 83. Curvas obtidas nos ensaios de rasgo para geomembrana de PEAD – carga de 400 kPa.

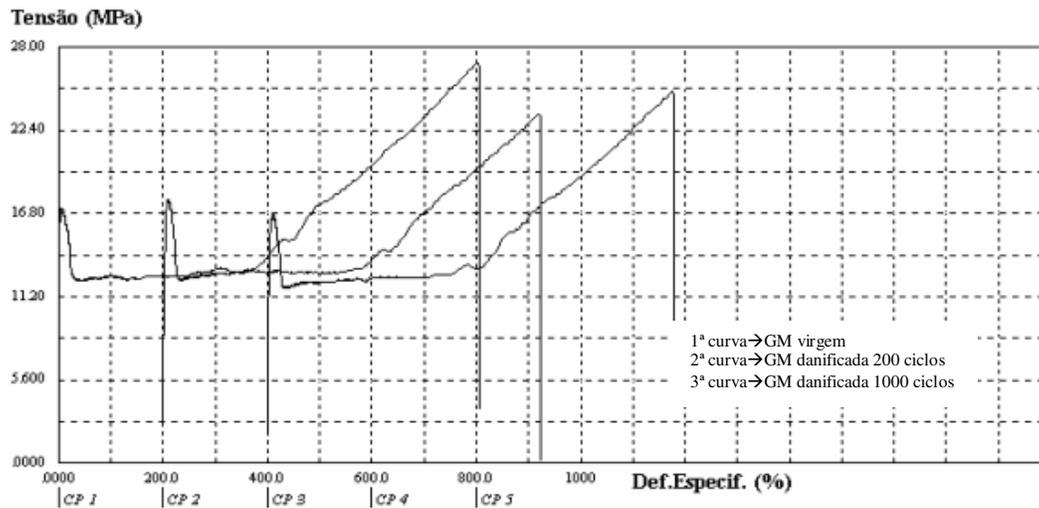


Figura 84. Curvas obtidas nos ensaios de tração para geomembrana de PEAD – carga de 200 kPa.

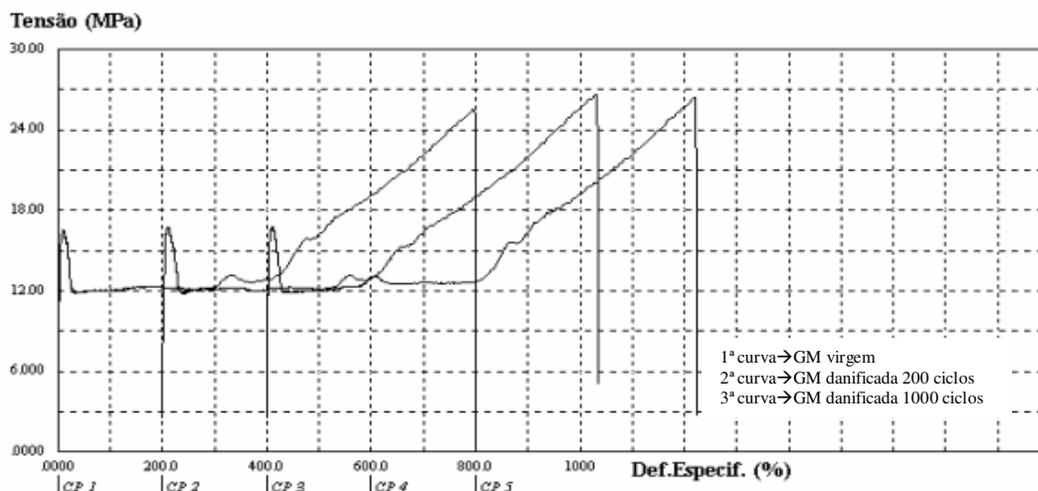


Figura 85. Curvas obtidas nos ensaios de tração para geomembrana de PEAD – carga de 400 kPa.

Tabela 30. Resultados dos ensaios mecânicos pós-dano - GM PEAD (1,5 mm) sem proteção.

Condição	Tensão (kPa)	Ciclos	Punção				Rasgo	
			F N	ΔF	δ mm	$\Delta\delta$	F N	ΔF
GM virgem	-	-	633		21		236	
GM sem proteção	200	200	611	0,97	19	0,90	218	0,92
	200	1000	627	0,99	17	0,81	209	0,89
GM danificada sem proteção	400	200	600	0,94	19	0,90	235	1,00
	400	1000	650	1,03	24	1,14	221	0,94

Legenda: $\Delta \rightarrow$ relação entre a Propriedade da geomembrana danificada e a Propriedade da geomembrana virgem.

Tabela 31. Resultados dos ensaios mecânicos pós-dano - GM PEAD (1,5 mm) sem proteção.

Condição	Tensão (kPa)	Ciclos	Tração							
			Escoamento				Ruptura			
			σ MPa	$\Delta\sigma$	ϵ %	$\Delta\epsilon$	σ MPa	$\Delta\sigma$	ϵ %	$\Delta\epsilon$
GM virgem	-	-	19		17		34		840	
GM sem proteção	200	200	17	0,90	15	0,88	24	0,71	721	0,86
	200	1000	15	0,79	14	0,82	26	0,76	782	0,93
GM danificada sem proteção	400	200	18	0,94	15	0,88	26	0,76	772	0,92
	400	1000	16	0,84	14	0,82	26	0,76	815	0,97

Legenda: $\Delta \rightarrow$ relação entre a Propriedade da geomembrana danificada e a Propriedade da geomembrana virgem.

As geomembranas danificadas apresentaram uma redução na força e deslocamento de punção cerca de 5% e 10%, respectivamente, em relação às geomembranas virgens. A força ao rasgo nas geomembranas danificadas foi reduzida em torno 10% em relação à geomembrana virgem.

Os valores da tensão e deformação de tração nas geomembranas danificadas também foram menores do que na geomembrana virgem. Em termos de escoamento, as tensões nas geomembranas danificadas apresentaram uma redução em torno de 10 a 15% em relação às geomembranas virgens. Os deslocamentos no escoamento na geomembrana danificada apresentaram uma redução de 12% aproximadamente em relação à geomembrana virgem. Em termos de ruptura, verificou-se que a tensão de ruptura na geomembrana danificada apresentou uma redução de cerca de 30% em relação à geomembrana virgem, enquanto os deslocamentos na ruptura apresentaram uma redução de 10%.

Os resultados apresentados mostram uma pequena variação das propriedades mecânicas das geomembranas de PEAD submetidas a carregamentos cíclicos. A maior variação encontrada foi em termos de tensão de ruptura. Os resultados também indicam que a magnitude da carga e o número de ciclos aplicados não influenciaram nas propriedades mecânicas das geomembranas de PEAD.

As Figuras abaixo apresentam os resultados dos ensaios realizados nas geomembranas de PEAD submetidas a carregamentos cíclicos com proteção de geotêxtil de PET. Os ensaios se referem à carga de 200 kPa com 1.000 ciclos.

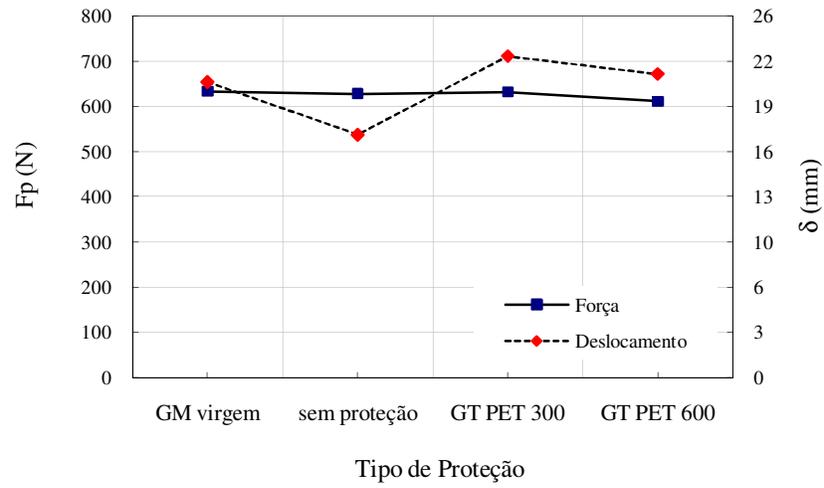


Figura 86. Resultados dos ensaios de punção realizados nas geomembranas de PEAD com proteção: ensaios cíclicos.

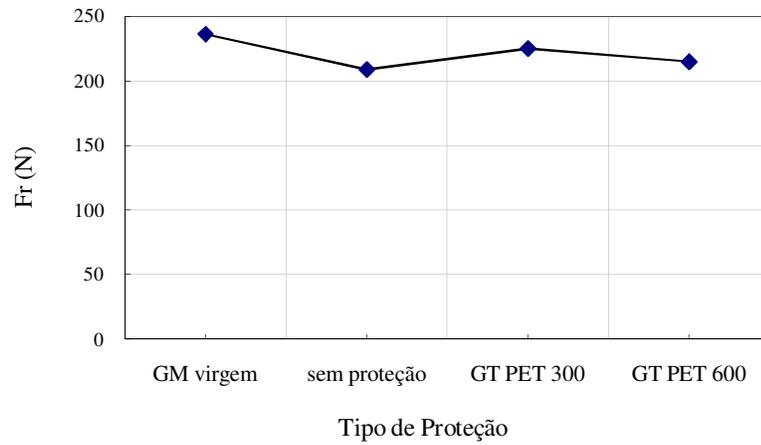


Figura 87. Resultados dos ensaios de rasgo realizados nas geomembranas de PEAD com proteção: ensaios cíclicos.

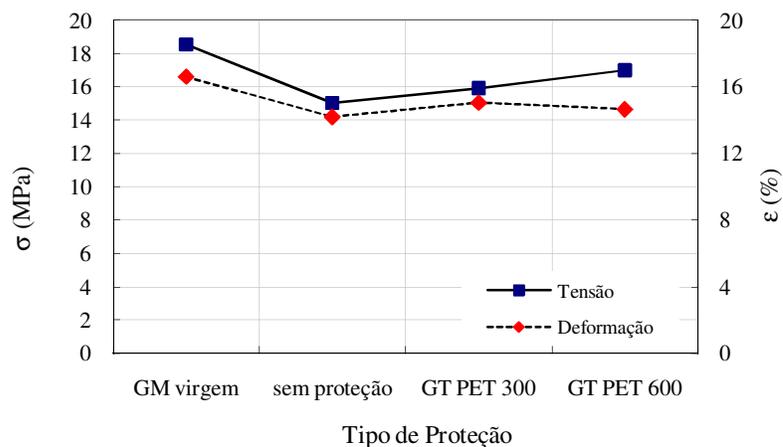


Figura 88. Resultados dos ensaios de tração realizados nas geomembranas de PEAD com proteção: ensaios cíclicos / valores no escoamento.

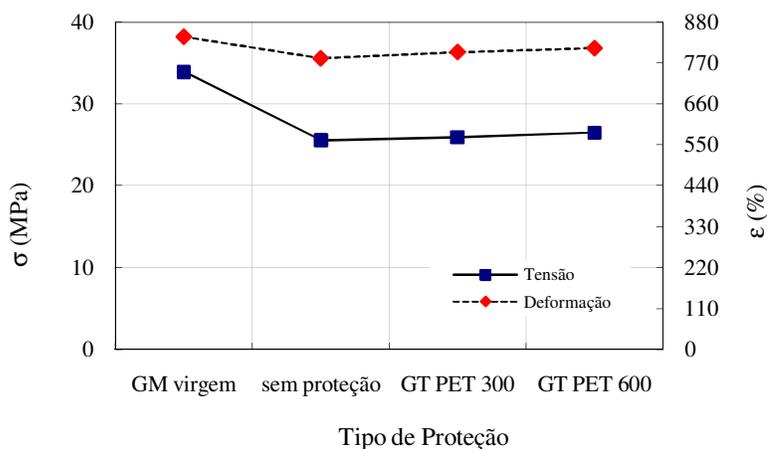


Figura 89. Resultados dos ensaios de tração realizados nas geomembranas de PEAD com proteção: ensaios cíclicos / valores na ruptura.

Ao contrário do que se esperava a introdução do geotêxtil não forneceu um aumento expressivo nas propriedades mecânicas das geomembranas de PEAD, tais como força de punção, rasgo e tensão de tração.

A Figura 90 apresenta os resultados dos ensaios de *stress cracking* realizados nas geomembranas de PEAD em condição virgem e depois de submetidas a carregamentos cíclicos em diferentes condições. Na Tabela 32 são apresentados os resultados dos ensaios.

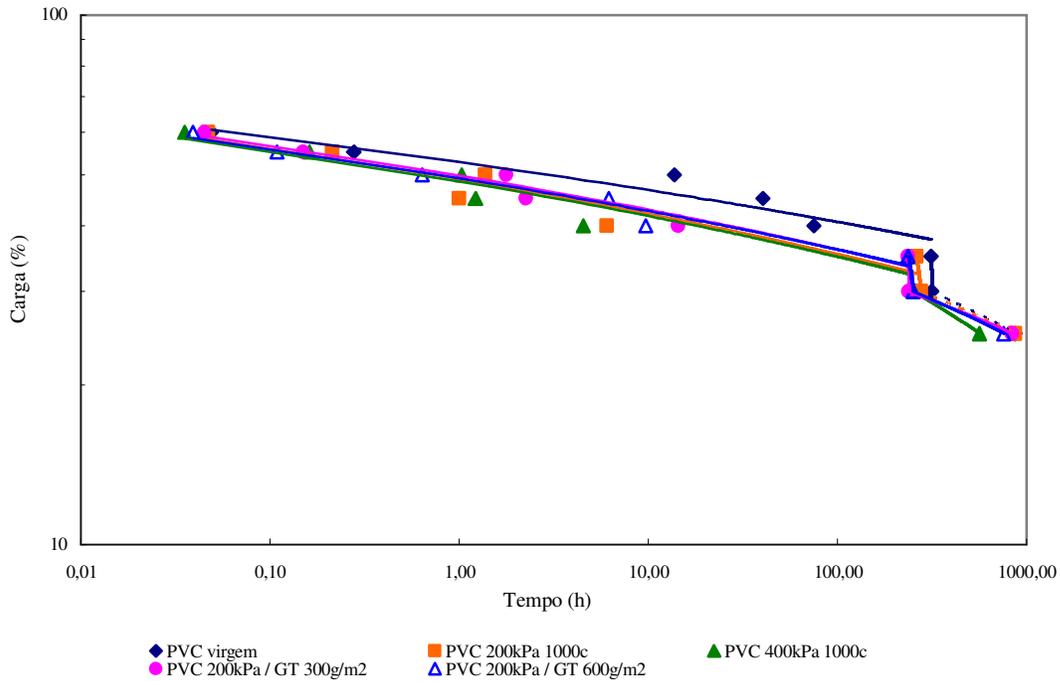


Figura 90. Curvas obtidas no ensaio de *stress cracking*: GM de PEAD 1,5 mm.

Tabela 32. Sumário dos resultados - *stress cracking*: geomembranas de PEAD, 1,5 mm de espessura.

Condição de Ensaio	T ruptura (horas)									T _t (horas)
	Carga (%)									
	65	60	55	50	45	40	35	30	25	
GM virgem	0,09	0,05	0,28	13,71	40,25	75,17	313,03	316,17	870	316,17
GM danificada sem proteção 200kPa 1000 ciclos	0,20	0,05	0,22	1,37	3,50	6,00	260,90	275,67	870	275,67
GM danificada sem proteção 400kPa 1000 ciclos	0,05	0,04	0,16	1,03	1,22	4,54	237,02	252,17	562	252,17
GM danificada com GT 300g/m ² 200kPa 1000 ciclos	0,07	0,05	0,15	1,77	2,25	14,4	236,9	235,65	837	235,65
GM danificada com GT 600g/m ² 200kPa 1000 ciclos	0,12	0,04	0,11	0,64	6,2	9,71	236,90	252,17	760	252,17

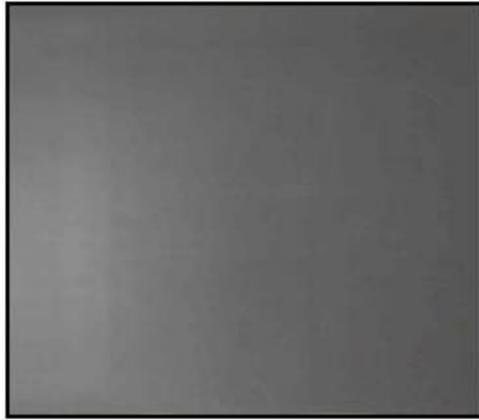
Verificou-se que todas as curvas apresentaram comportamento tipo degrau. O tempo de ruptura da geomembrana aumentou com a redução da carga aplicada até atingir a carga de 35%. Ao se aplicar a carga de 30%, constatou-se uma queda brusca da curva, formando-se o segundo trecho linear (degrau). Neste trecho, observa-se um pequeno aumento do tempo de ruptura com a diminuição da carga. A partir deste ponto, tem-se o terceiro trecho, onde baixos valores de carga forneceram elevados tempos de ruptura.

Comparando-se as geomembranas virgem e danificada, observa-se que para cargas mais altas, entre 65% e 55%, o tempo de ruptura das geomembranas danificadas com e sem proteção de geotêxtil foi semelhante ao obtido nas geomembranas virgens. Entre as cargas de 50% e 40%, observou-se que as geomembranas danificadas apresentaram uma redução do tempo de ruptura entre 80 a 90% em relação à geomembrana virgem. A partir da carga de 35%, constatou-se que a redução do tempo de ruptura nas geomembranas danificadas foi de aproximadamente 20% em relação em relação às geomembranas virgens.

Os resultados mostraram uma redução do tempo de transição (T_t) em torno de 20% nas geomembranas submetidas a carregamento cíclico. Observa-se ainda que a introdução do geotêxtil não aumentou o tempo de transição em relação à geomembrana danificada. No entanto, em todas as situações o tempo de transição foi superior ao valor mínimo recomendado de 100 horas, recomendado por Koerner *et al.*(1993).

4.1.2.2. Geomembranas de PVC

A Figura 91 mostra a superfície das geomembranas de PVC de 1,0 mm antes e após o carregamento dinâmico, sob diferentes solicitações.



(a) GM virgem



(b) GM sem proteção 200 kPa, 1000 ciclos



(c) GM sem proteção 400 kPa, 1000 ciclos

(d) GM com GT 300g/m² 200 kPa, 1000 ciclos(e) GM com GT 600g/m² 200 kPa, 1000 ciclos

Figura 91. Vista da superfície da geomembrana de PVC (1,0 mm).

Observa-se que, após o carregamento dinâmico, a superfície da geomembrana apresentou-se totalmente marcada pela brita. As marcas foram mais evidenciadas nos ensaios com maior carga e maior número de ciclos.

Ao se introduzir o geotêxtil, verificou-se uma redução bastante significativa nas ondulações. No geotêxtil de gramatura de 600 g/m^2 , nenhuma marca foi verificada na superfície após o carregamento.

Apesar dos efeitos verificados na superfície, em nenhuma solicitação constatou-se a presença de furos ou rasgos visíveis nas geomembranas de PVC.

As Figuras a seguir apresentam os resultados dos ensaios mecânicos (punção, tração e rasgo) realizados na geomembrana de PVC (1,0 mm) sem proteção, depois de submetidas ao carregamento dinâmico. Os ensaios incluem as geomembranas virgens e as geomembranas danificadas, sob diferentes cargas e número de ciclos. Na

Tabela 33 Tabela 33 é apresentado o sumário dos resultados dos ensaios.

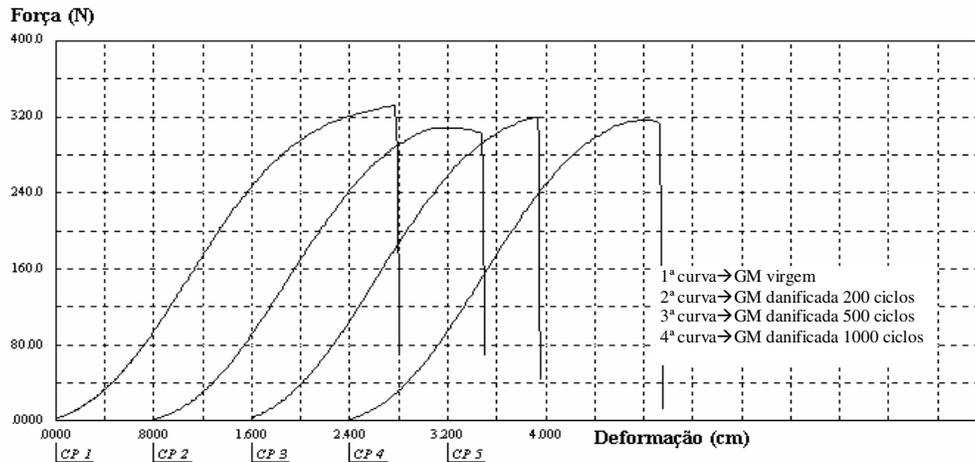


Figura 92. Curvas obtidas nos ensaios de punção para geomembrana de PVC – 200 kPa.

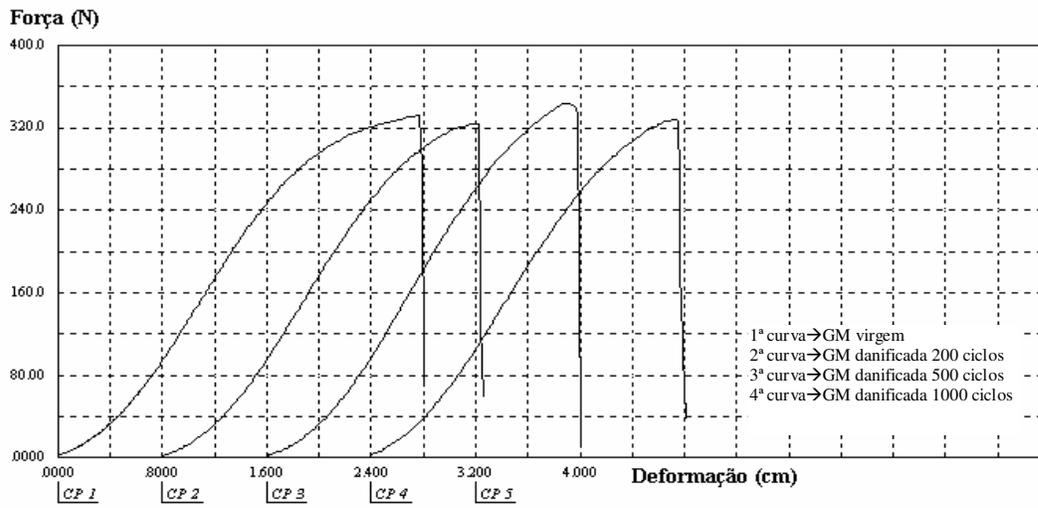


Figura 93. Curvas obtidas nos ensaios de punção para geomembrana de PVC – 400 kPa.

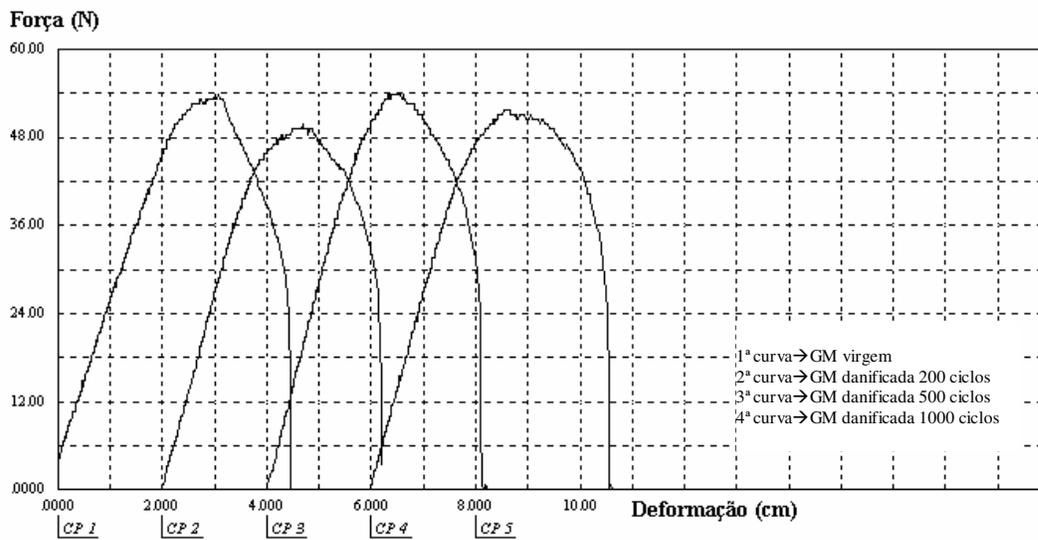


Figura 94. Curvas obtidas nos ensaios de rasgo para geomembrana de PVC – 200 kPa.

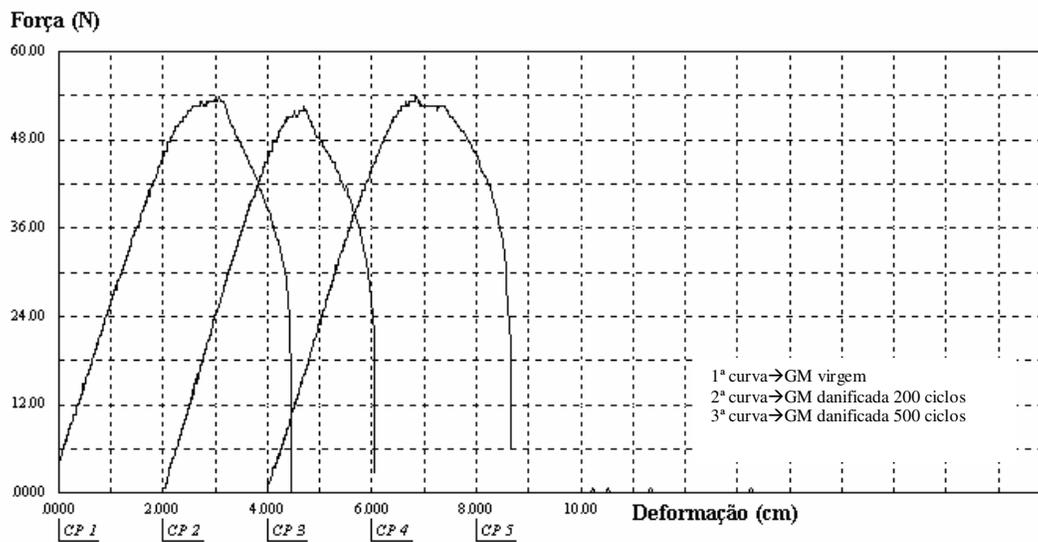


Figura 95. Curvas obtidas nos ensaios de rasgo para geomembrana de PVC – 400 kPa.

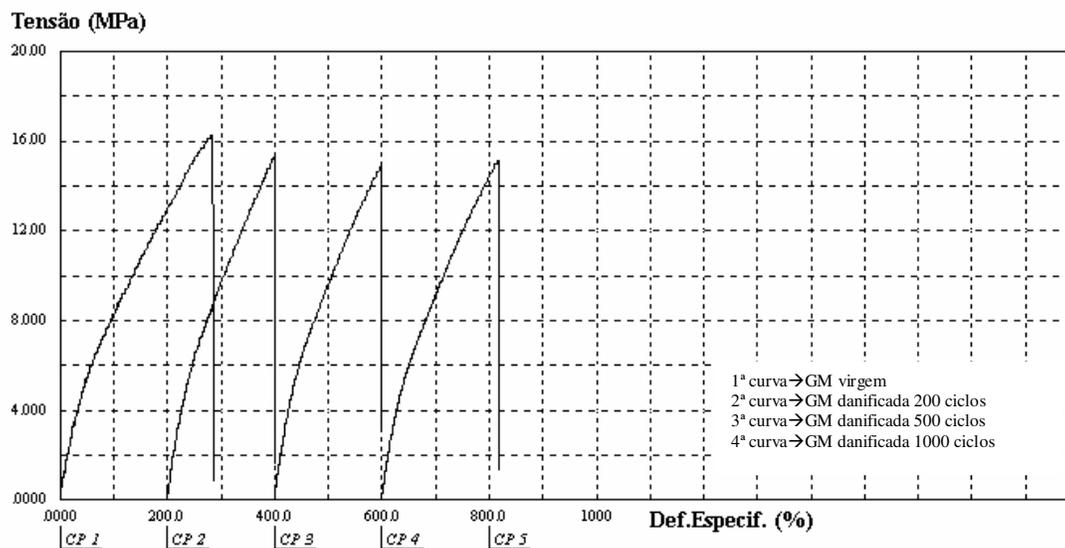


Figura 96. Curvas obtidas nos ensaios de tração para geomembrana de PVC – 200 kPa.

