



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. CIVIL - GEOTECNIA**

**RAFAELLY BESERRA PEIXOTO**

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO PUNÇIONAMENTO ESTÁTICO**  
**DE GEOSSINTÉTICOS EM CONTATO COM**  
**EFLUENTE AGRESSIVO**

**FORTALEZA**

**2023**

RAFAELLY BESERRA PEIXOTO

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO PUNÇONAMENTO ESTÁTICO  
DE GEOSSINTÉTICOS EM CONTATO COM EFLUENTE AGRESSIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

FORTALEZA

2023

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P1e Peixoto, Rafaelly Beserra.  
Estudo da variação da resistência ao punctionamento estático de geossintéticos em contato com efluente agressivo / Rafaelly Peixoto. – 2023.  
105 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti .
1. Geotêxtil . 2. Geomembrana . 3. Geocomposto. 4. Efluente ácido. 5. Punctionamento. I. Título.  
CDD 627
-

RAFAELLY BESERRA PEIXOTO

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO PUNÇIONAMENTO ESTÁTICO  
DE GEOSSINTÉTICOS EM CONTATO COM EFLUENTE AGRESSIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 25/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as maravilhas e bênçãos que venho recebendo dEle, por me dar muito mais do que eu preciso, e por me abençoar muito mais do que mereço.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de estudos durante meus anos de mestrado.

Ao Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares, pela excelente orientação, paciência e compreensão.

Aos professores participantes da Banca Examinadora, Alfran Sampaio Moura e Juceline Bastos, pelo tempo e valiosas colaborações e sugestões que me deram.

À minha mãe e ao meu querido irmão, por sempre me apoiarem nas minhas escolhas.

À minha amiga Karla Monique, por tornar essa caminhada mais leve.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões e companheirismo.

Ao *staff* do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da UFC, nas pessoas de Roberto Cordeiro, Anselmo Oliveira e Francisco da Silva, por todo acolhimento e auxílio com meus ensaios.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (POSDEHA), pela oportunidade de realizar meus estudos em Geotecnia.

À Maccaferri do Brasil, por ceder amostras do material geossintético utilizado neste estudo.

A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa,  
sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é  
coragem. (ROSA, 1986, p.436)

## RESUMO

Geossintéticos são materiais manufaturados com aplicações diversas em proteção ao meio ambiente e remediação de danos ambientais. Uma destas é o confinamento de resíduos e de terrenos contaminados. É crucial, no entanto, avaliar a compatibilidade entre as propriedades do geossintético e as condições do meio em que será inserido, a fim de evitar problemas futuros. Este trabalho teve como objetivo estudar a variação da resistência ao puncionamento estático de geossintéticos em contato com efluente ácido, o que pode ocorrer em depósitos de rejeitos de mineração. Para tanto, foram realizados ensaios de puncionamento em prensa CBR, com adaptação de uma peça ao equipamento, conforme a norma ABNT NBR ISO 12236 (2013). As amostras (todas virgens) eram de geomembranas (PEAD) de 2,0mm de espessura, geotêxteis de proteção (com diferentes gramaturas) e sistemas compostos (geotêxtil + geomembrana). Em uma segunda fase, os ensaios foram repetidos utilizando amostras imersas em efluente ácido. Os resultados demonstraram que, para uma das amostras ensaiadas de geotêxteis perfurados individualmente, houve queda na resistência ao puncionamento após exposição ao efluente ácido. Nas demais, a resistência praticamente não se alterou, provavelmente devido às diferenças na gramatura e processo de fabricação. Para a geomembrana, considerando o período de exposição ao efluente ácido, ocorreu enrijecimento. Verificou-se também que a introdução de geotêxteis como camada de proteção proporcionou incremento na resistência ao puncionamento em relação às geomembranas ensaiadas separadamente, tanto nas amostras virgens quanto nas expostas ao efluente ácido, com baixa alteração após o contato com este. A utilização de fatores de correção foi praticamente desnecessária, quando se aplicaram sistemas compostos ou geomembranas em contato com efluente ácido, considerando o tempo de exposição ensaiado.

**Palavras-chave:** geotêxtil; geomembrana; geocomposto; efluente ácido; puncionamento.

## ABSTRACT

Geosynthetics are manufactured materials with diverse applications in environmental protection and remediation of environmental damage. One is the confinement of waste and contaminated land. It is crucial, however, to evaluate the compatibility between properties of the geosynthetic and the conditions of the media in which it will be inserted, in order to avoid future problems. This work aimed to study the variation in static punching strength of geosynthetics in contact with acidic effluent, which can occur in mining waste deposits. To this end, punching tests were carried out in a CBR press, adapting a part to the equipment, in accordance with technical standard ABNT NBR ISO 12236 (2013). The samples (all virgin) were made of 2.0-mm-thick geomembranes (HDPE), protective geotextiles (with different unit weights), and composite systems (geotextile + geomembrane). In a second phase, the tests were repeated using samples immersed in acidic effluent. The results showed that, for one sample of the individually perforated geotextile tested, there was a drop in the punching strength after being exposed to acidic effluent. In the other samples, the strength practically did not change, probably due to differences in weight and the manufacturing process. For the geomembrane, considering the period of exposure to the acidic effluent, hardening occurred. It was also found that the introduction of geotextiles as a protective layer provided increase in the punching strength when compared with the geomembranes tested separately, both in virgin samples and those exposed to acidic effluent, with little change after the contact with it. The use of correction factors was found practically unnecessary when composite systems or geomembranes in contact with acidic effluent were used, considering the assessed exposure time.

**Keywords:** geotextile; geomembrane; geocomposite; acidic effluent, punching.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de geotêxteis: a) geotêxtil tecido; b) geotêxtil não tecido.....	25
Figura 2 – Estrutura típica de um geotêxtil tecido.....	26
Figura 3 – Geotêxtil não tecido.....	27
Figura 4 – Estruturas típicas de têxteis tricotados .....	27
Figura 5 – Uso de uma geomembrana como revestimento em um canal. ....	28
Figura 6 – Esquema de extrusor de rosca única.....	30
Figura 7 – Esboço e fotografia de extrusão de matriz plana geminada. ....	31
Figura 8 – Folha texturizada de extrusão de matriz plana. ....	31
Figura 9 – Processo de fabrico de geomembranas por calandragem.....	32
Figura 10 – Geomembrana reforçada com várias camadas .....	33
Figura 11 – Comportamento de um geossintético frente à atuação de um objeto penetrante. .....	39
Figura 12 – Ensaio de puncionamento estático-corte transversal.....	40
Figura 13 – Força de puncionamento <i>versus</i> deslocamento da punção.....	41
Figura 14 – Ensaio de penetração por queda de cone.....	42
Figura 15 – Tanque de imersão para avaliação da resistência química de geomembranas .	44
Figura 16 – Espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra .....	46
Figura 17 – Ensaio de resistência à degradação por radiação UV .....	47
Figura 18 – Instalação de geomembrana na de base de um aterro sanitário.....	49
Figura 19 – Aterro de São Giácomo, na cidade de Caxias do Sul/RS. (a) Instalação do geotêxtil sobre o gabião tipo colchão drenó (b) Aplicação da geomembrana sobre o geotêxtil .....	50
Figura 20 – Detalhes da superfície das áreas impactadas pela mineração de carvão .....	52
Figura 21 – Mineração do Vanádio de Maracás (com dupla camada de geossintético).....	53
Figura 22 – Valor da resistência à perfuração dos geossintéticos analisados.....	55
Figura 23 - Resultados de punção, selecionados usando o recipiente de teste GRI com cones truncados: Comportamento de diferentes tipos de geomembranas b) Comportamento da geomembrana HDPE lisa de 1,5 mm sendo protegida por vários geotêxteis de diferentes gramaturas.....	56
Figura 24 – Curvas de resistência à punção de geotêxteis de filamento contínuo de PET. b) Curvas de resistência à perfuração de geotêxteis de filamento contínuo de PP. c) Curvas de resistência à perfuração de geotêxteis de fibras descontínuas de PP.....	58
Figura 25 – (a) Curvas de resistência à perfuração de pinos de três geotêxteis avaliados. (b) Curvas de resistência à perfuração da pirâmide de três geotêxteis avaliados. (c) Curvas de resistência à perfuração CBR de três geotêxteis avaliados. ....	59
Figura 26 – Resultados de testes de punção estática nas quatro amostras de geotêxteis tecidos .....	60
Figura 27 – Detalhamento dos anéis metálicos utilizados para ensaios .....	68
Figura 28 – Equipamento MS 120 (Prensa CBR – Marshall) com anéis metálicos.....	69

Figura 29 – Material geossintético após a execução de um ensaio de puncionamento .....	71
Figura 30 – Geossintéticos expostos ao efluente químico por meio do processo de inundação .....	72
Figura 31 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras do geotêxtil 1 (gramatura180g/m <sup>2</sup> ).....	73
Figura 32 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geotêxtil 2 (gramatura200g/m <sup>2</sup> ).....	74
Figura 33 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geotêxtil 3 (gramatura300g/m <sup>2</sup> ).....	75
Figura 34 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras do geotêxtil 1 após o processo de contaminação pelo efluente agressivo .....	76
Figura 35 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras do geotêxtil 2 após o processo de contaminação pelo efluente agressivo .....	77
Figura 36 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras do geotêxtil 3 após o processo de contaminação pelo efluente agressivo .....	77
Figura 37 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras da geomembrana .....	78
Figura 38 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras da geomembrana após o processo de contaminação pelo efluente agressivo .....	79
Figura 39 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT1).....	81
Figura 40 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT2).....	82
Figura 41 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT3).....	82
Figura 42 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT1) após o processo de contaminação pelo efluente agressivo.....	83
Figura 43 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT2) após o processo de contaminação pelo efluente agressivo.....	84
Figura 44 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT3) após o processo de contaminação pelo efluente agressivo.....	84
Figura 45 – Comparação dos resultados do ensaio de puncionamento estático nas amostras, antes e após o processo de contaminação pelo efluente agressivo .....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de propriedades de polímeros, comumente usados na produção de geossintéticos.....	20
Tabela 2 – Compostos usados na fabricação de geotêxteis comumente usados e seu peso aproximado em porcentagem.....	25
Tabela 3 – Formulações dos tipos de geomembranas comumente usadas e seu peso aproximado em porcentagem.....	29
Tabela 4 – Comparativo entre as principais geomembranas. ....	36
Tabela 5 – Ensaio utilizados para a determinação das propriedades do geossintéticos.....	38
Tabela 6 – Resultados típicos de ensaios ao puncionamento para várias geomembranas poliméricas.....	41
Tabela 7 – Características dos geossintéticos estudados.....	55
Tabela 8 – Caracterização dos geotêxteis tecidos testados.....	60
Tabela 9 – Características técnicas da Geomembrana MacLine SDH. ....	65
Tabela 10- Características técnicas do Geotêxtil MacTex H2. ....	65
Tabela 11- Características técnicas do Geotêxtil MacTex N.2. ....	66
Tabela 12 – Resultado dos ensaios de puncionamento estático realizados. ....	85

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Descrição da classificação dos geossintéticos .....	23
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
PE	Polietileno
PA	Poliamida
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PVC	Polivinil clorado
HDPE	Polietileno de alta densidade
LLDPE	Polietileno linear de baixa densidade
FPP	Polipropileno flexível
CSPE	Polietileno clorossulfonado
EPDM	Borracha de Etileno Propileno Terpolímero
BAM	<i>Federal Institute for Materials Research and Testing</i>
TSFs	Instalações de armazenamento de rejeitos
DAM	Drenagem ácida de minas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1. Objetivos.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. Estrutura da dissertação .....</b>	<b>15</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Geossintéticos .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 Tipos de materiais que compõem os geossintéticos .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2 Polímeros usados na fabricação de geossintéticos .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3 Aditivos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Tipos de geossintéticos.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.1 Considerações iniciais .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2 Geotêxteis .....</b>	<b>24</b>
2.2.2.1 Geotêxteis tecido .....	25
2.2.2.2 Geotêxteis não tecidos .....	26
2.2.2.3 Geotêxtil tricotado .....	27
<b>2.2.3 Geomembranas .....</b>	<b>28</b>
2.2.3.1 Fabricação.....	29
2.2.3.2 Geomembranas de folhas lisas .....	30
2.2.3.3 Geomembrana de folha texturizada.....	31
2.2.3.4 Tipos de geomembranas .....	34
<b>2.3. Propriedades dos geossintéticos .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3.2 Resistência ao puncionamento .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3.3 Desempenho dos geossintéticos.....</b>	<b>42</b>
<b>2.4. Aplicação de geomembranas e geotêxteis em sistemas de impermeabilização em obras ambientais .....</b>	<b>47</b>
<b>2.4.1 Geossintéticos como sistemas de impermeabilização de aterros sanitários .....</b>	<b>47</b>
<b>2.4.3 Geossintéticos em sistemas de impermeabilização de para conter resíduos de mineração .....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.4 Resistência ao puncionamento em materiais geossintéticos.....</b>	<b>54</b>
<b>2.4.5 Influência do contato com efluente sobre o puncionamento estático de geossintéticos .....</b>	<b>61</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>64</b>

<b>3.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>64</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>64</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Geossintéticos.....</i></b>	<b>64</b>
<b>3.2.2</b>	<b><i>Efluente.....</i></b>	<b>67</b>
<b>3.3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3.1</b>	<b><i>Ensaio CBR.....</i></b>	<b>68</b>
<b>3.3.2</b>	<b><i>Ensaio realizados .....</i></b>	<b>70</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>71</b>
<b>4.1</b>	<b>Contaminação com efluente ácido .....</b>	<b>72</b>
<b>4.2</b>	<b>Curvas de Força de Puncionamento x Deslocamento .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.1</b>	<b><i>Geotêxteis .....</i></b>	<b>73</b>
<b>4.2.2</b>	<b><i>Geomembranas .....</i></b>	<b>78</b>
<b>4.2.3</b>	<b><i>Geocompostos .....</i></b>	<b>81</b>
<b>4.3</b>	<b>Discussões .....</b>	<b>85</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Desenvolvimentos Futuros.....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>91</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço da industrialização trouxe consigo problemas ambientais associados à área geotécnica, como por exemplo, a contaminação de solo por substâncias químicas, bem como a necessidade crescente de áreas apropriadas para disposição de mais diversos tipos de resíduos e a disposição de rejeitos da mineração. A geotecnia ambiental surge para pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas apoiadas nos conhecimentos básicos da engenharia geotécnica como resposta a estas necessidades (Izzo & Nagalli, 2013)

Nas últimas décadas, esse novo ramo da engenharia geotécnica vem sendo desafiado a responder questionamentos que afetam a vida moderna. Exemplo disso, é a questão da contaminação dos solos e de lençóis freático por efluentes agressivos, cuja geração aumenta cada vez mais, o que gera a necessidade de soluções mais pautadas em técnicas refinadas, visando causar o menor impacto ambiental possível, preservar a saúde pública e reduzir custos associados.

Os geossintéticos podem ser utilizados em várias aplicações de proteção ao meio ambiente e de remediação de danos ambientais. Tais são os casos de confinamento de resíduos, confinamento de terrenos contaminados, descontaminação de terrenos e controle de erosões. Suas principais funções nesses tipos de obra podem ser de barreira contra líquidos e gases, barreira para sedimentos, separação entre materiais, proteção, drenagem e filtração e até mesmo reforço (Palmeira, 2018).

Obras ambientais, tais como aterros sanitários e barragens de rejeito, são projetadas de modo a encapsular um resíduo ou rejeito. Este tipo de empreendimento é dimensionado com um sistema de impermeabilização de fundo, que tem objetivo impedir o escape do contaminante e a conseqüente contaminação dos solos e do lençol freático. Um correto dimensionamento da impermeabilização de fundo é de fundamental importância para garantir a estanqueidade do sistema.

Atualmente os sistemas de impermeabilização utilizam materiais geossintéticos, em particular geomembranas do tipo PEAD (Polietileno de alta densidade). Estas sofrem esforços durante a instalação e toda a sua vida útil. Dentre estes esforços podemos citar os de tração, de tração localizada, de estouro, de rasgo e de punção estático e dinâmico.

Geralmente, sistemas de impermeabilização são acompanhados por um sistema de drenagem sobrejacente, muitas vezes compostos por materiais drenantes que possuem elementos contundentes, tais como rachão e brita. Estes materiais granulares exercem esforços

(punção) sobre o sistema de impermeabilização, durante a vida útil dos geossintéticos. Além disso, há a necessidade de verificar a variação desta propriedade no tempo, quando em contato com um efluente agressivo. O puncionamento estático refere-se aos esforços aplicados por elementos contundentes sobre a geomembranas, que geralmente é protegida por um geotêxtil, para reduzir os efeitos do puncionamento, e a consequente ocorrência de furos na mesma.

O uso de geotêxteis sobre as geomembranas aumentam a resistência ao puncionamento (Vertematti, 2003). No entanto, em obras ambientais os geossintéticos ficam expostos a efluentes agressivos e torna-se relevante verificar se as diferentes propriedades dos geossintéticos se mantêm ao longo do tempo com o contato com um efluente. Esta pesquisa busca dar uma contribuição no sentido de verificar as variações da resistência ao puncionamento de sistemas de impermeabilização (geomembranas e geotêxteis) quando expostos a efluentes agressivos.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo geral dessa pesquisa é estudar a variação da resistência ao puncionamento estático de geomembranas, geotêxteis de proteção (com diferentes gramaturas) e conjunto (geotêxteis+geomembranas), quando em contato com efluente agressivo.

Como objetivos específicos, citam-se:

- Verificar as variações da resistência ao puncionamento estático em amostras virgens de geossintéticos individuais e conjuntas (geomembrana + geotêxtil);
- Propor a aplicação de um fator de redução da resistência ao puncionamento dos geossintéticos, no caso diminuição desta, com o contato com efluente ácido; e
- Desenvolver uma peça para adaptar ao equipamento de CBR, tornando possível a quantificação da capacidade dos geossintéticos de resistir a tensões geradas por objetos, em situação estática.

### **1.2. Estrutura da dissertação**

O trabalho está organizado em 5 capítulos correlacionados. O Capítulo 1, Introdução, apresentou por meio de sua contextualização o tema proposto neste trabalho. Da mesma forma

foram estabelecidos os resultados esperados por meio da definição de seus objetivos e apresentadas as limitações do trabalho permitindo uma visão clara do escopo proposto.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica. Neste capítulo são descritos os tipos de geossintéticos, suas definições, tipos de polímeros e normas, com ênfase nas propriedades mecânicas e de desempenho

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados para realização dos ensaios de resistência ao puncionamento estático de geomembranas, geotêxteis de proteção (com diferentes gramaturas) e sistemas compostos (geotêxteis+geomembranas), quando em contato com efluente agressivo

No Capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos durante esta pesquisa, que compreende o estudo da variação da resistência ao puncionamento estático de geossintéticos, antes e depois da contaminação com efluente agressivo, como também serão feitas discussões a respeito desses resultados.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão a respeito de cada um dos objetivos específicos e do objetivo geral como um todo, baseando-se no que foi identificado no capítulo 4.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são descritos os tipos de geossintéticos, suas definições, tipos de polímeros e normas, com ênfase nas propriedades mecânicas e de desempenho.

### **2.1. Geossintéticos**

Um geossintético é definido pela norma internacional NBR-ISO 10318-1(2018) como um produto em que ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, sob a forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações da engenharia geotécnica e civil.

Nas últimas décadas, os geossintéticos vêm desempenhando um papel fundamental, substituindo ou aprimorando técnicas existentes, permitindo associações e combinações com solo e agregados, resultando em soluções mais rápidas, mais leves, mais esbeltas, mais confiáveis e mais econômicas (Vertematti, 2015).

Os geossintéticos permearam a engenharia geotécnica a tal ponto que não é mais viável praticar a maioria das formas de engenharia geotécnica sem geossintéticos. Estes são produtos convenientes para utilização na engenharia geotécnica, porque desempenham uma variedade de funções e porque, em muitos casos, suas características são essencialmente inerentes, em oposição a serem governadas principalmente pela interação com uma estrutura (Giroud, 2005).

O rápido desenvolvimento da utilização de geossintéticos a nível mundial pode ser justificado pelos benefícios que dela derivam para os empreiteiros, para os projetistas e mesmo para os donos de obra: uma construção mais rápida e menos dependente das condições meteorológicas, a possibilidade de movimentação de menores volumes de terra, a utilização de solos de qualidade inferior e a facilidade de instalação.

As garantias sobre o desempenho de tais materiais advêm das propriedades uniformes dos geossintéticos, a capacidade dos geossintéticos para resolver problemas localizados no solo e a crescente evolução da normalização associada ao seu emprego (normas de ensaio e especificações com vista ao seu dimensionamento), além de uma construção e manutenção mais econômicas (Ferreira, 2010).

### **2.1.1 Tipos de materiais que compõem os geossintéticos**

Os geossintéticos são constituídos essencialmente por polímeros e, em menor escala, por aditivos. Os aditivos têm função de introduzir melhorias nos processos de fabricação ou modificar aspectos do comportamento de engenharia do polímero básico (Vertematti, 2004).

As matérias-primas usadas para o fabrico de geossintéticos podem ser naturais (lã, algodão, seda, entre outros) ou sintéticas. No entanto, as matérias-primas naturais raramente são usadas, por serem biodegradáveis e a não originarem materiais com propriedades mecânicas adequadas para muitas aplicações. Assim, os geossintéticos são majoritariamente produzidos a partir de matérias-primas de origem sintética (normalmente, polímeros orgânicos sintéticos). Uma descrição dos principais polímeros usados no fabrico de geossintéticos será apresentada a seguir.

### **2.1.2 Polímeros usados na fabricação de geossintéticos**

Segundo Vertematti (2004), os polímeros resultam do encadeamento de átomos de carbono, formando uma cadeia carbônica associada ou não a grupos funcionais, estruturados a partir de pequenas unidades de repetição denominadas monômeros, e de grupos de ponta, que são pequenas unidades que terminam a cadeia polimérica. O processo de polimerização pode ser resumido pela Expressão 1, em que  $n$  é o grau de polimerização,  $M$  é o monômero ou unidade de repetição e  $[-M -]_n$  designa o polímero resultante.

$$n M [-M -]_n \qquad \text{Expressão (1)}$$

O termo polímero tem origem grega resultando da combinação de *polys* (muitas) e *meros* (partes). Assim, um polímero é uma sucessão de partes formando um todo. Os polímeros podem ter origem sintética (preparados pela indústria química) ou podem ser naturais (produzidos pelos organismos vivos).

Os polímeros servem como matéria-prima para uma grande variedade de produtos e objetos utilizados rotineiramente. O uso de materiais poliméricos para fabricação de geossintéticos floresceu a partir de 1960, mas há registros de utilização em menor escala em décadas anteriores (Vertematti, 2004).

A densidade de um geossintético produzido a partir de um PE pode ser maior que a de um polímero-base, em função da presença de aditivos, especialmente de negro-de-carbono (2 a 3%), que tem densidade de  $1,80\text{g/cm}^3$  (Vertematti, 2004).

Neste tópico, será dada ênfase à apresentação de materiais poliméricos normalmente utilizados na fabricação de geossintéticos para obras geotécnicas e de proteção ambiental e uma breve descrição de suas características. São eles:

- *Polietileno (PE)*: constitui o polímero orgânico mais simples e possui a estrutura química menos reativa de todos os termoplásticos comercializados. Características como processamento fácil e baixo custo justificam sua utilização na fabricação de geotêxteis (Cassidy *et al.*, 1992). É geralmente resistente a ataque químico, mas está sujeito a termo e foto-oxidação na presença de radiação ultravioleta, representando acentuada sensibilidade à fluência (Cooke & Rebenfeld, 1988).
- *Poliamida (PA)*: os tipos mais empregados na fabricação de geotêxteis são náilons 6 e 6.6. As propriedades químicas desses dois tipos de poliamida caracterizam-se pela boa resistência a ataque químico. A umidade pode reduzir a rigidez e sua estabilidade. Compostos metálicos e negro-de-carbono são adicionados para garantir melhores propriedades de engenharia e reduzir a degradação UV (Vertematti, 2004).
- *Poliéster (PET)*: produto resultante da polimerização de etilenoglicol dimetiltereftalato ou ácido tereftálico. Segundo Koerner (1998), cerca de 15% das fibras utilizadas em geotêxteis, são de poliéster. Entre os pontos que fundamentam esse uso, ressalta-se suas propriedades mecânicas, como a alta resistência à tração. Conforme Horrocks & D' Souza (1992), o grande inconveniente associado às fibras de poliéster é a sensibilidade à hidrólise em ambientes alcalinos. Contêm aditivos para minimizar degradações térmicas e ao UV.
- *Polipropileno (PP)*: é um termoplástico semicristalino com um ponto de fusão de aproximadamente  $165\text{ }^\circ\text{C}$  e uma densidade de aproximadamente 0,90 (o PP é um dos polímeros mais leves; com densidade inferior à da água). O PP apresenta uma boa resistência a ácidos, a bases e à maioria dos solventes (alguns líquidos, como solventes clorados, gasolina ou o xileno). O PP é menos resistente à oxidação a temperaturas elevadas do que o PE; a menor resistência à oxidação do PP é devido

à existência de carbonos terciários na sua cadeia polimérica (que são mais susceptíveis de sofrer um ataque por parte de radicais livres, com perda de átomos de hidrogênio). Além disso, adicionais de estabilizantes térmicos o tornam mais durável e de negro-de-carbono, visando reduzir a degradação causada pela radiação UV.

- *Polivinil clorado (PVC)*: forma-se pela polimerização de vinil clorada e aditivos. Óleos e plastificantes somam cerca de 30 a 40% em peso do produto final; outros estabilizantes e negro-de-carbono, de 1 a 5%. O PVC apresenta elevada resistência a químicos inorgânicos, mas é suscetível ao ataque de solventes e óleos orgânicos (Vertematti, 2004).

As propriedades de alguns dos polímeros comumente usados na produção de geossintéticos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação de propriedades de polímeros, comumente usados na produção de geossintéticos

Propriedade	Polímeros			
	PP	PET	PA	PE
Força	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Módulo	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Tensão na falha	Alto	Médio	Médio	Alto
Rastejar	Alto	Baixo	Médio	Alto
Unidade de peso	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Custo	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Resistência à luz ultravioleta				
Estabilizado (não contém estabilizantes UV)	Alto	Alto	Médio	Alto
Desestabilizado (contém estabilizantes UV)	Médio	Alto	Médio	Baixo
Resistência a álcalis	Alto	Baixo	Alto	Alto
Resistência a fungos, vermes, insetos	Médio	Médio	Médio	Alto
Resistência ao combustível	Baixo	Médio	Médio	Baixo
Resistência a detergentes	Alto	Alto	Alto	Alto

Fonte: Adaptado de Shukla (2002).

### 2.1.3 Aditivos

Além do polímero base, os geossintéticos também possuem aditivos em sua composição. Esses materiais têm a função de introduzir melhorias nos processos de fabricação ou modificar aspectos do comportamento do polímero base (Callister Jr., 2002).

Os aditivos utilizados nos geossintéticos fazem parte de uma grande variedade de compostos químicos que são utilizados para melhorar as propriedades, o processamento e o desempenho dos materiais poliméricos (Guimarães, 2012).

A expectativa de uma vida longa dos polímeros deve-se, sobretudo, ao desenvolvimento de aditivos estabilizantes que impedem ou retardam a degradação, aumentando a vida útil do polímero em dezenas ou centenas de anos. Um aditivo é qualquer substância que é adicionada em uma pequena quantidade a um polímero para modificar suas propriedades para uma finalidade específica, tais como (Greenwood et al., 2012):

- Controlar a polimerização: reguladores de crescimento em cadeia, aceleradores, compatibilizantes, promotores de reticulação;
- Melhoria de processamento: promotores de fluxo, plastificantes, agentes de deslizamento, lubrificantes, agentes tixotrópicos, agentes de libertação;
- Melhorar a resistência à degradação durante o processamento e serviços: estabilizantes térmicos, estabilizantes de UV, desativadores de metais, limpadores de ácido;
- Melhoria das propriedades mecânicas: agentes de nucleação, compatibilizantes, modificadores de impacto, agentes de reticulação, plastificantes, reforços fibrosos;
- Melhoria do desempenho do produto: antiestática, agentes expansores, agentes de fricção, retardadores de chama, plastificantes, supressores de fumaça;
- Melhoramento das propriedades de superfície: promotores de aderência, agentes antiembaciamento, impedindo que ocorra perda brilho ou transparência, agentes de antibloqueio, agentes tensioativos, aditivos antidesgaste;
- Melhoria das propriedades ópticas: agentes de nucleação, pigmentos e corantes, branqueadores; e
- Redução de custos: extensores, enchimentos particulados.

Existem distintos tipos de aditivos químicos que podem ser incorporados aos geossintéticos, de forma isolada ou combinada. Os principais tipos são: antioxidantes, estabilizantes UV e pigmentos (Dierickx & Van, 2004).

A seguir, será feita uma breve descrição dos principais tipos de aditivos químicos:

- *Antioxidantes*: são compostos químicos que têm a função de inibir ou retardar o processo de oxidação dos polímeros, desde a fase de processamento quanto ao longo da sua vida útil, passando, também, pelo armazenamento dos mesmos (Carneiro, 2009). Assim sendo, a deterioração da superfície dos geossintéticos e de suas propriedades físicas é evitada pelo uso dos antioxidantes (Lopes e Lopes, 2010).
- *Estabilizantes UV*: também conhecidos como agentes de absorção da radiação ultravioleta, e tais estabilizantes atuam na redução ou retardamento da degradação causada pela luz ultravioleta (radiação UV). Esse processo ocorre por meio de diferentes mecanismos que interferem na degradação do geossintético por presença de oxigênio, denominada foto-oxidação. Dentro dessa categoria, pode-se citar o negro de carbono que é formado a partir da decomposição térmica ou combustão de hidrocarbonetos, sendo um dos aditivos mais utilizados na indústria dos plásticos. Trata-se de um pó finamente disperso que tem como características diâmetro aproximado de 10 a 100nm e área superficial entre 25 e 1.500 m<sup>2</sup>/g. A utilização desse aditivo se deve por diversas razões, tais como seu elevado poder de pigmentação, baixo custo, alta eficiência e excelente desempenho (como colorante e/ou estabilizante UV). Existe uma variada gama de níveis de cores de negro de carbono, para atender aos requerimentos de todos os plásticos (Accorsi e Yu, 1998; Carneiro, 2009). O negro de carbono fornece cor e opacidade aos materiais, protegendo os polímeros da radiação UV, alterando propriedades elétricas dos plásticos, dentre outras funções. Para garantir eficiência no desempenho, é necessário que o negro de carbono esteja uniformemente distribuído por todo o plástico (Carneiro, 2009).

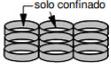
## 2.2. Tipos de geossintéticos

Nesse tópico, serão apresentados os principais grupos de geossintéticos disponíveis no mercado. Uma ênfase maior será dada as geomembranas e aos geotêxteis, que são os materiais utilizados na presente pesquisa.

### 2.2.1 Considerações iniciais

A Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS) classifica os geossintéticos genericamente em categorias dependendo do processo de fabricação, no qual, as denominações usuais e breves descrições dos geossintéticos estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição da classificação dos geossintéticos

	<p><b>Geotêxteis</b> são mantas contínuas de fibras ou filamentos, tecidos, não tecidos, tricotados ou costurados. As mantas são flexíveis e permeáveis. Geotêxteis são usados para aplicações de separação, proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosões.</p>
	<p><b>Geomembranas</b> são mantas contínuas e flexíveis constituídas de um ou mais materiais sintéticos. Elas possuem baixíssima permeabilidade e são usadas como barreiras para fluidos, gases ou vapores.</p>
	<p><b>Geogrelhas</b> são materiais geossintéticos com forma de grelha. A principal aplicação das geogrelhas é em reforço de solos.</p>
	<p><b>Georredes</b> são materiais com aparência semelhante à das grelhas formados por duas séries de membros extrudados paralelos, que se interceptam em ângulo constante. Possui alta porosidade ao longo do plano, sendo usada para conduzir elevadas vazões de fluidos ou gases.</p>
	<p><b>Geocompostos drenantes</b> são formados pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos e possuem como função a drenagem de líquidos, drenagem de gases, filtração e proteção mecânica, é exemplo: geocompostos drenantes pré-fabricados ou geodrenos. Esses são constituídos por um núcleo plástico drenante envolto por um filtro geotêxtil.</p>
	<p><b>Geotubos</b> são tubos poliméricos perfurados ou não usados para drenagem de líquidos ou gases (incluindo coleta de chorume ou gases em aplicações de aterros sanitários). Em alguns casos o tubo perfurado é envolvido por um filtro geotêxtil.</p>
	<p><b>Geocélulas</b> são arranjos tridimensionais relativamente espessos, constituídos por tiras poliméricas. As tiras são soldadas para formar células interconectadas que são preenchidas com solo e, às vezes, concreto. Em alguns casos, faixas de 0,5 a 1m de largura de geogrelhas podem ser ligadas por hastes poliméricas verticais para se formar geocélulas mais espessas, também denominadas “geocolchão”.</p>

	<p><b>Geoespuma</b> são blocos ou placas produzidas por meio da expansão de espuma de poliestireno para formar uma estrutura de baixa densidade. O geoespuma é usado para isolamento térmico, como um material leve em substituição a aterros de solo ou como uma camada vertical compressível para reduzir pressões de solo sobre muros rígidos.</p>
	<p><b>Geocompostos argilosos (GCL's)</b> são geocompostos fabricados com uma camada de bentonita geralmente incorporada entre geotêxteis de topo e base ou ligadas à uma geomembrana ou à uma única manta de geotêxtil. Os geotêxteis que compõem os GCL's geralmente são costurados ou agulhados através do núcleo argiloso para aumentar a resistência interna do produto ao cisalhamento. Quando hidratados eles atuam efetivamente como barreira para líquido ou gás e são comumente usados em aterros sanitários em conjunto com geomembranas.</p>

Fonte: International Geosynthetics Society (IGS).

Em paralelo, os geossintéticos também podem ser classificados com base nas distinções estruturais ocasionadas pela variedade dos processos de fabricação. Os geossintéticos podem ser agrupados em duas categorias: os materiais permeáveis e os impermeáveis.

Entre os permeáveis destacam-se os geotêxteis, as geogrelhas, as georredes, as geocélulas e os geotubos. Por sua vez, os produtos os impermeáveis resumem-se as barreiras geossintéticas como geocompostos argilosos e geomembranas.

A seguir, serão descritos, de maneira detalhada, os geotêxteis e as geomembranas, tendo em vista que representam o foco deste trabalho. Maiores informações a respeito dos diferentes tipos de geossintéticos podem ser consultadas em Palmeira 2018.

### 2.2.2 Geotêxteis

O termo geotêxteis é definido pela norma internacional NBR-ISO 10318-1(2018) como material têxtil plano, permeável, polimérico (sintético ou natural), podendo ser não tecido, tricotado ou tecido, utilizado em contato com o solo e/ou outros materiais em aplicações da engenharia geotécnica e civil. A Tabela 2 apresenta os principais compostos utilizados na fabricação dos geotêxteis.

Tabela 2 – Compostos usados na fabricação de geotêxteis comumente usados e seu peso aproximado em porcentagem.

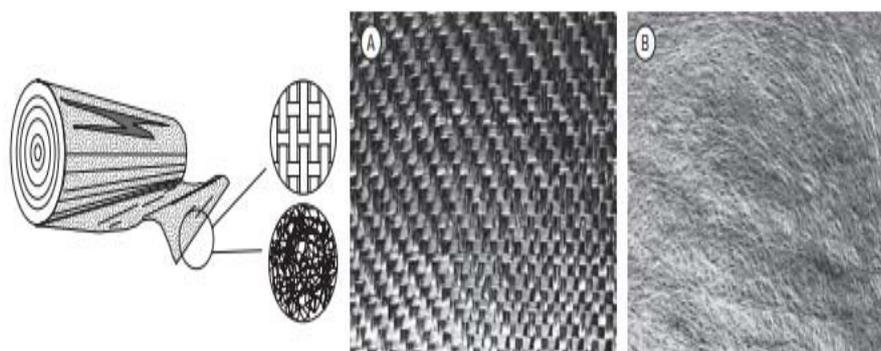
Nome genérico	Resina	Negro de carbono	Outros aditivos
Polipropileno	95-98	0-2	1-3
Poliéster	97-98	0-1	1-2
Polietileno	95-98	1-3	1-2

Fonte: Daniel e Koerner, 2007.

Aproximadamente 90% dos geotêxteis usados hoje são feitos de resina de polipropileno. Os outros 10% são poliéster e uma variedade de polímeros, incluindo polietileno, nylon e outros usados para fins especiais. Tal como acontece com todos os geossintéticos, a resina base tem vários aditivos, resultando no composto final. Os aditivos usados para proteção contra a luz ultravioleta e como auxiliares de processamento são os mais comuns (Daniel & Koerner, 2007).

Os geotêxteis, dependendo do processo de fabrico e da estrutura, podem ser divididos em tecidos, não-tecidos e tricotados. A Figura 1 ilustra alguns geotêxteis tecidos e não-tecidos.

Figura 1 – Tipos de geotêxteis: a) geotêxtil tecido; b) geotêxtil não tecido.



Fonte: Palmeira, 2018.

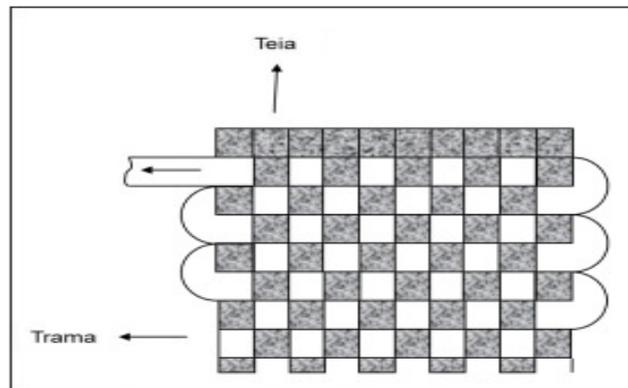
### 2.2.2.1 Geotêxteis tecido

Segundo a norma internacional NBR-ISO 10318-1(2018), o geotêxtil tecido (GTX-W) é aquele produzido pelo entrelaçamento, geralmente em ângulo reto, de dois ou vários conjuntos de fios, filamentos, laminetes ou outros elementos.

Os geotêxteis tecidos, fabricados conforme os princípios da tecelagem tradicionais são compostos por conjuntos perpendiculares entre si, conhecidos por teia e trama (Figura 2), e por

componentes paralelos entrelaçados, constituindo uma estrutura planar com alguns milímetros de espessura (Afonso, 2009).

Figura 2 – Estrutura típica de um geotêxtil tecido.



Fonte: Adaptado de Rosário (2008).

A espessura dos geotêxteis tecidos produzidos por multifilamentos ou por fios fibrilados, varia de 1,0 a 2,0 mm, enquanto os geotêxteis compostos por tiras ou fios simples, a espessura não ultrapassa 0,5 mm (Violante, 2016).

#### 2.2.2.2 Geotêxteis não tecidos

Segundo a norma internacional NBR-ISO 10318-1(2018), o geotêxtil não tecido (GTX-NW) é aquele geotêxtil feito de fibras, filamentos ou outros elementos direcional ou aleatoriamente orientados, interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos.

Os geotêxteis não tecidos, (Figura 3), são manufacturados através do posicionamento aleatório das fibras ou filamentos, em trama solta, em um tapete (Carvalho, 2014). Em seguida, os componentes são interligados por processos mecânicos, químicos ou térmicos, obtendo-se uma estrutura planar (Rosário, 2008).