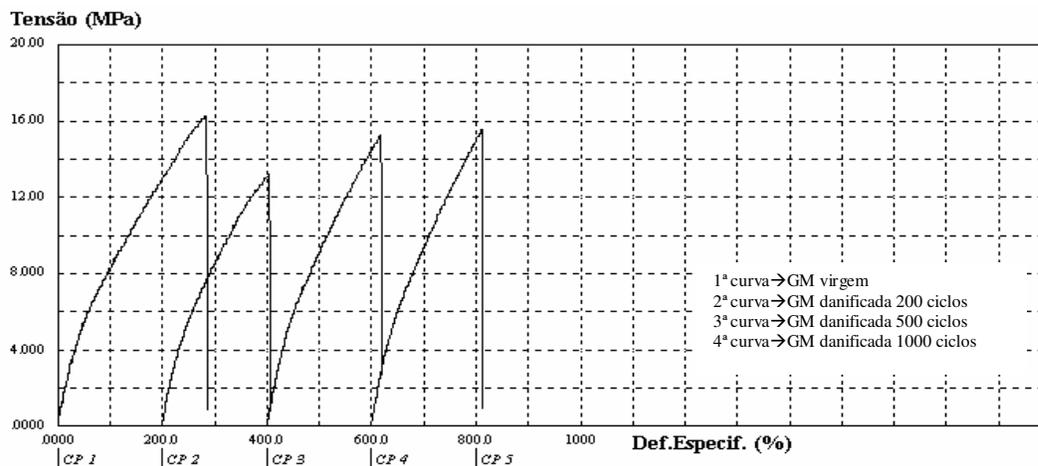


Figura 97. Curvas obtidas nos ensaios de tração para geomembrana de PVC – 400 kPa.

Tabela 33. Resultados dos ensaios mecânicos pós-dano - GM PVC (1,0 mm) sem proteção.

Condição	Tensão (kPa)	Ciclos	Punção				Rasgo		Tração Ruptura			
			F	ΔF	δ	$\Delta \delta$	F	ΔF	σ	$\Delta \sigma$	ϵ	$\Delta \epsilon$
			N		mm		N		MPa		%	
GM virgem	-	-	330		27		67		18		422	
GM sem proteção	200	200	309	0,94	24	0,89	50	0,75	16	0,89	207	0,49
	200	500	319	0,97	24	0,89	54	0,80	15	0,83	196	0,47
	200	1000	317	0,96	24	0,89	53	0,79	15	0,83	209	0,50
GM danificada sem proteção	400	200	325	0,98	24	0,89	53	0,79	14	0,78	209	0,50
			342	1,04	24	0,89	53	0,79	15	0,83	215	0,51
	400	1000	328	0,99	23	0,86	53	0,79	16	0,89	214	0,51

Legenda: Δ → relação entre a Propriedade da geomembrana danificada e a Propriedade da geomembrana virgem.

As geomembranas danificadas de PVC apresentaram uma redução na força e deslocamento de punção entre 5% e 10%, respectivamente, em relação às geomembranas virgens. A força ao rasgo nas geomembranas danificadas foi reduzida em torno de 10% em relação à geomembrana virgem. A força ao rasgo nas geomembranas danificadas apresentou uma redução de cerca de 20%. A tensão de ruptura na geomembrana danificada apresentou uma pequena redução, em torno de 10 a 15%, em relação à geomembrana virgem. O efeito

mais evidente foi verificado nos valores dos deslocamentos na ruptura, constatando-se uma diminuição de 50% em relação à geomembrana virgem.

Os resultados também indicam que a magnitude da carga e o número de ciclos aplicados não influenciaram nas propriedades mecânicas das geomembranas de PVC.

As Figuras abaixo apresentam os resultados dos ensaios realizados nas geomembranas PVC submetidas a carregamentos cíclicos com proteção de geotêxtil de PET. Tais resultados também se referem à carga de 200 kPa com 1.000 ciclos.

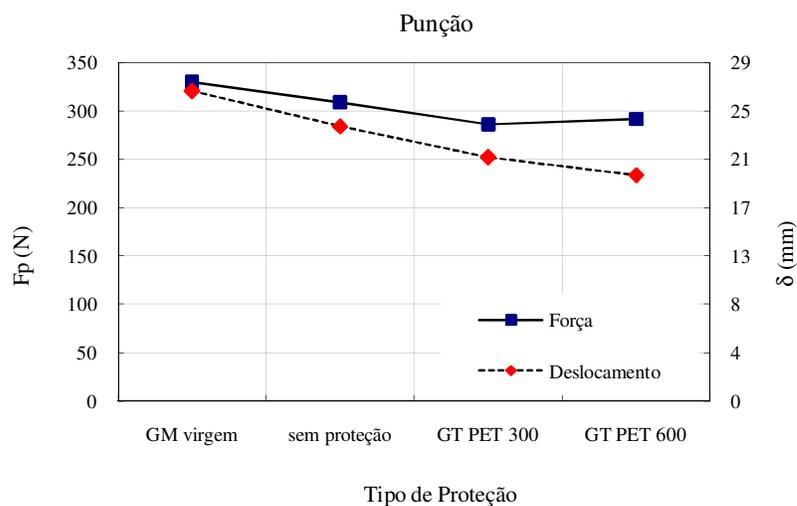


Figura 98. Resultados dos ensaios de punção realizados nas geomembranas de PVC sem proteção: ensaios cíclicos.

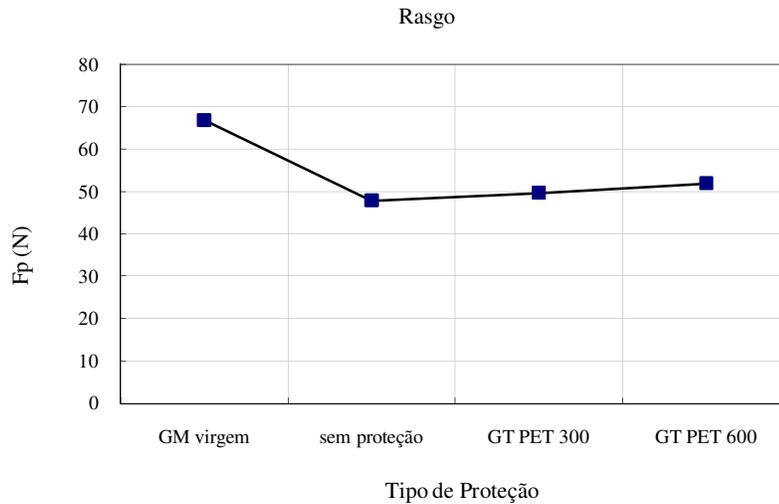


Figura 99. Resultados dos ensaios de rasgo realizados nas geomembranas de PVC sem proteção: ensaios cíclicos.

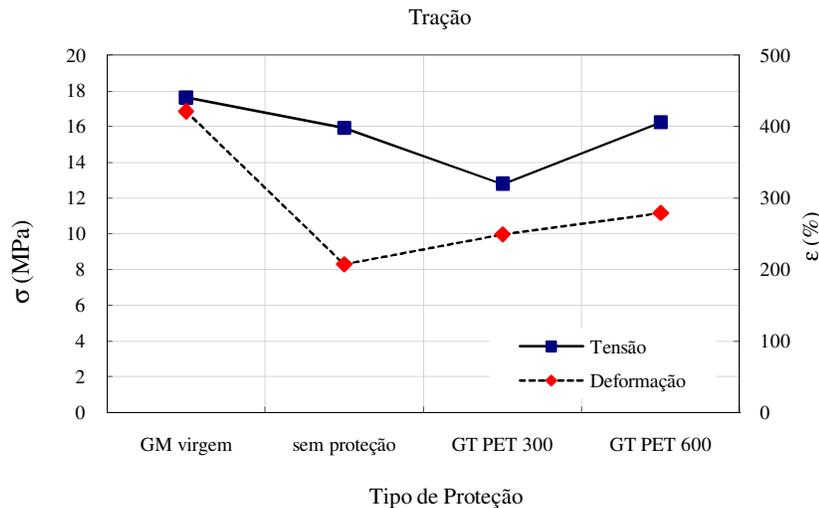


Figura 100. Resultados dos ensaios de tração realizados nas geomembranas de PVC sem proteção: ensaios cíclicos.

Os resultados mostram que a introdução do geotêxtil não aumentou os valores das propriedades mecânicas das geomembranas de PVC. Em algumas situações, tais como nos ensaios de punção, os valores chegam a ser ligeiramente menores do que na geomembrana sem proteção. No entanto, tal redução é pequena, da ordem de 10%. A maior variação foi

verificada em termos de deformação na ruptura. Constata-se um aumento da deformação com a introdução do geotêxtil e com o aumento de sua resistência à tração.

A Figura 101 apresenta os resultados dos ensaios de transmissividade ao vapor (WVT) realizados nas geomembranas de PVC, sob diferentes condições. A Tabela 34 apresenta alguns valores de permeabilidade por difusão ($\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}.\text{mmHG}^{-1}.\text{cm}$) e condutividade hidráulica (cm/s) recomendados por Koerner(1998) e Haxo Jr., H.E; Pierson, P. (1996).

Os valores de condutividade hidráulica obtidos nos ensaios de WVT variaram entre $1,3 \times 10^{-12} \text{ cm/s}$ e $2,4 \times 10^{-12} \text{ cm/s}$. A maior dispersão foi verificada na configuração com geomembrana danificada sem proteção e sob carga de 200 kPa e 200 ciclos.

Verifica-se que os valores condutividade hidráulica encontrados nos ensaios com amostras de geomembranas danificadas estão dentro dos valores de condutividade hidráulica sugeridos para geomembranas virgens, o que indica que as propriedades hidráulicas das geomembranas não foram afetadas pelo carregamento cíclico.

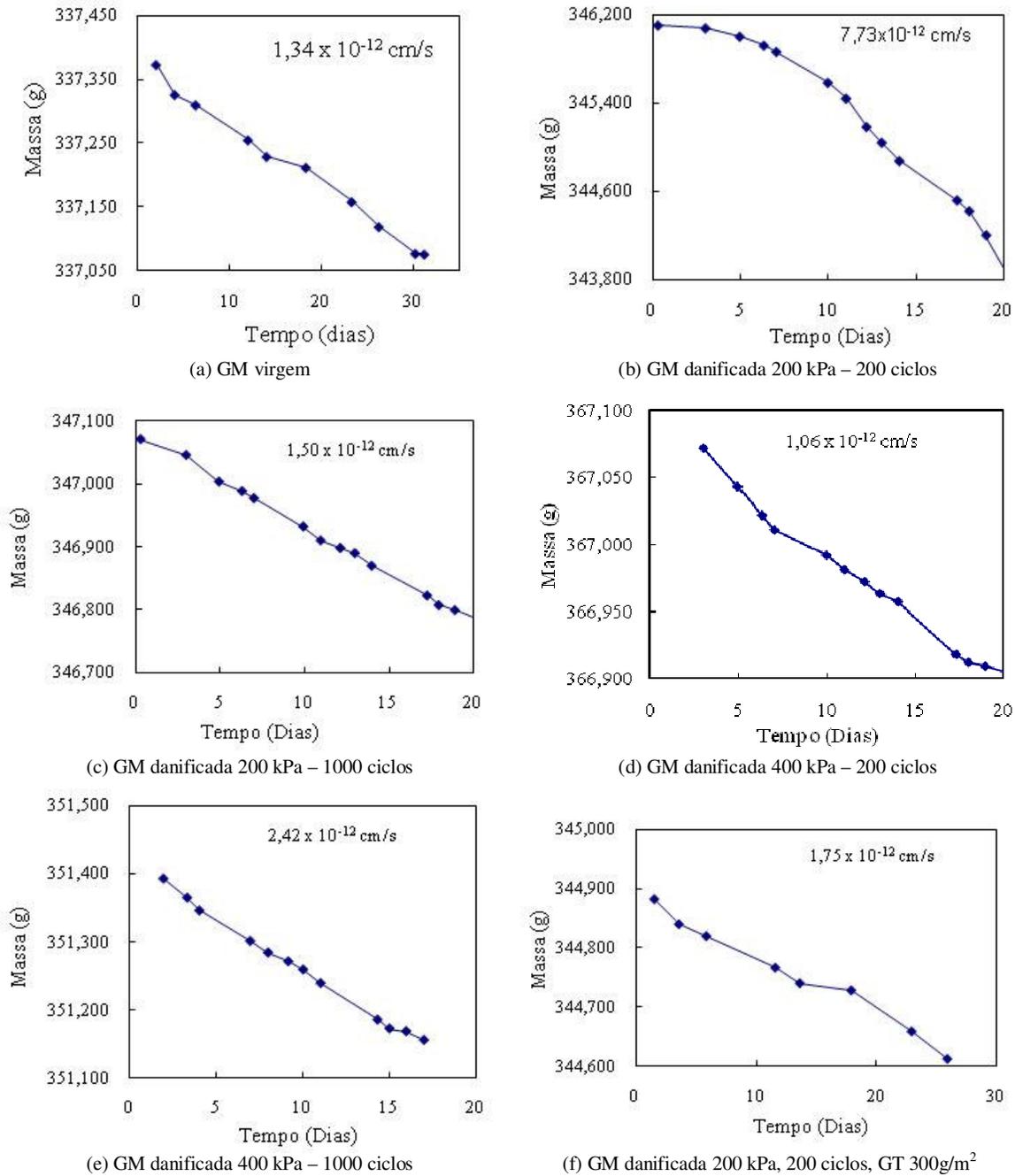


Figura 101. Resultados dos ensaios de transmissividade ao vapor (permeabilidade) em geomembranas de PVC.

Tabela 34. Valores de permeabilidade recomendados.

Geomembrana	Espessura (mm)	Permeabilidade		Faixa de valores recomendados	
		Permeância	Condutividade Hidráulica	Permeância	Condutividade Hidráulica
		(perm.cm)*	(cm/s)	(perm.cm)**	(cm/s) ***
	0,28	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,02 \times 10^{-11}$	-	
PVC	0,52	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,20 \times 10^{-11}$	-	$1,00 \times 10^{-10a-13}$
	0,76	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,10 \times 10^{-11}$	-	
PVC	0,91-0,97	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,78 \times 10^{-11}$ cm/s	$1,79 - 2,40 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-11}$ a $2,04 \times 10^{-11}$

* perm.cm= g.m².dia⁻¹.mmHG⁻¹.cm

** Haxo Jr, H.E; Pierson, P. (1996)

***Koerner (1998)

4.2. Ensaio de Campo

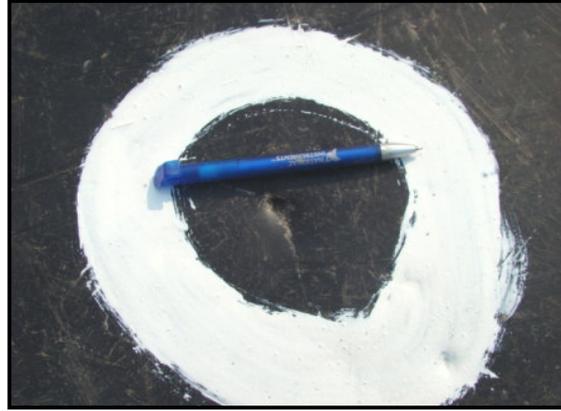
4.2.1. Geomembranas de PEAD

4.2.1.1. Análise Visual

As Figuras abaixo ilustram as superfícies das geomembranas de PEAD sob diferentes configurações, após retirada da camada de drenagem. Na Tabela 35 é apresentada uma síntese dos tipos de danos observados seguindo as recomendações propostas pelo CFG (2001).



arranhões



furos



entalhe

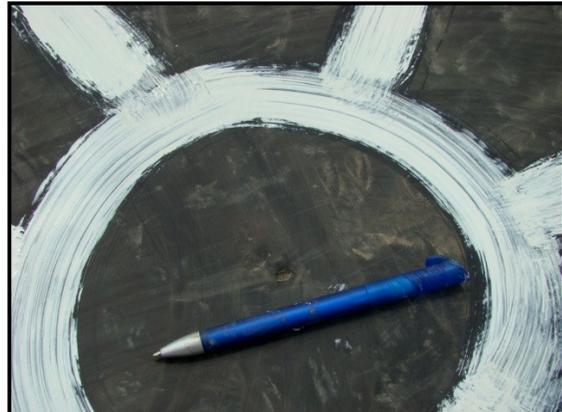


indentação

Figura 102. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção e brita 3.



arranhões



indentação

Figura 103. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 300 g/m² e brita 3.

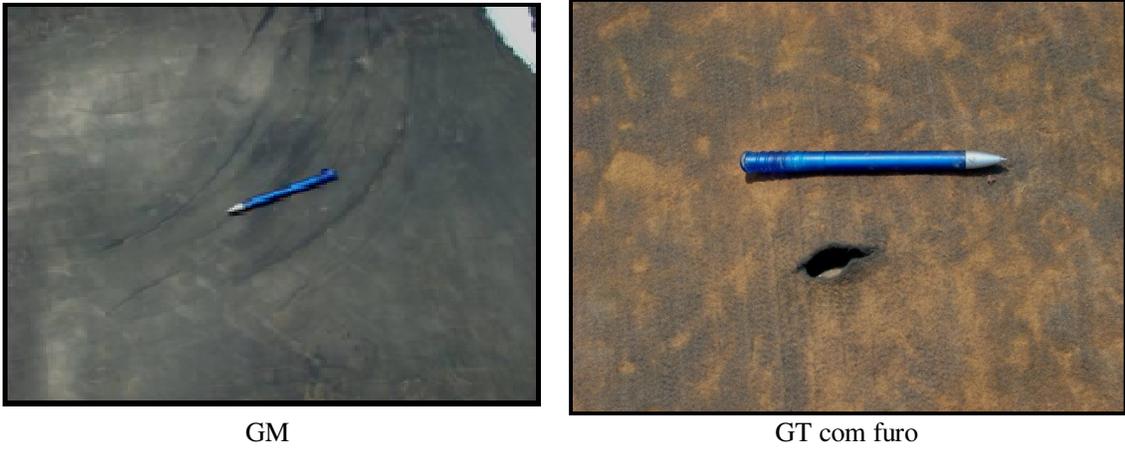


Figura 104. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 600 g/m² e brita 3.



Figura 105. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PP 600 g/m² e brita 3.



Figura 106. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 1200 g/m² e brita 3.



Figura 107. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com camadas naturais e brita 3: (a) areia; (b) solo.



Figura 108. Danos visuais: GM de PEAD de 2,0 mm sem proteção e brita 3.



Figura 109. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção e brita 1.



Figura 110. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 300 g/m² e brita 1.

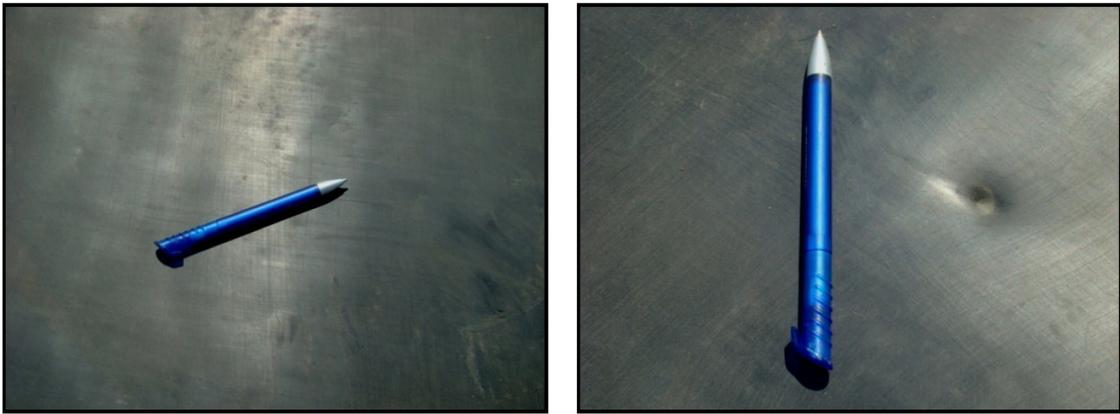


Figura 111. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 600 g/m² e brita 1.

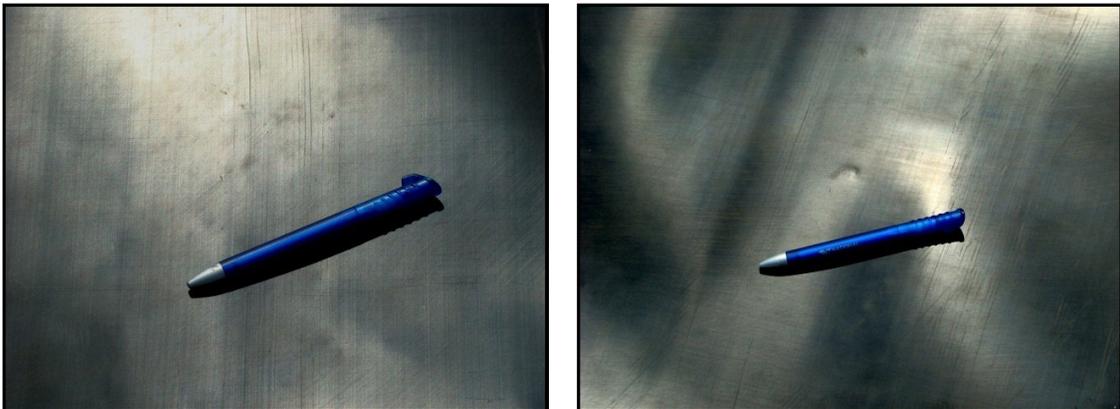


Figura 112. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com GT PET 1200 g/m² e brita 1.



Figura 113. Danos visuais: GM de PEAD de 1,5 mm com camadas naturais e brita 1: (a) areia; (b) solo.

Tabela 35. Danos visuais observados nas geomembranas de PEAD.

Configuração			Tipo de Dano Visual					Classe
GM	Proteção	Brita	Arranhão	Entalhe	Indentação	Deformação	Furos	
PEAD 1,5 mm	-	3	muitos	vários	algumas	muitas	2	I
	GT PET 300		bastante	-	algumas	muitas	-	II
	GT PET 600		bastante	-	-	poucas	-	II
	GT PP 600		poucos	-	-	muitas	-	II
	GT PET 1200		-	-	-	-	-	III
	Areia		poucos	-	-	poucas	-	II
	Solo		poucos	-	-	poucas	-	II
PEAD 2,0 mm	-		muitos	-	várias	muitas	-	II
PEAD 1,5mm	-	1	muitos	-	-	poucas	1	I
	GT PET 300		vários	-	-	poucas	-	II
	GT PET 600		poucos	-	algumas	poucas	-	II
	GT PET 1200		-	-	-	-	-	III
	Areia		poucos	-	-	-	-	II
	Solo		poucos	-	-	poucas	-	II

As geomembranas de PEAD sem proteção apresentaram todos os tipos de danos descritos pelo CFG (2001). Os arranhões e as deformações foram o tipo de dano mais recorrente. Também foi constatada a existência de alguns furos nas geomembranas de 1,5

mm. As geomembranas de 2,0 mm não apresentaram furos, no entanto, a presença dos outros tipos de danos foi intensa.

Nas configurações com elemento de proteção constatou-se uma redução dos danos visuais sobre a superfície da geomembrana, principalmente nos danos sob as formas de arranhões e entalhes. Em nenhuma configuração foi constatada a existência de furos nas geomembranas, apesar dos geotêxteis de PET 300 g/m² e PET 600 g/m² apresentaram furos sobre sua superfície.

Em termos de desempenho visual, as proteções com PET 1200 g/m² apresentaram melhor desempenho, sem provocar qualquer tipo de dano sobre a superfície da geomembrana. Apenas esta configuração se enquadrou na classe III proposta pelo CFG.

A proteção com geotêxtil de PP 600 g/m² também proporcionou um bom desempenho visual, com poucos arranhões sobre a superfície da geomembrana e sem perfurações no geotêxtil.

As camadas de proteção com areia e solo apresentaram melhor desempenho visual do que os geotêxteis com gramatura de 300 e 600 g/m², sendo observados apenas poucos arranhões e deformações.

4.2.1.2. Ensaio Pós-Danos

4.2.1.2.1. Ensaio de Tração Faixa Larga

As Figuras abaixo apresentam as curvas obtidas nos ensaios de tração em faixa larga nas geomembranas de PEAD, com diferentes camadas de proteção. A Figura 128 ilustra o mecanismo de ruptura verificado em algumas configurações.

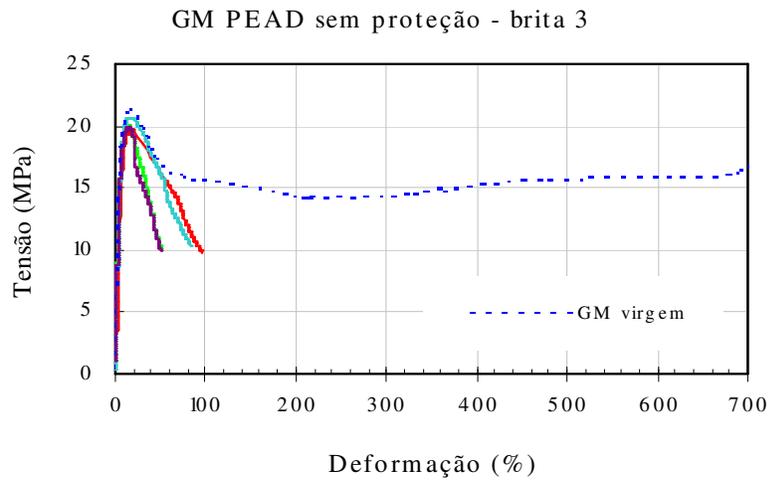


Figura 114. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga: GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção / brita 3.

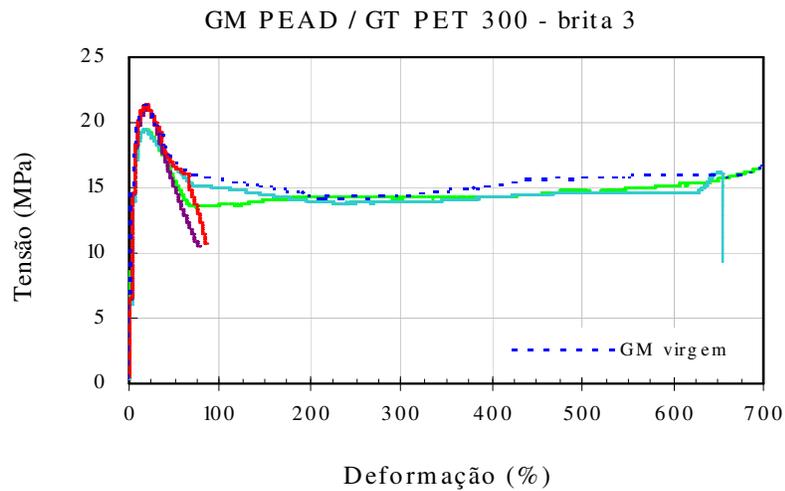


Figura 115. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 300 g/m^2 / brita 3.

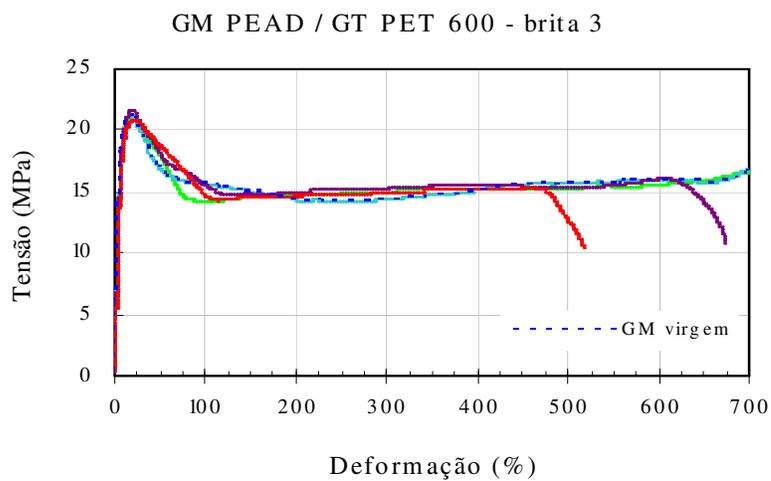


Figura 116. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 600 g/m^2 / brita 3.