Figura 3 – Geotêxtil não tecido.



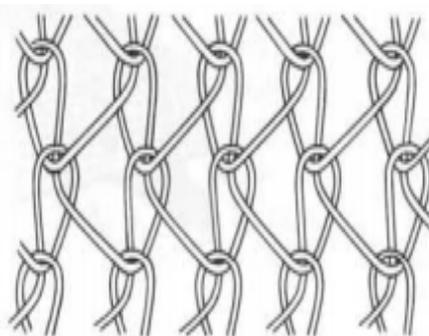
Fonte: Autora.

### 2.2.2.3 Geotêxtil tricotado

Segundo a norma internacional NBRISO 10318-1(2018), o geotêxtil tricotado (GTX-K) é aquele geotêxtil produzido pelo entrelaçamento de um ou vários fios, filamentos ou outros elementos.

Os geotêxteis tricotados são produzidos por meio da junção entre as técnicas de tecelagem e tricotagem, com o objetivo de gerar produtos de maior resistência. A sua estrutura é constituída por feixes de multifilamentos de elevada resistência aplicados sobre uma base tricotada deformável (Figura 4).

Figura 4 – Estruturas típicas de têxteis tricotados



Fonte: Shukla, 2002.

### 2.2.3 Geomembranas

Segundo a norma internacional NBR-ISO 10318-1(2018), as geomembranas podem ser definidas como material geossintético de baixa permeabilidade. Além disso, é utilizada em aplicações da engenharia geotécnica e civil com a finalidade de reduzir ou prevenir a percolação de fluidos através da estrutura

As geomembranas (GM) constituem em membranas poliméricas flexíveis que apresentam permeabilidades extremamente baixas (da ordem de  $10^{-12}$  cm/s) e que são utilizadas como barreiras para líquidos e vapores. São produzidas industrialmente, em geral na forma de bobinas, que são levadas ao local da obra, onde procede a sua instalação e respectivas emendas. (Vertematti, 2015)

Dentre as principais vantagens de aplicação das geomembranas, em obras de engenharia, pode-se destacar: o controle de qualidade de um produto manufaturado, a facilidade de instalação, a flexibilidade, a reduzida permeabilidade e o ganho de espaço no aterro (Vilar, 2003). A Figura 5 apresenta a utilização de geomembrana em uma obra de engenharia.

Figura 5 – Uso de uma geomembrana como revestimento em um canal.



Fonte: K. Von Maubeuge Naue, 2020.

A seguir, serão descritos os principais processos utilizados na produção das geomembranas comumente encontradas no mercado, bem como, a caracterização de tais modelos.

### 2.2.3.1 Fabricação

A fabricação das geomembranas começa com a produção das matérias-primas, que inclui a própria resina polimérica; vários aditivos, como antioxidantes, plastificantes, enchimentos, negro de carbono e lubrificantes (como um auxiliar de processamento). Por exemplo, os aditivos, como sais de chumbo e orgânicos derivados de Ba, Ca, Cd, Zn e Sn, são adicionados ao PVC para melhorar a estabilidade ao calor e à luz.

Aditivos lubrificantes, como estearatos ou palmitatos, são adicionados ao polímero para melhorar a fabricação do material. Plastificantes em PVC e HDPE melhoram a flexibilidade da membrana. Além disso, para aumentar a resistência química e UV, antioxidantes são fundidos no polímero. A Tabela 3 faz referência à composição das principais geomembranas encontradas no mercado.

As matérias-primas são então processadas em folhas de geomembrana de várias largura e espessura de três maneiras: extrusão, calandragem e revestimento espalhado (Sangan & Rowe, 2002; Rowe et al., 2004; Rimal et al., 2004; Gulec et al., 2004; Rowe, 2005; Rowe et al., 2009; Rowe et al., 2010; Lodi & Bueno, 2012). Essas técnicas de fabricação resultam em produtos com espessura variando de 0,5 mm até 5,0 mm (Rollin & Rigo, 1991).

Tabela 3 – Formulações dos tipos de geomembranas comumente usadas e seu peso aproximado em porcentagem

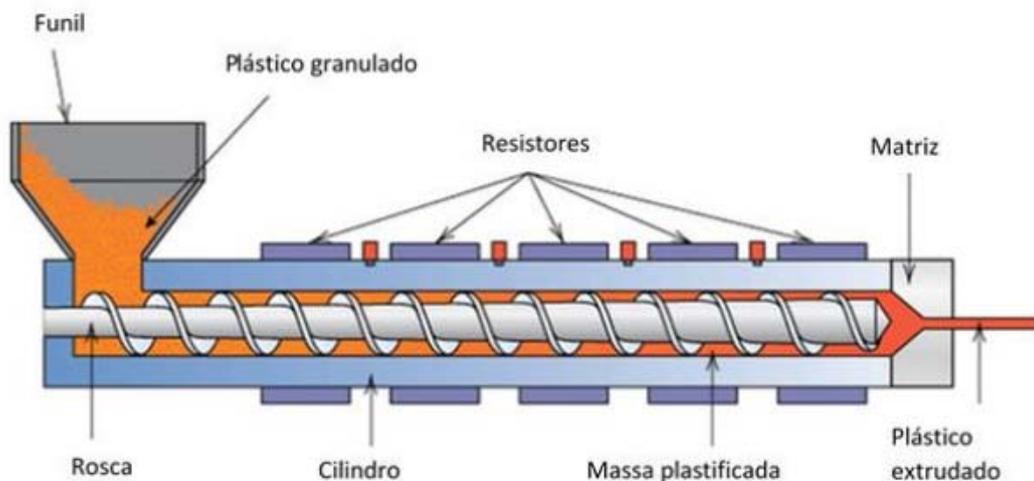
<b>Tipos</b>	<b>Resina</b>	<b>Plastificante</b>	<b>Enchimentos</b>	<b>Negro de carbono</b>	<b>Aditivos</b>
HDPE	95-98	0	0	2-3	0.25-1
LLDPE	94-96	0	0	1-3	0.5-4
FPP	85-98	0	0-13	2-4	0.5-2
PVC	50-70	25-35	0-10	2-5	2-5
CSPE	40-60	0	40-50	5-10	5-15
EPDM	25-30	0	20-40	20-40	1-5

Fonte: Adaptado de Daniel & Koerner, 1993.

O processo de extrusão mais simples consiste em forçar o plástico derretido, constituídas de polímero fundido e aditivos necessários, através de um orifício. O tipo de equipamento mais comumente empregado é a extrusora de rosca única, esquematizada na Figura 6.

No processo, o plástico é introduzido na forma de *pellets* e conduzido para o orifício de saída por uma rosca ao longo de um trecho em que ocorre fusão e mistura. A forma e as dimensões do produto final são condicionadas pelo tipo e forma do orifício de saída (Palmeira, 2018). A abertura da matriz pode ser uma matriz plana de saída horizontal ou uma matriz circular de saída vertical (Daniel & Koerner, 1993).

Figura 6 – Esquema de extrusor de rosca única

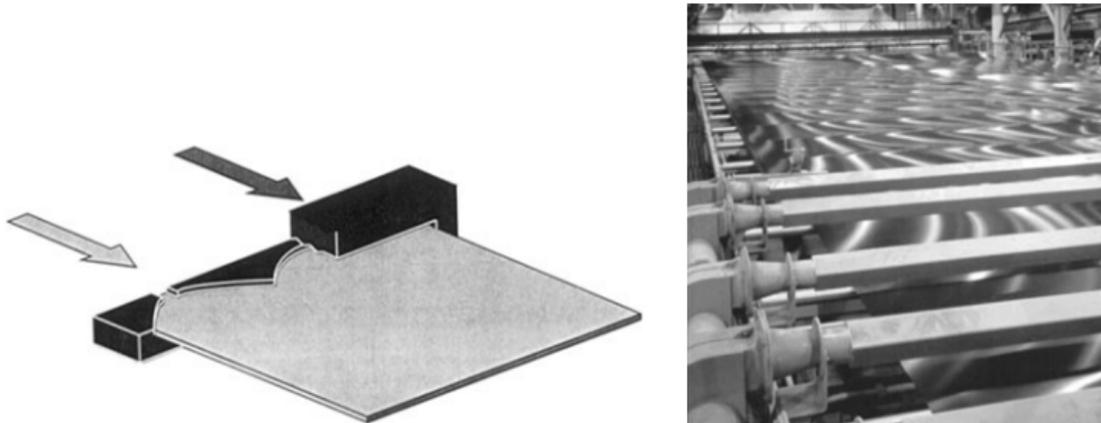


Fonte: Adaptado de Britti Bacalhau, Cunha & Afonso, 2006.

### 2.2.3.2 Geomembranas de folhas lisas

O polímero fundido e completamente misturado entra na matriz e é forçado pela pressão a fluir lateralmente, saindo do espaço da matriz ao longo de toda a sua largura em uma espessura que é precisamente controlada. Uma largura típica de folha é de aproximadamente 7,0 m. Folhas mais largas podem ser feitas usando duas extrusoras lado a lado, como que os fluxos de fusão se fundem dentro do bloco de matriz comum (Figura 7). As dimensões acabadas, particularmente a espessura, podem ser rigidamente controladas (variação de 1,0%). (Daniel & Koerner, 1993).

Figura 7 – Esboço e fotografia de extrusão de matriz plana geminada.

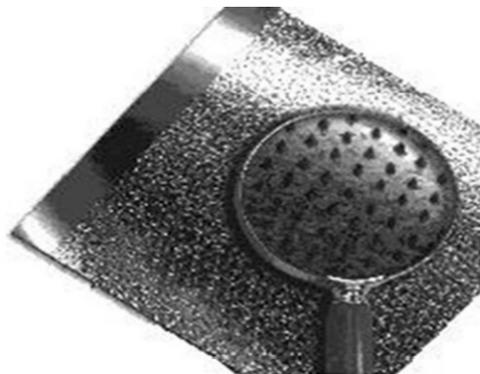


Fonte: Struve 1995, com permissão do Instituto de Informação Geossintética.

#### 2.2.3.3 Geomembrana de folha texturizada

A texturização pode ser feita em uma ou ambas as superfícies da folha. Existem atualmente dois métodos usados para texturizar geomembranas lisas: coextrusão (mais comum na América do Norte) e estruturação através de um conjunto padronizado de rolos de resfriamento (mais comum na Europa). Para fornecer uma superfície texturizada usando extrusão de matriz plana, a folha lisa deixa o espaço da matriz e (enquanto ainda quente) é enviada entre os rolos contra rotativos padronizados. Assim, a folha ainda viscosa assume a configuração da superfície do padrão do rolo (Figura 8). Observe que a borda é lisa para facilitar a soldagem das chapas no campo.

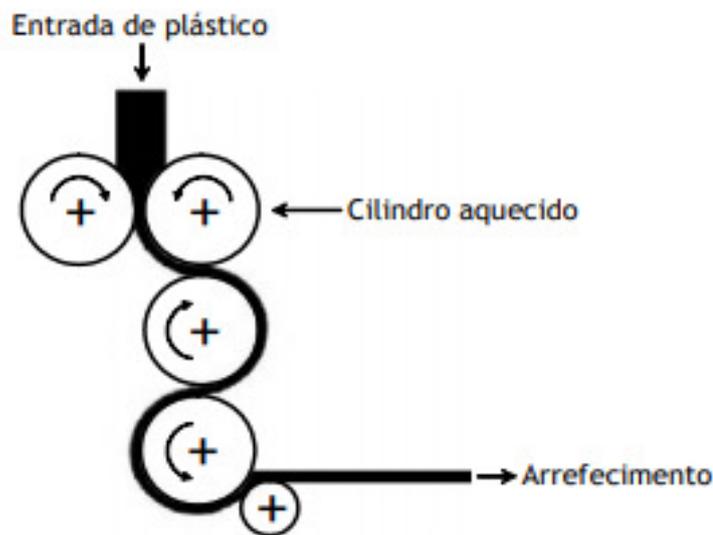
Figura 8 – Folha texturizada de extrusão de matriz plana.



Fonte: Cortesia de Agru America, Inc.

A calandragem é outro processo que pode ser utilizado na confecção de geomembranas, com ou sem reforço, em que o plástico fundido é comprimido entre rolos rotatórios, como esquematizado na Figura 9. O processo mais comum de fabricação de geomembranas é em monocamada sem reforço, com espessura entre 0,13mm e 5mm e larguras de rolo típicas entre 0,9 e 5,2 m, podendo chegar a 10 m para alguns fabricantes (Palmeira, 2018).

Figura 9 – Processo de fabrico de geomembranas por calandragem.



Fonte: Lopes, 1998.

O processo de calandragem (compressão do material entre cilindros aquecidos de rotação contrária) é o processo mais usado para o fabrico das geomembranas (Ingold, 1994). Polímeros provenientes dos laminadores são trabalhados e achatados entre rolos contrarrotativos em uma folha de geomembrana.

A maioria dos *calenders* possuem configurações de "L invertido" (Figura 9), embora haja outras configurações, disponíveis. Os rolos são geralmente cilindros de aço inoxidáveis lisos e têm até 2,0 m de largura. A distância de abertura entre os cilindros adjacentes é definida para a espessura desejada da folha final. Uma margem rolante de material fundido é formada entre os rolos adjacentes. Conforme a geomembrana sai da calandragem, ela entra em uma série adicional de rolos para retirada, estampagem, decapagem, resfriamento e corte. (Daniel & Koerner, 1993).

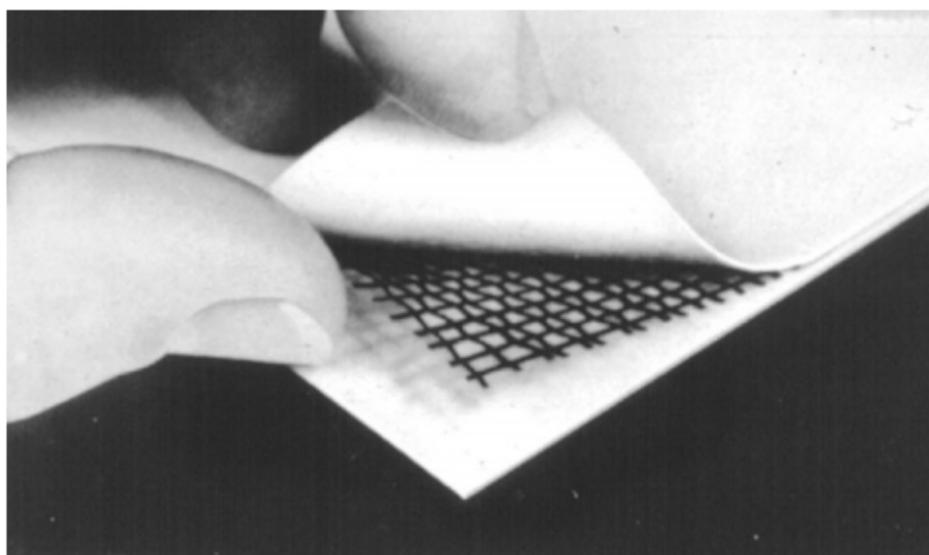
A calandragem ocorre muitas vezes após o processo de extrusão, para uniformizar a superfície dos materiais e melhorar as suas propriedades mecânicas. Espessuras típicas de geomembranas estão nas faixas de 0,25 a 7,5 mm (10 a 300 mils, 1 mil = 0,001 pol.) e são produzidos em rolos de aproximadamente 1,5 a 10m de comprimento (Shukla, 2002).

O espalhamento superficial funciona como um reforço à estrutura desenvolvida, ou seja, consiste no revestimento de um geotêxtil, seja com um polímero ou um composto asfáltico, originando um material com características específicas para o meio em que será utilizado.

O calander do tipo L invertido oferece a possibilidade de introduzir simultaneamente duas fitas do composto polimérico misturado e triturado, formando assim duas folhas individuais de geomembranas. Ou seja, o processo de calandragem pode produzir geomembranas em forma de múltiplas camadas. Uma vez que, essas camadas, são formadas por folhas separadas de geomembrana, que são reunidas imediatamente após a saída da calander para fornecer uma geomembrana laminada que consiste em duas ou mais camadas do material (Daniel & Koerner, 1993).

Ao produzir as duas camadas separadas em um calander L invertido, conforme descrito acima, um tecido, denominado tela de reforço, pode ser introduzido entre as duas camadas (Figura 10). A tela geralmente é um fio de poliéster tecido com 6x6, 10x10 ou 20x20 contagens. Esses números referem-se ao número de fios por polegada nas direções da máquina e transversal à máquina, respectivamente. (Daniel & Koerner, 1993).

Figura 10 – Geomembrana reforçada com várias camadas



Fonte: Daniel e Koerner, 1993.

#### 2.2.3.4 Tipos de geomembranas

Todas as geomembranas são, na verdade, formulações de uma resina original (a partir da qual derivam seu nome genérico) e quantidades variáveis de outros ingredientes (Daniel & Koerner, 1993). São classificadas em sintéticas ou asfálticas, de acordo com o material empregado na sua fabricação, sendo os polímeros sintéticos mais utilizados em sua fabricação:

- *Termoplásticos*: aqueles que podem ser repetidamente aquecidos até o ponto de fusão, moldados ou trabalhados e, posteriormente, resfriados para preservar a forma remoldada (exemplos: PVC, PP, LDPE, HDPE, LLDPE);
- *Termoplásticos cristalinos*: são polímeros termoplásticos que possuem um arranjo ordenado de átomos ou moléculas com repetição regular no espaço: (exemplos: LDPE, HDPE, LLDPE);
- *Elastômeros*: são aqueles que apresentam propriedades elásticas, ou seja, apresentam elevadas deformações antes de escoarem (exemplo: EPDM); e
- *Elastômeros termoplásticos*: constituem o grupo de polímeros que apresentam propriedades termoplásticas e elastoméricas (exemplos: CPE, CSPE).

Destacam-se alguns aditivos que, pela sua importância, poderão ser decisivos no comportamento do geossintético. Estes aditivos, tais como: antioxidantes, negro de carbono, óleos plastificantes e filtros inertes, melhoram as características específicas do polímero ou polímero base. Além disso, no caso de funcionarem como material de enchimento, reduzem o custo do composto.

A maioria das geomembranas são produzidas a partir de polímeros termoplásticos, que não tendo ligações cruzadas, poderão ter na sua composição agentes de ligação originando um material termo endurecido de alta resistência química, ao contrário dos compostos de borracha sintética (Monteiro, 1998). Distinguem-se três categorias principais de geomembranas: as termoplásticas semicristalinas, as termoplásticas amorfas e as elastômeras. Destas, as primeiras são as que, de longe, têm a menor quantidade de aditivos, enquanto a categoria de elastoméricas tem a maior quantidade. As geomembranas amorfas termoplásticas são produtos intermediários, no que se refere a quantidade de aditivos.

Os principais tipos de geomembranas e suas respectivas características, de acordo com Daniel e Koerner (1993) são:

- a) Polietileno de alta densidade (HDPE): são feitas de resina de polietileno, negro-de-carbono e sais; os aditivos são auxiliares no processo de determinação de características específicas e atuam como antioxidantes de longo prazo. As geomembranas de HDPE podem ser lisas em ambos os lados, liso de um lado e texturizado do outro, ou texturizado em ambos os lados;
- b) Polietileno linear de baixa densidade (LLDPE): são feitas de resina de polietileno, negro-de-carbono e sais para estabilização de processamento e antioxição de longo prazo. Na polimerização de baixa pressão do LLDPE, a incorporação aleatória de monômeros de alfa olefina produz cadeia curta e ramificação suficiente para produzir densidades na faixa de 0,915 a 0,930 /cm<sup>3</sup>. Essa faixa resulta em propriedades de resina bastante diferentes do HDPE. Em particular, o LLDPE tem densidade mais baixa, maior flexibilidade, menos tendência a rachaduras por tensão, maior alongamento na ruptura e valores de módulo de elasticidade mais baixos em todos os níveis de alongamento. Podem ser lisas em ambos os lados, liso de um lado e texturizado do outro, ou texturizado em ambos os lados;
- c) Polipropileno Flexível (FPP): são feitas de resina de polipropileno, negro de carbono e sais. Para geomembranas não pretas, TiO<sub>2</sub> é adicionado junto com o corante em quantidades de até 13%. Este polímero resulta em propriedades com flexibilidade significativamente maior do que HDPE e ligeiramente maior do que LLDPE;
- d) Cloreto de polivinila (PVC): são feitas com resina de cloreto, plastificante (s), negro-de-carbono e aditivos. Podem ser lisas em ambos os lados;
- e) Polietileno clorossulfonado (CSPE): consistem em resina de polietileno clorossulfonado, negro-de-carbono (ou corantes). A geomembrana finalizada é geralmente moldada com um tecido têxtil, denominado “tela de reforço”, entre as camadas individuais do material.

A geomembrana de PEAD (Polietileno de alta densidade) desempenha papel relevante no processo de impermeabilização de aterros, uma vez que possui elevada durabilidade,

estanqueidade e resistência mecânica, química e física aos resíduos sólidos. A Tabela 4 apresenta um comparativo entre as desvantagens e vantagens dos principais tipos de geomembranas fabricadas.

Tabela 4 – Comparativo entre as principais geomembranas.

Geomembrana	Principais características
Policloreto de vinila (PVC)	Boa trabalhabilidade
	Altas características de resistência sem esforços
	Facilidade para execução de emendas
	Leve como camada única
	Grande variação na velocidade
	Grande variação nas misturas
	Baixa resistência a raios UV, ozônio, sulfetos, intempéries
	Baixa resistência ao puncionamento
	Trincas devem ser verificadas
	Possível bloqueio (aderência)
Polietileno clorosulfonado (CSPE)	Boa resistência aos raios UV e agentes de intempéries
	Boa resistência para químicos, ácidos e óleos
	Bom desempenho para baixas temperaturas
	Boas costuras - calor e adesivo
	Baixas características de resistência
	Problemas durante emendas
	Possível bloqueio (aderência)
Polietileno clorado (PEC)	Boa resistência aos raios UV e agentes de intempéries
	Bom desempenho para baixas temperaturas
	Boas características de resistência
	Costuras fáceis - dielétricos e solventes
	Baixa resistência para químicos, ácidos e óleos
	Baixa qualidade na emenda; Possível bloqueio (aderência)
Polietileno de média densidade e de alta densidade (PELMD e PEAD)	Boa resistência a diversos agentes químicos
	Boas características de resistência e soldas
	Grande variação na espessura
	Bom desempenho em baixas temperaturas
	Suscetível ao fenômeno de “stress cracking”
	Baixa resistência ao puncionamento
	Alta expansão/contração térmica
	Sensível a rachaduras
	Crítica de acabamento de costura
Polietileno linear de baixa densidade (LLDPE)	Boas costuras - térmica e extrusão
	Grande variação na espessura
	Superfície de alta fricção
	Sem rachaduras
	Resistência química variada
	LLDPE recém introduzido

Fonte: Adaptado de Woodley, 1978 e Bagchi, 1994.

Cabe ressaltar que a tabela desenvolvida por Bagchi (1994) apresentava lacunas, tais como a não inclusão da resistência das geomembranas de PEAD aos raios UV e a possibilidade de melhoramento de características do material por meio da formulação das geomembranas de PVC. Dessa forma, os estudos de Woodley (1978) serviram como complementação de informações.

### **2.3. Propriedades dos geossintéticos**

Como para qualquer outro material de engenharia, a utilização de geossintéticos pressupõe o conhecimento de suas propriedades relevantes para cada aplicação. A garantia da eficiência na utilização de um geossintético está intimamente relacionada a um conjunto de propriedades que são: físicas, hidráulicas, mecânicas e de desempenho, que deverão ser asseguradas após as operações de transporte, colocação em obra e ao longo de sua vida útil.

Dentre as propriedades físicas mais relevantes, podemos citar a massa por unidade de área (gramatura), a espessura dos polímeros que compõem os geossintéticos e a porosidade. Tais atributos servem para classificar geossintéticos da mesma “família”.

Com relação às propriedades mecânicas, destacam-se a resistência à tração, à fluência, à compressão e ao puncionamento (dinâmico e estático), como as mais significativas. Já às propriedades hidráulicas contemplam a abertura de filtração, a permissividade e a transmissividade.

Segundo Lopes (1992), as propriedades mecânicas dos geossintéticos dependem de vários fatores, tais como: o polímero constituinte, a estrutura, o processo de fabrico e o tipo de ligação, entre outros

As propriedades referentes a desempenho têm por objetivo verificar as propriedades do geossintéticos quando em contato com outro tipo material (efluente, solo, etc.). Os testes de desempenho para estudos de durabilidade, por exemplo, englobam a avaliação do desempenho do geossintético após o contato com materiais agressivos ou sob a influência das condições climáticas, no que se refere à resistência à: voláteis, à abrasão, à degradação térmica, à radiação solar, à resistência química e a resistência biológica. Também englobam os testes de desempenho a avaliação de parâmetros de interface no contato do geossintético com outro material. A avaliação da resistência de interfaces solo-geossintético pode ser obtida por meio de ensaios utilizando um plano inclinado ou rampa, por ensaio de cisalhamento direto, ou ensaio

de arranchamento. Uma descrição desses ensaios pode ser consultada em Vertematti (2004) e Palmeira (2018.)

A Tabela 5 apresenta os principais ensaios utilizados para a determinação das propriedades do geossintéticos. O detalhamento da execução dos ensaios pode ser consultado nas normas citadas em Palmeira (2018) e Vertematti (2004).

Tabela 5 – Ensaio utilizados para a determinação das propriedades do geossintéticos

<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>	<b>Objetivo</b>	
<b>Física</b>	Gramatura ( $\rho_A$ )	NBR ISO 10.318-1 (2018)	Representar o peso (g) do geossintético por $m^2$ .
	Espessura ( $d$ )	NBR ISO 10.318-1 (2018)	Representar a distância entre as superfícies superior e inferior de um geossintético.
	Espessura com pressões especificadas	NBR 9.863-1 (2021)	Medir a distância entre a placa de referência sobre a qual o corpo de prova é colocado e a face de uma sapata circular de compressão, paralela, que aplica uma tensão específica em uma área de dimensão definida.
	Porosidade ( $n$ )	-	Quantificar a capacidade de permitir que um líquido flua através de um material geossintético.
<b>Mecânico</b>	Tração	NBR ISO 10.318-1 (2018)	Quantificar a força de tração, por unidade de largura, suportada por um corpo de prova em dado instante de um ensaio de curta duração.
	Puncionamento Estático	NBR ISO 12.236 (2013)	Medir a capacidade dos geossintéticos de resistir a tensões geradas por objetos penetrantes, em situação estática.
	Puncionamento Dinâmico	NBR ISO 13.433 (2013)	Medir a capacidade dos geossintéticos de resistir a tensões geradas por objetos penetrantes, em situação dinâmica.
<b>Hidráulica</b>	Transmissividade de ( $\theta$ )	NBR ISO 10.318-1 (2018)	Calcular a taxa de vazão volumétrica no plano do produto por unidade de largura do corpo de prova
	Permissividade ( $\Psi$ )	NBR ISO 10.318-1 (2018)	Quantificar a taxa de vazão volumétrica de água, ou outros líquidos, por unidade de área e por unidade de perda de carga hidráulica, sob fluxo laminar normal ao plano do produto.
<b>Desempenho</b>	Abrasão	EN ISO 13.427 (2014) ASTM D4886 (2018).	Medir o desgaste causado pelo contato de um material contra qualquer superfície

Propriedade	Norma	Objetivo
Resistência química	-	Comparar as propriedades da amostra virgem de material geossintético com as propriedades após o contato com produto químico
Degradação térmica	ASTM D794	Determinar a resistência a degradação térmica dos geossintéticos
Resistência biológica	ASTM G 22-76 (1996) ASTM G 21-15 (2021)	Determinar a Resistência de Plásticos a Bactérias
Radiação solar	ASTM D 1435 (2020)	Avaliar a resistência de um geossintético à ação da radiação solar
Voláteis	-	Determinar a fração volátil

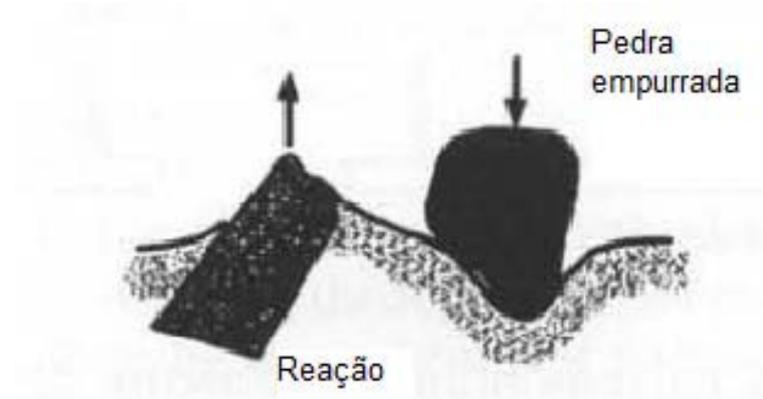
Fonte: Autora.

### 2.3.2 Resistência ao puncionamento

Para Shukla (2002), a resistência à punção representa a capacidade dos geossintéticos de resistir a tensões geradas por objetos penetrantes, como pedaços de rocha ou madeira, sob condição quase estática.

A Figura 11 mostra o comportamento de um geossintético frente à atuação de um objeto penetrante. Onde, torna se possível observar alterações no estado de tensões do conjunto e, conseqüentemente, uma reorganização física dos seus componentes.

Figura 11 – Comportamento de um geossintético frente à atuação de um objeto penetrante.



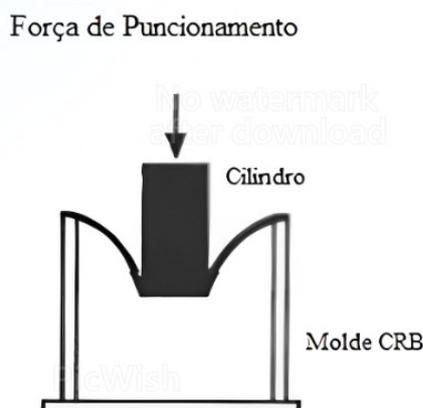
Fonte: Hausmann, 1990.

## I. Ensaio de puncionamento estático (punção CBR)

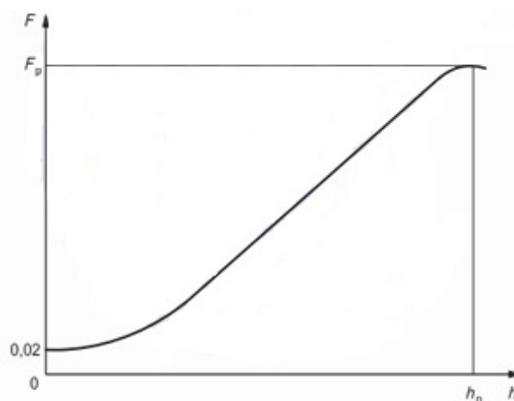
A norma da ABNT, NBR ISO 12236 (2013) descreve as recomendações sobre o ensaio para definir a resistência ao puncionamento de um geossintético. O ensaio utiliza a prensa do ensaio para obter o índice de suporte Califórnia (*California bearing ratio*, CBR) e é regido pela NBR ISO 9895 (2017).

Durante a execução do ensaio, o geossintético é submetido à uma força aplicada por um cilindro de aço, como mostrado na Figura 12. O geossintético tem suas extremidades fixas no molde do ensaio e o cilindro desce a uma velocidade constante, até atingir a ruptura do geossintético. Nesse ensaio são medidos a força necessária ao puncionamento do espécime e o deslocamento vertical do cilindro (Palmeira, 2018).

Figura 12 – Ensaio de puncionamento estático-corte transversal.



O ensaio é realizado com deslocamento controlado até a ruptura do corpo de prova com velocidade de  $50 \pm 5$  mm/min e pré-carga de 20 N. Para fixação do geossintético no equipamento de ensaio são utilizadas garras em suporte estrutural no molde CBR. O número mínimo de corpos de prova a ser ensaiado é de cinco. O ambiente de ensaio deve possuir temperatura controlada de  $20 \pm 2^\circ$  C e umidade relativa de  $65 \pm 5$ . A força de puncionamento máxima, o deslocamento na força máxima e a curva força de puncionamento são registrados, como pode ser visto na Figura 13, onde  $h$  é o deslocamento (em mm),  $F$  é a Força de puncionamento (em kN),  $F_p$  é a Força máxima de puncionamento (em kN), e  $H_p$  é o Deslocamento à força máxima (em mm).

Figura 13 – Força de puncionamento *versus* deslocamento da punção

Fonte: NBR ISO 12236 (2013).

Os valores de resistência ao puncionamento, para geomembranas não-reforçadas, estão geralmente compreendidos entre 50 e 500N e para geomembranas reforçadas entre 200 e 2000N. A presença de geotêxteis acima ou abaixo das geomembranas não- reforçadas aumenta consideravelmente sua resistência ao puncionamento. A Tabela 6 apresenta valores de resistência ao puncionamento para várias geomembranas baseados na norma da ASTM D4833 (Sharma & Lewis, 1994).

Tabela 6 – Resultados típicos de ensaios ao puncionamento para várias geomembranas poliméricas

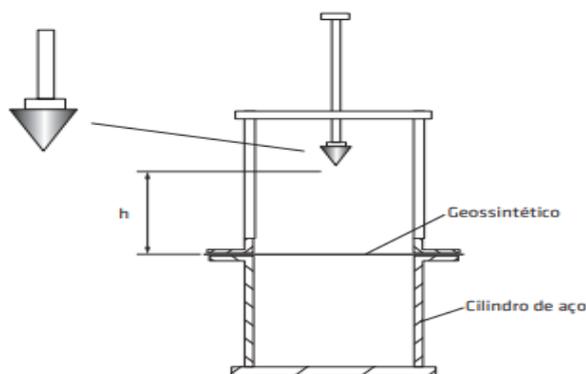
<b>Geomembranas</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Resistência à Punção (N)</b>
PEAD (HDPE)	1,5	318-363
PEAD (HDPE)	2,0	408-477
VLDPE	1,0	227-295
VLDPE	1,5	340-386
PVC	0,5	Não avaliado
PVC	1,0	Não avaliado

Fonte: Sharma & Lewis, 1994

## II. Ensaio de puncionamento dinâmico

Esse ensaio busca verificar a resistência de um geossintético (tipicamente geotêxteis ou geomembranas) à penetração de uma ponta cônica em queda livre de uma altura padronizada, como esquematizada na Figura 14 (Palmeira, 2018). O ensaio é padronizado pela NBR ISO 13433 (2013).

Figura 14 – Ensaio de penetração por queda de cone



Fonte: Palmeira, 2018.

Segundo a norma internacional NBRISO 13433 (2013), o princípio de tal ensaio baseia-se no conjunto ordenado de processos em que o corpo de prova é fixado horizontalmente entre dois anéis de aço. Um cone de aço inoxidável com a ponta virada para baixo é deixado cair de uma distância de 500 mm até o centro do corpo de prova. O grau de penetração é medido inserindo-se um cone graduado no furo.

### 2.3.3 Desempenho dos geossintéticos

Os ensaios de desempenho são executados tomando-se em consideração o meio em que se insere o geossintético. Os resultados são típicos da combinação geossintético/ meio (solo, geossintético, líquido) envolvente (Vertematti, 2004).

nsaios de durabilidade utilizados em geomembranas tem como objetivo verificar o desempenho a longo prazo de resistir tensões de origem mecânica, química, física ou biológica. Essas tensões podem ser aplicadas individualmente ou em conjunto (Rollin & Rigo,1991).

A seguir, será feita uma descrição das principais propriedades de desempenho dos geossintéticos.

#### I. Abrasão

Abrasão de um geossintético é definida como o desgaste causado pelo contato de um material contra qualquer superfície. A resistência à abrasão é expressa como a percentagem de

perda de resistência à tração ou do peso da amostra de teste. Ao testar a resistência à abrasão dos geossintéticos, é importante simular o tipo real de abrasão que um geossintético encontraria em campo (Shukla, 2002).

Os métodos normalmente usados para avaliar a resistência dos geossintéticos à abrasão incluem a EN ISO 13427: 2014 e ASTM D4886-18.

Testes mais tradicionais (como o aparelho de abrasão Taber para geomembranas termoplásticas e Pico Abrader para geomembranas elastoméricas) também podem ser usadas para reproduzir as condições secas de abrasão. O testador de abrasão Taber é descrito por ASTM D4060:19, enquanto o Pico Abrader é descrito por ASTM D2228 - 04(2019) (Rollin & Rigo, 1991).

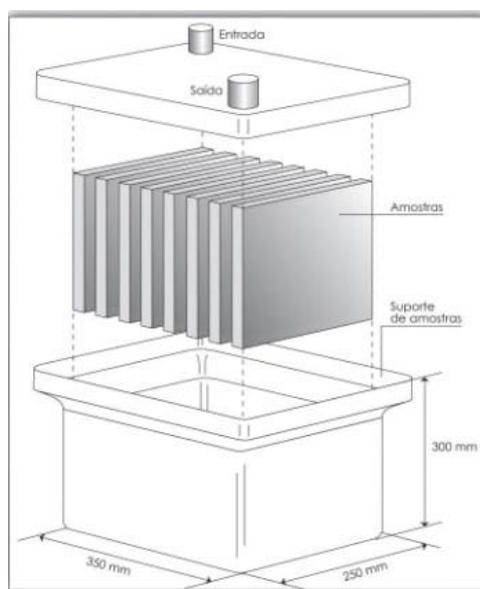
## II. Resistência química

Quando em serviço, as geomembranas podem ser submetidas a vários ataques por produtos químicos. A resistência química de diferentes geomembranas para produtos químicos geralmente é conhecida. O problema surge quando o produto químico não é um material de componente único. Neste caso, possíveis efeitos sinérgicos, que não são completamente conhecidos, podem surgir (Koerner, 1990).

A avaliação da degradação química das geomembranas em laboratório é feita mergulhando-se amostras em tanques contendo a substância agressiva. Esses tanques devem ser executados com material inerte ao produto em análise, tipicamente aço inoxidável ou vítreo (Figura 15).

No geral, empregam-se amostras em duplicatas, que são mantidas em tanques a temperaturas constantes de 23 a 50°C por períodos de até 120 dias. Periodicamente, as amostras de ambos os tanques são ensaiadas e suas propriedades comparadas com as da amostra virgem (Vertematti, 2004).

Figura 15 – Tanque de imersão para avaliação da resistência química de geomembranas



Fonte: Vertematti, 2004.

### III. Degradação térmica

A ação da temperatura (calor) pode provocar danos nos geossintéticos de vários modos: acelerando os mecanismos de degradação dos polímeros, causando a dissociação das ligações químicas ao longo da cadeia polimérica, promovendo a formação de radicais livres (que, em contato com o oxigênio, iniciam a oxidação dos polímeros) ou originando a dilatação ou contração térmica dos materiais (Carneiro, 2009).

O termo “degradação” significa perda de plastificantes e aditivos, causando geralmente um enrijecimento da membrana. Para avaliar esse efeito, amostras de geomembranas são colocadas em estufa, a elevadas temperaturas (geralmente 75°). Em tempos predeterminados, avaliam-se as propriedades de interesse, como resistência a tração, a rasgos, ao puncionamento, entre outras (Vertematti,2004).

O grau de energia térmica fornecida aos geossintéticos pode ocasionar a quebra das suas ligações químicas, uma vez que a energia fornecida seja igual ou superior à energia que as constitui. E essa fragmentação das ligações pode ocasionar rupturas na cadeia polimérica e/ou eliminação de moléculas, como por exemplo, de ácido clorídrico, no caso do PVC.