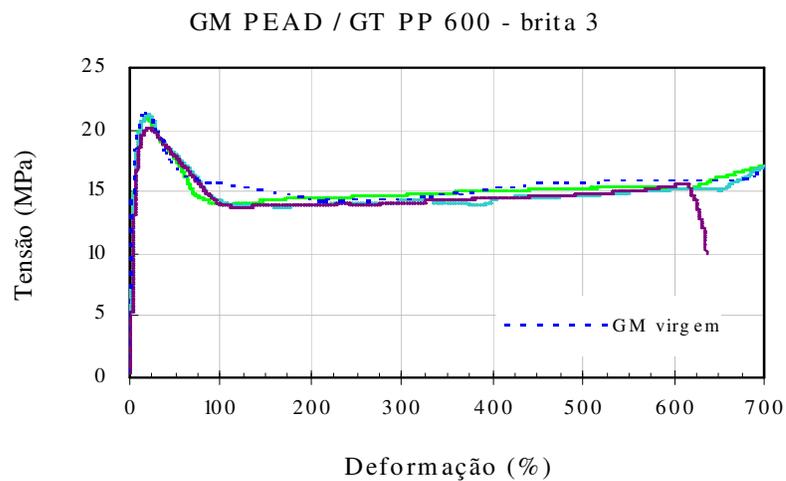


Figura 117. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PP 600 g/m^2 / brita 3.

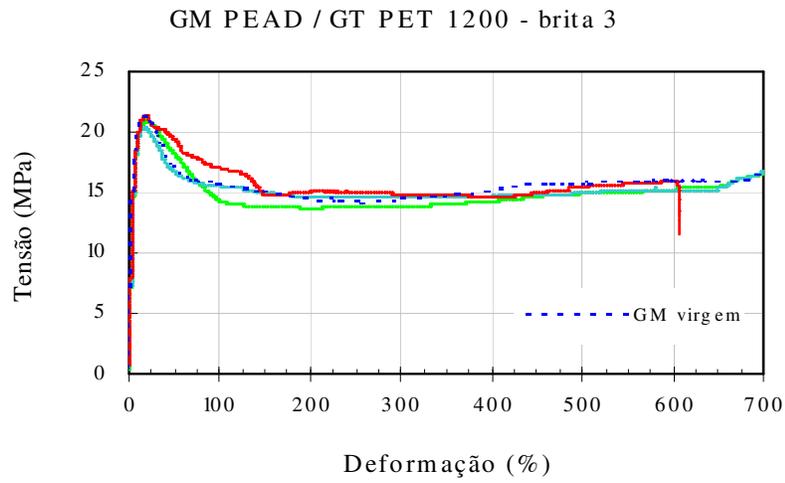


Figura 118. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 1200 g/m^2 / brita 3.

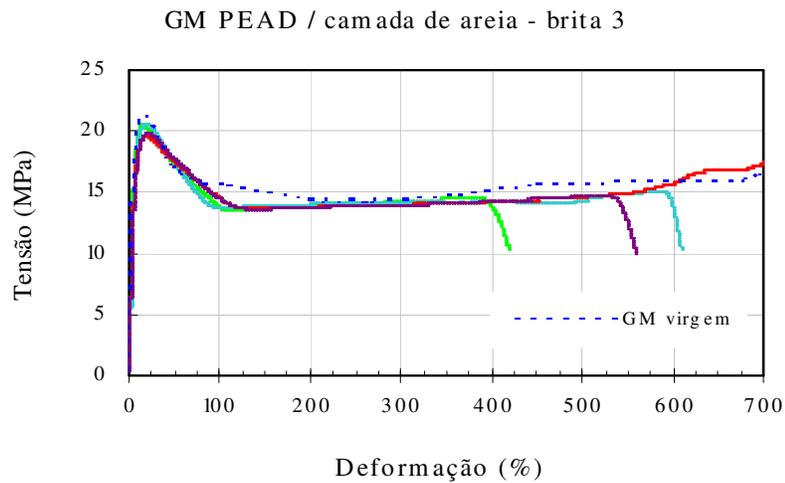


Figura 119. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e areia / brita 3.

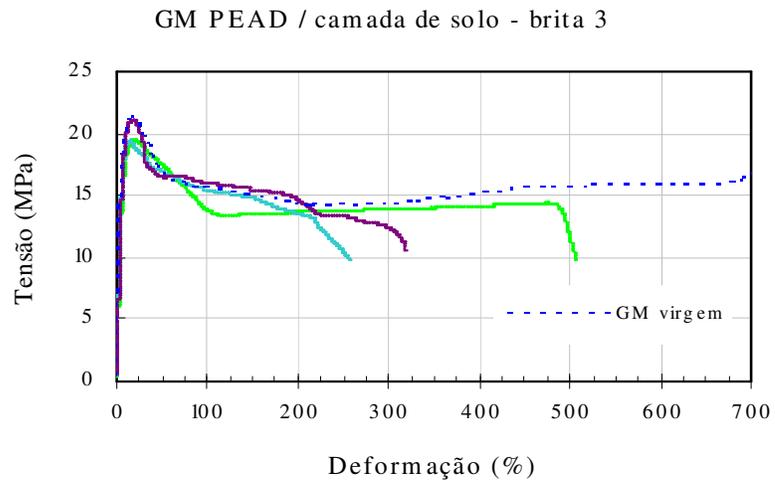


Figura 120. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e solo / brita 3.

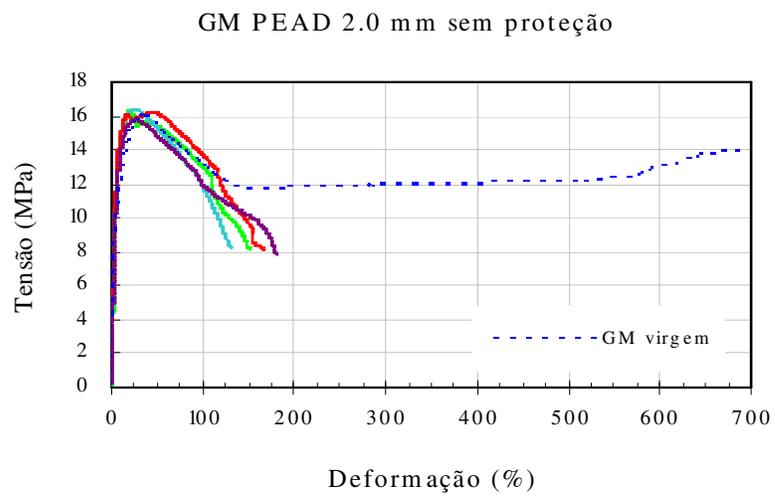


Figura 121. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD de 2,0 mm sem proteção / brita 3.

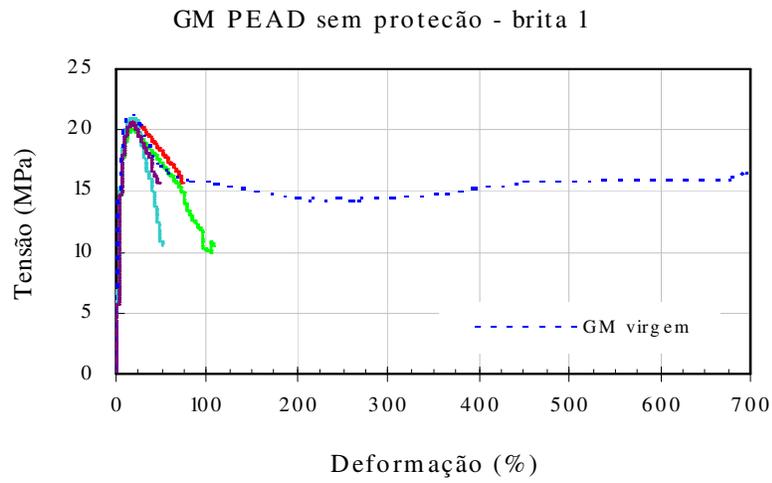


Figura 122. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD de 1,5 mm sem protecção / brita 1.

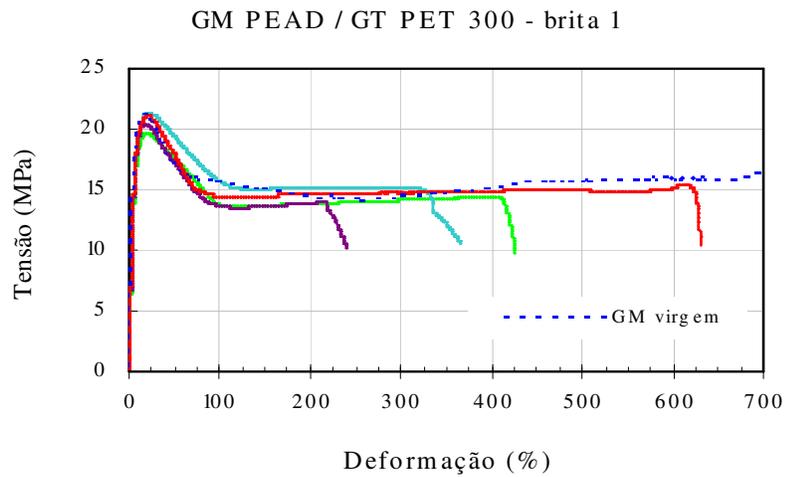


Figura 123. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 300 g/m^2 / brita 1.

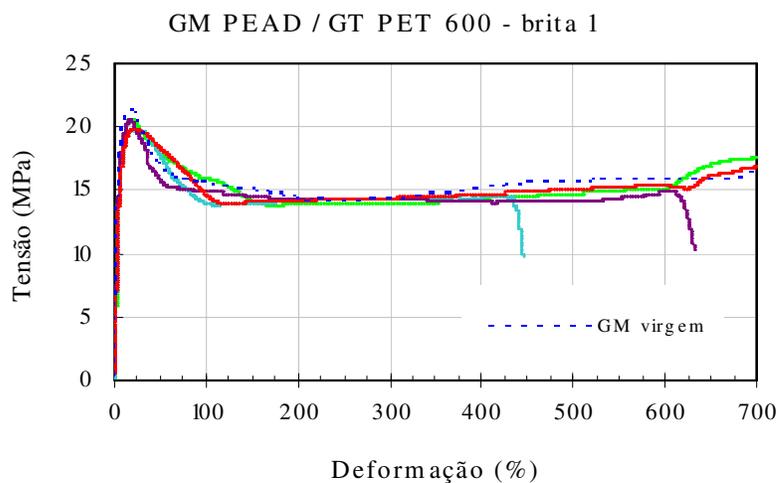


Figura 124. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 600 g/m^2 / brita 1.

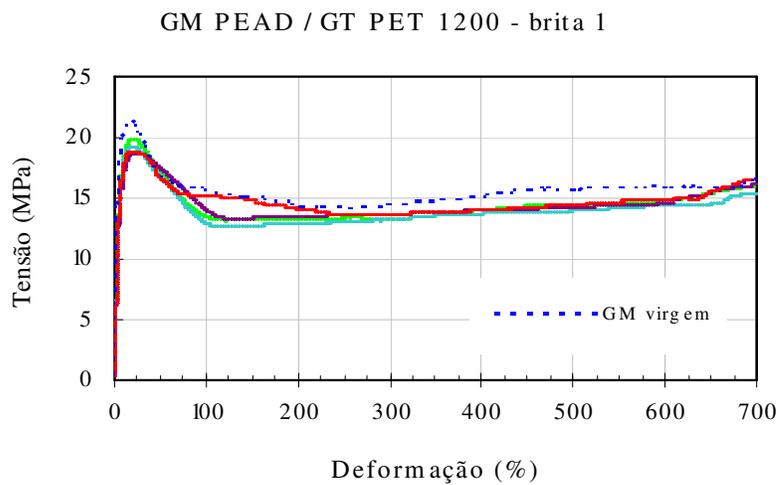


Figura 125. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e GT PET 1200 g/m^2 / brita 1.

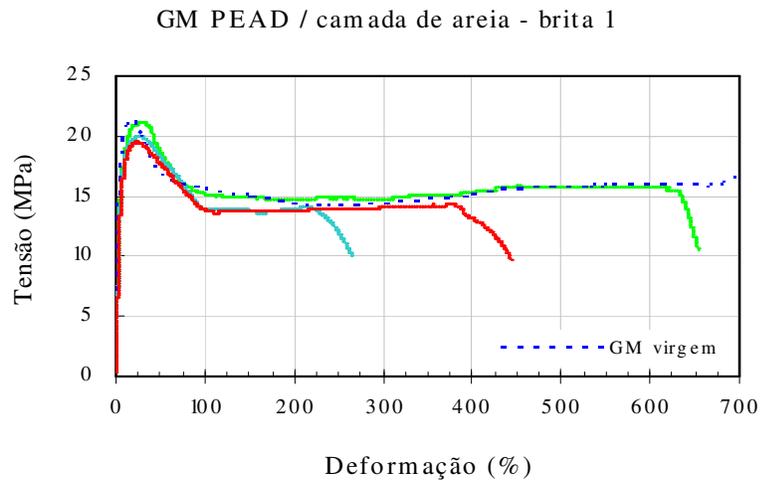


Figura 126. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e areia / brita 1.

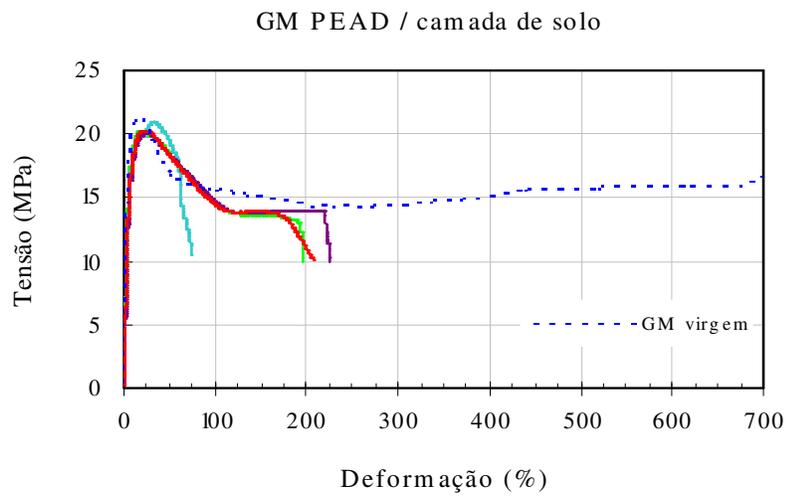


Figura 127. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD e solo / brita 1.



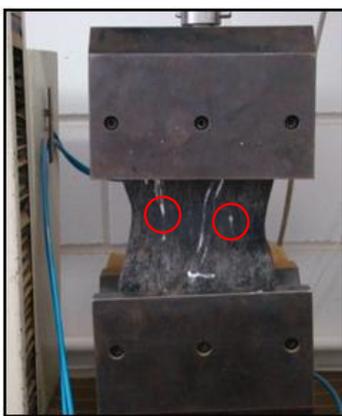
GM virgem – início do ensaio



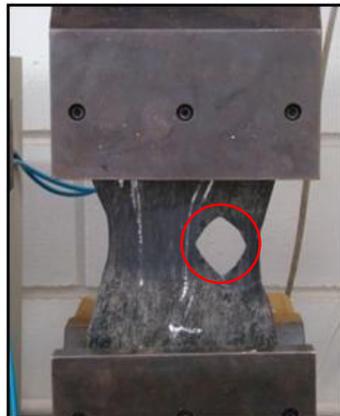
GM virgem



GM virgem – final do ensaio



GM sem proteção – início do rasgo



GM sem proteção – propagação do rasgo



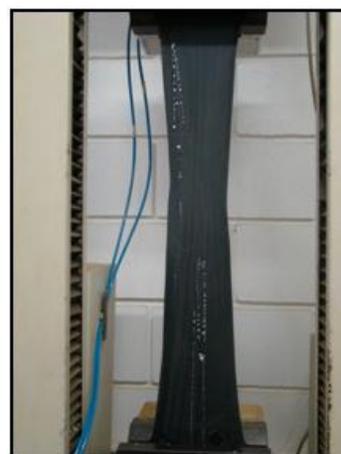
Detalhe ruptura no entalhe



GT PET 300



GT PET 600



GT PET 1200

Figura 128 (Continua). Mecanismo de ruptura nos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD.

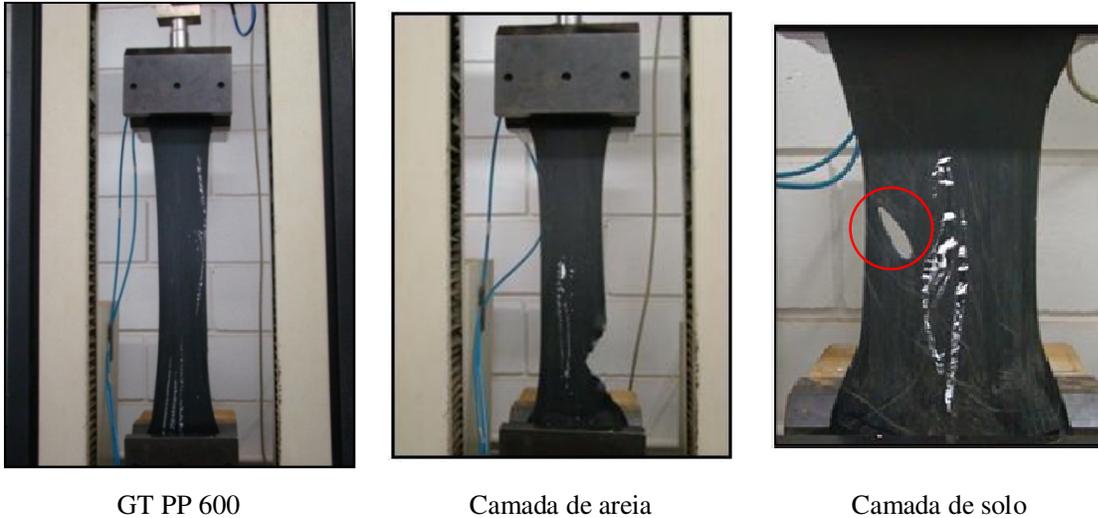


Figura 128 (Final). Mecanismo de ruptura nos ensaios de tração em faixa larga – GM de PEAD.

O resultado típico do ensaio de tração em faixa larga em geomembranas de PEAD é caracterizado pelo alongamento da geomembrana com o acréscimo de tensão aplicada até que a geomembrana atinja um valor de pico (limite elástico). A partir deste ponto e continuando o alongamento da geomembrana, ocorre a estrição da seção transversal do corpo e conseqüente diminuição da tensão aplicada. Novamente, a tensão volta a crescer com o aumento do alongamento até que ocorra a ruptura. Neste caso, a ruptura é caracterizada por um corte instantâneo ao longo de toda a seção transversal da geomembrana.

Geralmente, a ruptura em geomembranas de PEAD ocorre para valores em torno de 1000 %. Devido à limitação do deslocamento da máquina (fim de curso), o corpo de prova atingiu deformações em torno de 800%, valor este tomado com deformação de ruptura pra fins de análise.

Diferente do observado nas geomembranas virgens, as amostras de geomembranas danificadas sem proteção romperam imediatamente após atingir o limite elástico, ou seja, com baixos valores de deformação e tensão. A ruptura do corpo de prova é caracterizada por um

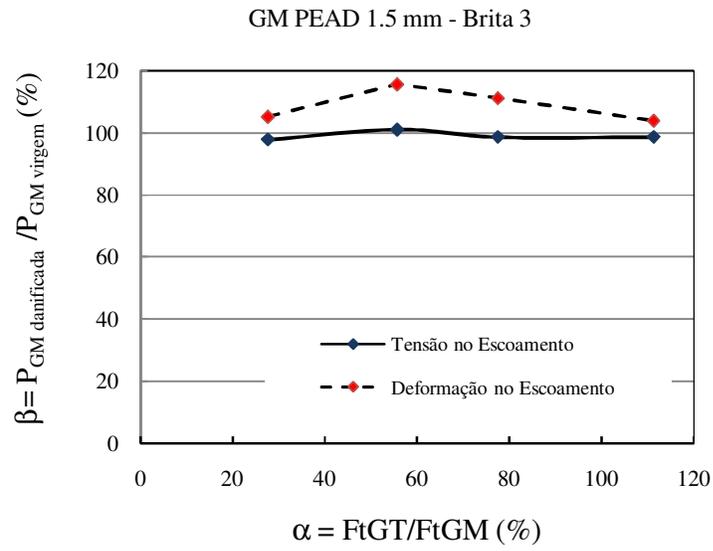
rasgo que se inicia na região mais danificada da geomembrana, localizada sobre os arranhões e entalhes, e se propaga ao longo do corpo de prova.

Com a introdução do elemento de proteção, verificou-se que a geomembrana alcançou maiores valores de alongamento antes de atingir a ruptura. Contudo, a ruptura também é caracterizada por um rasgo iniciado geralmente nos arranhões.

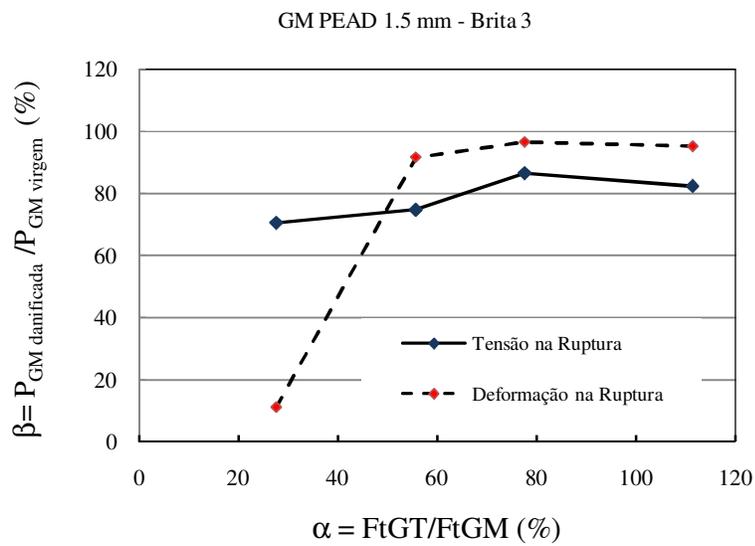
Mesmo nas configurações com poucos arranhões como, por exemplo, com proteção de areia, solo e PET 600, a ruptura da geomembrana foi caracterizada por um rasgo. Somente a proteção com PET 1200 g/m² e PP 600 g/m² que atingiu grandes valores de alongamento e apresentou modo de ruptura semelhante à da geomembrana virgem.

Apesar de algumas configurações apresentarem indentações, não se verificou o início da ruptura nestas regiões e sim nos arranhões e entalhes.

As Figuras abaixo apresentam os gráficos de tensão e deformação em termos de escoamento e ruptura respectivos aos ensaios realizados com geotêxteis. Nestas figuras α representa a relação entre a força de tração do geotêxtil (F_{iGT}) e a força de tração da geomembrana, e β representa a relação entre a propriedade da geomembrana danificada (P_{GM} danificada) e propriedade da geomembrana virgem (P_{GM} virgem) analisada. A Tabela 36 sintetiza os resultados de todas as configurações.



(a)



(b)

Figura 129. Resultados de tração em faixa larga - GM de PEAD e brita 3: (a) escoamento; (b) ruptura.

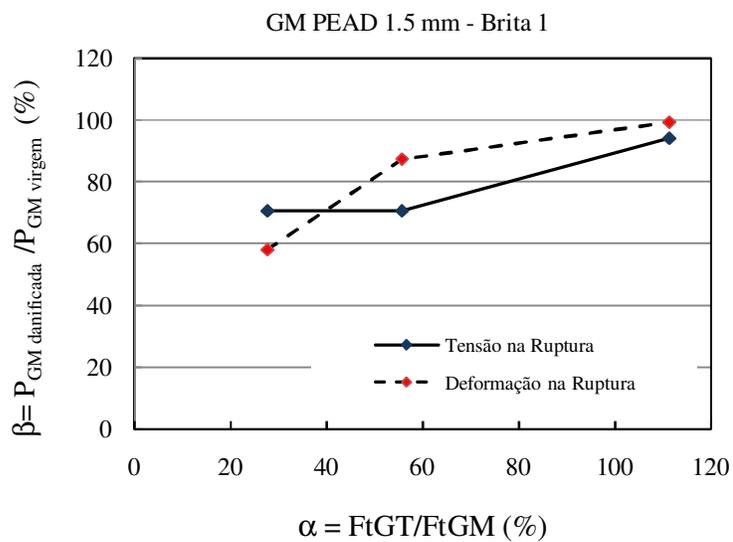
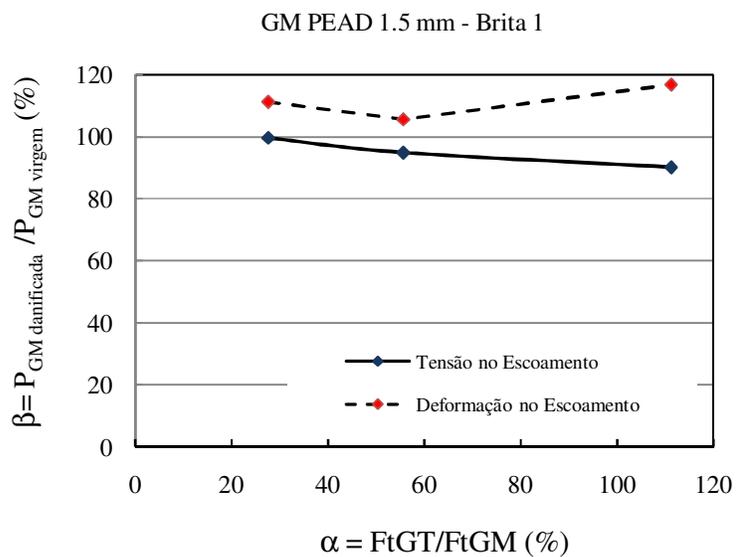


Figura 130. Resultados de tração em faixa larga - GM de PEAD e brita 1: (a) escoamento; (b) ruptura.

Tabela 36. Resultados dos ensaios de tração faixa larga realizados nas geomembranas de PEAD.

Configuração de Ensaio			Escoamento		Ruptura	
			σ (MPa)	ϵ (%)	σ (MPa)	ϵ
GM	Proteção	Brita				
GM virgem 1.5 mm	-	-	21,1	18	16,9	710
GM virgem 2.0 mm	-	-	15,3	36	13,7	703
GM danificada 1.5 mm	Sem proteção	3	20,0	19	10,0	67
	GT PET 300		20,6	19	10,1	80
	GT PET 600		21,3	21	12,7	650
	GT PET 1200		20,8	19	14,3	675
	GT PP 600		20,8	20	14,7	685
	Areia		20,2	19	12,1	575
	Solo		20,0	17	10,0	270
GM danificada 2.0 mm	Sem proteção	1	16,2	25	8,1	160
GM danificada	Sem proteção		20,4	18	13,0	61
	GT PET 300		21,0	20	10,4	412
	GT PET 600		20,1	19	12,1	620
	GT PET 1200		19,0	21	16,1	705
	Areia		19,8	22	10,0	454
	Solo		20,4	18	10,4	175

As propriedades de tração em termos de escoamento não se modificaram em relação à geomembrana virgem. Somente foram verificadas alterações em termos de resistência a ruptura.

As configurações sem proteção apresentaram uma grande redução em termos de tensão e deformação na ruptura. Na configuração com brita 3, as geomembranas apresentaram uma redução em torno de 40% e 90% na tensão e deformação de ruptura, respectivamente, em relação aos valores da geomembrana virgem.

Com a introdução do elemento de proteção, constatou-se um aumento nos valores de tensão e deformação de ruptura. Em geral, as camadas de proteção com geotêxtil proporcionaram elevados valores de deformação das geomembranas ($\epsilon \approx 700\%$). Excetua-se a configuração com geotêxtil de PET 300 g/m², que alcançou baixos valores de deformação na ruptura da geomembrana ($\epsilon \approx 80\%$). Ressalta-se que esta configuração apresentou o pior

desempenho no campo em termos de danos mecânicos visíveis. Em termos de tensão de ruptura, verificou-se um pequeno acréscimo dos valores com a introdução do geotêxtil.