Maiores informações sobre ensaios para determinar a resistência a degradação dos geossintéticos podem ser obtidas na norma ASTM D794 (1993).

#### IV. Resistência biológica

As geomembranas podem ser atacadas por uma série de organismos vivos, particularmente quando utilizados em instalações de resíduos: o termo geral usado para descrever a capacidade de uma geomembrana de resistir a este tipo de ataque é resistência biológica.

Segundo Rollin & Rigo (1991), a resistência biológica das geomembranas pode ser examinada, dividindo o efeito macro biológico (devido a animais e plantas) e o microbiológico (devido a fungos e bactérias). Quanto à resistência a animais (como ratos), não há procedimentos de teste bem estabelecidos disponíveis. No entanto, é possível dizer que quanto mais forte e mais espessa for a geomembrana, melhor será sua resistência ao ataque de animais.

O polímero de uma geomembrana é geralmente resistente a fungos e bactérias, na medida em que não serve como fonte de carbono para o crescimento microbiológico. São geralmente os outros componentes, como plastificantes, lubrificantes, estabilizadores e corantes que podem sofrer ataque. É importante estabelecer a resistência das geomembranas ao ataque microbiológico quando são utilizadas sob condições de alta temperatura e umidade (Rollin & Rigo (1991).

O método de teste ASTM G 22-76 (1996), intitulado "Prática Padrão para Determinar a Resistência de Plásticos a Bactérias", é projetado para testar a resistência de materiais poliméricos sintéticos (materiais moldados, artigos de superfície tratada ou objetos semelhantes) ao ataque bacteriano.

Segundo o teste proposto pela ASTM G 21-15(2021), esta prática abrange a determinação do efeito de fungos nas propriedades de materiais poliméricos sintéticos na forma de artigos moldados e fabricados, tubos, hastes, folhas e materiais de filme.

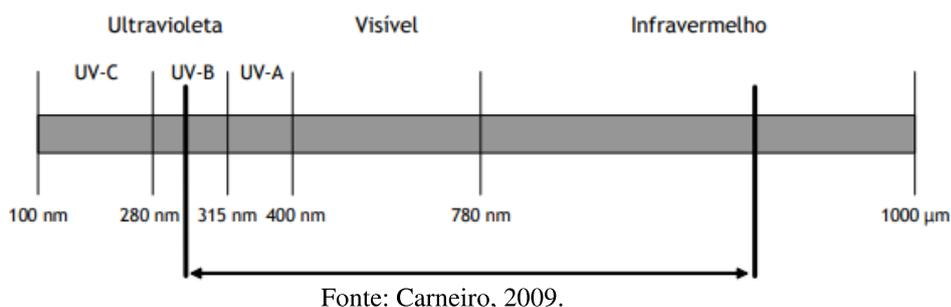
#### V. Radiação solar

Existem muitas evidências que o mais importante fator ambiental responsável pela degradação dos materiais poliméricos é a radiação solar, especialmente a radiação ultravioleta presente no espectro solar (Rosa, 1996).

Materiais plásticos são naturalmente sensíveis à luz e especificamente a exposição U.V. Esta é a razão pela qual misturas como o negro de carbono são adicionados aos compostos básicos durante o processo de fabricação de geomembranas.

A energia emitida pelo sol, na forma de radiação, que atinge à superfície da terra possui comprimento de ondas variáveis. E essas ondas eletromagnéticas podem ser divididas em três grupos: radiação UV (entre 295 e 400 nm), radiação visível (entre 400 e 780 nm) e radiação infravermelha (entre 780 e 3000 nm), como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra



A região UV representa apenas cerca de 4% do espectro solar que atinge a superfície terrestre, mas é a zona mais energética (a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda) e aquela que pode provocar mais danos aos materiais poliméricos. A região UV pode ser subdividida em três zonas: UV-A (entre 315 e 400 nm), que provoca alguma degradação nos polímeros; UV-B (entre 280 e 315 nm), que causa sérios danos nos polímeros; UV-C (entre 100 e 280 nm), apenas encontrada fora da atmosfera terrestre (Carneiro, 2009).

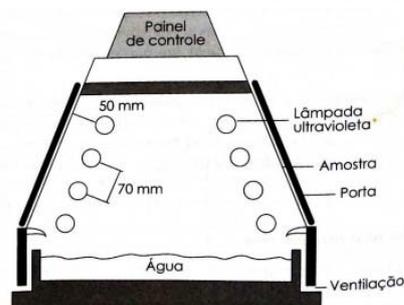
Segundo Vertematti (2004), a avaliação da resistência das geomembranas à ação da radiação solar é feita expondo-se os produtos ao ar livre para que recebam incidência de luz solar e de variações climáticas (chuvas, ventos, mudanças de temperatura). As amostras são dispostas em painéis inclinados 45 graus em relação à horizontal e orientadas de forma que tal amostra receba a máxima incidência de luz solar ao longo do ano.

A degradação provocada pela radiação UV pode ser afetada pela temperatura, pela umidade, pela precipitação, pelo oxigênio atmosférico, pelo vento, pela poluição atmosférica, entre outros.

A ASTM D 1435 (2020) orienta a forma de montagem do sistema, de amostragem e de tratamento dos resultados. Cabe ressaltar, que após o envelhecimento das amostras, elas deverão passar por testes laboratoriais, nos quais serão mensuradas as perdas de propriedades mecânicas ou hidráulicas.

Alternativamente, pode-se reproduzir, de modo artificial, o ambiente de degradação por incidência solar em laboratório. Para tanto, submetem-se amostras a ciclos de exposição à luz ultravioleta e condensação, sob elevadas temperaturas (Figura 17). Nesse caso, avaliam-se os períodos pré-fixados as propriedades de interesse. Os tempos de observação, no geral, são superiores a 500h, podendo, em casos especiais, atingir 10.000h (Vertematti, 2004).

Figura 17 – Ensaio de resistência à degradação por radiação UV



Fonte: Vertematti, 2004.

## VI. Voláteis

Segundo Rollin e Rigo (1991), a fração volátil é definida como a perda de peso de uma amostra de geomembrana ao aquecer em um forno de circulação a 105°C por 2 horas. O tamanho recomendado da amostra é um disco de 50 mm de diâmetro. O teste indica a quantidade de constituintes voláteis que foram absorvidos pela geomembrana, durante a sua exposição.

A determinação de voláteis é geralmente o primeiro teste realizado em uma amostra de geomembrana exposta, que precisa ser executado assim que possível, após a coleta da amostra do local de utilização.

## 2.4. Aplicação de geomembranas e geotêxteis em sistemas de impermeabilização em obras ambientais

### 2.4.1 Geossintéticos como sistemas de impermeabilização de aterros sanitários

A ABNT - NBR 8419-(1992) classifica o aterro sanitário da seguinte forma: “aterro sanitário é um método de disposição de resíduos sólidos no solo, sem provocar prejuízos ou ameaças à saúde e à segurança, utilizando-se princípios de engenharia, de tal modo, a confinar

o lixo no menor volume possível, cobrindo-o com uma camada de terra, ao fim do trabalho de cada dia, ou mais frequentemente, conforme o necessário”.

Os sistemas de contenção de resíduos para aterros sanitários englobam a impermeabilização de base aos resíduos neles colocados e de camadas de cobertura construídos sobre os resíduos. Os revestimentos mitigam a percolação de lixiviados e a migração de gás para fora de um aterro sanitário. Para garantir a estabilidade do aterro sanitário ao longo do tempo é necessário fazer a drenagem do chorume e do biogás gerados, com o dimensionamento de sistemas de drenagem.

O sistema de impermeabilização de fundo do aterro deve apresentar características como estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica e às intempéries, compatibilidade física, química e biológica com os resíduos a serem depositados no aterro (Cempre, 2010).

A impermeabilização da fundação e das laterais do aterro tem como função a proteção e o impedimento da percolação do chorume para o subsolo e aquíferos. No Brasil, a exigência mínima para a contenção de lixiviados não-perigosos é de que as camadas de fundo e laterais possuam uma camada simples, que pode ser de argila compactada de permeabilidade inferior a  $10^{-7}$  cm/s ou geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) com espessura mínima de 2 mm, tendo em vista a sua durabilidade, estanqueidade e resistência mecânica, química e física aos resíduos sólidos. A qualidade do material e os métodos de construção devem assegurar durabilidade e segurança, no sentido de diminuir os impactos ambientais (Elk, 2007).

Tal técnica pode substituir ou complementar a impermeabilização realizada por argilas compactadas, podendo ser utilizada em conjunto (que melhora o desempenho do sistema impermeabilizante). No entanto, no Brasil, é recomendável o uso de um sistema duplo de impermeabilização, contendo uma camada de argila compactada e uma geomembrana PEAD, com espessura mínima de 2mm. Essa espessura mínima é aprovada pela Instituição Federal de Pesquisa e Testes de Materiais (BAM), de forma a garantir a robustez suficiente aos esforços que estará submetida durante a vida útil. Não é recomendável a utilização da geomembrana como único sistema de impermeabilização, pois esta pode estar sujeita a furos e rasgos durante a instalação e operação.

Além disso, geomembranas devem ser mecanicamente fortes o suficiente para sobreviver ao transporte, manuseio, colocação e atividades de construção subsequentes. As deformações, sofridas em condições de serviço, tem que estar dentro de limites aceitáveis, sendo compatível com as deformações dos demais componentes da estrutura do aterro. A

resistência da interface deve estar de acordo com os requisitos de estabilidade da estrutura do aterro (Shukla, 2002).

A Figura 18 apresenta a instalação de uma geomembrana como parte da construção de um sistema de revestimento na base de um aterro sanitário.

Figura 18 – Instalação de geomembrana na de base de um aterro sanitário



Fonte: Schicketanz, Aachen (1997).

A instalação de geomembranas em aterros sanitários também requer clima favorável, que não pode ser feito durante um evento de chuva. A temperatura mínima para emenda das folhas de polietileno é de 5°C. Deve ser alocado tempo suficiente para a colocação de geomembranas para lidar com atrasos inevitáveis devido a clima desfavorável.

Os geotêxteis não-tecidos são amplamente aplicados em obras de aterro sanitário com variadas funções, dentre elas: separação de materiais com diferentes granulometrias, proteção de geomembranas, filtração do chorume, controle de erosão superficial, entre outras aplicações.

Geotêxteis utilizados em sistemas de filtração de chorume, substituem uma camada granular, atuando como um elemento de transição entre o sistema de drenagem e os resíduos. O sistema de drenagem pode ser composto materiais granulares contudentes (areias, britas, seixos e rachão) e tubos de drenagem.

Uma das aplicações do geotêxtil no aterro sanitário é como proteção das geomembranas utilizadas para impermeabilização, isso porque ele evita que as mesmas possam ser perfuradas ou rasgadas. Um exemplo dessa aplicação pode ser visto na Figura 19, onde foi aplicado o

geotêxtil como proteção da geomembrana no aterro sanitário de São Giácomo na cidade de Caxias do Sul, no estado do Rio Grande do Sul no ano de 1997 (Amaral, 2019).

Figura 19 – Aterro de São Giácomo, na cidade de Caxias do Sul/RS. (a) Instalação do geotêxtil sobre o gabião tipo colchão dreno (b) Aplicação da geomembrana sobre o geotêxtil



Fonte: Departamento Técnico - Atividade Bidim, 1998. Modificada por Amaral, 2019.

Observa-se que o geotêxtil atua como elemento de proteção à geomembrana na face inferior, impedindo a ocorrência de rasgos ou perfurações pelo contato direto com o gabião, reduzindo o período de execução da obra, acarretando uma diminuição de custos e um menor impacto ambiental.

Além do uso de geotêxteis de geomembranas em sistemas de impermeabilização da base do aterro sanitário, os mesmos materiais podem ser aplicados com as mesmas funções em sistemas de cobertura finais. Os sistemas de impermeabilização da cobertura dos aterros têm a função de diminuir a infiltração da água da chuva e o consequente aumento do volume do percolado, além de controlar a entrada e saída de gases.

Sharma & Lewis (1994) enfatizam que esse sistema é diferente do sistema de impermeabilização da base do aterro, necessitando de resistência química inferior à requerida para este último. Entretanto, existem preocupações quanto a sua durabilidade e exposição, devendo ser resistente a processos erosivos e adequado à futura utilização da área.

### ***2.4.3 Geossintéticos em sistemas de impermeabilização de para conter resíduos de mineração***

A exploração mineral tornou-se uma atividade indispensável para a sociedade moderna, devido à importância que os bens minerais e seus derivados assumiram na economia mundial. Entretanto, a continuidade e expansão das atividades de mineração no Brasil e no mundo dependem de um forte compromisso com a preservação e recuperação do meio ambiente (Rebouças et al.,2006).

De acordo com Salomons (1995), a mineração é uma das formas em que os metais potencialmente tóxicos são liberados para o ambiente, já que se constitui em uma atividade que rompe o equilíbrio químico natural. Diante disso, os metais tendem a interagir com os demais compartimentos (atmosfera, biosfera e hidrosfera), causando efeitos e persistindo no meio ambiente por longos períodos de tempo, mesmo após o controle das suas fontes de emissão.

A DAR (drenagem ácida de rocha) é formada pela oxidação de minerais sulfetados, principalmente pirita ( $\text{FeS}_2$ ), quando expostos a ação do oxigênio atmosférico e da água, com mediação bacteriana. Quando a DAR está relacionada à atividade mineradora, o processo passa a ser chamado de drenagem ácida de mina (DAM).

Uma das principais consequências da DAR é a solubilização de metais pesados associados aos minerais sulfetados, devido ao baixo pH ( $< 4,5$ ), os quais podem contaminar recursos hídricos adjacentes. A drenagem ácida de mina é um dos fatores mais importantes na ocasião do fechamento definitivo de uma mina, seja a céu aberto ou subterrânea. Ela implica em monitoramento, correções e atitudes necessárias para que se tenha uma situação mais próxima possível do inicial ou que não traga consequências inadequadas ao meio ambiente. (De Moraes, 2017).

Os elementos mais comuns encontrados na DAM de resíduos de minas metálicas são e alumínio, zinco, ferro, sulfato e cádmio (Ripley et al. ,1996). As minas de carvão no sul do Brasil produzem rejeitos como parte de suas operações de processamento de minério. Quando a disposição dos rejeitos (também conhecidos como rejeito de carvão) é inadequada, eles podem causar poluição do ar, do solo e da água (ver Figura 20).

Um dos principais problemas ambientais associados à disposição inadequada desses rejeitos é a drenagem ácida de mina (DAM), que se caracteriza pela formação de um efluente ácido rico em metais com concentrações de metais superiores às previstas pela legislação ambiental, provenientes do contato do rejeito com água e oxigênio do ar. A AMD, resultado da

oxidação da pirita ( $\text{FeS}_2$ ), produz um efluente ácido com alta concentração de sulfato, ferro e outros minerais sulfetados (alumínio, zinco e manganês) (Soares et al., 2022).

Figura 20 – Detalhes da superfície das áreas impactadas pela mineração de carvão



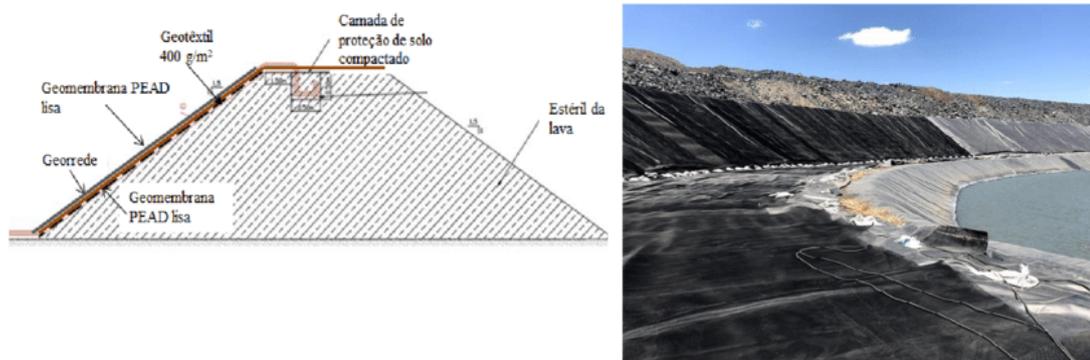
Fonte: Livro Carvão Brasileiro, 2008.

As áreas mineradas foram, em grande parte, utilizadas como depósitos de rejeitos e estéreis da mineração do carvão. A exposição desses materiais às condições atmosféricas e, conseqüentemente, dos seus minerais sulfetados, possibilitou a formação de drenagem ácida, provocando a alteração da qualidade das águas pela diminuição do pH, afetando as águas subterrâneas e superficiais de rios.

Segundo Bouazza (2013), o propósito de incorporar barreiras geossintéticas na mineração consiste numa moderna operação que visa reduzir os riscos ambientais associados com a migração de contaminantes para fora do local e para melhorar a recuperação de água da mina para reutilização ou extração do produto da solução.

A Figura 21 apresenta uma das estruturas de disposição controlada dos rejeitos não magnéticos (BNM 04), gerados a partir da exploração e beneficiamento do vanádio.

Figura 21 – Mineração do Vanádio de Maracás (com dupla camada de geossintético)



Fonte: Botelho, 2019.

A técnica de controle da percolação com geossintéticos adotada na Mineradora Vanádio de Maracás, com camada dupla de geomembrana (geotêxtil com função de proteção da geomembrana + geomembrana de PEAD lisa) e camada de georrede, permitiu a detecção e o tratamento de pequenos vazamentos de forma a melhorar e assegurar o controle e a confiabilidade do sistema de disposição de rejeitos.

Os sistemas executados que permitiram um controle no monitoramento da fuga de líquidos, no acompanhamento sistêmico do barramento e nas observações de “surgências” facilitaram a gestão de risco da estrutura. Foi possível verificar também que as estruturas construídas com materiais geossintéticos, os quais possuem alto grau de controle tecnológico e industrial e excelentes propriedades mecânicas e físicas, possibilitaram um melhor desempenho da obra.

No que diz respeito as instalações de armazenamento de rejeitos (TSFs) o resíduo produzido é uma lama que é geralmente chamada de “polpa”. Geossintéticos ganham empregabilidade como revestimentos dessas instalações. Uma camada de drenagem contínua ou intermitente também pode ser colocada sobre a camada de impermeabilização para acelerar a consolidação de rejeitos. Materiais geossintético como geotubos, geotêxteis e geodrenos são frequentemente incorporados ao projeto do sistema de drenagem (Touze, 2021).

Em aterros de rejeitos de mineração, além do uso com impermeabilização de fundo, a utilização de geomembranas em coberturas também é aplicável, e isso traz como benefício a redução da geração de lixiviados. Essas camadas são denominadas coberturas secas, sendo compostas por materiais aplicados sobre os rejeitos, e atuam para inibir as reações químicas que ocorreriam no interior das jazidas desse material, evitando assim a formação de DAM.

As coberturas secas são uma técnica aplicada em larga escala na América do Norte e Austrália, que consiste em uma alternativa utilizada na prevenção e controle da DAM, quando da reabilitação de depósitos de resíduos de mineração geradores de acidez. Elas são colocadas sobre o depósito de material reativo e têm por objetivo principal o controle da entrada de oxigênio e água, inibindo o processo de oxidação dos sulfetos na sua origem. Além dessas funções, as coberturas secas devem ser resistentes à erosão e fornecer suporte à vegetação (Borma e Soares, 2002).

As coberturas secas (Dry cover), uma vez projetadas de forma adequada, podem ser uma alternativa para ajudar a reduzir o volume e/ou a carga poluente da água que escoia pelos rejeitos, e conseqüentemente, trazer uma redução de custos de tratamento de efluentes. Dentre as diversas funções que as camadas que compõem a estrutura das coberturas secas desempenham, podemos citar: exclusão do oxigênio, consumo do oxigênio ou exclusão da água (Soares et al., 2022).

#### ***2.4.4 Resistência ao puncionamento em materiais geossintéticos***

Embora existam muitas facetas e considerações envolvidas no projeto de uma geomembrana, elas obviamente não devem ser perfuradas. Isso comprometeria sua continuidade e reduziria sua eficiência como material de barreira (Koerner, 2010). Dessa forma, a análise da resistência ao puncionamento faz se necessária, uma vez que, constantemente as geomembranas são submetidas a esse tipo de situação adversa, pelo contato direto com materiais contundentes do sistema de drenagem sobrejacente, pela pressão exercida pela carga gerada em aterros muito altos.

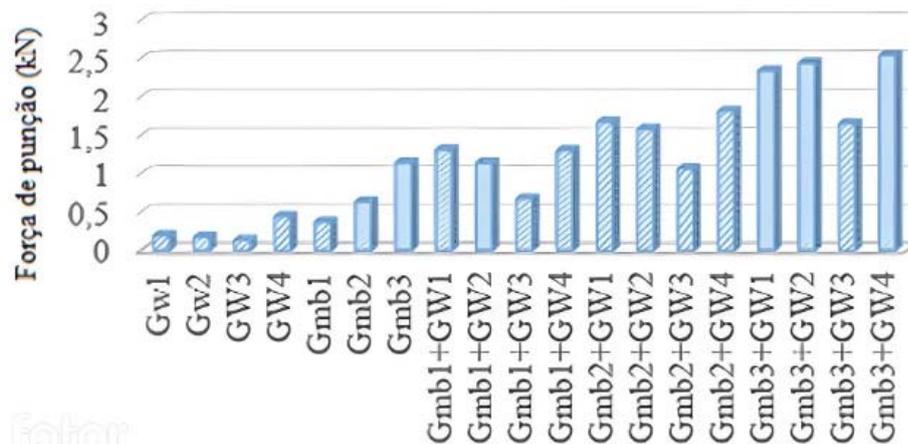
Cholewa (2019) realizou uma análise da resistência à perfuração de geomembranas ( $Gm_i$ ) e geotêxteis ( $Gw_i$ ), em diferentes configurações, que são apresentados na Tabela 7. Para tais testes, foram usados quatro tipos de geotêxteis e três tipos de geomembranas, com diferentes gramaturas e espessuras. Os resultados dos ensaios de resistência ao puncionamento podem ser visualizados na Figura 22.

Tabela 7 – Características dos geossintéticos estudados

Característica	Geotêxteis				Geomembranas		
	Gw1	Gw2	Gw3	Gw4	Gmb1	Gmb2	Gmb3
Massa por unidade de área [g.m <sup>-2</sup> ]	330	300	90	500	300	450	600
Espessura sob pressão externa de 2kPa [mm]	0.5	1.5	1.5	4.0	1.0	1.5	2.0
Técnica de produção	Colagem	Perfurado com agulha			Calandragem		

Fonte: Cholewa, 2019.

Figura 22 – Valor da resistência à perfuração dos geossintéticos analisados



Fonte: Adaptado de Cholewa, 2019.

Para os geotêxteis a maior resistência à punção (0,44 kN) foi obtida para geotêxtil agulhado com maior gramatura e espessura (Gw4). Os resultados indicaram um aumento da resistência de puncionamento com o aumento da gramatura, mas não em relação ao aumento da espessura.

Logo, é possível constatar que a influência na resistência ao puncionamento é função da gramatura do material e não da sua espessura. Com relação aos resultados obtidos para as geomembranas, os valores de resistência à punção foram superiores às dos geotêxteis e aumentaram proporcionalmente com o aumento da espessura e a da gramatura das geomembranas.

Já com relação aos compostos, constituídos por uma geomembrana e um geotêxtil, independente da gramatura da geomembrana, em geral, houve um aumento da resistência ao

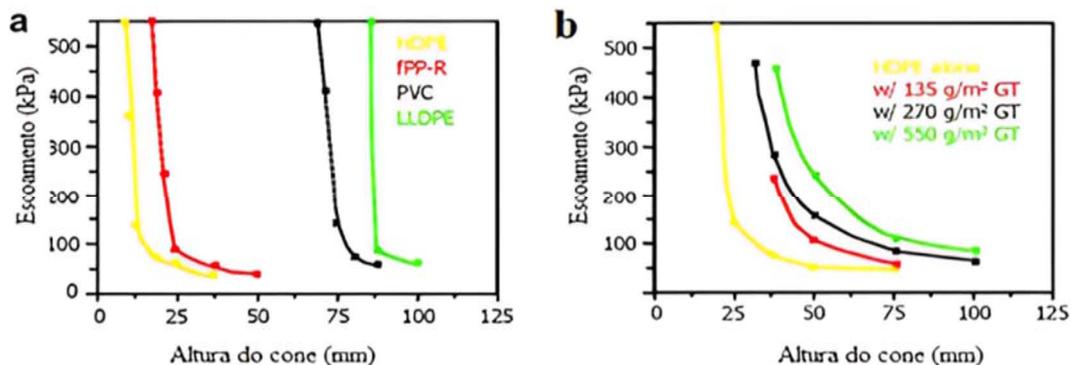
puncionamento do geocomposto, com o aumento da gramatura do geotêxtil utilizado. Os resultados indicaram um aumento da resistência ao puncionamento da geomembrana com a inclusão de um geotêxtil de proteção, alcançando maiores valores para geomembranas com maior gramatura.

Os resultados indicaram que uma maior proteção contra a ruptura mecânica são proporcionadas por combinações, nas quais a geomembrana ocorre em um revestimento do geotêxtil de maior gramatura. Alta resistência à perfuração também foi observada usando geotêxtil fabricado pelo processo de colagem, união dos seus componentes por meio de agentes químicos ou temperatura.

Koerner (2010), em seu estudo de dez anos sobre fluência por puncionamento estático de geomembranas de HDPE protegidas por geotêxteis não tecidos fabricados por agulhamento, cujo foco foi a análise de métodos de projeto de geotêxteis usados como materiais de proteção, destaca a utilização do Método GRI (GRI-Instituto de Pesquisas de Geossintéticos dos EUA).

Esse método objetivava a obtenção de um fator de redução de fluência de longo prazo ("RFCR") da geomembrana contra o objeto saliente. E como resultado da punção, usando o recipiente de teste GRI, foram obtidos diversos comportamentos, função do arranjo estabelecido, como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Resultados de punção, selecionados usando o recipiente de teste GRI com cones truncados: Comportamento de diferentes tipos de geomembranas b) Comportamento da geomembrana HDPE lisa de 1,5 mm sendo protegida por vários geotêxteis de diferentes gramaturas



Fonte: Koerner, 2010.

A Figura 23 (a) mostra a resposta de quatro tipos de geomembranas submetidas a punção, onde observa-se que as geomembranas de LLDPE e PVC apresentam resistências ao

puncionamento maiores, no escoamento, considerando alturas maiores de elementos contundentes (75 e 10mm).

A Figura 23 (b) mostra uma geomembrana de HDPE lisa, de 1,5 mm, sendo protegida por vários geotêxteis de diferentes gramaturas, indicando que uma gramatura mais alta do mesmo tipo geotêxtil de fato oferece maior proteção Koerner (2010), ao promover uma análise a respeito da resistência à perfuração de geotêxteis não tecidos, fabricados por agulhamento, de poliéster (PET) e polipropileno (PP), com mesma gramatura, observou que os resultados dos testes de puncionamento indicaram um melhor desempenho, no que se refere a resistência ao puncionamento, dos geotêxteis com fibras de polipropileno.

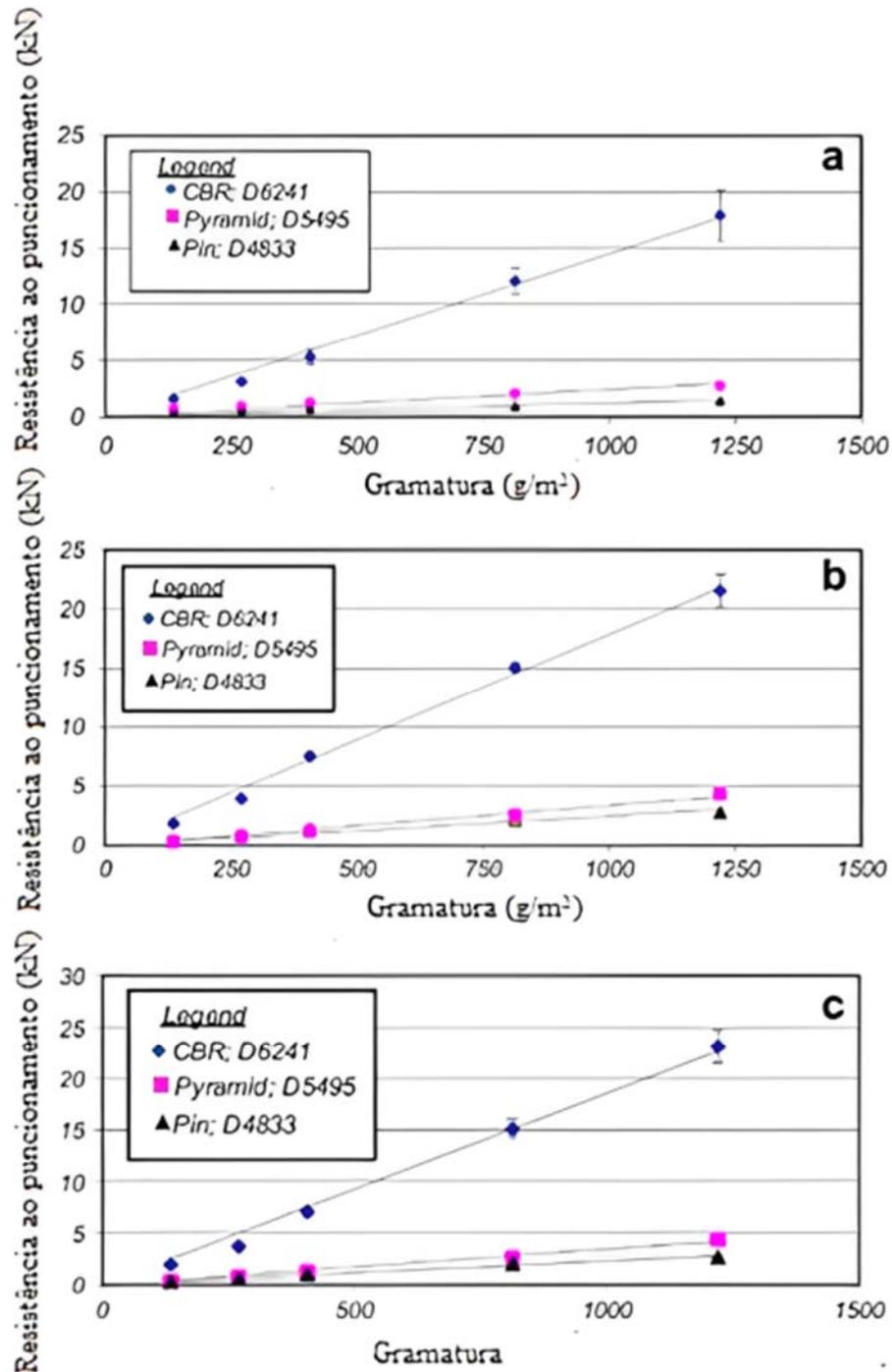
Cabe ressaltar que os testes foram avaliados isoladamente, ou seja, sem uma geomembrana acompanhante, usando três métodos diferentes de teste de punção ASTM:

- ASTM D4833, o teste de punção “pin” (não há teste equivalente ISO),
- ASTM D5494, o teste de punção “pirâmide” (não há teste equivalente ISO),
- ASTM D6241, o teste de punção “CBR” (isto é equivalente a ISO12236).

Foram utilizados geotêxteis não tecidos de PET e PP (fibras contínuas e descontínuas) com cinco gramaturas diferentes cada: 135, 270, 406, 813 e 1220 g/m<sup>2</sup>. Ambas as amostras foram avaliadas nos três métodos mencionados anteriormente. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 24.

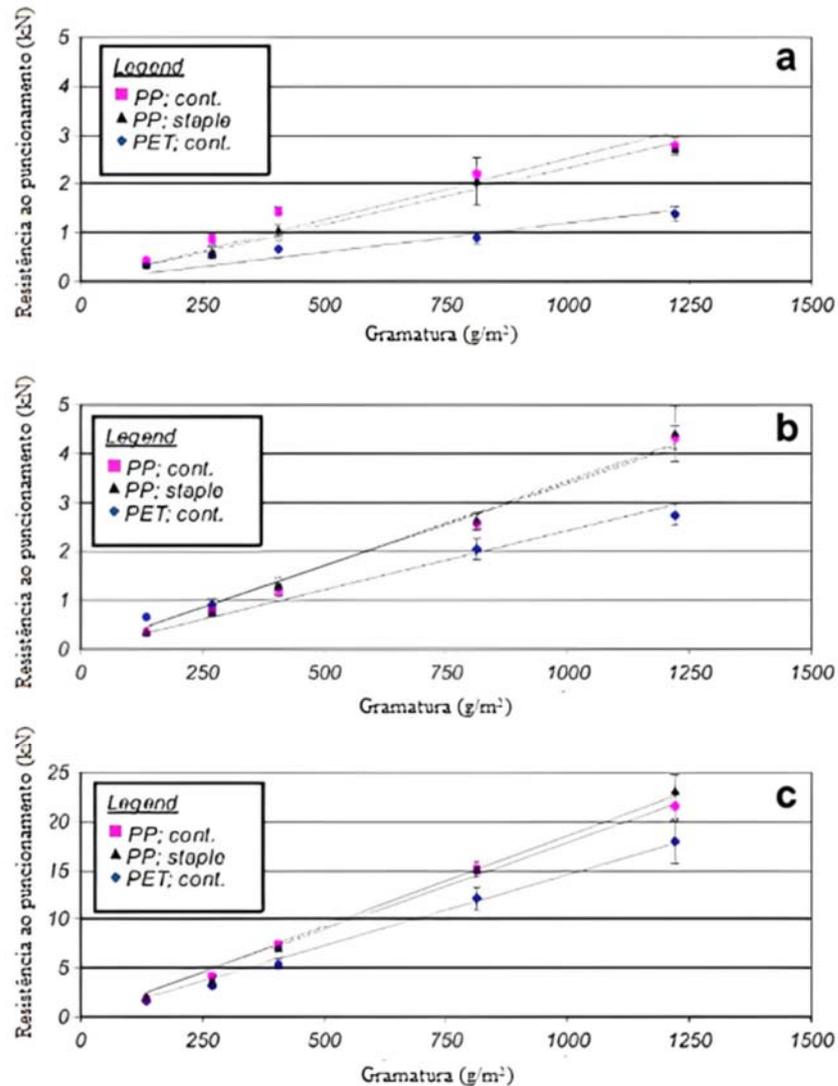
A Figura 25 mostra a comparação direta do comportamento de resistência à perfuração de geotêxteis feitos de resina PET (contínua) versus resina PP (contínua e grampo) de mesmas gramaturas).

Figura 24 – Curvas de resistência à punção de geotêxteis de filamento contínuo de PET. b) Curvas de resistência à perfuração de geotêxteis de filamento contínuo de PP. c) Curvas de resistência à perfuração de geotêxteis de fibras descontínuas de PP



Fonte: Koerner, 2010.

Figura 25 – (a) Curvas de resistência à perfuração de pinos de três geotêxteis avaliados. (b) Curvas de resistência à perfuração da pirâmide de três geotêxteis avaliados. (c) Curvas de resistência à perfuração CBR de três geotêxteis avaliados.



Fonte: Koerner, 2010

Os resultados dos testes mostrados na Figura 25, apontam que ambos os geotêxteis de PP (filamento contínuo e fibra descontínua) apresentaram comportamentos semelhantes em relação à variação da resistência ao puncionamento com as diferentes gramaturas.

Em todos os ensaios realizados, os resultados de resistência ao puncionamento de ambos os geotêxteis anteriormente mencionados foram superiores ao geotêxtil PET (filamento contínuo), considerando a mesma gramatura. Koerner (2010), conclui, que a resistência à perfuração, considerando os resultados dos geotêxteis não tecidos estudados, depende do tipo

de resina utilizada, com fibras de PP apresentando resistências ao puncionamento maiores que as fibras de PET, considerando a mesma gramatura.

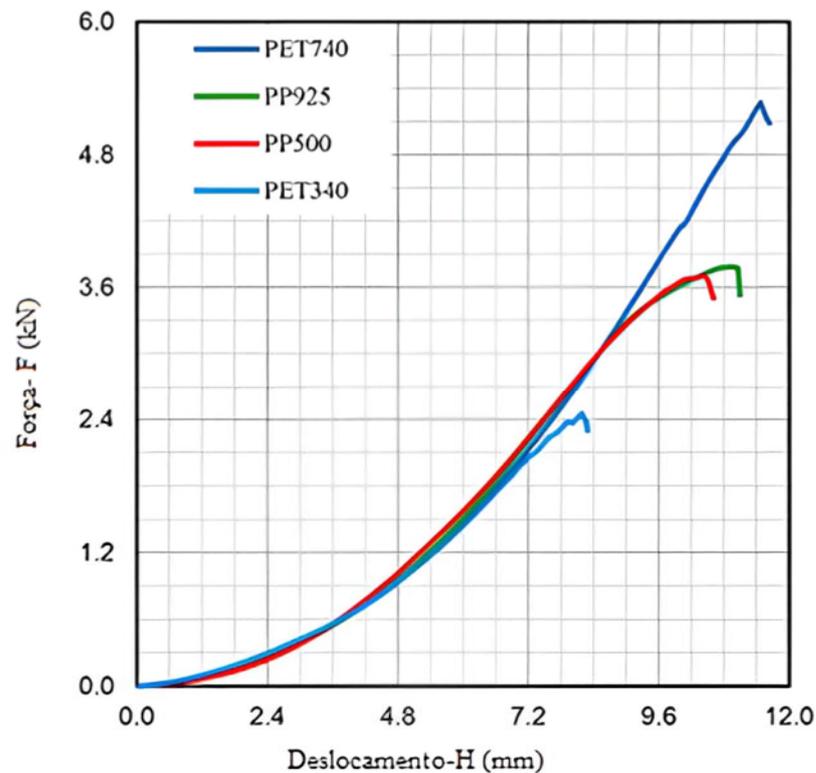
Dias Filho (2022) realizou uma revisão de métodos indiretos para a estimativa da resistência à tração média e das deformações, a partir de resultados de testes de punção, utilizando California Bearing Ratio (CBR), para várias amostras de geotêxteis. A metodologia foi aplicada a quatro geotêxteis tecidos de diferentes gramaturas, dois de polipropileno e dois de poliéster. A Tabela 8 mostra as características das amostras utilizadas no estudo, e a Figura 26, as curvas obtidas dos testes de resistência à punção estática.

Tabela 8 – Caracterização dos geotêxteis tecidos testados

Características	PET340	PP500	PET740	PP925
Gramatura ( $\text{g/m}^2$ )	340	500	740	925
Espessura (mm)	0,51	1,53	1,17	2,62
Resistência à tração (kN/m)	52,5	106,5	150,7	155,0

Fonte: Dias Filho, 2022.

Figura 26 – Resultados de testes de punção estática nas quatro amostras de geotêxteis tecidos



Fonte: Dias Filho, 2022.

Os resultados do teste de punção CBR, expressam que os dois geotêxteis PP (PP925 e PP500) apresentaram comportamentos muito semelhantes. O geotêxtil PET340 apresentou-se como o de menor resistência, dentre as amostras analisadas. E o geotêxtil PET740, mostrou-se como o mais resistente, suportando forças superiores a 5,2 kN até atingir a sua ruptura. Logo, é possível constatar que há influência da gramatura e do tipo de fibra na resistência ao puncionamento estático.