Os resultados mostram que as geomembranas com proteção de areia também proporcionaram um acréscimo de tensão e deformação na ruptura em relação à geomembrana virgem. Apesar de apresentar poucos danos na superfície da geomembrana, a configuração com proteção de solo gerou baixos valores de tensão e deformação na geomembrana.

Na configuração com brita 1, as geomembranas sem proteção apresentaram uma redução de 40% e 90 %, respectivos à tensão e deformação de ruptura. As geomembranas com camada de proteção apresentaram um aumento na deformação de ruptura, sendo que as configurações com PET 1200 g/m² e PET 600 g/m² apresentaram os maiores valores ($\epsilon \approx 700\%$ e $\epsilon \approx 620\%$, respectivamente). Ressalta-se que estas configurações também apresentaram melhor desempenho no campo em relação à presença e intensidade de danos visíveis. Adicionalmente, a configuração com geotêxtil de PET 300 g/m², com desempenho insatisfatório no campo, alcançou valores da ordem de 410% na geomembrana.

Ao contrário do comportamento verificado no campo, as configurações com areia como proteção apresentaram baixos valores de deformação na ruptura ($\epsilon=180\%$).

Os resultados dos ensaios de tração em faixa larga indicam que a tensão e deformação de ruptura variam com a resistência à tração do geotêxtil. Constatou-se que quanto maior a resistência à tração do geotêxtil, maior a deformação da geomembrana. No entanto, esta tendência foi evidenciada apenas nas configurações com brita 1.

4.2.1.2.2. Ensaio de Tração Multiaxial

As Figuras a seguir apresentam as curvas e a análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração multiaxial com geomembranas de PEAD. A Tabela 37 apresenta a síntese dos resultados.

Tabela 37. Resultados dos ensaios de tração multiaxial realizados nas geomembranas de PEAD.

Configuração de Ensaio			σ_r	$\Delta\sigma$	ϵ_r	$\Delta\epsilon$
GM	Proteção	Brita	(MPa)		(%)	
GM virgem	-	-	25,6	-	62	-
GM danificada	Sem proteção	3	25,0	1,00	14	0,23
	GT PET 300		25,9	1,01	16	0,26
	GT PET 600		23,7	0,93	29	0,47
	GT PET 1200		23,0	0,90	35	0,50
	GT PP 600		23,0	0,90	31	0,57
	Areia		23,3	0,91	23	0,38
	Solo		20,6	0,80	30	0,48
GM danificada	Sem proteção	1	23,8	0,93	23	0,37
	GT PET 300		22,9	0,90	24	0,40
	GT PET 600		21,7	0,85	39	0,64
	GT PET 1200		22,4	0,88	50	0,81
	Areia		24,4	0,95	21	0,34
	Solo		23,0	0,90	28	0,45

* $\Delta \rightarrow$ razão entre a tensão (σ) ou deformação (ϵ) da geomembrana danificada em relação à geomembrana virgem.

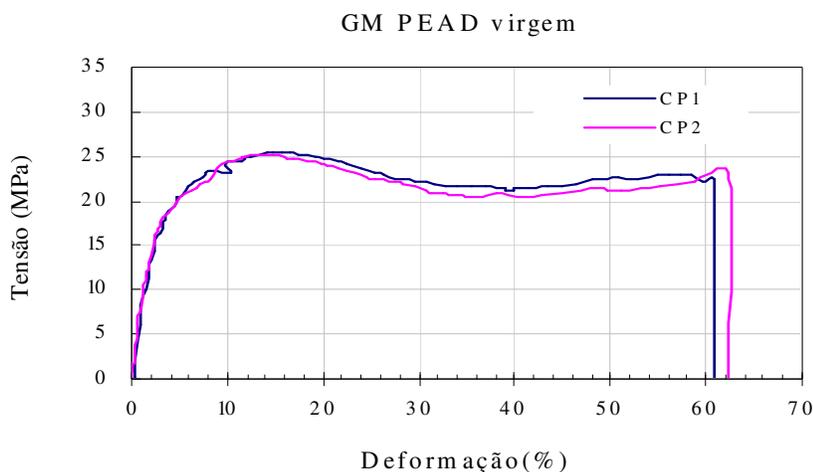


Figura 131. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm virgem.

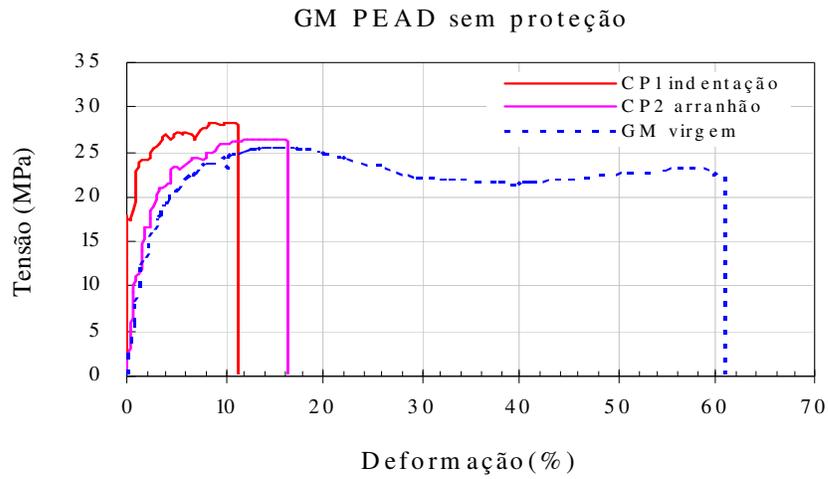


Figura 132. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção / brita 3.

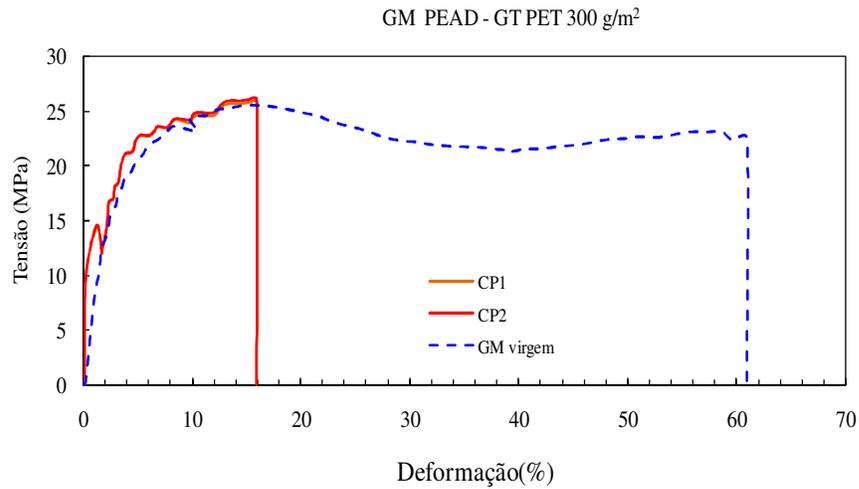


Figura 133. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 300 g/m² / brita 3.

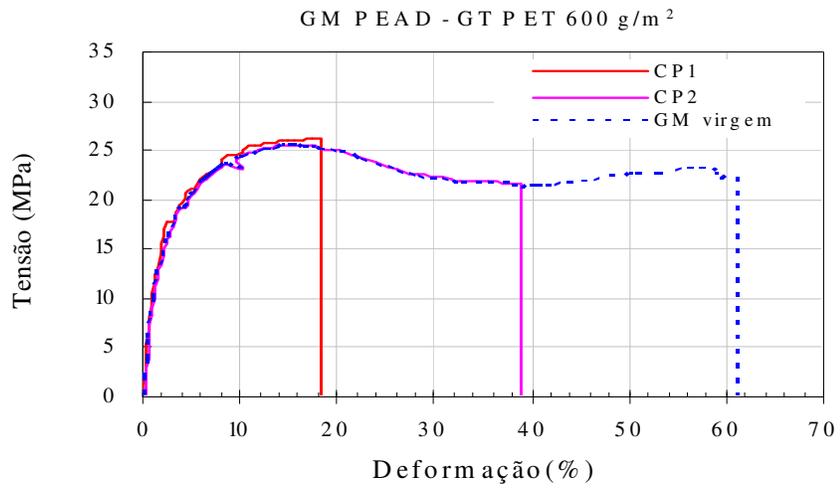


Figura 134. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 600 g/m² / brita 3.

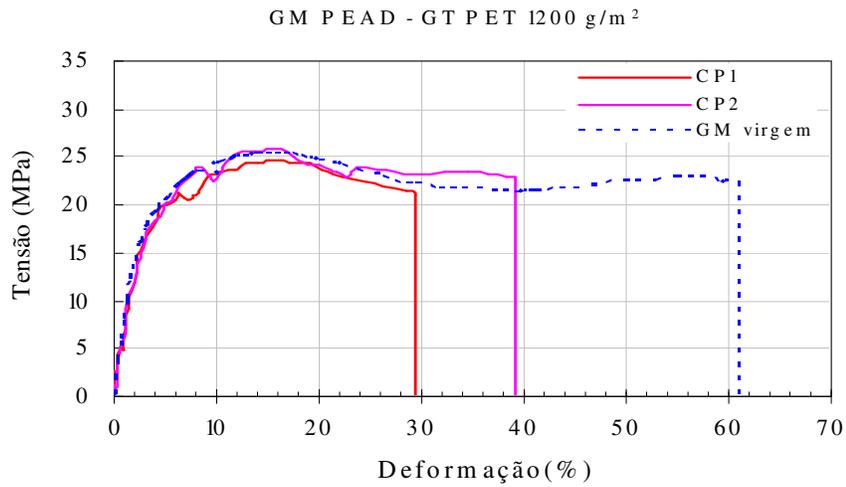


Figura 135. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 1200 g/m² / brita 3.

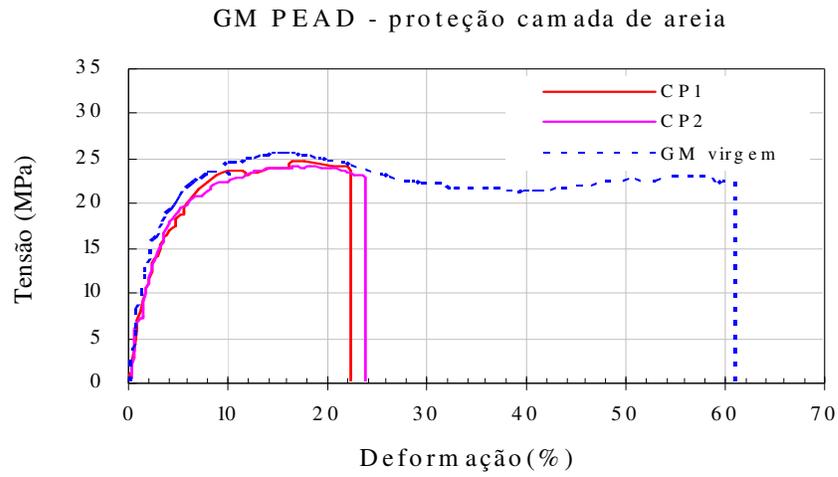


Figura 136. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e camada de areia/ brita 3.

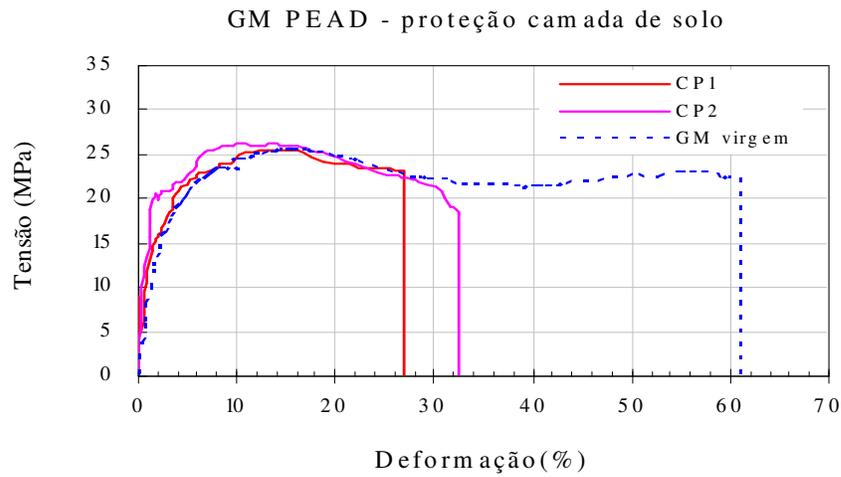


Figura 137. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e camada de solo/ brita 3.

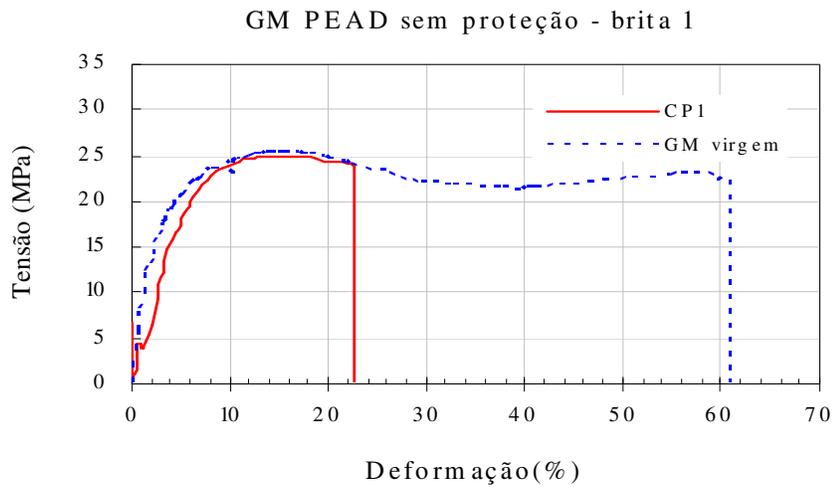


Figura 138. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm sem proteção / brita 1.

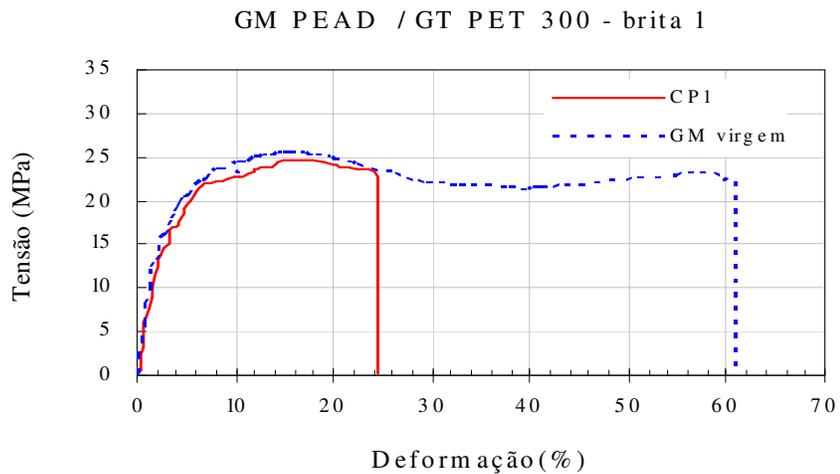


Figura 139. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 300 g/m² / brita 1.

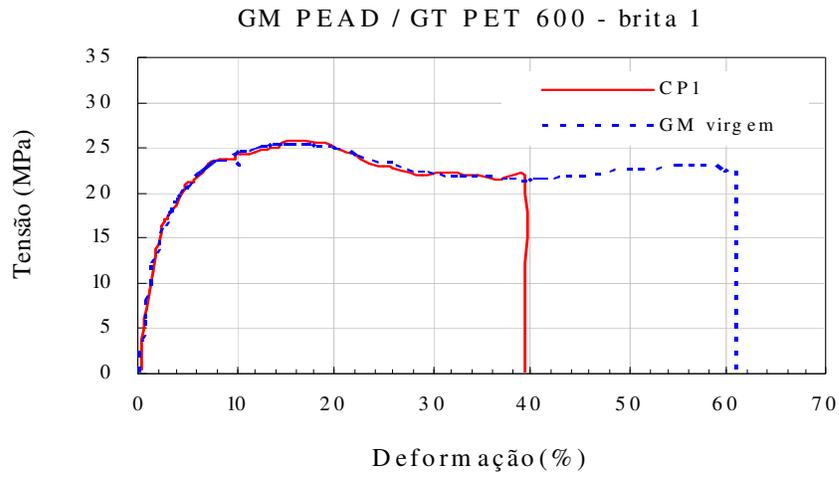


Figura 140. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 600 g/m² / brita 1.

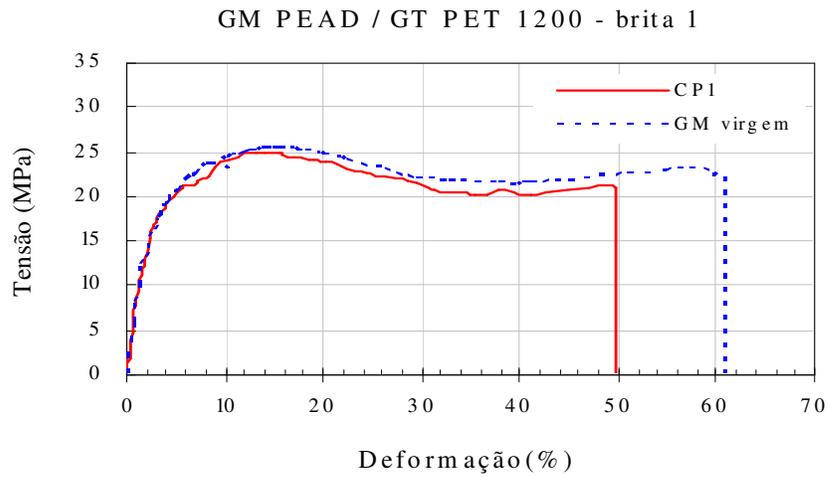


Figura 141. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e GT PET 1200 g/m² / brita 1.

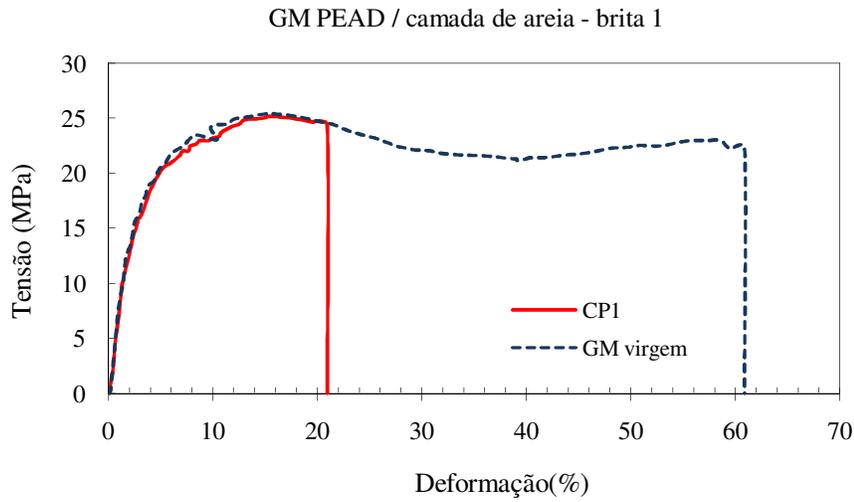


Figura 142. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e camada de areia / brita 1.

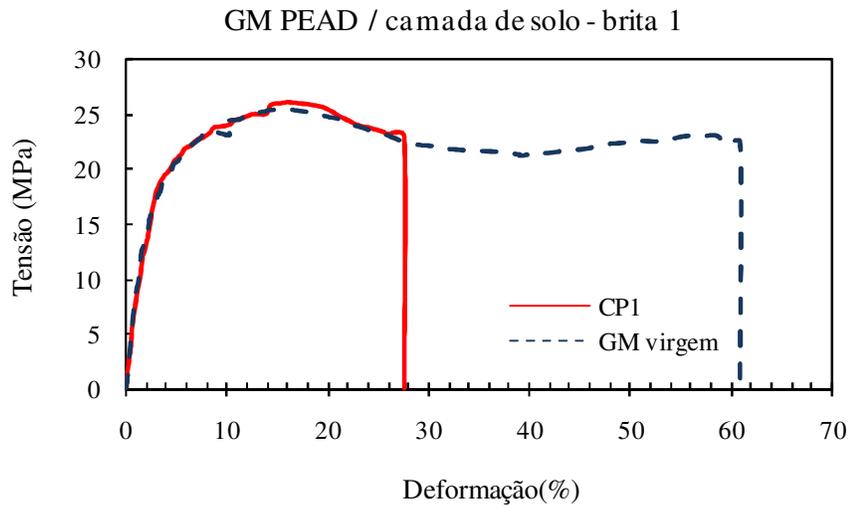


Figura 143. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PEAD de 1,5 mm e camada de solo / brita 1.

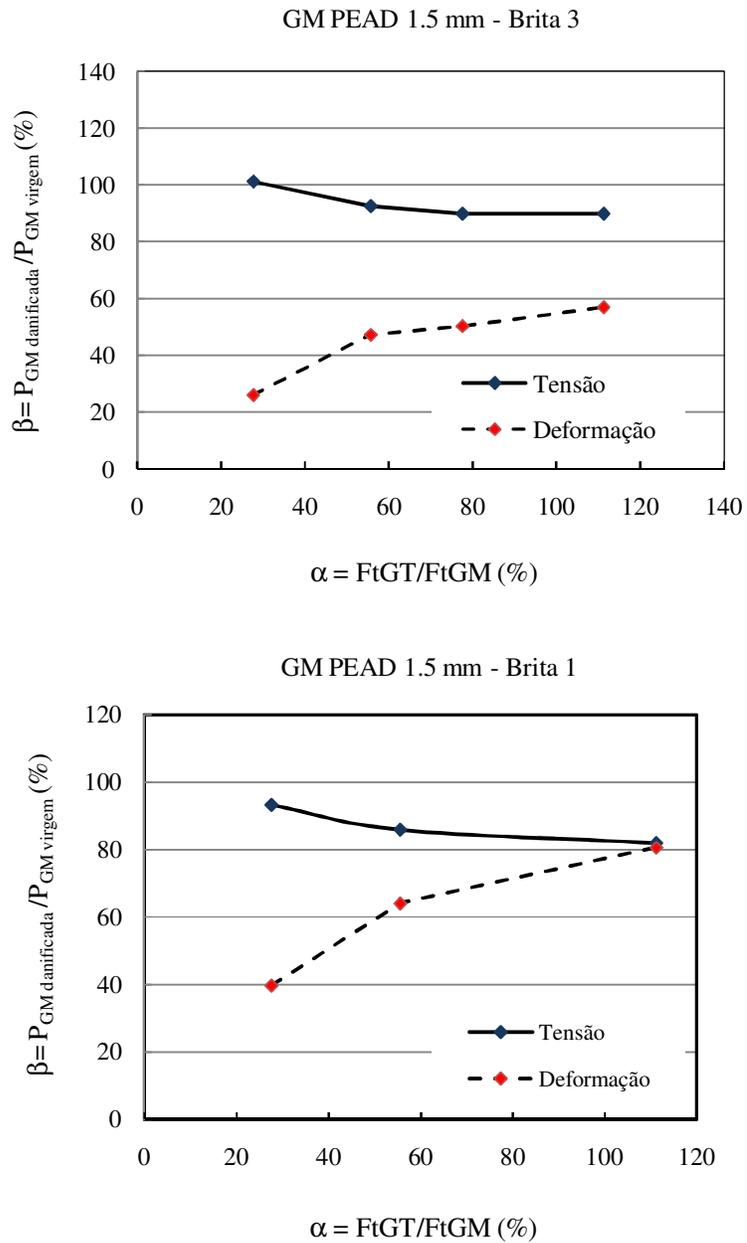


Figura 144. Resultados de tração multiaxial - GM de PEAD 1,5 mm.

Na configuração com geomembrana virgem, a tensão e deformação de ruptura foram de 25,6 MPa e 62%, respectivamente. Os valores de tensão de ruptura nas geomembranas danificadas apresentaram uma redução em relação à geomembrana virgem. No entanto, as maiores reduções são observadas em termos de deformação, constatando-se uma redução de 80% e 60% nos valores de deformação respectivos às configurações com brita 3 e brita 1.

Com a introdução do elemento de proteção, verificou-se um aumento nos valores de deformação. No entanto, nenhuma configuração apresentou deformações de ruptura da mesma ordem de grandeza que a geomembrana virgem.

Em ambas as granulometrias, constatou-se uma variação significativa nos valores de deformação com o tipo de proteção utilizada. A configuração com geotêxtil de PET 1200 g/m² apresentou menor redução de deformação em relação à geomembrana virgem ($\Delta\varepsilon=0,57$ para a brita 3 e $\Delta\varepsilon = 0,81$ para a brita 1).

As configurações com solos também apresentaram uma elevada redução nos valores de deformação comparados à geomembrana virgem. No entanto, nas configurações com brita 3, os valores de deformação foram superiores a deformação de ruptura utilizando geotêxtil de PET 300 g/m². Nas configurações com brita 1, os valores de deformação foram da mesma ordem de grandeza.

Os resultados dos ensaios de tração multiaxial (Figura 144) também indicam uma correlação entre a resistência à tração do geotêxtil (F_{IGT}) com a deformação na ruptura da geomembrana. Verifica-se que quanto maior a resistência a tração do geotêxtil, maior o valor de β , ou seja, menor a perda de deformação de ruptura na geomembrana danificada em relação à geomembrana virgem.

A Figura 145 e a Figura 146 ilustram o modo de ruptura das geomembranas de PEAD no ensaio de tração multiaxial.

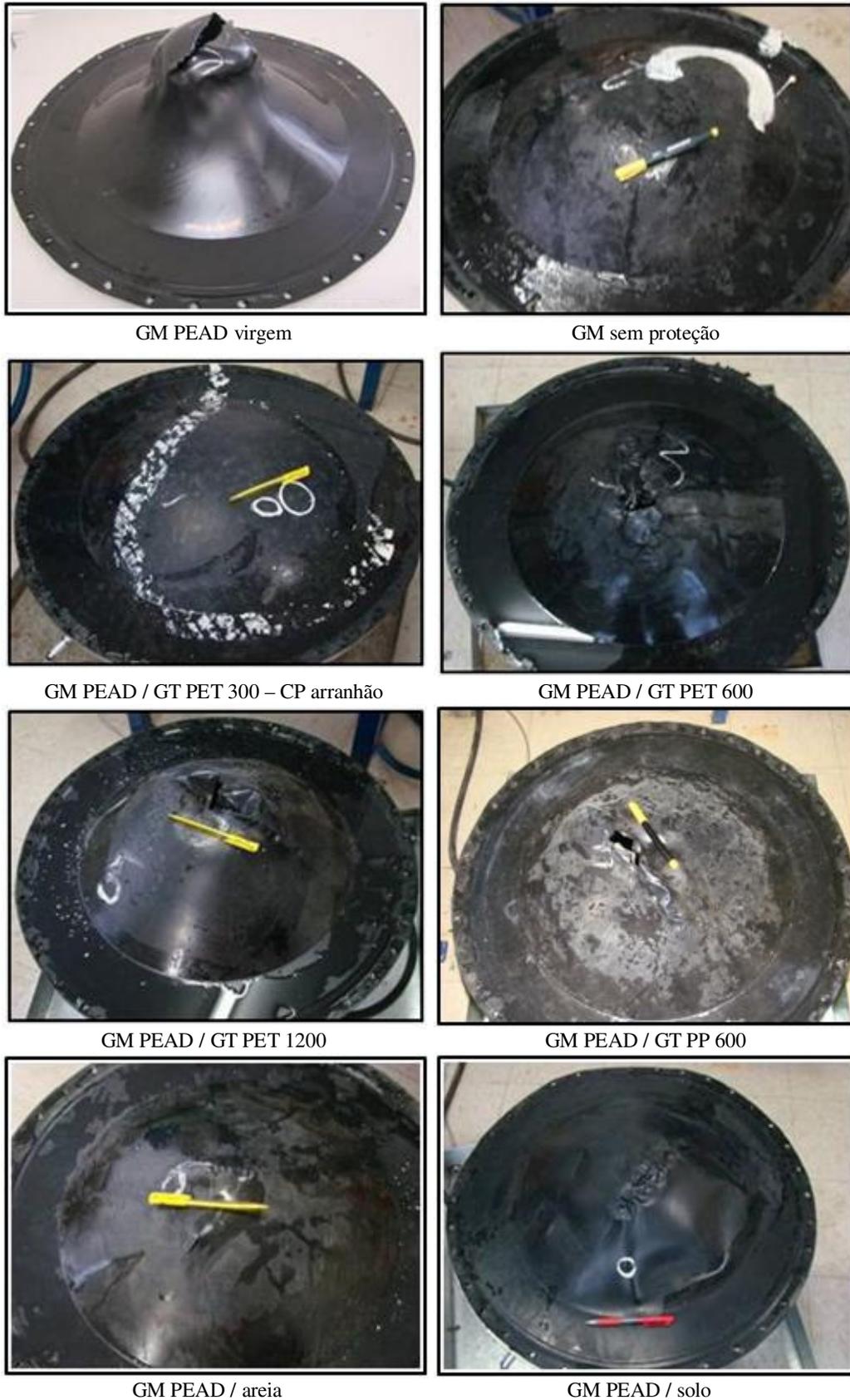


Figura 145. Modo de ruptura nos ensaios de tração multiaxial: GM PEAD 1,5 mm / brita3.



Figura 146. Modo de ruptura nos ensaios de tração multiaxial: GM PEAD 1,5 mm / brita1.

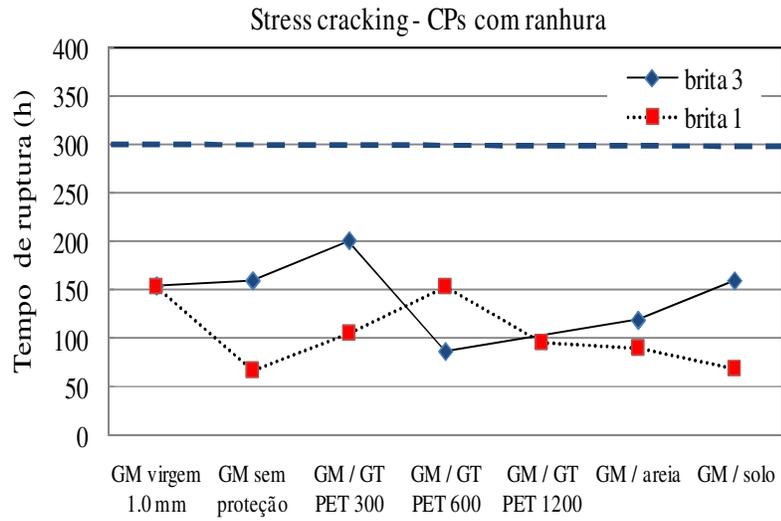
Observa-se que a geomembrana virgem se deforma assumindo uma forma esférica ou elíptica até atingir a ruptura, localizada no centro da amostra. Em geral, as geomembranas danificadas sem e com camada de proteção apresentaram comportamento diferente da

geomembrana virgem. A ruptura nas geomembranas sem proteção foi caracterizada por pequenos cortes localizados em cima dos arranhões e fora do centro da amostra.

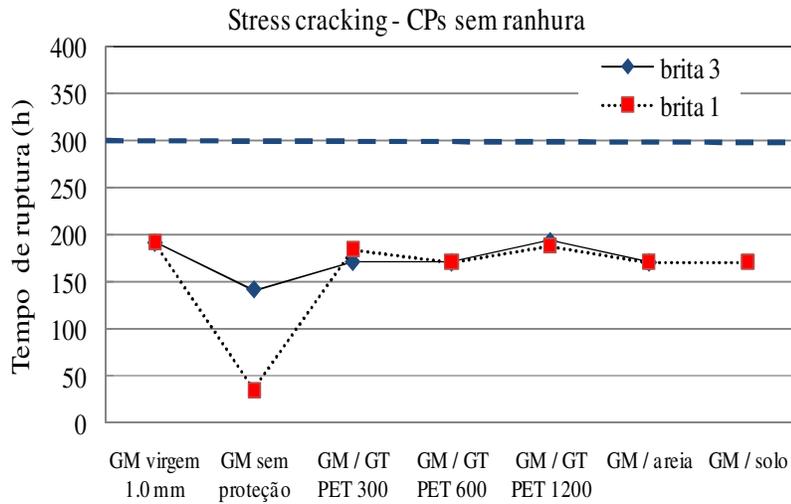
As configurações com brita 3 e geotêxteis de PP 600 g/m² e 1200g/m² foram as que apresentaram comportamento mais próximo a geomembrana virgem, com ruptura localizada no centro da amostra e sob a forma de estouro. Nas configurações com brita 1, as configurações com geotêxteis de PET 600 g/m² e 1200g/m² se assemelharam ao comportamento verificado nas geomembranas virgens. Em ambas as granulometrias, verificou-se que a ruptura nas geomembranas danificadas com proteção de areia e solo também foi localizada por pequenos cortes localizados em cima dos arranhões e fora do centro da amostra.

4.2.1.2.3. Ensaio de Stress Cracking

A Figura 147 apresenta os resultados dos ensaios de *stress cracking* (SP-NTCL) respectivos as amostras com ranhura (ASTM D5397) e sem ranhura na região central da geomembrana. Tais resultados se referem às geomembranas de PEAD de 1,5 mm com geotêxtil de proteção. A Tabela 38 apresenta os resultados de todas as configurações.



(a)



(b)

Figura 147. Resultados do ensaio de *stress cracking*: (a) CPs com ranhura; (b) CPs sem ranhura.

Tabela 38. Síntese dos resultados de stress cracking em geomembranas de PEAD.

Brita	Configuração	Carga 30%	
		CP com ranhura	CP sem ranhura
		Tr (h)	Tr (h)
-	GM virgem 1.0 mm	153	192
-	GM virgem 2.0 mm	131	-
Brita 3	GM sem proteção	158	141
	GM / GT PET 300	200	171
	GM / GT PET 600	86	171
	GM / GT PET 1200	-	193
	GM / areia	118	171
	GM / solo	158	-
	PEAD 2,00 s/p	197	-
Brita 1	GM sem proteção	67	35
	GM / GT PET 300	105	185
	GM / GT PET 600	153	171
	GM / GT PET 1200	95	188
	GM / areia	89	171
	GM / solo	68	171

Nos corpos de prova sem ranhura, o tempo de ruptura da geomembrana virgem foi de 192 horas. Obteve-se na geomembrana danificada sem proteção e com brita 3 um tempo de ruptura de 140 horas, o que representa uma redução de 30% em relação ao tempo de ruptura da geomembrana virgem. Nas configurações com elemento de proteção, constata-se um aumento do tempo de ruptura, que atinge valores próximos ao da geomembrana virgem. Verificou-se também que o tempo de ruptura nas geomembranas danificadas não varia com o tipo de proteção utilizado.

Nas configurações com brita 1, o tempo de ruptura na geomembrana danificada sem proteção foi de 35h, representando uma redução de 80%. Ao se introduzir a camada de proteção, o tempo de ruptura alcançou valores próximos ao tempo de ruptura da geomembrana virgem, não sendo constatada variação do tempo de ruptura com o tipo de proteção utilizado.

Desta forma, os resultados mostram que os danos decorrentes do processo de instalação somente alteraram a susceptibilidade da geomembrana ao fenômeno de *stress cracking* nas configurações sem proteção, principalmente nas configurações com brita de

menor graduação (brita 1). As configurações com camada de proteção apresentaram o mesmo tempo de ruptura.

Os corpos de prova com ranhura apresentaram uma elevada dispersão nos resultados do ensaio. Ao contrário do observado nos corpos de prova sem ranhura, não se constatou nenhuma relação do tempo de ruptura com o tipo de proteção utilizado, principalmente nas configurações com brita 3. Observa-se, por exemplo, que o tempo de ruptura na geomembrana sem proteção foi semelhante ao da geomembrana virgem. Nas configurações com brita 1, observa-se que os resultados atingiram o comportamento esperado. O tempo de ruptura na geomembrana sem proteção foi menor do que na geomembrana virgem; enquanto nas camadas com proteção, constatou-se um aumento do tempo de ruptura.

Contudo, os ensaios realizados com ranhura no corpo de prova podem mascarar os resultados, assim como dificultar a interpretação de tais dados. Uma das questões consiste na intensificação dos danos existentes, uma vez que pode ocorrer a sobreposição da ranhura com o próprio dano, dificultando até mesmo a padronização da espessura ligada do corpo de prova. Ao contrário, nos ensaios sem ranhura, ocorre uma padronização mais adequada dos resultados, onde o próprio dano é considerado o agente catalisador do *stress cracking*.

4.2.1.4. Influência das características dos agregados no desempenho do elemento de proteção.

As Figuras a seguir ilustram os resultados dos ensaios de tração faixa larga, multiaxial e stress cracking utilizando britas de diferentes diâmetros. Nesta figuras, a brita 3 corresponde a de maior diâmetro e brita 1 a de menor diâmetro.

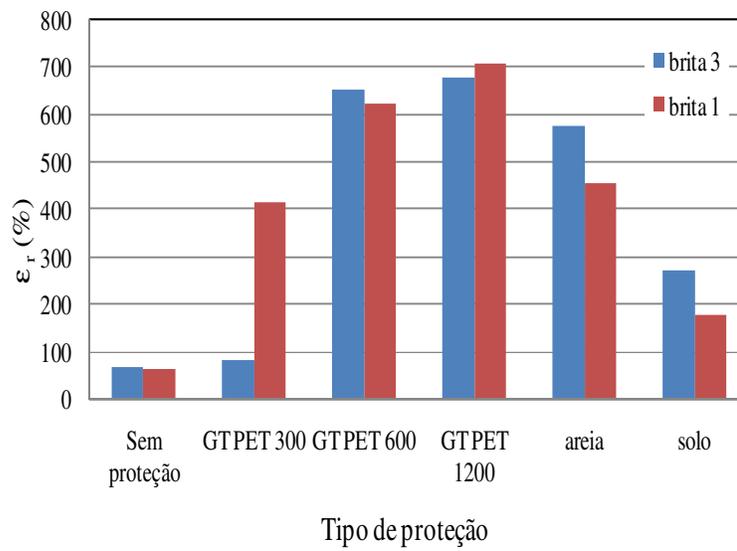
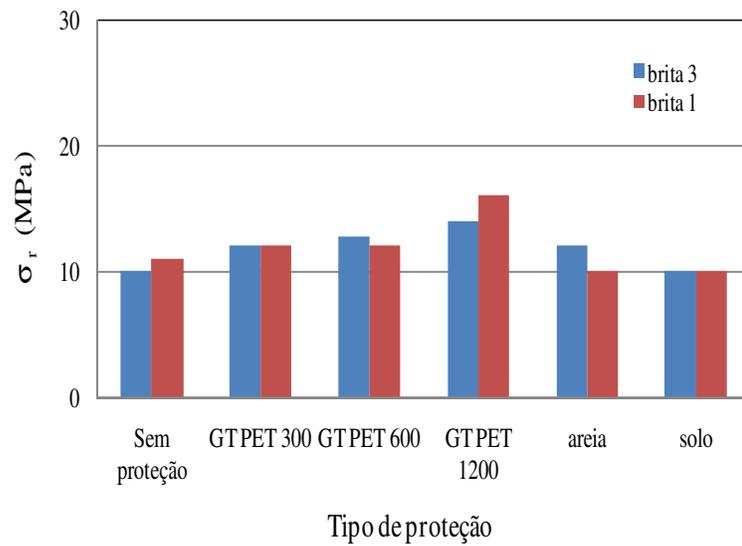


Figura 148. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga em função do diâmetro dos agregados: GM de PEAD.

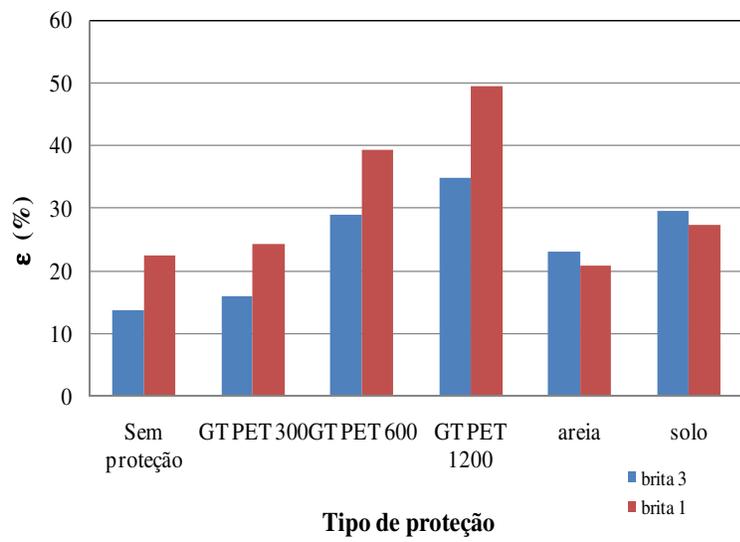
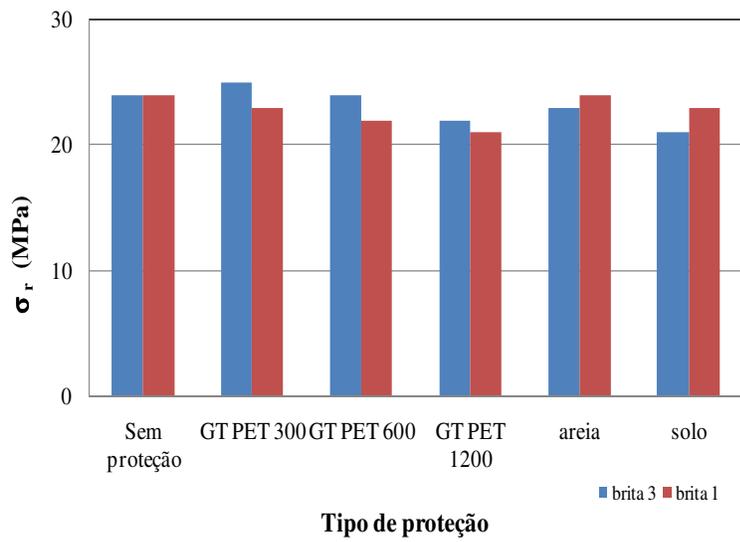


Figura 149. Resultados dos ensaios de tração multiaxial em função do diâmetro dos agregados: GM de PEAD.

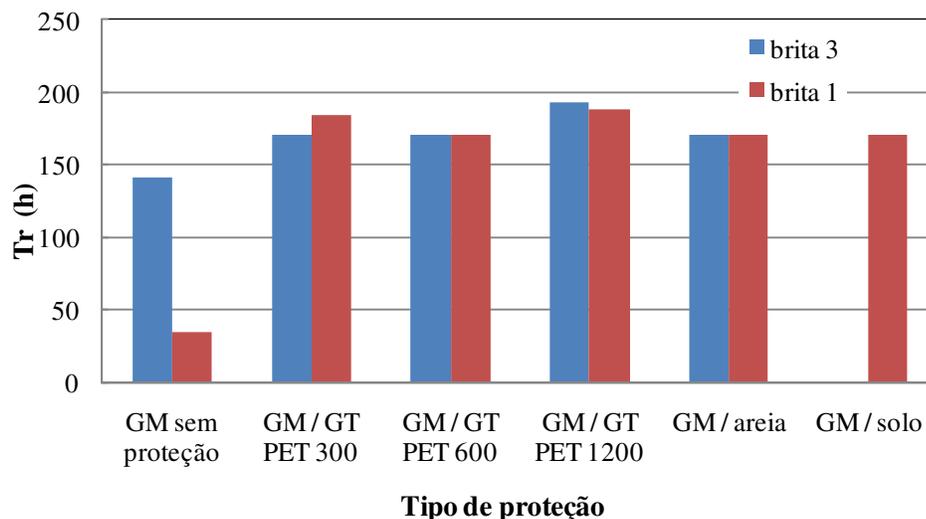


Figura 150. Resultados dos ensaios de *stress cracking* em geomembranas de PEAD em função do diâmetro dos agregados: CP's sem ranhura.

Os resultados dos ensaios de tração em faixa larga indicaram que a variação da deformação com relação ao tamanho dos agregados é pequena. Nas configurações sem proteção, por exemplo, a deformação foi a mesma nos dois tipos de brita utilizados. A mesma constatação foi verificada nas configurações com geotêxteis como elemento de proteção. Excetua-se apenas o geotêxtil de PET 300 g/m^2 , que apresentou valores de deformação de tração mais baixos na configuração com brita 3. Os resultados dos ensaios de tração multiaxial mostram que os valores de deformação foram menores nas configurações com brita 3, com e sem geotêxtil como elemento de proteção.

Em termos de resistência à tração, verificou-se que as maiores reduções de deformação foram verificadas nas configurações com brita de maior diâmetro. Estas constatações corroboram com os resultados retratados na literatura. Koerner *et al.* (1996) e Badu *et al.* (1998), por exemplo, relatam que a resistência a punção das geomembranas danificadas depende, dentre outros fatores, do diâmetro. Quanto maior o diâmetro das partículas, menor a

área de contato entre os agregados e a geomembrana, gerando maiores valores de tensão e, conseqüentemente, maiores os danos à geomembrana.

Reddy *et al* (1996) também constatou que quanto maior o diâmetro do agregado, maiores as reduções nos valores de deformação de ruptura no ensaio de tração multiaxial. Nos ensaios de tração em faixa larga não foram verificadas alterações nas características de tração com relação ao diâmetro dos agregados.

Com relação ao ensaio de stress cracking, verificou-se que o tempo de ruptura (T_r) nas geomembranas sem proteção é menor nas configurações com brita 1. A redução do tempo de ruptura foi da ordem de 70% em relação às configurações com brita 3. Nas configurações com camada de proteção, o tempo de ruptura independe das características da brita. Isto porque, conforme já mencionado, os danos existentes não foram capazes de acelerarem o processo de *stress cracking*. Ao contrário dos ensaios de tração, os agregados com menor diâmetro (brita 1) apresentaram maior susceptibilidade ao fenômeno de *stress cracking*, o que indica que os danos foram mais intensos.

Nas configurações com solos naturais verificou-se, em geral, que as características das geomembranas não se alteram com o diâmetro dos agregados.

4.2.2. Geomembranas de PVC

4.2.2.1. Análise Visual

As Figuras abaixo ilustram as superfícies das geomembranas de PVC sob diferentes configurações, após retirada da camada de drenagem. A Tabela 39 sintetiza os danos observados nas geomembranas de PVC seguindo o critério proposto pelo CFG (2001).

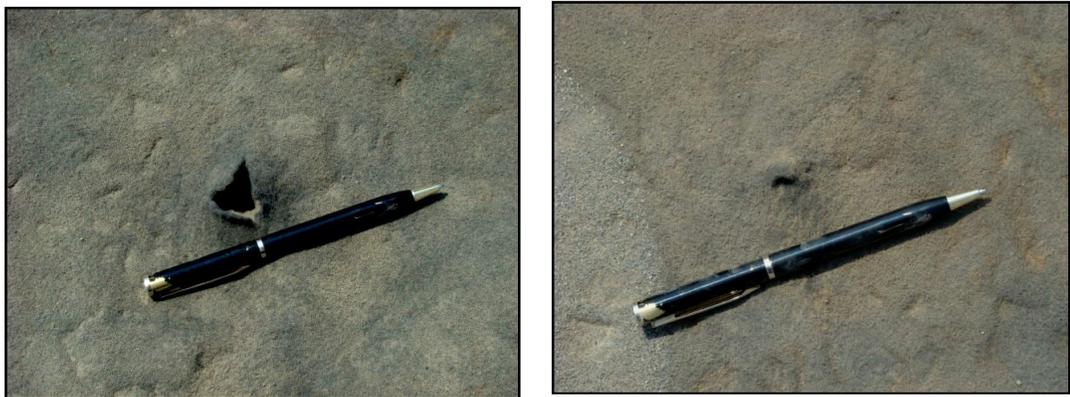


Figura 151. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm sem proteção e brita 3.



Superfície da GM

Rasgo na GM



Rasgo no GT

Rasgo no GT

Figura 152. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PET 300 g/m² e brita 3.

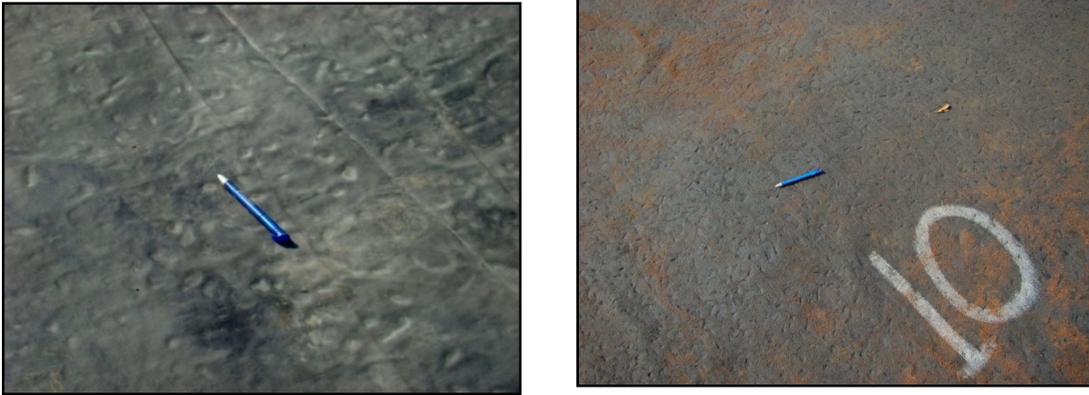
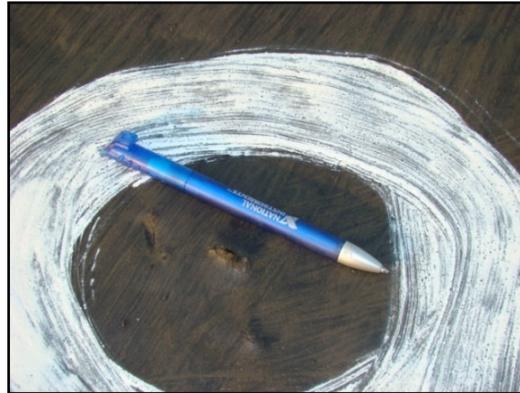


Figura 153. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PET 600 g/m² e brita 3.



Superfície da GM



Rasgo na GM



Superfície do GT



Furo no GT

Figura 154. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PP 600 g/m² e brita 3.



Superfície da GM



Superfície do GT

Figura 155. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PET 1200 g/m² e brita 3.



areia



solo

Figura 156. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com camadas naturais e brita 3.



Figura 157. Danos visuais: GM de PVC de 2,0 mm sem proteção e brita 3.



Figura 158. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm sem proteção e brita 1.



Figura 159. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com GT PET 600 g/m² e brita 1.



Figura 160. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com camadas naturais e brita 1: (a) areia; (b) solo.

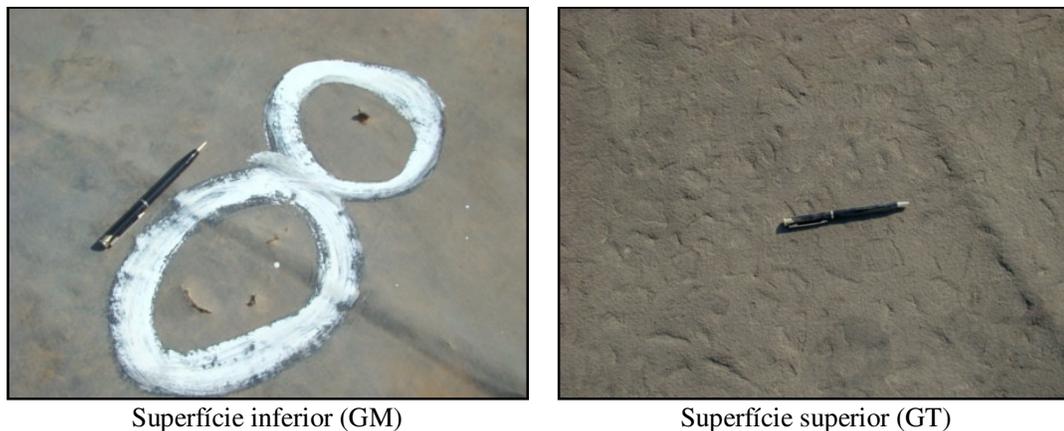


Figura 161. Danos visuais: GM de PVC de 1,0 mm com geocomposto.

Tabela 39. Danos visuais observados nas geomembranas de PVC.

Configuração			Tipo de Dano Visual					Classe
GM	Proteção	Brita	Arranhão	Entalhe	Indentação	Deformação	Furos	
PVC 1,0mm	-	3	-	-	-	muitas	67	I
	GT PET 300		-	-	-	várias	2	I
	GT PET 600		-	-	-	muitas	-	II
	GT PP 600		-	-	-	poucas	11	I
	GT PET 1200		-	-	-	várias	-	II
	Areia		-	-	-	várias	-	II
	Solo		-	-	-	várias	-	II
PVC 2,0mm	-		-	-	-	muitas	2	I
GC	-		-	-	-	inúmeras	inúmeros	I
PVC 1,0mm	-	1	-	-	-	poucas	5	I
	GT PET 600		-	-	-	poucas	-	II
	Areia		-	-	-	várias	-	II
	Solo		-	-	-	várias	-	II

No caso das geomembranas de PVC somente foram verificados danos na forma de deformações e furos. Em se tratando de furos, pôde-se verificar que a incidência de furos foi bastante elevada nas geomembranas sem proteção. Foram verificados grandes rasgos, com extensão em torno de 10 cm, e pequenos furos, muitos deles imperceptíveis a olho nu. A

configuração com geomembrana de 2,0 mm também apresentou furos, embora em menor quantidade do que na geomembrana de 1,0 mm.

Nas configurações com elemento de proteção constatou-se uma redução das deformações e dos furos sobre a superfície da geomembrana. Apenas os geotêxteis de PET 300 g/m² e PP 600 g/m² não foram capazes de proteger a geomembrana contra furos. Estes danos possivelmente estão associados aos movimentos operacionais dos maquinários, que podem ter gerado acréscimos de tensão localizados.

As camadas de proteção com areia e solo apresentaram um bom desempenho visual comparado às proteções com geotêxtil, apresentando poucas deformações e sem furos. Em contrapartida, o geocomposto utilizado apresentou um elevado número de furos.

4.2.2.2. Ensaio Pós-Danos

4.2.2.2.1. Ensaio de Tração Faixa Larga

As Figuras a seguir apresentam as curvas obtidas nos ensaios de tração em faixa larga nas geomembranas de PVC, com diferentes camadas de proteção. A Figura 174 ilustra o mecanismo de ruptura verificado em algumas configurações.

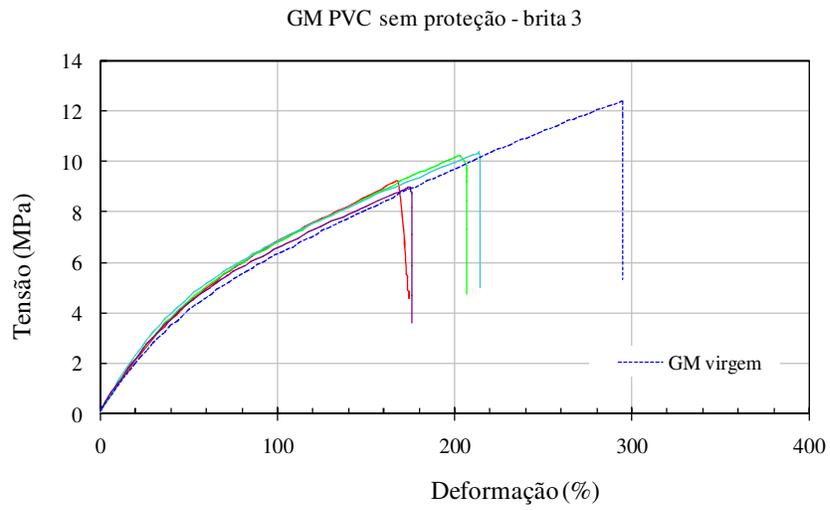


Figura 162. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga: GM de PVC de 1,0 mm sem proteção / brita 3.