Também é possível observar o comportamento inesperado do geotêxtil com fibra de PP, que contradiz o estudo anterior, uma vez que os valores de resistência ao puncionamento para o geotêxtil com fibra de PET foram superiores que aos com fibra de PP, que tinha a maior gramatura de todos, o que pode ser um reflexo de um erro durante a execução dos ensaios.

#### ***2.4.5 Influência do contato com efluente sobre o puncionamento estático de geossintéticos***

O puncionamento estático é uma das propriedades dos geossintéticos que deve ser controlada, não só com o objetivo de manter a danificação dos materiais durante as operações de instalação dentro de limites aceitáveis, como também de assegurar o conveniente exercício das funções que lhes são exigidas durante a vida da obra em que estão inseridos.

Esta propriedade assume especial destaque quando a função principal que é exigida ao geossintético é a de proteção, pois neste caso, o puncionamento estático é, para além de uma exigência operacional, uma exigência funcional (Lopes, 1992).

Nos sistemas de impermeabilização de resíduos que utilizam geossintéticos, a geomembrana é muitas vezes protegida na parte superior um geotêxtil, que deve exibir características de puncionamento estático que inibam a transmissão de esforços à geomembrana.

Como é sabido, por razões relacionadas com a constituição e fabricação dos geossintéticos os valores desta e das outras propriedades destes materiais podem sofrer alteração por ação de agentes físicos, químicos e biológicos.

Em aterros de resíduos é relevante estudar como o contato dos geossintéticos, presentes em sistemas de impermeabilização, com efluentes gerados pelos resíduos, podem afetar a resistência ao puncionamento estático dos mesmos.

Lopes (2000) realizou um estudo do comportamento ao puncionamento estático de geotêxteis e geomembranas sob a ação de agentes de degradação. Para tal, selecionaram-se,

para de um mesmo fabricante, três geotêxteis não tecidos, agulhados de filamento longo em polipropileno, mas com diferentes gramaturas ( $150\text{g/m}^2$ ,  $235\text{g/m}^2$  e  $400\text{g/m}^2$ ) e três geomembranas lisas em polietileno de alta densidade com espessuras diferentes (1mm, 1,5mm e 2mm).

Os seis materiais foram submetidos por períodos de 5, 15 e 30 semanas à ação de quatro soluções: lixiviado de um aterro de RSU, ácida, alcalina e salina. Para cada agente de degradação e para cada um dos materiais foi definida a resistência ao puncionamento estático no fim de cada período de exposição, tendo-se comparado os valores obtidos com os valores do mesmo parâmetro da amostra do material virgem. O objetivo foi avaliar a influência de uma solução na resistência ao puncionamento estático de diferentes materiais geossintéticos. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Em termos gerais, os agentes de degradação afetaram mais significativamente a resistência ao puncionamento estático do geotêxtil e a geomembrana de menor gramatura ( $150\text{ g/m}^2$ );
- Os geotêxteis sujeitos à ação do lixiviado do aterro de RSU evidenciam menores resistências ao puncionamento estático à medida que o tempo de exposição aumentou, sendo essa redução tanto mais evidente quanto menor a gramatura do material;
- A redução de resistência ao puncionamento estático das geomembranas por ação dos lixiviados do aterro de RSU foi mais significativa para as duas geomembranas de menor gramatura;
- As conclusões enunciadas em (2) e (3) sugerem especial cuidado na seleção da geomembrana e do geotêxtil de proteção a aplicar em sistemas de impermeabilização de aterros de resíduos, uma vez que aqueles materiais estão permanentemente sujeitos a ações estáticas indutoras de puncionamento e durante muito tempo em contato com lixiviados;
- A ação da solução ácida na resistência ao puncionamento estático das geomembranas é semelhante à do lixiviado de um aterro de RSU, parecendo, no entanto, afetar menos significativamente o comportamento do material à proporção que a espessura do mesmo aumenta;
- Devido a limitada amostragem de materiais geossintéticos utilizados no estudo (geotêxteis não tecidos em polipropileno e geomembranas lisas de PEAD), não é

possível generalizar os resultados para outros tipos de geossintéticos e sim recomendar a realização de estudos com outros materiais para corroborar os resultados.

Mitchell (1985) realizou testes de exposição unilateral (em uma face) e imersão usando um lixiviado simulado de rejeitos de moinho de urânio. O lixiviado tinha pH entre 1,5 e 2,5 e continha ácido sulfúrico, ferro, alumínio, magnésio, amônio, cobalto, cromo, sódio e silício com vestígios de arsênico, cobre, potássio, molibdênio, níquel, fósforo, selênio, vanádio e zinco. Foram testadas geomembranas de polivinil cloro, polietileno de alta densidade HDPE e polietileno clorosulfonado. Os testes de exposição unilateral foram conduzidos por 126 dias a 18, 48 e 78°C e os testes de imersão foram conduzidos por 120 dias a 23 e 50°C. Foi possível verificar mudanças nas propriedades físicas e mecânicas dos geossintético, exemplo disse é o que foi observado na geomembrana HDPE, que ocorreram quando expostas ao lixiviado de rejeitos, onde a gramatura e a espessura mudaram menos de 2%, a resistência ao rasgo mudou menos de 6% e a resistência à tração mudou menos de 10%.

A degradação devido à exposição química geralmente começa como mudanças na estrutura do polímero e eventualmente se manifesta como mudanças nas propriedades de engenharia dos geossintéticos (Hsuan & Koerner 1998). Mudanças comuns no polímero incluem fragilização, redução ou ganho de peso molecular, geração de radicais livres, perda de aditivos e plastificantes e comprometimento da transparência Kulshreshtha (1992).

Na DAM (Drenagem ácida de minas), esses processos podem ser o resultado de condições ácidas e concentrações elevadas de metais. As condições ácidas demonstraram causar pequenas perdas de resistência em alguns polímeros usados para geossintéticos (Risseuw & Schmidt, 1990; Jailloux et al., 1992; Salman et al., 1997; Billing et al., 1990 e Van Langenhove, 1990) mostraram que concentrações elevadas de metais em soluções ácidas podem acelerar a degradação de alguns polímeros geossintéticos.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Introdução**

Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para realização dos ensaios de resistência ao puncionamento estático de geomembranas, geotêxteis de proteção (com diferentes gramaturas) e sistemas compostos (geotêxteis+geomembranas), quando em contato com efluente agressivo.

Os ensaios de puncionamento basearam-se na norma da ABNT NBR ISO 12236 (2013), para definir a resistência ao puncionamento estático dos materiais geossintéticos. Os ensaios foram realizados nos laboratórios de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará e de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Cariri com as amostras virgens e repetidos em amostras imersas no efluente agressivo (ácido). O resultado adotado para cada ensaio equivale a média do valor obtido entre cinco corpos de prova.

Nos ensaios de desempenho em que as amostras foram submetidas a um processo de imersão em efluente ácido, os corpos de prova foram empilhados em recipientes preenchido com o efluente por um período equivalente a 1000 horas, em condições de pressão e temperatura ambiente, seguindo as recomendações da ASTM D 5322 (2009). Os materiais foram submetidos à exposição por um efluente produzido em laboratório que simula o efluente gerado em rejeitos piritosos, típicos de aterros de resíduos ou barragens de rejeito de mineração no Brasil, que quando expostos ao oxigênio e a água, dão origem à drenagem ácida de minas.

#### **3.2 Materiais**

Neste estudo foi utilizada uma geomembrana de PEAD e geotêxteis com três gramaturas diferentes, produzidas pela Maccaferri, e um efluente ácido produzido em laboratório. A seguir serão detalhados os diferentes materiais utilizados.

##### **3.2.1 Geossintéticos**

Os materiais geossintéticos utilizados no desenvolvimento dessa pesquisa foram:

- a) Geomembrana MacLine SDH, espessura 2,0 mm;
- b) Geotêxtil 1 - MacTex N.2, gramatura de 180g/m<sup>2</sup>;

- c) Geotêxtil 2 - MacTex H.2, gramatura de 200g/m<sup>2</sup>; e  
 d) Geotêxtil 3 - MacTex H.2, gramatura de 300g/m<sup>2</sup>.

As características técnicas das amostras usadas podem ser observadas na Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 9 – Características técnicas da Geomembrana MacLine SDH.

<b>Geomembrana MacLine SDH</b>		
Geomembranas flexíveis de excelente qualidade		
Elevada resistência contra agentes químicos, biológicos e à degradação por raios UV		
Produzida com Polietileno virgem de alta densidade e alto peso molecular		
<b>Propriedades físicas</b>		
Espessura (média mínima) [mm] <sup>(1)</sup>	ASTM D5199	200
Densidade (mín.) [g/cm <sup>3</sup> ]	ASTM D1505	0,94
Teor de negro de fumo [%]	ASTM D4218	02/03
Dispersão de negro de fumo <sup>(2)</sup>	ASTM D5596	01/02
<b>Propriedades mecânicas</b>		
Resistência à tração no escoamento [kN/m] <sup>(3)</sup>	ASTM D6693	29
Alongamento no escoamento [%] <sup>(3)</sup>	ASTM D6693	12
Resistência à tração na ruptura [kN/m] <sup>(3)</sup>	ASTM D6693	53
Alongamento na ruptura [%] <sup>(3)</sup>	Tipo IV	700
Resistência ao rasgo [N] <sup>(3)</sup>	ASTM D1004	249
Resistência ao puncionamento [N] <sup>(3)</sup>	ASTM D4833	640
Resistência ao tenso-fissuramento [horas]	ASTM D5397 (App.)	≥500
Tempo de oxidação indutiva (OIT) [min.] <sup>(3)</sup>	ASTM D3895	≥100

Fonte: Maccaferri, 2021.

Tabela 10- Características técnicas do Geotêxtil MacTex H2.

<b>Geotêxtil MacTex H.2</b>
Geotêxtil não tecido produzido com fibras cortadas de poliéster, agulhadas e consolidado termicamente por calandragem. Coloração preta.

<b>Propriedades físicas</b>		H 40.2	H 60.2
Gramatura [g/cm <sup>2</sup> ]	ASTM D5261 ABNT NBR ISO	200	300
Espessura [mm]	ASTM D5199 ABNT NBR ISO 9863-1	1,3	1,9
Ponto de amolecimento [°C]	—	230 a 249	
Resistência UV [%/h]	ASTM D4355	70/50	70/500
<b>Propriedades mecânicas</b>		H 40.2	H 60.2
Resistência à tração Faixa Larga Sentido longitudinal [kN/m]	ASTM D4595 / ABNT NBR SSO 10319	10	16
Alongamento Faixa Larga [%]	ASTM D4595 / ABNT NBR ISO 10.319	50	50
Resistência à tração GRAB (sentido longitudinal) [N]	ASTM D4632	710	1050
Alongamento GRAB [%]	ASTM D4632	50	50
Resistência ao Estouro (Mullen Burst) [kPa]	ASTM D3786	1500	2500
Resistência ao puncionamento CBR [kN]	ASTM D6241 ABNT NBR ISO 12.236	1,5	2,5
Resistência ao rasgo trapezoidal (sentido longitudinal) [N]	ASTM D4533	350	500
<b>Propriedades hidráulicas</b>		H 40.2	H 60.2
Permeabilidade normal [cm/s]	ASTM D4491 ABNT NBR ISO 11.058	0,2	0,16
Permissividade [s <sup>-1</sup> ]	ASTM D4491 ABNT NBR ISO 11.058	1,5	1
Velocidade do fluxo [m/s]	ASTM D4491 ABNT NBR ISO 11058	0,09	0,06
Abertura aparente (AOS) [mm]	ASTM D4751	0,075	0,075

Fonte: Maccaferri, 2020.

Tabela 11- Características técnicas do Geotêxtil MacTex N.2.

<b>Geotêxtil MacTex N.2</b>		
Geotêxtil agulhado de Coloração cinza, produzido com fios de poliéster		
<b>Propriedades físicas</b>		H 36.2
Gramatura [g/cm <sup>2</sup> ]	ABNT NBR ISO 9864	180

Espessura [mm]	ABNT NBR ISO 9863	2,4
Resistência U. V (500h) [%]	ASTM D7238	>70
<b>Propriedades mecânicas</b>		H 36.2
Resistência à tração Faixa Larga. Sentido longitudinal [kN/m]	ABNT NBR ISO 10319	8
Resistência à tração Faixa Larga. Sentido transversal [kN/m]	ABNT NBR ISO 10319	9
Alongamento Faixa Larga (Longitudinal) [%]	ABNT NBR ISO 10319	>50
Alongamento Faixa Larga (Transversal) [%]	ABNT NBR ISO 10319	>50
Puncionamento [N]	ABNT NBR ISO 13433	320
Resistência ao puncionamento CBR [kN]	ABNT NBR ISO12236	1,7
Resistência ao rasgo trapezoidal (sentido longitudinal) [N]	ASTM D4533	315
Resistência ao rasgo trapezoidal (sentido transversal) [N]	ASTM D4533	390
<b>Propriedades hidráulicas</b>		H 36.2
Abertura de filtração (095) [ $\mu\text{m}$ ]	ABNT NBR ISO 12956	100
Permeabilidade [cm/s]	ABNT NBR ISO 11058	0,51
Permissividade [ $\text{s}^{-1}$ ]	ABNT NBR ISO 11058	2,15

Fonte: Maccaferri, 2020.

### 3.2.2 Efluente

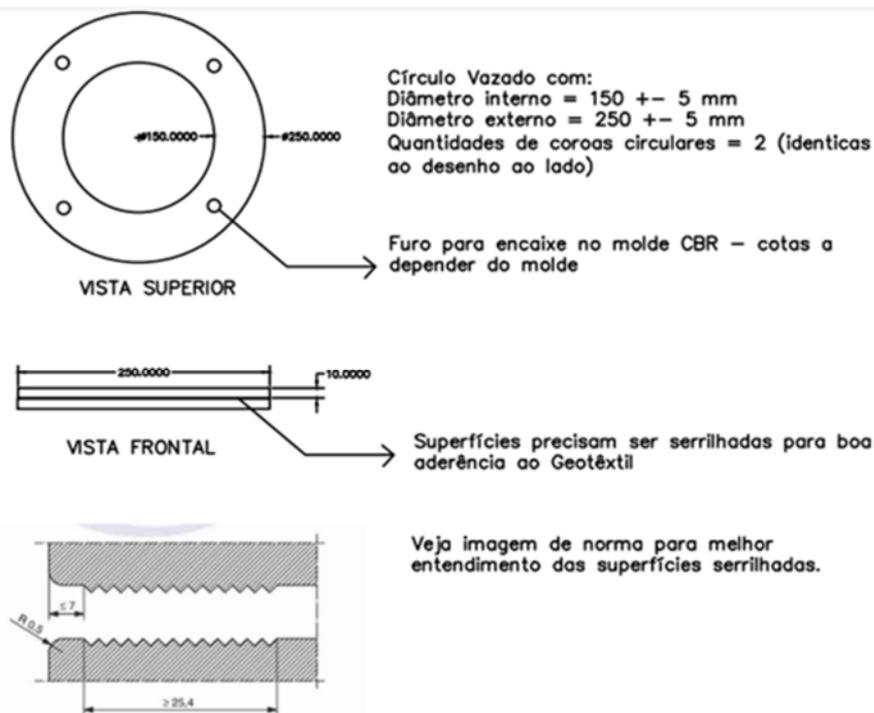
Para simulação do efluente agressivo ao qual o geossintético em situação cotidiana à exposição de resíduos de mineração que gerem efluentes ácidos, em aterros e barragens executadas por mineradoras, adotou-se como base um produto oriundo do Sulfato de ferro ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , massa molar de 278.0146 g/mol), com alta concentração de ferro (entre 20 e 40 g/L) e sulfato (entre 60 e 100g/L). Esse efluente tem ocorrência típica em drenagem de rejeitos de mineração de carvão mineral e rejeitos oriundos do beneficiamento de minérios, tais como o ouro, Soares (2022). O material apresentou baixo Ph 2,0 (indicando elevados níveis de acidez). O ácido foi produzido no Laboratório de Química da UFCA.

### 3.3 Metodologia

#### 3.3.1 Ensaio CBR

Para a execução dos ensaios de puncionamento na prensa CBR foi necessário adaptar uma peça ao equipamento de CBR, para prender as amostras de geossintéticos durante a execução dos ensaios. As dimensões da peça são mostradas na Figura 27 e seguem as especificações da ABNT NBR ISO 12236 (2013).

Figura 27 – Detalhamento dos anéis metálicos utilizados para ensaios



Fonte: Autora.

Os anéis foram produzidos em aço inox, por meio da união de chapas metálicas (respeitando as especificações da norma), e tinham como principal função prender o material geossintético a ser analisado. Para permitir uma melhor fixação do geossintético à peça de aço inox foram utilizados quatro parafusos, como pode ser visto na Figura 27.

A Figura 28 mostra a execução de um ensaio de puncionamento realizado, em que é possível visualizar na parte superior a peça de fixação para o geossintético, em que se aplicou uma velocidade de deformação de  $50\text{mm}/\text{min}$ , como recomendado pela norma ABNT NBR

ISO 12236 (2013). A ABNT NBR ISO 9862 (2013) serviu de base para definição da amostragem e preparação dos corpos de prova para a realização dos ensaios.

Figura 28 – Equipamento MS 120 (Prensa CBR – Marshall) com anéis metálicos



Fonte: Autora.

O equipamento utilizado foi do tipo MS 120 - Prensa CBR – Marshall, que apresenta como características as seguintes especificações técnicas:

- Dimensões do equipamento: 495 mm x 605 mm x 1090 mm (LxCxA);
- Normas relacionadas: DNIT 172/2016 - ME, NBR 9895:2016, DNER-ME 043/95, DNER-ME 107/94, DNIT 136/2018 – ME, DNIT 178/2018-PRO;
- Saída USB para gravação de dados em pendrive;
- Sensor de deslocamento (1 unidade): eletrônico linear com curso de 25 mm;
- Sensor de força (1 unidade): célula de carga com capacidade de 5000 kgf;
- Capacidade máxima de carga: 5000 kgf;
- Velocidade de operação: configurável via display da IHM - 0,01 mm/min a 60 mm/min;
- Curso do pistão: 140 mm;
- Alimentação elétrica: 220 V – 50/60 Hz;
- Ligação à rede elétrica por meio de cabo multipolar PP e tomada industrial;

- Dispositivos de segurança (IDR, relé de segurança, chave de emergência, botão de reset relé de segurança).

### ***3.3.2 Ensaios realizados***

Os ensaios de puncionamento foram realizados nas seguintes amostras de geossintéticos:

- a) GMB – Geomembrana;
- b) GT1–Geotêxtil 1, gramatura de 180/m<sup>2</sup>;
- c) GT2– Geotêxtil 2, gramatura de 200g/m<sup>2</sup>;
- d) GT3–Geotêxtil 3, gramatura de 300 g/m<sup>2</sup>;
- e) Geocomposto (GT1 + GMB);
- f) Geocomposto (GT2 + GMB);
- g) Geocomposto (GT3 +GMB).

Os ensaios foram realizados com as amostras virgens e repetidos em amostras imersas em um efluente agressivo, totalizando 14 ensaios (com 5 repetições cada), somando 70 amostras ensaiadas.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos durante esta pesquisa, que compreende o estudo da variação da resistência ao puncionamento estático de geossintéticos, antes e depois da contaminação com efluente agressivo, como também serão feitas discussões a respeito desses resultados.

Cabe ressaltar que, foi adotado como critério de ruptura e, conseqüentemente, parada da Prensa CBR, o rasgo do material analisado. A Figura 29 mostra a ruptura sofrida pela amostra de geossintético durante a execução de um ensaio de puncionamento, que é entendido como o ponto máximo de resistência.

Figura 29 – Material geossintético após a execução de um ensaio de puncionamento



Fonte: Autora.

Observa-se, o comportamento frágil do material em questão, uma vez que a sua ruptura ocorre abruptamente, quando submetido a tensão máxima, sem passar por muita deformação plástica.