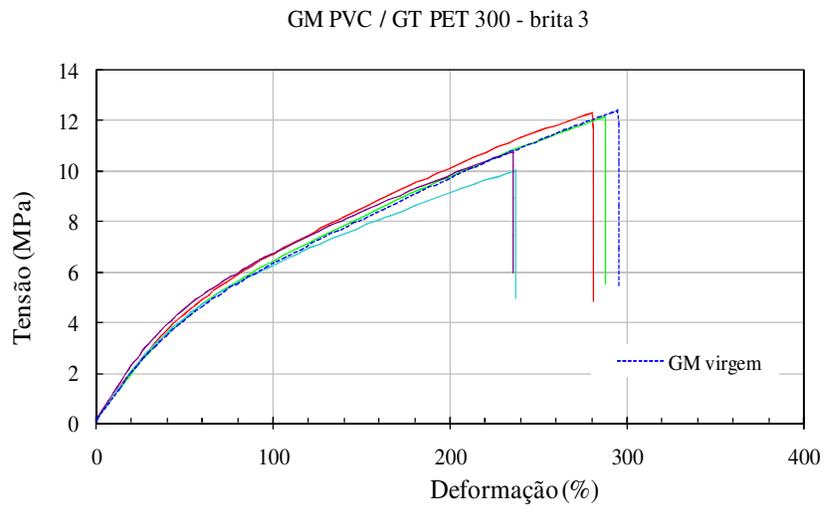


Figura 163. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 300 g/m² / brita 3.

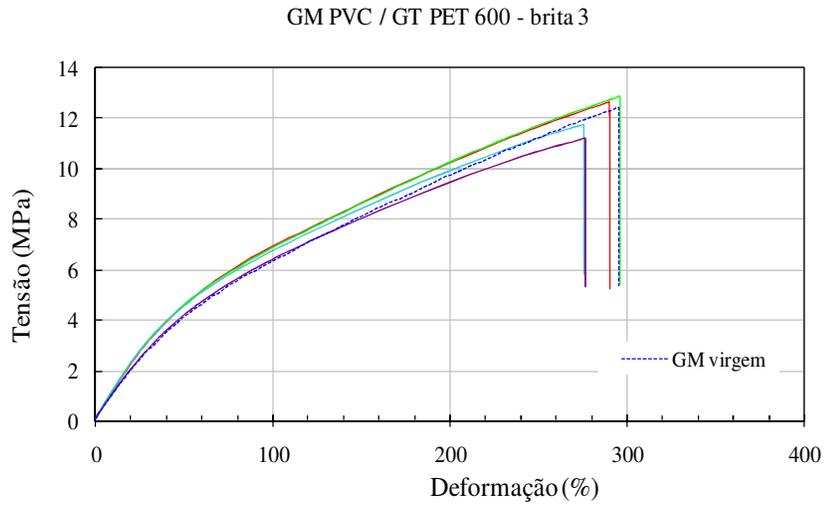


Figura 164. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 600 g/m² / brita 3.

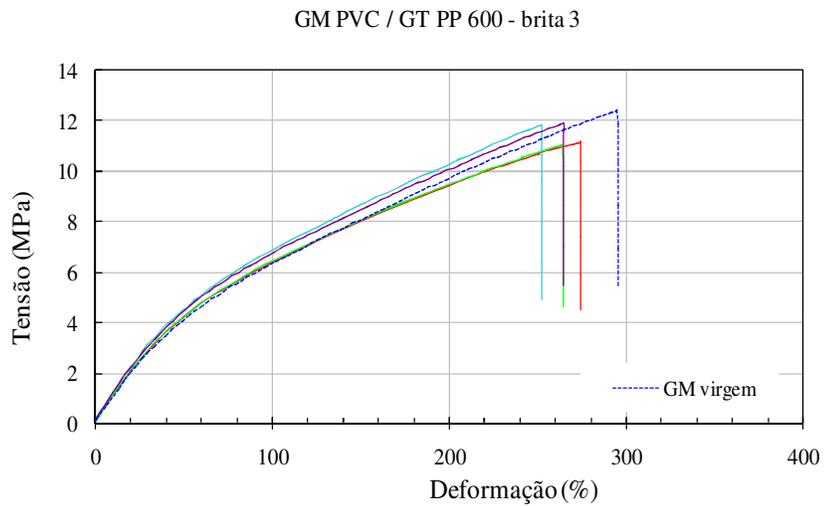


Figura 165. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PP 600 g/m² / brita 3.

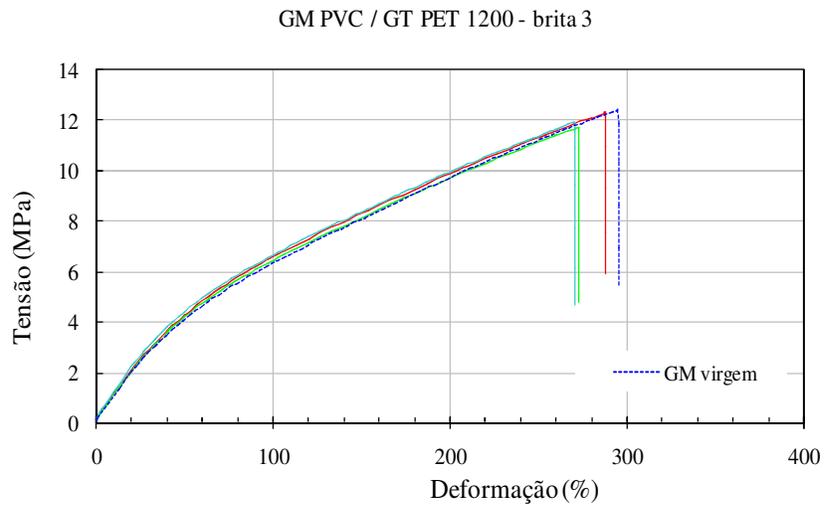


Figura 166. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 1200 g/m² / brita 3.

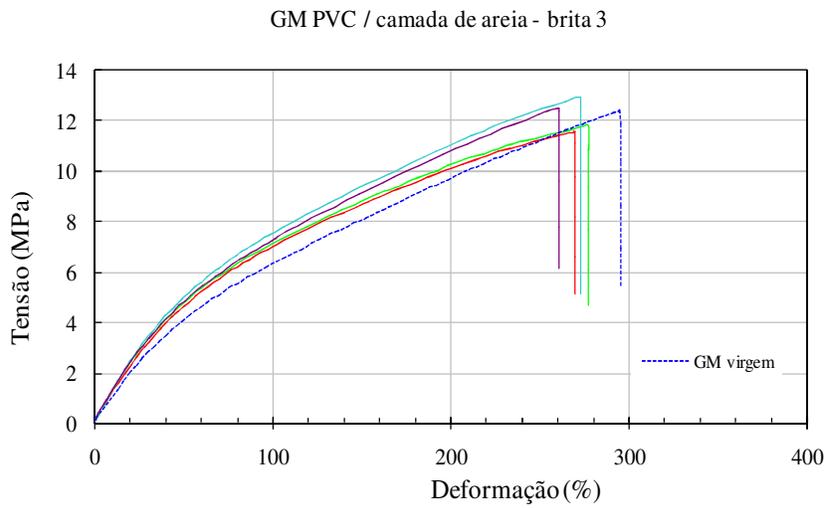


Figura 167. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e camada de areia / brita 3.

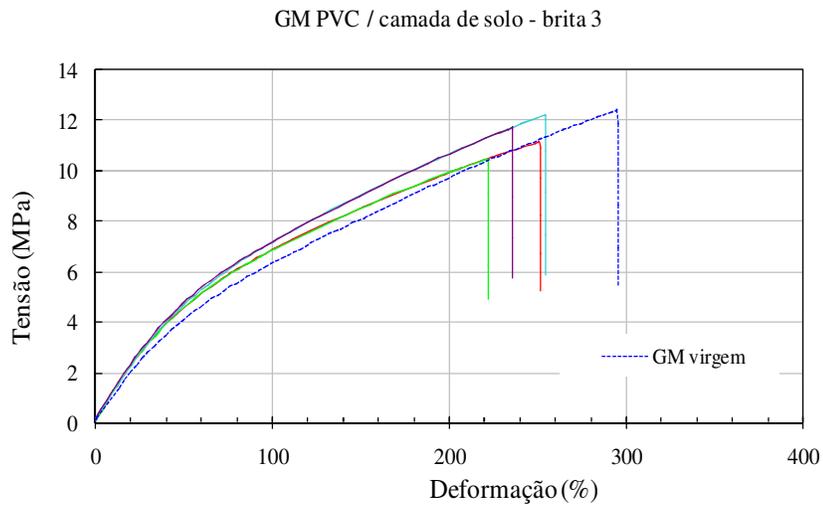


Figura 168. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e camada de solo / brita 3.

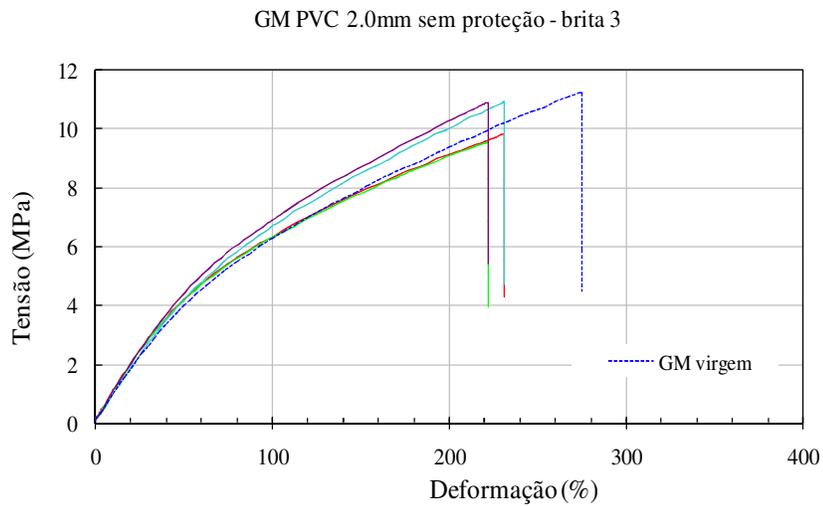


Figura 169. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga: GM de PVC de 2,0 mm sem proteção / brita 3.

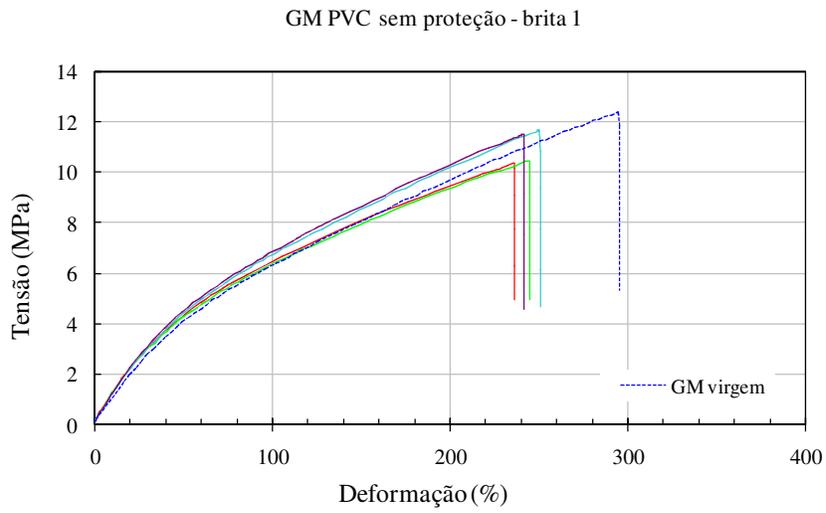


Figura 170. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm sem proteção/ brita 1.

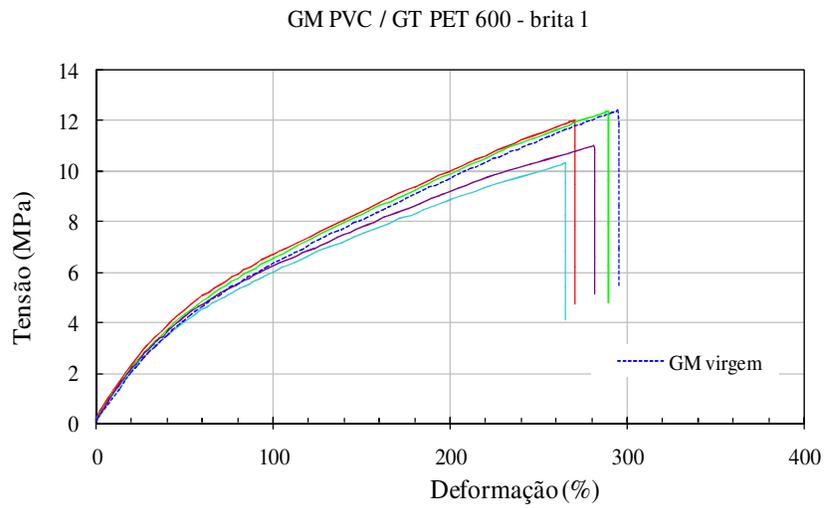


Figura 171. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 600 g/m² / brita 1.

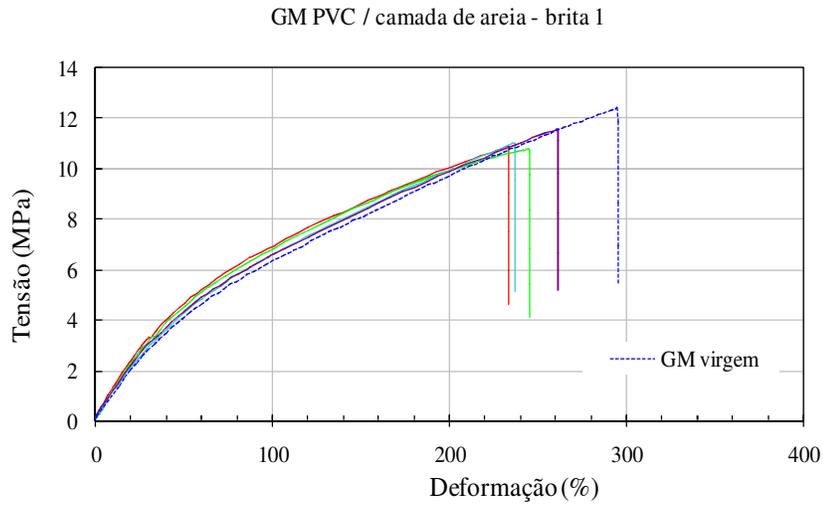


Figura 172. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e areia / brita 1.

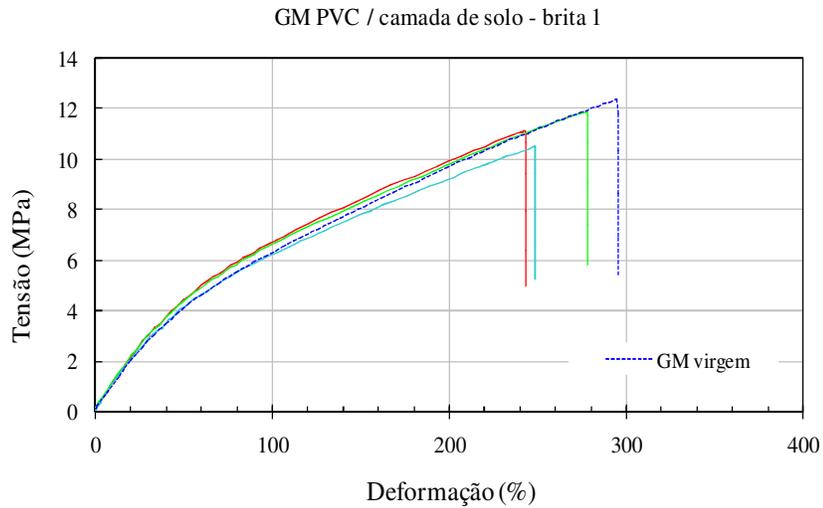


Figura 173. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC de 1,0 mm e solo / brita 1.



GM sem proteção



GT PET 600



Camada de areia

Figura 174. Mecanismo de ruptura nos ensaios de tração em faixa larga – GM de PVC.

As geomembranas sem elemento de proteção romperam com valores de alongamento e tensão de tração mais baixos do que verificado nas geomembranas virgens. Ao se introduzir o elemento de proteção, constatou-se um aumento nos valores de tensão e alongamento de tração na geomembrana, com comportamento semelhante ao da geomembrana virgem.

Com relação ao modo de ruptura, verificou-se que as geomembranas sem proteção romperam por meio de um rasgo iniciado na região mais danificada. Ao contrário, nas geomembranas virgens a ruptura é caracterizada por um corte instantâneo ao longo de toda a

largura do corpo de prova. Nas configurações com proteção, o modo de ruptura foi similar ao verificado nos ensaios de tração com geomembranas virgens.

A Figura 175 apresenta os gráficos de tensão e deformação respectivos aos ensaios realizados com geotêxtil como elemento de proteção. A Tabela 40 sintetiza os resultados de todas as configurações ensaiadas.

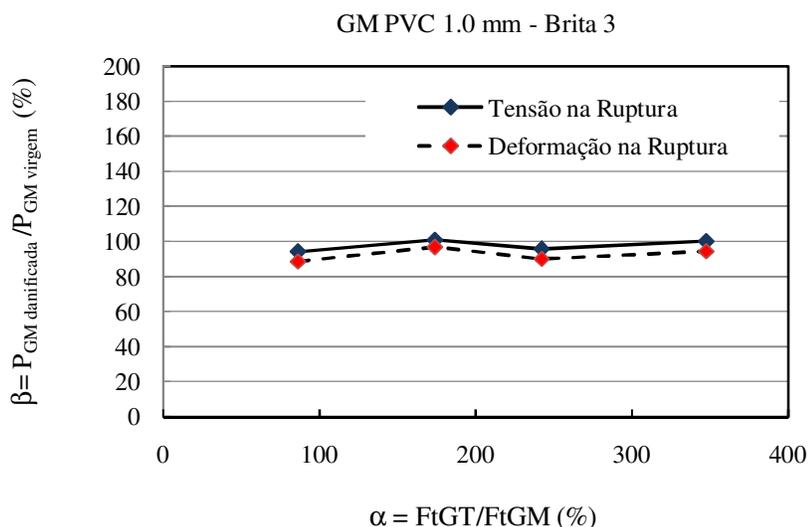


Figura 175. Resultados de tração em faixa larga - GM de PVC: (a) brita 3; (b) brita 1.

Os resultados dos ensaios de tração faixa larga mostram que as maiores reduções ocorreram nas geomembranas danificadas sem proteção. Constataram-se reduções em torno de 45 % e 35% nas forças e deformação de ruptura, respectivamente, para a configuração com brita 3. Na configuração com brita 1, a redução foi de aproximadamente 10% e 20% respectivos à força e deformação na ruptura.

Com a introdução do elemento de proteção, verificou-se um acréscimo da tensão de tração nas geomembranas danificadas atingindo, em todas as configurações, valores próximos à geomembrana virgem. As configurações com geotêxtil apresentaram uma redução de

deformação inferior a 10% comparada à geomembrana virgem, enquanto nas configurações com areia e solo apresentaram uma redução em torno de 15%.

Observa-se também que a resistência à tração da geomembrana não é função das características de tração do geotêxtil, como ocorre nas geomembranas de PEAD.

Tabela 40. Resultados dos ensaios de tração faixa larga realizados nas geomembranas de PVC.

Configuração de Ensaio			σ	$\Delta\sigma$	ϵ	$\Delta\epsilon$
GM	Proteção	Brita	(MPa)		(%)	
GM virgem 1.0 mm	-	-	11,9	-	293	-
GM virgem 2.0 mm	-	-	10,7	-	275	-
GM danificada 1.0 mm	Sem proteção	3	6,5	0,55	193	0,66
	GT PET 300		11,3	0,95	260	0,89
	GT PET 600		12,1	1,02	284	0,97
	GT PET 1200		11,5	1,01	277	0,95
	GT PP 600		12,0	0,97	264	0,90
	Areia		12,2	1,03	270	0,92
	Solo		11,4	0,96	250	0,85
GM danificada 2.0 mm	Sem proteção		10,6	0,99	226	0,82
GM danificada	Sem proteção	1	11,0	0,92	243	0,83
	GT PET 600		11,4	0,96	277	0,95
	Areia		11,1	0,93	244	0,83
	Solo		11,2	0,94	256	0,87

4.2.2.2.2. Ensaio de Tração MultiAxial

As Figuras a seguir apresentam as curvas e a análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração multiaxial com geomembranas de PVC. A Tabela 41 apresenta a síntese dos resultados.

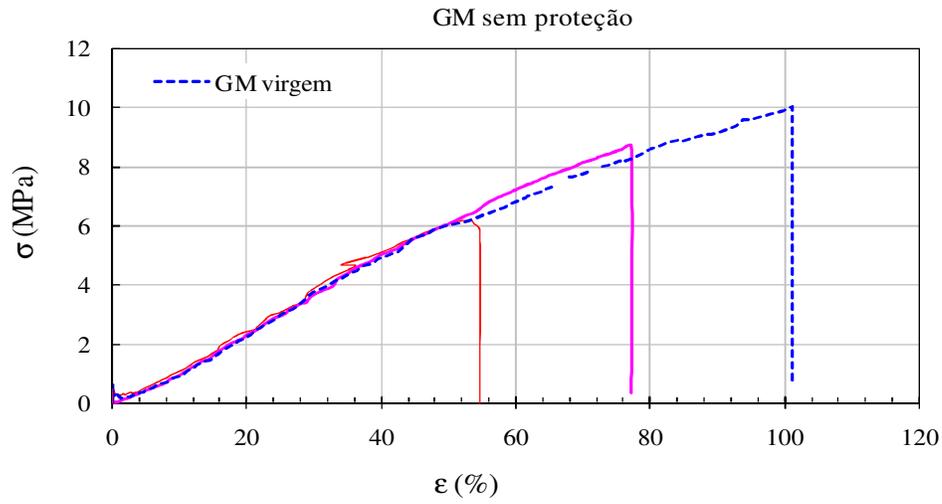


Figura 176. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm sem proteção / brita 3.

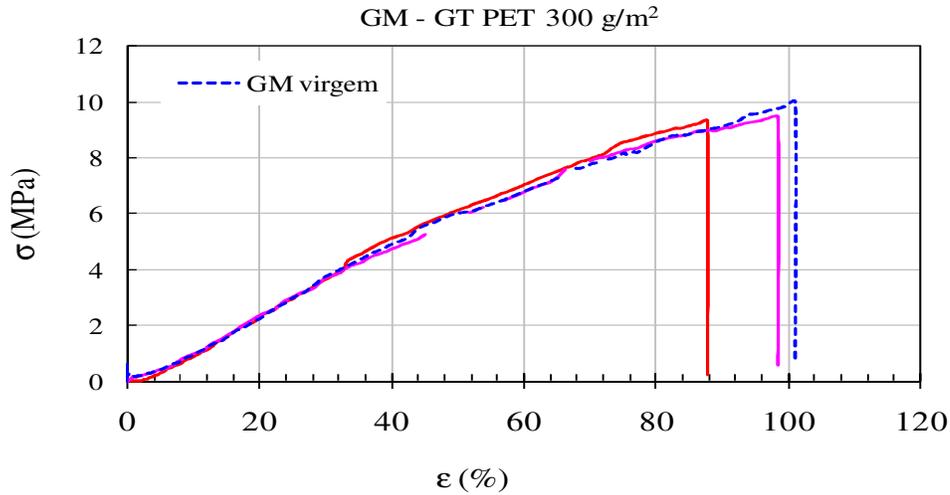


Figura 177. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 300 g/m² / brita 3.

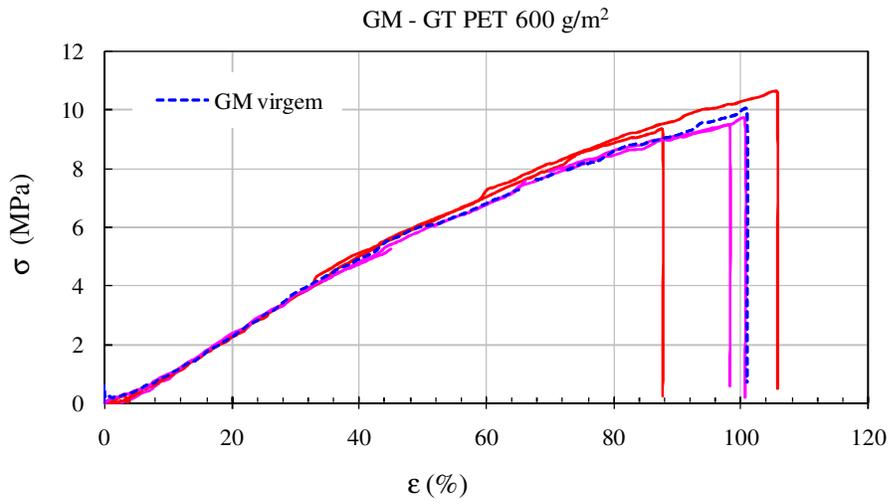


Figura 178. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 600 g/m² / brita 3.

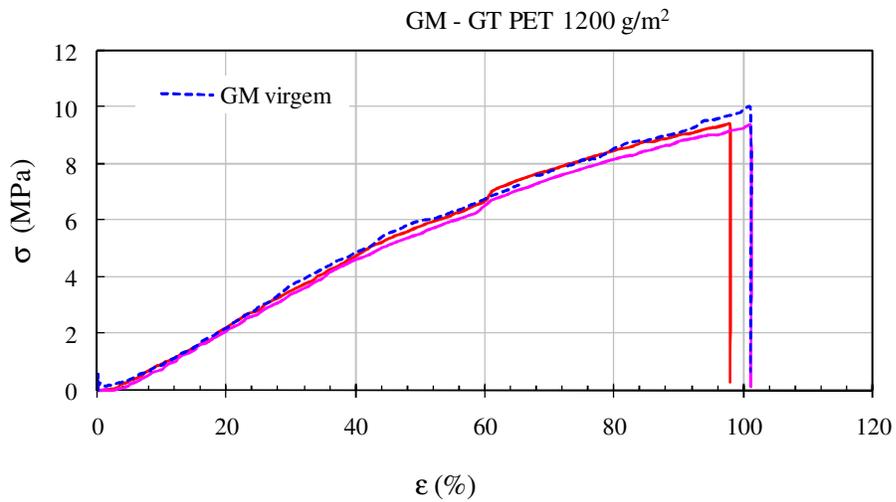


Figura 179. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e GT PET 1200 g/m² / brita 3.

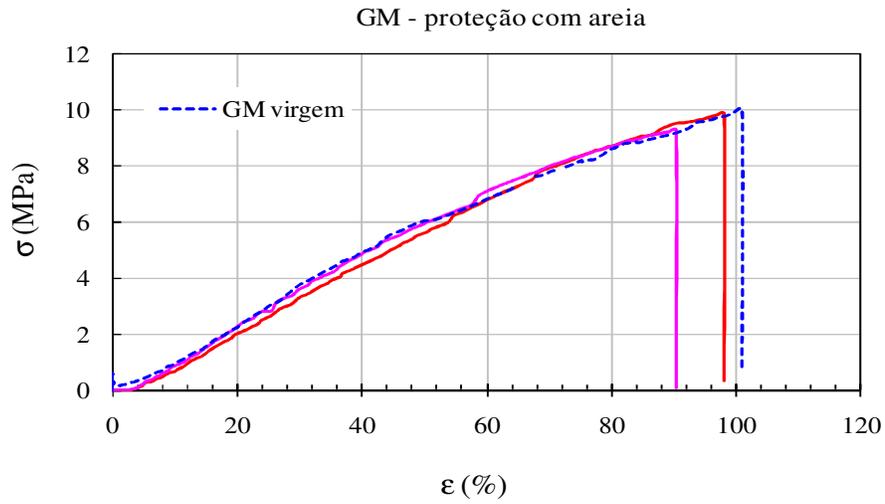


Figura 180. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e camada de areia / brita 3.

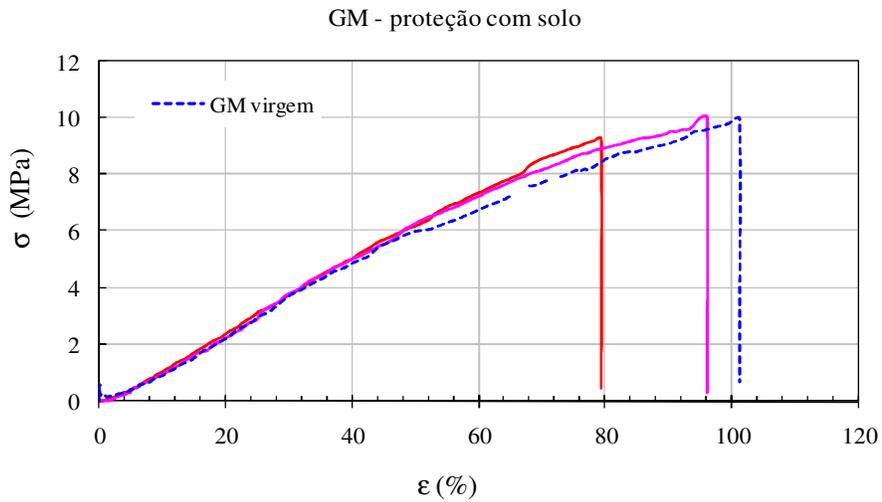


Figura 181. Resultados dos ensaios de tração multiaxial – GM de PVC de 1,0 mm e camada de solo / brita 3.

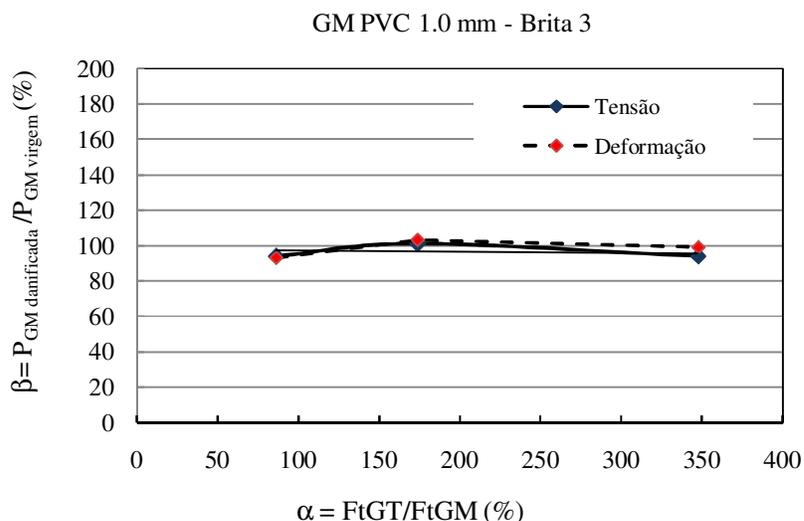


Figura 182. Análise ensaio de tração multiaxial – GM de PVC e brita 3.

Tabela 41. Resultados dos ensaios de tração multiaxial realizados nas geomembranas de PVC.

Configuração de Ensaio			σ	$\Delta\sigma$	ϵ	$\Delta\epsilon$
GM	Proteção	Brita	(MPa)		(%)	
GM virgem 1.0 mm	-	-	10,0	-	100	-
GM danificada 1.0 mm	Sem proteção	3	7,2	0,72	66	0,66
	GT PET 300		9,4	0,94	93	0,93
	GT PET 600		10,1	1,01	103	1,03
	GT PET 1200		9,4	0,94	99	0,99
	Areia		9,5	0,95	94	0,94
	Solo		9,7	0,97	90	0,90

Os resultados mostram que a geomembrana danificada sem proteção apresentou grande redução nos valores de tensão e deformação à tração, em torno de 30%.

No caso das geomembranas com proteção, constata-se um aumento nos valores da tensão e deformação, que tendem ao valor da geomembrana virgem. De modo análogo ao verificado nos ensaios de tração em faixa larga, a variação das propriedades de tração multiaxial da geomembrana com o tipo de proteção empregado foi de pequena grandeza.

A Figura 183 ilustra o modo de ruptura observado nas geomembranas de PVC submetidas ao ensaio de tração multiaxial.



GM PVC virgem



GM sem proteção – CPI



GM sem proteção – CP2



GM PVC / GT PET 300



GM PEAD / GT PET 600



GM PEAD / GT PET 1200



GM PEAD / areia



GM PEAD / solo

Figura 183. Modo de ruptura nos ensaios de tração multiaxial: GM PVC 1,0 mm / brita3.

Verifica-se que a geomembrana virgem rompeu no centro da amostra (topo da abóbada) como um estouro. No entanto, a geomembrana danificada sem proteção apresentou sua ruptura caracterizada por um pequeno furo (primeiro corpo de prova) e um longo corte central (primeiro corpo de prova), ambos localizados no centro da amostra.

Em geral, as geomembranas danificadas com proteção apresentaram o modo de ruptura semelhante à geomembrana virgem. Excetuam-se as geomembranas com proteção de geotêxtil de PET 300g/m² e com solo, as quais apresentaram a ruptura caracterizada por um longo corte central.

De acordo com o modo de ruptura observado e com o critério proposto por Badu *et al.* (1998), todas as configurações seriam capazes de garantir a integridade da geomembrana, incluindo a configuração sem elemento de proteção. Fato não constatado no campo, pois as configurações sem proteção e com PET 300 g/m² e PP 600g/m² apresentaram furos.

No caso específico das geomembranas de PVC, que são flexíveis, os danos se distribuem praticamente ao longo de toda a sua superfície, isto é, são uniformes e não pontuais, como ocorrem nas geomembranas de PEAD. Desta forma, a ruptura ocorre sempre na região central devido à sobreposição do dano com a região onde as tensões são maiores.

4.2.2.3. Influência das características dos agregados no desempenho do elemento de proteção.

A Figura 184 abaixo mostra o resultado dos ensaios de tração em faixa larga em função das características dos agregados utilizados.

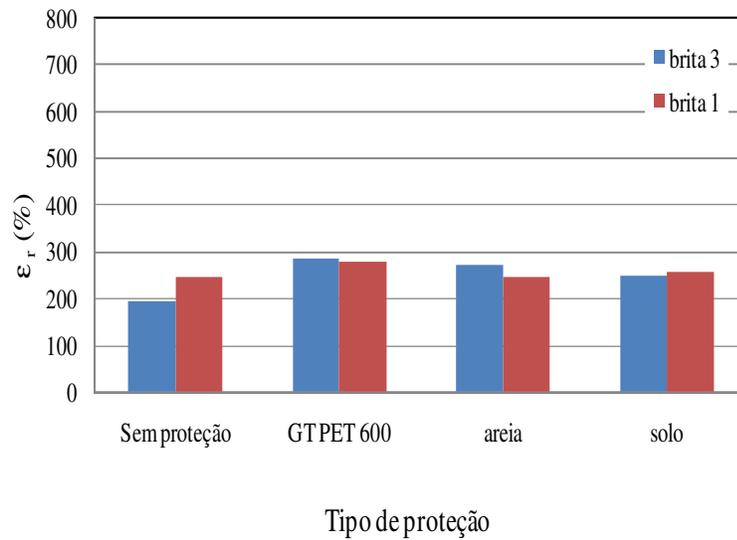
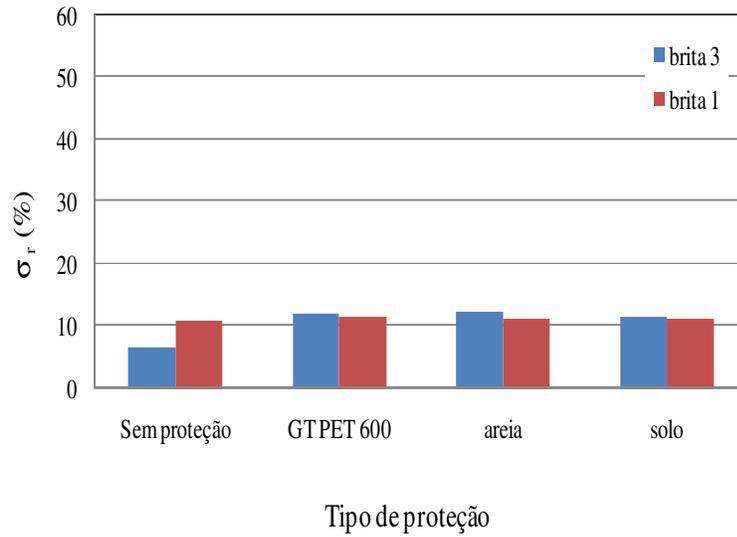


Figura 184. Resultados dos ensaios de tração em faixa larga de GM de PVC (1,0mm) em função do diâmetro e formato dos agregados.

Os resultados dos ensaios de tração em faixa larga indicaram que a variação da deformação com relação ao tamanho e formato dos agregados é desprezível. Apenas as geomembranas sem proteção que apresentaram maior redução de tensão ($\Delta\sigma=30\%$) e de deformação ($\Delta\varepsilon=40\%$) nas configurações com brita 3 (maior diâmetro).

No entanto, nas configurações com proteção não se verificou alteração nas propriedades de tração da geomembrana com o tamanho ou com a forma dos agregados.

4.3. Avaliação do Desempenho dos Materiais de Proteção segundo o CFG (2001)

Com base nos resultados dos ensaios pós-danos realizados nas geomembranas associados à análise visual, e seguindo a classificação proposta pelo CFG (2001), pôde-se avaliar o desempenho dos elementos de proteção utilizados.

A classificação das geomembranas é função dos tipos de danos identificados e das propriedades alteradas das geomembranas. Os danos foram divididos em três níveis:

- Nível I: A geomembrana apresenta furos (1 ou vários).
- Nível II: A geomembrana apresenta um ou várias indentações, entalhes, deformações ou arranhões.
- Nível III: A geomembrana não apresenta nenhum tipo de dano.

O nível I é considerado totalmente inaceitável pelo CFG e, em geral, não necessita ensaios complementares. Nos níveis II as modificações de propriedades das geomembranas são consideradas. O guia sugere um mínimo de 25% de decréscimo nas propriedades analisadas para que a geomembrana seja considerada danificada.

Os níveis podem ainda ser subclassificados em função do nome e da dimensão dos danos observados, seguindo uma numeração por dano decrescente, ou seja, da geomembrana mais danificada para a menos danificada. Assim, propõe-se o seguinte critério de classificação das geomembranas para os níveis II:

- Classe II.1 → os decréscimos de tensão ($\Delta\sigma$) e deformação ($\Delta\varepsilon$) de ruptura nos ensaios de tração em faixa larga são maiores que 25%, e os decréscimos de deformação no ensaio multiaxial são maiores que 50%.
- Classe II.2 → os decréscimos de tensão ($\Delta\sigma$) e deformação ($\Delta\varepsilon$) de ruptura nos ensaios de tração em faixa larga são menores ou iguais a 25%, e os decréscimos de deformação no ensaio multiaxial são menores ou iguais a 50%.

A Tabela 42 apresenta o desempenho dos elementos de proteção utilizados nas geomembranas de PEAD com base na classificação proposta.

Tabela 42. Desempenho dos elementos de proteção utilizados nas geomembranas de PEAD.

Elemento de Proteção	Tipo de brita	Classificação
GT PET 300 g/m ²		II.1
GT PET 600 g/m ²		II.2
GT PP 600 g/m ²	3	II.2
GT PET 1200 g/m ²		III
Areia		II.1
Solo		II.1
GT PET 300 g/m ²		II.1
GT PET 600 g/m ²		II.2
GT PET 1200 g/m ²	1	III
Areia		II.1
Solo		II.1

Observa-se que o geotêxtil de PET 300 g/m², a camada de areia e de solo apresentaram o mesmo desempenho como elemento de proteção, enquadrando-se na categoria II.1. Apesar

das configurações com proteção de areia e solo apresentarem poucos danos mecânicos visíveis, constatou-se uma elevada redução nas propriedades das geomembranas danificadas.

Verificou-se também que os geotêxteis de PET 600 g/m² e PP 600 g/m² se enquadram na categoria II.2, como desempenho semelhante, independente de suas características de tração.

E, por último, verificou-se que o geotêxtil de PET 1200 g/m² se enquadra na categoria III, sendo a única configuração onde as propriedades das geomembranas não são significativamente afetadas pelo dano de instalação, e sem a presença de danos mecânicos visíveis.

A Tabela 43 apresenta o desempenho dos elementos de proteção utilizados nas geomembranas de PVC seguindo também a classificação proposta.

Tabela 43. Desempenho dos elementos de proteção utilizados nas geomembranas de PVC.

Elemento de Proteção	Tipo de brita	Classificação
GT PET 300 g/m ²		I
GT PET 600 g/m ²		II.2
GT PP 600 g/m ²	3	I
GT PET 1200 g/m ²		II.2
Areia		II.2
Solo		II.2
GT PET 600 g/m ²		II.2
Areia	1	II.2
Solo		II.2

Em geral, conforme já discutido anteriormente, os elementos de proteção utilizados nas geomembranas de PVC apresentaram o mesmo desempenho. Verifica-se que os elementos se encaixam na categoria II.2, com pouca ou nenhuma variação nas propriedades das geomembranas danificadas.

Verifica-se que os únicos elementos de proteção não capazes de prevenir furos nas geomembranas foram os geotêxteis de PET 300 g/m² e PP 600 g/m² (brita 3), enquadrando-se na categoria I.

4.4. Comparação entre os Resultados dos Ensaios de Laboratório e de Campo

4.4.1. Ensaios de Campo *versus* Ensaios Índice

Os resultados dos ensaios índices mostraram que as geomembranas de PVC apresentaram um elevado aumento na força de punção com a introdução do geotêxtil. Verificou-se também que o desempenho dos geotêxteis foi mais bem caracterizado em termos de resistência à tração (R_{tGT}) do que pela gramatura (Gr). Os dados indicaram que quanto maior a resistência à tração do geotêxtil, maior a força de punção do conjunto geomembrana / geotêxtil.

Os resultados dos ensaios de tração realizados nas amostras de geomembranas danificadas no campo também mostraram que a introdução do geotêxtil como elemento de proteção aumenta a resistência da geomembrana contra danos de instalação. Verificou-se que as características de tração das geomembranas danificadas com camada de proteção se aproximaram das características da geomembrana virgem. No entanto, verificou-se que todos os geotêxteis apresentaram o mesmo desempenho em termos quantitativos, independente da resistência à tração.

Adicionalmente, os resultados dos ensaios índices realizados com geomembranas de PEAD mostraram o aumento da força de punção da geomembrana com a introdução do geotêxtil como elemento de proteção. Também se constatou que quanto maior a resistência à tração do geotêxtil, maior a força de punção do conjunto geomembrana / geotêxtil.

Ao se analisar as geomembranas de PEAD submetidas aos danos de instalação de campo, verificou-se que a introdução do elemento de proteção também aumenta a resistência da geomembrana. Observou-se uma redução dos danos mecânicos visíveis sobre a superfície das geomembranas, e um aumento das propriedades de tração em relação às geomembranas danificadas sem proteção. Nas configurações com brita de menor diâmetro verificou-se um aumento das propriedades de tração das geomembranas com o aumento da resistência à tração do geotêxtil. Contudo, nas configurações com brita de maior diâmetro, constatou-se que as propriedades de tração da geomembrana não se modificam com o aumento da resistência à tração do geotêxtil.

Ou seja, os resultados indicam que a avaliação dos elementos de proteção através de ensaios índices pode ser mascarada pelas características granulométricas dos agregados utilizados em campo.

4.4.2. Ensaio de Campo *versus* Ensaio Cíclico

As Tabelas a seguir mostram uma comparação da análise visual das geomembranas de PEAD e PVC, respectivamente, submetidas a ensaios de danos de instalação provocados por carregamentos cíclicos em laboratório e em campo. Tais resultados se referem aos ensaios realizados com brita 1.

Tabela 44. Comparação dos danos visuais observados nas geomembranas de PEAD.

Configuração	Ensaio	Tipo de Dano				
		arranhão	entalhe	indentação	deformação	furo
GM sem proteção- 200 kPa- 200 ciclos	laboratório	✓	-	-	-	-
GM sem proteção- 200 kPa- 500 ciclos		✓	-	-	-	-
GM sem proteção- 200 kPa- 1000 ciclos		✓	-	-	-	-
GM sem proteção- 400 kPa- 200 ciclos		✓	-	-	-	-
GM sem proteção- 400 kPa- 500 ciclos		✓	-	-	-	-
GM sem proteção- 400 kPa- 1000 ciclos		✓	-	-	-	-
GM sem proteção		campo	✓	-	-	✓
GM GT PET 300	laboratório	✓	-	-	-	-
	campo	✓	-	-	✓	-
GM GT PET 600	laboratório	✓	-	-	-	-
	campo	✓	-	✓	✓	-

Tabela 45. Comparação dos danos visuais observados nas geomembranas de PVC.

Configuração	Ensaio	Tipo de Dano				
		arranhão	entalhe	indentação	deformação	furo
GM sem proteção- 200 kPa- 200 ciclos	laboratório	-	-	-	✓	-
GM sem proteção- 200 kPa- 500 ciclos		-	-	-	✓	-
GM sem proteção- 200 kPa- 1000 ciclos		-	-	-	✓	-
GM sem proteção- 400 kPa- 200 ciclos		-	-	-	✓	-
GM sem proteção- 400 kPa- 500 ciclos		-	-	-	✓	-
GM sem proteção- 400 kPa- 1000 ciclos		-	-	-	✓	-
GM sem proteção		campo	-	-	-	✓
GM GT PET 300	laboratório	-	-	-	-	-
	campo	-	-	-	✓	-
GM GT PET 600	laboratório	-	-	-	-	-
	campo	-	-	-	✓	-

Comparando as geomembranas de PEAD, observa-se que os danos mecânicos foram mais intensos nos ensaios de campo. Enquanto nos ensaios de laboratório só foi verificada a presença de arranhões, no campo verificou-se a existência de outros tipos de danos como entalhes, indentações e furos. Além disto, a ocorrência dos arranhões foi maior nos ensaios de campo.

A análise visual também mostra que os elementos de proteção reduzem os danos, mas no campo, dependendo da configuração, não impedem o aparecimento de alguns danos considerados críticos como arranhões e indentações.

Os danos mecânicos nas amostras de geomembrana de PVC submetidas aos ensaios de instalação em campo também foram mais intensos do que as amostras de geomembranas submetidas campo aos ensaios de carregamento cíclico em laboratório. Observa-se que nenhuma amostra de geomembrana sem elemento de proteção apresentou furos nos ensaios de laboratório. Nas configurações com geotêxtil como elemento de proteção também não foram constatados furos e, a introdução deste reduziu as deformações na superfície das geomembranas. Ao contrário, nos ensaios de campo, constatou-se a presença de furos (rasgos) nas geomembranas sem proteção, e de deformações nos ensaios realizados com geotêxtil de PET 300 e 600 g/m².

Comparando-se os ensaios de danos de instalação em laboratório e no campo, verificou-se que o processo de execução apresenta o mesmo mecanismo, que consiste na aplicação sucessiva de vários carregamentos e descarregamentos sobre a geomembrana (carregamento cíclico). No entanto, ao analisar os detalhes executivos, verificam-se várias diferenças. No ensaio de carregamento cíclico em laboratório, a carga atuante variou de 200 a 400 kPa e foram aplicados 1.000 ciclos (1.000 manobras de carregamento e descarregamento). Em contrapartida, no ensaio de campo, a carga atuante exercida pela área de contato do trator com a geomembrana foi de aproximadamente 60 kPa. Além disto, após o

lançamento da brita, a camada de drenagem foi compactada com 8 passadas, sendo que cada passada corresponde a um movimento de avanço e recuo do trator.

Observa-se que o carregamento e o número de ciclos (passadas) no campo foram de menor intensidade do que no laboratório. No entanto, os danos no campo foram muito mais intensos. Cabe ressaltar que os ensaios de laboratório não simulam as manobras operacionais que ocorrem no campo como frenagem e movimentação giratória do trator. Tais manobras geram esforços adicionais e, pelo constatado no campo, aumentam os danos à geomembrana.

Conclui-se que, em termos de análise visual, o tipo e a intensidade dos danos mecânicos verificados nos ensaios de carregamento cíclico não condizem com o comportamento verificado em campo.

Em termos quantitativos, verificou-se nos ensaios de laboratório (Figura 86) uma redução nos valores de tensão e deformação à tração na ruptura nas geomembranas de PEAD de 30% e 20%, respectivamente, nas configurações sem elemento de proteção. Nos ensaios de campo a redução foi de 35% e 90% respectivos a tensão e a deformação de tração na ruptura. Os ensaios de laboratório indicaram que as propriedades das geomembranas não se alteram com a introdução do geotêxtil. Incluem-se nestas propriedades as forças de punção, de rasgo e a tensão e deformação à tração na ruptura. Entretanto, nos ensaios de campo verificou-se que a introdução do geotêxtil proporcionou elevado aumento de deformação à tração na ruptura.

Analisando-se as alterações das geomembrana de PVC em termos quantitativos, verificou-se nos ensaios de laboratório uma redução da tensão e deformação à tração na ruptura de 15% e 50%, respectivamente, nas configurações sem elemento de proteção. Nos ensaios de campo a redução foi de 8% e 15% respectivos a tensão e deformação à tração na ruptura. Os ensaios de laboratório e de campo também indicam que deformação a tração na ruptura aumentou com a introdução do geotêxtil. No entanto, ao contrário do que se esperava,

os menores decréscimos de deformação foram verificados nos ensaios de campo, onde os danos foram mais intensos.

4.5. Comparação dos Resultados de Campo com os Dados e Métodos da Literatura

4.5.1. Análise dos Danos de Instalação: Comparação com Reddy et al. (1996)

As Tabelas a seguir apresentam uma comparação entre os resultados dos ensaios de tração multiaxial e em faixa larga realizados nas geomembranas de PEAD e os dados relatados em Reddy *et al.* (1996), também referentes a danos de instalação.

Os geotêxteis comparados são não tecidos, agulhados e gramatura aproximada de 300 g/m². O pedregulho classificado como médio apresenta partículas com diâmetro entre 10 a 40 mm, enquanto o pedregulho fino apresenta partículas com diâmetro entre 8 e 25 mm, ambos com forma angular e com granulometria não uniforme. Estas características assemelham-se às características dos agregados utilizados nos ensaios de campo, respectivos a brita 3 e brita 1. A maior variação refere-se à granulometria da brita 3 (20 a 100 mm).

Tabela 46. Comparação dos Ensaio de Tração Multiaxial.

Condição do Ensaio	Ensaio de Tração Multiaxial							
	Reddy et al. (1996)				Ensaio de Campo			
	σ (MPa)	$\Delta\sigma$	ϵ (%)	$\Delta\epsilon$	σ (MPa)	$\Delta\sigma$	ϵ (%)	$\Delta\epsilon$
GM virgem	15,1	-	25,3	-	25,6	-	62	-
Pedregulho médio, sem GT	16,9	1,12	15,16	0,60	25,0	0,98	14	0,23
Pedregulho médio, com GT	14,6	0,97	26,9	1,06	25,9	1,01	16	0,26
Pedregulho fino, sem GT	15,7	1,04	18,3	0,72	23,8	0,93	23	0,37
Pedregulho fino, com GT	14,7	0,97	29,2	1,15	23,9	0,93	24	0,40

$\Delta\sigma \rightarrow$ razão entre a $\sigma_{\text{geomembrana danificada}}$ e $\sigma_{\text{geomembrana virgem}}$
 $\Delta\epsilon \rightarrow$ razão entre a $\epsilon_{\text{geomembrana danificada}}$ e $\epsilon_{\text{geomembrana virgem}}$

Tabela 47. Comparação dos Ensaio de Tração Faixa Larga.

Condição do Ensaio	Ensaio de Tração Faixa Larga							
	Reddy et al. (1996)				Ensaio de Campo			
	σ_{rup} (MPa)	$\Delta\sigma$	ϵ_{rup} (%)	$\Delta\epsilon$	σ_{rup} (MPa)	$\Delta\sigma$	ϵ_{rup} (%)	$\Delta\epsilon$
GM virgem	21,3	-	1211	-	16,9	-	710	-
Pedregulho médio, sem GT	12,2	0,57	464	0,38	10,0	0,59	67	0,09
Pedregulho médio, com GT	19,1	0,90	1048	0,87	10,1	0,60	80	0,11
Pedregulho fino, sem GT	12,5	0,59	505	0,42	13	0,77	61	0,09
Pedregulho fino, com GT	15,8	0,74	1027	0,85	10,4	0,62	412	0,58

$\Delta\sigma \rightarrow$ razão entre a $\sigma_{\text{geomembrana danificada}}$ e $\sigma_{\text{geomembrana virgem}}$
 $\Delta\epsilon \rightarrow$ razão entre a $\epsilon_{\text{geomembrana danificada}}$ e $\epsilon_{\text{geomembrana virgem}}$

Verifica-se nas configurações sem proteção, em ambos os trabalhos, uma redução significativa dos valores de deformação multiaxial, e dos valores de tensão e deformação na ruptura nos ensaios de tração faixa larga.

No entanto, a redução das características analisadas nas geomembranas danificadas foi mais intensa no trabalho de campo aqui apresentado. Observa-se, por exemplo, que as deformações obtidas no ensaio multiaxial apresentaram uma redução de 80 % (brita 3) e 60 % (brita 1) em relação à geomembrana virgem. No trabalho de Reddy *et al.* (1996), as deformações apresentaram uma redução de 40 % (brita 3) e 30 % (brita 1). Os resultados dos ensaios de tração em faixa larga das amostras de campo mostram uma redução na deformação de ruptura de 90 % em relação à geomembrana virgem, para ambas as granulometrias, enquanto os resultados de Reddy *et al.* (1996) mostram uma redução de 60 %.

Ao se analisar a introdução do geotêxtil no trabalho de Reddy *et al.* (1996), observa-se um elevado aumento nos valores de deformação de ruptura no ensaio multiaxial, e de tensão e deformação de ruptura no ensaio de tração em faixa larga, alcançando valores próximos as características da geomembrana virgem.

Ao contrário, nos resultados do ensaio de campo aqui apresentado, verificou-se que a introdução do geotêxtil de PET 300 g/m² não aumenta os valores das propriedades de tração das geomembranas danificadas com proteção em relação às geomembranas danificadas sem proteção.

Com base no resultados de seu trabalho, Reddy *et al.* (1996) afirmam que um geotêxtil não tecido de PET 300 g/m² é capaz de fornecer proteção suficiente contra danos de instalação, sem que hajam danos sob sua superfície e alterações em suas propriedades mecânicas de tração.

Entretanto, os resultados dos ensaios aqui apresentados mostram que o geotêxtil de PET 300 g/m² utilizado não apresentou desempenho satisfatório como elemento de proteção.

Esta configuração apresentou o pior desempenho visual no campo, com uma grande concentração de danos sob a forma de arranhões e entalhes. Além disto, a configuração com geotêxtil de PET 300 g/m² também apresentou os maiores decréscimos das propriedades das geomembranas analisadas comparados aos demais geotêxteis.

4.5.2. Metodologia proposta por Badu et al.(1998)

Segundo o critério proposto por Badu *et al.* (1998) para geomembranas de PEAD, o desempenho de elementos de proteção está associado com a localização da ruptura num ensaio de tração multiaxial. Neste critério, uma amostra de geomembrana virgem rompe no topo da abóbada (forma do corpo de prova deformado) porque este é o local onde as tensões são maiores. Se a geomembrana rompe em local diferente do topo da abóbada, isto indica que a amostra foi previamente “enfraquecida” no local onde a ruptura ocorre. Além disto, o critério considera que as características de tração das geomembranas não são significativamente afetadas pelos danos, e que as propriedades obtidas não fornecem informações precisas para correlacioná-las com os danos visíveis.

No entanto, os resultados dos ensaios de tração multiaxial realizados nas amostras de geomembranas de PEAD submetidas ao ensaio de campo mostraram uma elevada redução nos valores de deformação na ruptura em todas as configurações. Mas também não forneceram informações que pudessem correlacionar as características obtidas com os danos visíveis.

Contudo, o modo de ruptura forneceu um bom indicativo do desempenho dos materiais utilizados. Verificou-se, nas configurações sem elemento de proteção e com geotêxtil de PET 300 g/m², que a ruptura foi localizada em cima dos arranhões e entalhes, fora da região central e sem aparecimento de uma zona de escoamento na geomembrana.

As configurações com geotêxteis de PET de 600 g/m², apesar da existência de poucos arranhões, apresentaram a ruptura caracterizada no centro da amostra, semelhante à geomembrana virgem. As configurações com geotêxteis de PP de 600 g/m² e de PET de 1200 g/m², com bom desempenho visual no campo, também apresentaram o modo de ruptura semelhante ao da geomembrana virgem.

Ressalta-se que, apesar das configurações com areia e solo conterem poucos arranhões sobre sua superfície, estas tiveram sua ruptura caracterizada por pequenos furos ou cortes localizados fora da região central. Ou seja, estas configurações foram capazes de diminuir a quantidade dos danos, mas não a intensidade dos danos.

Os resultados dos ensaios indicaram que os arranhões e entalhes correspondem aos danos mais críticos, sendo os principais catalisadores da ruptura da geomembrana.

4.5.3. Metodologia proposta baseada no desempenho a curto prazo (Narejo et al, 1996)

Para correlacionar os dados experimentais obtidos nos ensaios de campo com a metodologia proposta por Narejo *et al.* (1996), calculou-se a pressão disponível para cada gramatura de geotêxtil utilizada segundo a Equação 15.

$$P_{disponível} = 450 \cdot \frac{M}{H^2} \quad \text{Equação 15}$$

Sendo que **M** corresponde à gramatura do geotêxtil em g/m², e **H** corresponde à altura de penetração dos grãos em mm.

A altura de penetração (H) foi admitida como metade do diâmetro máximo do agregado (1/2 D_{máximo}). Assim, H₁ = 14 mm e H₃ = 50 mm, onde H₁ corresponde à altura de penetração da brita 1 e H₃ a altura de penetração da brita 3.

Obtida a pressão disponível, foram aplicados fatores de correlação para as condições de campo (Equação 16).

$$p' = P_{disponível} \left(\frac{1}{MF_S \times MF_{PD} \times MF_R} \right) \cdot \left(\frac{1}{FS_{CR} \times FS_{CBD}} \right) \quad \text{Equação 16}$$

Sendo que:

- $P_{disponível}$ - pressão máxima obtida do ensaio de cone;
- $P'_{admissível}$ - pressão máxima admissível para condições específicas;
- MF_S - fator modificado para o formato dos grãos;
- MF_{PD} - fator modificado para a densidade;
- MF_R - fator modificado para o arqueamento do solo;
- FS_{CR} - fator parcial de fluência;
- FS_{CBD} - fator parcial de degradação biológica e química.

Os valores dos fatores de correlação adotados são apresentados na Tabela 48, com base nos valores sugeridos por Narejo *et al.* (1996).

Tabela 48. Fatores de correlação utilizados para as condições do ensaio de campo.

Agregado	MF_S	MF_{PD}	MF_R	FS_{CR}	FS_{CBD}
Brita 1	1.0	0.50	1.0	1.0	1.0
Brita 3	1.0	0.50	1.0	1.0	1.0

A pressão disponível para geomembranas sem proteção foi estimada a partir dos dados experimentais retratados por Narejo *et al.* (1996), correlacionando a altura dos cones com a pressão máxima obtida (pressão disponível). A Figura 185 apresenta a correlação adotada.

Os valores das pressões disponíveis e admissíveis para todas as configurações são apresentados na Tabela 49.

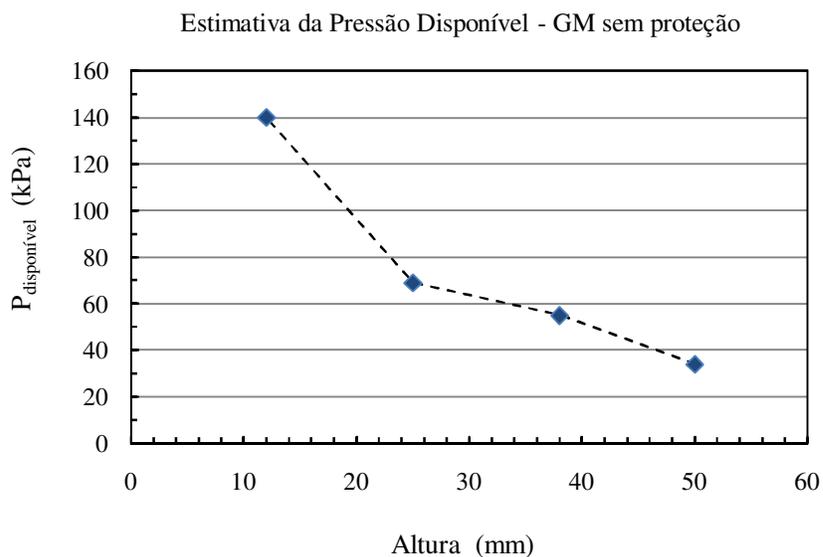


Figura 185. Estimativa da pressão disponível para geomembranas sem proteção (NAREJO *et al*, 1996).

Tabela 49. Cálculo da pressão admissível segundo a metodologia proposta por Narejo *et al* (1996).

Geotêxtil Gramatura (g/m ²)	Ensaio dos Cones P disponível (kPa)		Correlação com o campo P' admissível (kPa)		Pressão de Campo (kPa)	F.S.*	
	H ₃	H ₁	H ₃	H ₁		H ₃	H ₁
	Sem proteção	34	122	24		61	≈ 60
PET 300	53	673	105	1345	≈ 60	1,8	22
PET 600	104	1322**	207	2645	≈ 60	3,5	44
PP 600	107	1361**	213	2723	≈ 60	3,6	45
PET 1200	207	2640**	414	5281	≈ 60	6,9	88

* F.S. → fator de segurança (relação entre a pressão admissível e a pressão atuante)

** Obs.: nenhuma pressão maior que 1100 kPa foi reportada nos ensaios de cones devido a limitação do equipamento.

Segundo a metodologia proposta por Narejo *et al.* (1996), a configuração com geomembrana sem proteção e brita 3 não seria capaz de prevenir furos nas geomembranas, fato realmente verificado no ensaio de campo. Na configuração com brita 1, a pressão admissível é igual à pressão atuante. Entretanto, as geomembranas apresentaram furos, arranhões e entalhes sob sua superfície, além da elevada perda das suas características de tração.

A introdução de um geotêxtil de PET 300 g/m² gera uma pressão admissível de 105 kPa (FS= 1,8) e 1345 kPa (FS=22), respectivos à configuração com brita 3 e 1. Ou seja, este geotêxtil seria suficiente para suportar as condições de campo (pressão) nas configurações com brita 3, e estaria superdimensionado para as condições com brita 1.

No entanto, verificou-se a existência de inúmeros danos sob a forma de entalhes e arranhões na superfície das geomembranas utilizando o geotêxtil de PET 300 g/m². Além disto, conforme já discutido anteriormente, os resultados dos ensaios realizados nas amostras de campo mostram que as características de tração das geomembranas foram bastante alteradas nesta configuração. Verificou-se na configuração com brita 3, por exemplo, decréscimos de 40% e 90% na tensão e deformação de tração de ruptura no ensaio de faixa larga, respectivamente, e 75% na deformação de ruptura no ensaio de tração multiaxial em relação à geomembrana virgem. Na configuração com brita 1, os decréscimos foram de aproximadamente 40% para tensão e deformação de tração de ruptura no ensaio de faixa larga, e 60% para a deformação de ruptura no ensaio de tração multiaxial. O modo de ruptura do ensaio de tração multiaxial também indicou que a geomembrana foi danificada, apresentando comportamento distinto da geomembrana virgem.

Os resultados dos ensaios de campo mostram que a influência do tamanho dos agregados difere da metodologia proposta. Observa-se que a diminuição do tamanho dos agregados não gerou um efeito tão acentuado quanto indicado pela metodologia proposta.

Ao se analisar os demais geotêxteis, também se observa que a pressão admissível é maior do que a pressão aplicada no ensaio de campo. Com os geotêxteis de PET 600 g/m² e PP 600 g/m² observou-se um fator de segurança de 3,5 e 45, respectivos as configurações com brita 3 e 1. E, com o geotêxtil de PET 1200 g/m², verifica-se um fator de segurança de 7 e 88 para as configurações com brita 3 e 1, respectivamente.

Entretanto, apesar dos elevados valores de pressão admissível, os resultados dos ensaios mostraram uma considerável perda de características de tração das geomembranas, principalmente em termos de deformação de ruptura no ensaio de tração multiaxial.

Adicionalmente, os ensaios de campo mostram que as características de tração da geomembrana praticamente não se alteraram com o aumento da gramatura do geotêxtil. Em termos quantitativos, todos os geotêxteis apresentaram o mesmo desempenho, em especial nas configurações com brita de maior diâmetro (brita 3).

Desta forma, verificou-se que a metodologia proposta por Narejo *et al* (1996) não conseguiu reproduzir adequadamente os desempenhos observados em campo.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÃO

Esta tese apresentou uma investigação sobre o desempenho de diferentes materiais de proteção para geomembranas de PEAD e de PVC. Para isto, o programa experimental foi conduzido através ensaios de laboratório e de campo.

Nos ensaios índice de laboratório foram realizados ensaios de punção estática e de punção dinâmica. Nesta etapa foram variados o polímero e espessura da geomembrana, a gramatura e polímero do geotêxtil, a disposição dos geotêxteis e a introdução de uma base de solo compactado. As conclusões acerca dos resultados dos ensaios índice foram:

- A introdução do geotêxtil aumenta a resistência à punção, nos ensaios estáticos, e diminui o diâmetro de perfuração, nos ensaios dinâmicos, da geomembrana.
- A resistência à punção do sistema geomembrana / geotêxtil é função da resistência à tração do geotêxtil. Quanto maior a resistência a tração do geotêxtil, maior o acréscimo de resistência a punção para a geomembrana.
- A resistência à punção também depende da resistência à tração da geomembrana. Geomembranas com baixa resistência à tração (PVC) apresentam um elevado acréscimo de resistência com a introdução do geotêxtil. Ao contrário, geomembranas com elevada resistência à tração (PEAD) apresentam baixos acréscimos de resistência.
- A resistência à punção da geomembrana é proporcional a sua espessura. No entanto, este efeito é pequeno comparado a introdução do geotêxtil.

– A introdução de uma base de solo compactado aumenta a resistência à punção da geomembrana sem proteção. Ao comparar as configurações com proteção, observa-se que o acréscimo de resistência é menor na configuração geomembrana / geotêxtil sem base de solo compactado. Este comportamento indica que, em campo, o acréscimo de resistência pode não ser tão evidente com a introdução do geotêxtil.

Nos ensaios de desempenho de laboratório foram realizados ensaios de carregamento cíclico em geomembranas. Foram variados o polímero da geomembrana, a gramatura do geotêxtil, o número de ciclos e a magnitude da carga aplicada. As conclusões desta etapa foram:

– Os danos mecânicos presentes na geomembrana após o carregamento cíclico não foram tão intensos. As geomembranas de PEAD apresentaram poucos danos na forma de arranhões e, as geomembranas de PVC apresentaram danos na forma de deformação. Não foram constatados furos em nenhuma configuração de ensaio, até mesmo nos ensaios com maior número de ciclos e maior carga aplicada.

– As propriedades das geomembranas danificadas praticamente não foram alteradas pelo carregamento cíclico. A maior mudança foi verificada em termos de deformação na ruptura da geomembrana.

– A introdução do geotêxtil não aumentou as características mecânicas das geomembranas em relação à geomembrana danificada. Apenas nas geomembranas de PVC foi verificado um acréscimo de deformação na ruptura com a introdução e aumento da resistência à tração do geotêxtil.

– A transmissividade hidráulica das geomembranas danificadas de PVC apresentou a mesma ordem de grandeza das geomembranas virgens.

– O tempo de ruptura do ensaio de *stress cracking* também não foi alterado com o carregamento cíclico. As configurações de geomembranas de PEAD com e sem elemento de proteção apresentaram o mesmo de tempo de ruptura que as geomembranas virgens.

– Em síntese, as propriedades mecânicas, hidráulicas e de desempenho das geomembranas danificadas por este tipo de solicitação não foram alteradas.

Nos ensaios de campo foram simulados os danos de instalação em geomembranas referentes à fase de instalação das geomembrana e construção da camada de drenagem.. Foram variados o polímero da geomembrana, a gramatura e tipo do geotêxtil (resistência à tração), o tipo de proteção e, o tamanho e forma dos agregados. As conclusões desta etapa foram:

– As geomembranas sem proteção apresentaram diversos e inúmeros tipos de danos sobre sua superfície. Nas geomembranas de PEAD os danos se apresentaram na forma de furos, arranhões, entalhes, deformações e indentações, segundo o critério proposto pelo CFG (2001). Nas geomembranas de PVC os danos se apresentaram na forma de furos (rasgos) e deformações.

– Com a introdução do elemento de proteção diminuiu-se o tipo e a intensidade dos danos nas geomembranas. No caso das geomembranas de PEAD observou-se uma redução principalmente em termos de arranhões e entalhes; enquanto nas geomembranas de PVC a redução foi mais eficiente em termos de furos.

– Em termos de análise visual, os melhores elementos de proteção para geomembranas de PEAD foram o geotêxtil de PET 1200 g/m² e PP 600 g/m², e as camadas de proteção com areia e solo.

– Em termos de análise quantitativa, verificou-se que as configurações sem elemento de proteção geraram elevados decréscimos nas propriedades das geomembranas de PEAD em termos de tensão e deformação de ruptura nos ensaios de tração faixa larga e multiaxial. Os ensaios também mostraram que o início da ruptura é localizado nos pontos de maior concentração de arranhões e entalhes. No ensaio de *stress cracking* verificou-se uma redução acentuada do tempo de ruptura.

– Com a introdução do elemento de proteção, verificou-se um acréscimo nas características mecânicas das geomembrana de PEAD. Nos ensaios de tração em faixa larga, os valores da tensão e deformação na ruptura tendem para o valor da geomembrana virgem. Nos ensaios de tração multiaxial verificou-se que, apesar do acréscimo da deformação, nenhuma configuração apresentou valores da mesma ordem de grandeza da geomembrana virgem. No ensaio de *stress cracking* também foi verificado o aumento do tempo de ruptura com a introdução do elemento de proteção.

– Nas configurações com brita 3 e geomembranas de PEAD, verificou-se que as características mecânicas das geomembranas não foram influenciadas pela resistência à tração do geotêxtil. No entanto, nas configurações com brita 1, verificou-se que quanto maior a resistência à tração do geotêxtil, menor a redução das propriedades analisadas da geomembrana.

– Os elementos de proteção com solos naturais também apresentaram visualmente um bom desempenho com relação à redução da ocorrência de danos em geomembranas de PEAD. Contudo, os resultados dos ensaios indicam que tais configurações apresentaram elevados decréscimos de deformação.

– O modo de ruptura do ensaio de tração multiaxial nas geomembranas de PEAD indicou que as configurações com geotêxtil de PET 1200 g/m² e PP 600 g/m² apresentaram desempenho satisfatório e, condizem com o comportamento verificado no campo.

– No caso das geomembranas de PVC, as configurações que apresentaram melhor desempenho em termos visuais foram com geotêxtil PET 1200 g/m², camada de areia e de solo.

– Com relação às propriedades das geomembranas danificadas, verificou-se que as geomembranas de PVC apresentaram uma redução significativa em termos de tensão e deformação de ruptura nos ensaios de tração faixa larga e multiaxial.

– Com a introdução do elemento de proteção, verificou-se um acréscimo nas características mecânicas das geomembrana de PVC. Os valores da tensão e deformação na ruptura nos ensaios de tração em faixa larga e multiaxial tendem para o valor da geomembrana virgem em todas as configurações. Além disto, as características mecânicas das geomembranas não foram influenciadas pela resistência à tração do geotêxtil.

– O modo de ruptura das geomembranas de PVC nos ensaios multiaxiais não foi indicativo do desempenho dos elementos de proteção. Todas as configurações apresentaram a ruptura localizada na região central.

– Verificou-se que as geomembranas protegidas com geotêxteis de PET 300 g/m² e PP 600 g/m² apresentaram furos sobre sua superfície.

Comparando-se os ensaios de laboratório e os ensaios de campo, foram observadas as seguintes conclusões:

– Os resultados dos ensaios de tração em geomembrana de PEAD submetidas a carregamento de campo indicam uma boa correlação com os ensaios índices somente nas configurações com brita de pequeno diâmetro. Nas configurações com brita de maior diâmetro, as características mecânicas das geomembranas não foram alteradas com a variação da resistência à tração do geotêxtil.

– Nas configurações com geomembrana de PVC, os ensaios de campo também contradizem com os resultados dos ensaios índice. Verificou-se que as características mecânicas das geomembranas danificadas em campo não variaram com a resistência à tração do geotêxtil.

– Verificou-se que os danos de instalação no campo foram mais intensos do que nos ensaios de carregamento cíclico tanto nas geomembranas de PEAD quanto de PVC. Além disto, a introdução do elemento de proteção no campo minimiza, mas não impede o aparecimento de alguns tipos de danos no campo.

– Ainda comparando os ensaios cíclicos com os ensaios de campo, verificou-se que as geomembranas danificadas de PEAD apresentaram maior decréscimo de suas propriedades mecânicas no campo. A introdução do elemento de proteção não alterou as propriedades das mecânicas das geomembranas nos ensaios de laboratório. Por outro lado, nos ensaios de campo, proporcionou elevado aumento nas suas propriedades.

Os resultados dos ensaios pós-danos realizados nas geomembranas submetidas aos ensaios de campo permitiram avaliar o desempenho de diferentes elementos de proteção segundo o critério proposto pelo CFG. Foram verificadas as seguintes conclusões:

– Nas geomembranas de PEAD, verificou-se que os geotêxteis de PET 300 g/m^2 , as camadas de areia e de solo se enquadram na mesma categoria, apresentando os maiores danos e os comportamentos semelhantes. Os geotêxteis de PET 600 g/m^2 e PP 600 g/m^2 apresentaram melhor desempenho do que os elementos citados anteriormente, com pequenos decréscimos nas características das geomembranas. O geotêxtil de PET 1200 g/m^2 apresentou o melhor desempenho, encaixando-se na categoria III do CFG, ou seja, sem ocorrência significativa de danos.

– Nas geomembranas de PVC, nenhuma configuração se encaixou na categoria III. Os elementos de proteção utilizados nas geomembranas de PVC apresentaram o mesmo

desempenho. Verifica-se que os elementos se encaixam na categoria II.2, com pouca ou nenhuma variação nas propriedades das geomembranas danificadas.

– Verifica-se que os únicos elementos de proteção não capazes de prevenir furos nas geomembranas foram os geotêxteis de PET 300 g/m² e PP 600 g/m² (brita 3).

Comparando os resultados dos ensaios de campo com os dados e/ou metodologias existentes na literatura, verificaram-se as seguintes conclusões:

– As reduções das características de tração das geomembranas danificadas foram mais intensas do que nos ensaios de campo retratados na literatura (Reddy et al., 1996).

– Segundo a metodologia proposta por Badu et al. (1998), verificou-se, nas configurações sem elemento de proteção e com geotêxtil de PET 300 g/m², que a ruptura foi localizada em cima dos arranhões e entalhes, fora da região central e sem aparecimento de uma zona de escoamento. Os demais geotêxteis apresentaram o mesmo comportamento com relação ao modo de ruptura.

– As configurações com areia e solo tiveram sua ruptura caracterizada por pequenos furos ou cortes localizados fora da região central.

Referências Bibliográficas

-
- AGNELLI, J.A.M. (2000). **Introdução a materiais poliméricos**. Apostila – DEMA / UFSCar.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 10004 (2004). **Resíduos sólidos: Classificação**.
- _____. NBR 12553 (2003). **Geossintéticos – Terminologia**.
- _____. NBR 12568 (2003). **Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área**.
- _____. NBR 12569 (1992). **Geotêxteis - Determinação da espessura**.
- _____. NBR 12824 (1993). **Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga**.
- _____. NBR 13359 (1995). **Geotêxteis - Determinação da resistência ao puncionamento estático - Ensaio com pistão tipo CBR**.
- _____. NBR 14971 (1993). **Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da resistência à perfuração dinâmica (queda de cone) - Método de ensaio**
- _____. NBR 8419 (1987). **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - D792 (1991). **Standard Test Methods for Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement**.
- _____. D882 (1995a). **Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**.

- ____. D883 (2000). **Standard Terminology Relating to Plastics.**
- ____. D1004 (1994). **Standard Test Method for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting.**
- ____. D1693 (1997). **Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics.**
- ____. D3776 (1996). **Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric.**
- ____. D3786 (1980a). **Standard Test Method for Hydraulic Bursting Strength of Textile Fabrics-Diaphragm Bursting Strength Tester Method.**
- ____. D4533 (1991). **Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles.**
- ____. D4595 (1994). **Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method.**
- ____. D4632 (1996). **Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles.**
- ____. D4751 (1995). **Standard Test Method for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile.**
- ____. D4833 (1996). **Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes and Related Products.**
- ____. D 5101 (1996). **Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio.**
- ____. D5199 (1995). **Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes.**
- ____. D5262 (1995). **Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep Behavior of Geosynthetics.**
- ____.D5321 (1997). **Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method.**
- ____. D5397 (1995). **Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test.**

- ____. D5494 (1993). **Standard Test Method for the Determination of Pyramid Puncture Resistance of Unprotected and Protected Geomembranes**
- ____. D5514 (1994). **Standard Test Method for Large Scale Hydrostatic Puncture Testing of Geosynthetics.**
- ____. D5617 (1999). **Standard Test Method for Multi-Axial Tension Test for Geosynthetics.**
- ____. D5818 (1995). **Standard Practice for Obtaining Samples of Geosynthetics from a Test Section for Assessment of Installation Damage.**
- ____. D6693 (2004). **Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes.**
- ____. D6747 (2004). **Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Detection of Potential Leak Paths in Geomembranes.**
- ____. E96 (1996). **Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.**
- AZAMBUJA, E. (2003). **Considerações sobre o Projeto e o Desempenho de Barreiras com Geomembranas nos Sistemas de Disposição de Resíduos Sólidos**, In: 4º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, p. 12.
- BADU- TWEBEBOAH, K. et al. (1998). **Evaluation of the Effectiveness of HDPE Geomembrane Liner Protection.** 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, USA, pp. 279-284.
- BATHIA, S.K.; SMITH, J.L. (1996). **Geotextile characterization and pore-size distribution: Part 1. A review of manufacturing processes.** Geosynthetics International, v. 3, n.1, p. 85-105.
- BAM. (1999). **Certification Guidelines for Plastic: Geomembranes Used to Line Landfills and Contaminated Sites.**
- 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.**

- BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J.G.; ADAM, D. (2002). **Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances**. Geosynthetics – 7th ICG. Delmas, Gourc & Girard (eds.), Nice – França.
- BUENO, B.S.; VILAR, O.M. (2004). **Propriedades, Ensaios e Normas**. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Editora Edgard Blücher, pp. 27-62.
- CFG (2001). **Guide pour la réalisation de planches d'essais d'endommagement**, Comité Français des Géosynthétiques, www.cfg.asso.fr, 16 p.
- CFGG (2003). **Présentation de méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes**. Comité Français Géosynthétiques, France.
- DANIEL, D.E. (1993). **Geotechnical practice for waste disposal**- London ; New York- Chapman & Hall – 683p.
- DANIEL, D.E.; KOERNER, R. M. (1995). **Waste containment facilities Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems**. American Society of Civil Engineering Press, New York.
- FROBEL, R. & RIGO, J-M. (1991). **Puncture Testing. Geomembranes: Identification and Performance Testing**. Edited by A. Rollin and J-M. Rigo, pp. 157-175.
- GALAGHER, E.M.; DARBYSHIRE, W.; WARWICK, R.G. (1999). **Performance testing of geoprotectors: background, critique, development, and current UK practice**. Geosynthetics International, vol. 4, n. 6, pp. 283-301.
- GARTUNG, E. (1996). **Landfill liners and covers**. Geosynthetics: applications, design and construction, De Groot, Den Hoedt & Termaat (eds.) - pp. 55 - 70.
- GEROTO, R.E. (2008). **Desempenho de Camadas de Proteção para Geomembranas**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos / USP. São Carlos, SP, 188 páginas.
- GIROUD; J.P.; BADU- TWENEBOAH, K., SODERMAN, K.L. (1995). **Theoretical Analysis of geomembrana puncture**. Geosynthetics International, vol. 2, n. 6, pp. 1019-1048.
- GRI TEST METHOD GM10 (2002). **Specification for the SCR of HDPE Geomembranes**.

- HSUAN, Y.G. (2000). **Data Base of Field Incidents Used to Establish HDPE Geomembrane Stress Crack Resistance Specifications**. Geotextiles and Geomembranes n. 18, pp. 1-22.
- HAXO Jr., H.E.; PIERSON, P. (1996). **Permeability Testing**. Geosynthetics: applications, design and construction, De Groot, Den Hoedt & Termaat (eds.) - pp. 219 - 240.
- HSUAN, Y.G.; KOERNER, R.M. (1998). **Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 119, n. 11, pp. 532-541.
- ISO 10.722 (1998). **Geotextile and geotextile – related products – Procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular materials**.
- JONES, D.R.V.; SHERCLIFF, D.A.; DIXON, N. (2000). **Difficulties associated with the specification of protection geotextiles using only unit weight**. 2th European Geosynthetics Conference- Italian Geosynthetic Society.
- KOERNER, R.M. (1998). **Design with geosynthetics**– 4rd Edition- Prentice Hall.
- KOERNER, R.M.; HSUAN, Y.G.; LORD, A.E.Jr. (1993). **Stress cracking behavior of HDPE geomembranes and its prevention**. Final Report to U.S. EPA Contract CR-815692, Springfield, p. 94.
- KOERNER, R.M.; WILSON-FAHMY, R.F.; NAREJO, D. (1996). **Puncture protection of geomembranes. Part 3: examples**. Geosynthetics International, vol. 3, n. 5, pp. 655-675.
- LENGEN, A.; SIEBKEN, J. (1996). **Geomembrane in the United States: A brief discussion**. Geosynthetics: applications, design and construction– De Groot, Den Hoedt & Termaat (eds.)- pp. 697– 704.
- LAVOIE, F.L. (2006). **Estudo do fissuramento sob tensão (stress cracking) em geomembranas de polietileno (PE) virgens e degradadas**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos / USP. São Carlos, SP, 157 páginas.
- LODI, P. (2003). **Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD e policloreto de vinila (PVC))**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos / USP. São Carlos, SP, 284 páginas.
- LOPES (2006). **Análise dos métodos de controlo de integridade de geomembranas de PEAD usadas em aterros de RSU**. Revista Geotecnia, n° 106, pp. 107-131.

- NAREJO, D. (1995). **Three levels of geomembrane: puncture protection.** Geosynthetics International, vol. 2, n. 4, pp. 765-769.
- NAREJO, D.; KOERNER, R. M.; WILSON-FAHMY, R.F. (1996). **Puncture protection of geomembranes. Part 2: experimental.** Geosynthetics International, vol. 3, n. 5, pp. 629-653.
- PEGGS, I.D. (1988). **Failure and remediation of a geomembrane lining system.** *Geotechnical Fabrics Report*, 6(6), pp. 13-16.
- PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO – PNSB (2000). **Comentários sobre os resultados apresentados no tema de Limpeza Urbana pelo Consultor J. H. Penido Monteiro.** J. H. Penido Monteiro, abril 2002.
- REDDY, D.V.; BUTUL, B. (1999). **A comprehensive literature review of liner failures and longevity.** Center for Marine Structures and Geotechnique, Department of Ocean Engineering. Florida Atlantic University, 146 p.
- REDDY, K.R.; BANDI, S.R.; ROHR, J.J.; FINY, M.; SIEBKEN, J. (1996). **Field evaluation of protective covers for landfill geomembrana liners under construction loading.** Geosynthetics International, vol. 3, n. 6, pp. 679-700.
- REDDY, K.R.; SAICHEK, R.E. (1998). **A Rational Design for the Protection of Landfill Geomembrane Liners.** 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, USA, pp. 289-294.
- ROWE, 1998(1998). **Geosynthetic and the Minimization of Contaminant Migration through Barrier Systems Beneath Solid Waste.** 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, USA, pp. 279-284.
- SEEGER, S.; MÜLLER, W. (1996). **Requirements and testing of protective layer systems for geomembranas.** Geotextiles and Geomembranes (14), pp. 365-376.
- SNOW, M.; BISHOP, I.; KEENAN, R. (1999). **Case history of geomembrane damage assessment.** Proceedings of Geosynthetics' 99, Boston, Massachusetts, pp. 635-644.
- TOGNON (1999). **Laboratory testing of geosynthetics used in landfill barrier systems.** M.E.S c. thesis, Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario, London, Ontario, Canadá.

- 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.
- VERTEMATTI, J.C. (2004). Manual Brasileiro de Geossintéticos. São Paulo, Editora Blücher.
- VILAR, O. M. (2003). **Geossintéticos em Aplicações Ambientais**. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2003), PUC, Porto Alegre (RS), 18 páginas (CD Rom).
- 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.
- ZANZINGER, H (1999). **Efficiency of geosynthetic protection layers for geomembrana liners: performance in a large scale model test**. Geosynthetics International, vol. 6, n. 4, pp. 303-317.
- ZANZINGER, H; GARTUNG, E. (1998). **A Rational Design for the Protection of Landfill Geomembrane Liners**. 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, USA, pp. 285-288.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)