Salienta-se que não foi considerado o pré-carregamento de 0,20kN, estabelecido pela ABNT NBR ISO 12236 (2013), durante a realização dos ensaios de puncionamento estático, em detrimento de limitações do equipamento utilizado.

#### 4.1 Contaminação com efluente ácido

A simulação do contato entre o efluente agressivo e os materiais geossintéticos utilizou-se ácido gerado no laboratório de Química da Universidade Federal do Cariri.

Os materiais geossintéticos foram expostos ao efluente químico por meio do processo de inundação, em reservatórios plásticos, como pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Geossintéticos expostos ao efluente químico por meio do processo de inundação



Fonte: Autora.

Como pode ser visto na Figura 29, a imersão consiste em comportar os corpos de prova em recipientes cheios de ácido, por um período equivalente a 1000 horas, em temperatura 20°C (vinte graus centígrados) e umidade relativa do ar 60%, conforme recomendações da ASTM D 5322 (2009). Posteriormente, as amostras são retiradas e secas, a temperatura ambiente, por um período de 3 dias. Por fim, foram realizados os ensaios de resistência ao puncionamento, em regime estático, nas amostras simples e em associação (geocompostos).

## 4.2 Curvas de Força de Puncionamento x Deslocamento

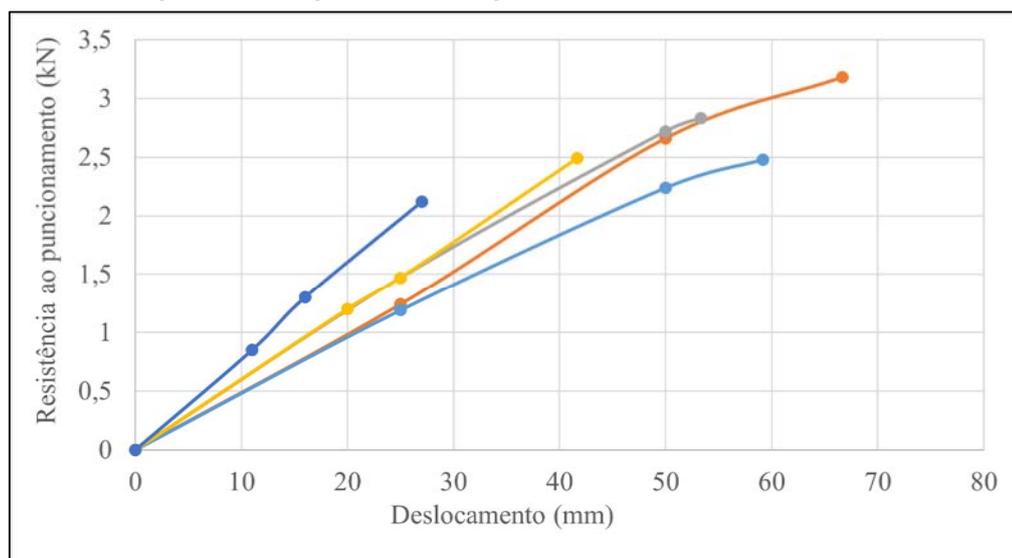
As Figuras 31 a 44 apresentam as curvas e a análise dos resultados obtidos nos ensaios de puncionamento estático das amostras de geotêxteis, geomembranas e geocompostos especificados anteriormente.

### 4.2.1 Geotêxteis

#### I. Amostras virgens

Obteve-se, para as amostras virgens de geotêxteis, que foram ensaiadas individualmente, os seguintes resultados mostrados nas Figuras 31 a 33.

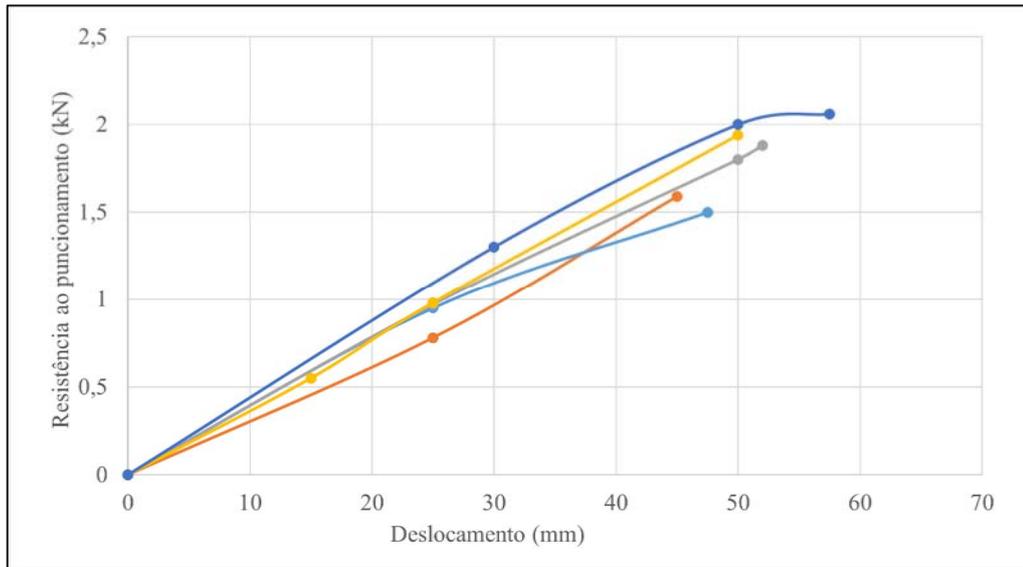
Figura 31 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras do geotêxtil 1 (gramatura 180g/m<sup>2</sup>)



Fonte: Autora.

Verifica-se um comportamento semelhante para a maioria das amostras do geotêxtil 1 analisadas, onde ambas convergem para um valor médio de resistência ao puncionamento estático equivalente a 2,62 kN e apresenta coeficiente de variação equivalente a 15%.

Figura 32 – Resultado do ensaio de punção estático nas amostras do geotêxtil 2 (gramatura 200g/m<sup>2</sup>)

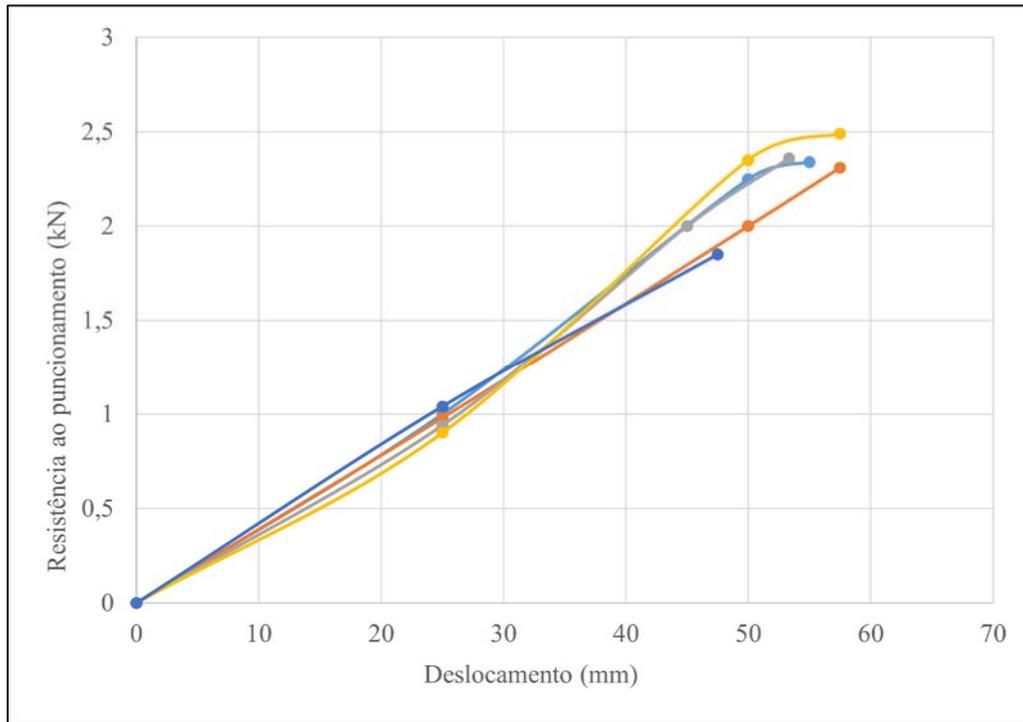


Fonte: Autora.

Os geotêxteis MacTex H2, gramatura de 200 g/m<sup>2</sup> (Geotêxtil 2), revelaram-se os menos resistentes à perfuração, atingindo valor médio de 1,78 kN e apresenta coeficiente de variação equivalente a 15%.

Verifica-se, que os dois geotêxteis mostrados anteriormente, possuem gramaturas próximas, mas o de maior gramatura apresentou uma menor resistência. Provavelmente, tal comportamento decorre do processo de produção empregado, uma vez que o GT2 (gramatura 200 g/m<sup>2</sup>) é fabricado com fibras cortadas de poliéster, agulhadas e consolidado termicamente por calandragem, e já o GT1 (gramatura 180 g/m<sup>2</sup>) é fabricado com fios de poliéster, agulhado. Também é possível observar que, a diferença de coloração existentes entre os geotêxteis, indica um tipo distinto de aditivo, ou seja, a composição possui diferenças.

Figura 33 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geotêxtil 3 (gramatura 300g/m<sup>2</sup>)



Fonte: Autora.

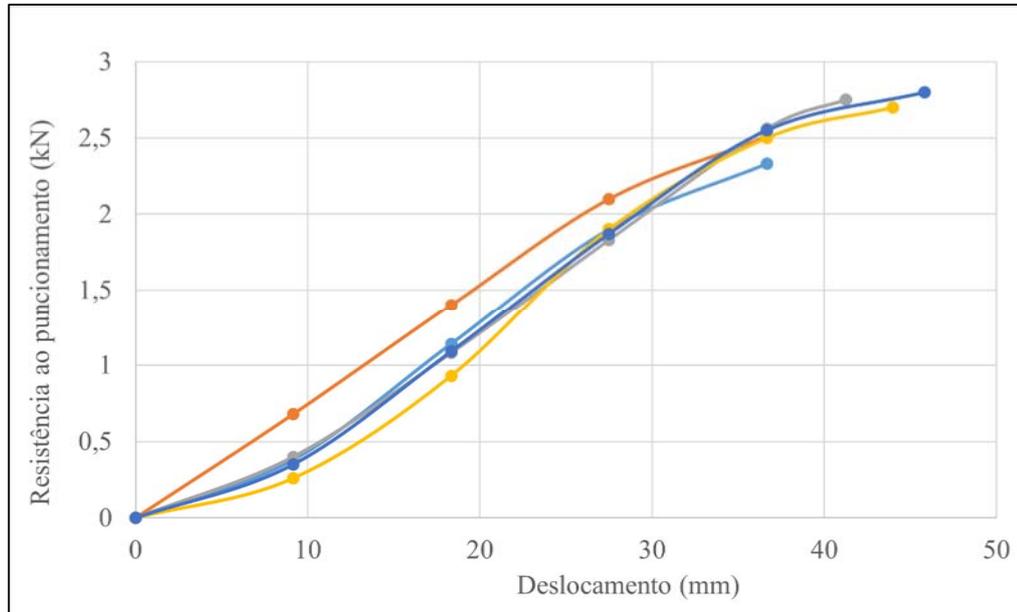
Verifica-se que o valor médio da resistência ao puncionamento estático para as amostras do geotêxtil 3 equivale a 2,27 kN e apresenta coeficiente de variação equivalente a 11%. Observa-se, que o GT3 (gramatura 300 g/m<sup>2</sup>) apresentou um aumento da resistência ao puncionamento estático em relação ao GT2 (gramatura 200 g/m<sup>2</sup>), e isso indica a influência da gramatura nas propriedades mecânicas do material, pois ambos possuem a mesma composição e passaram pelo mesmo processo de produção, mas o GT1 (gramatura 180 g/m<sup>2</sup>) ainda apresentou resistências maiores, evidenciando a influência do processo de produção empregado.

Os resultados dos ensaios CBR, para amostras virgens, apresentaram coeficientes de variação superior ao valor equivalente a 10%, que as normas consideram como aceitável, Europeia EN ISO 12236 (2006) e a Americana ASTM D6241 (2022), prescrevem para caracterizar boa homogeneidade das amostras.

## II. Amostras após contaminação

Os resultados obtidos para geotêxteis, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo, podem ser observadas nas Figuras 34 a 36.

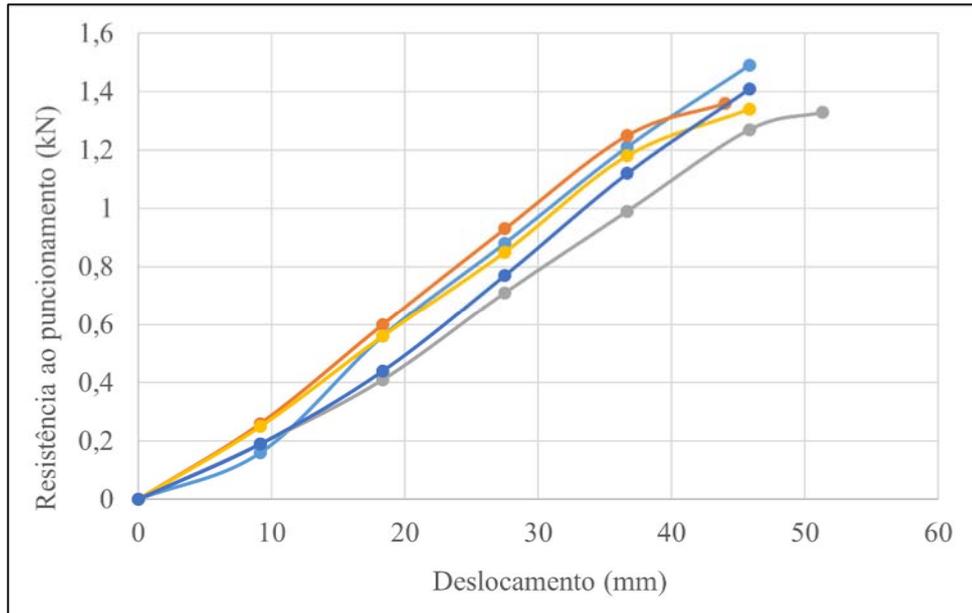
Figura 34 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras do geotêxtil 1 após o processo de contaminação pelo efluente agressivo



Fonte: Autora.

O geotêxtil 1, gramatura de 180/m<sup>2</sup>, apresentou valor médio de resistência ao puncionamento estático equivalente a 2,61 kN e coeficiente de variação equivalente a 8%, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo. Mostrando que não houve alteração dessa propriedade.

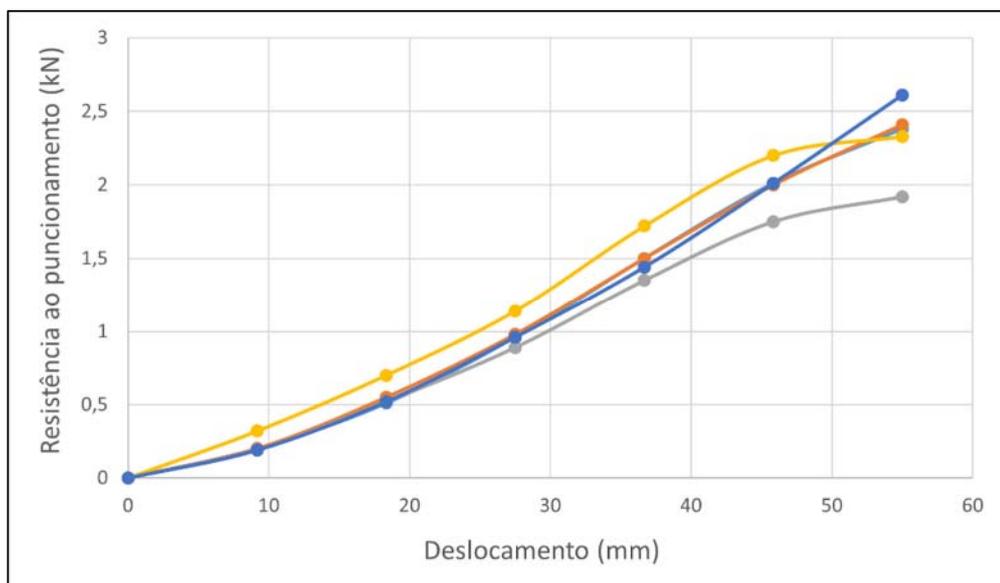
Figura 35 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras do geotêxtil 2 após o processo de contaminação pelo efluente agressivo



Fonte: Autora.

O geotêxtil 2 apresentou valor médio de resistência ao puncionamento estático equivalente a 1,35kN e coeficiente de variação equivalente a 5%, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo. Demonstrando uma queda de resistência de 0,45 kN (25%), uma vez comparado aos valores obtidos em amostras virgens.

Figura 36 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras do geotêxtil 3 após o processo de contaminação pelo efluente agressivo



Fonte: Autora.

Obteve-se para o geotêxtil 3 o valor médio de resistência ao puncionamento estático de 2,33 kN e coeficiente de variação equivalente a 10,8%, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo. Mostrando que não houve alteração dessa propriedade, diferentemente do Geotêxtil 2, que é produzido pelo mesmo processo e possui o mesmo polímero base, no entanto apresenta gramatura diferente.

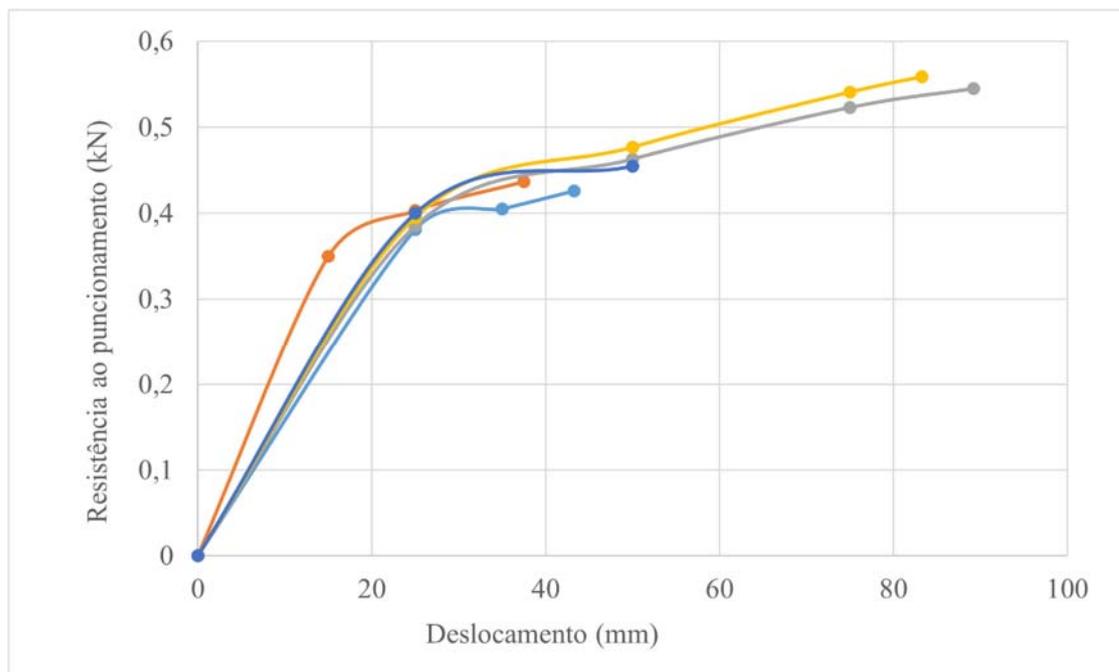
Como se observa, os resultados apresentaram coeficientes de variação inferiores ou bem próximos ao limite de 10%, que as normas consideram como aceitável, Europeia EN ISO 12236 (2006) e, a Americana ASTM D6241 (2022), prescrevem, indicando mais experiência no preparo dos ensaios.

#### 4.2.2 Geomembranas

##### I. Amostras virgens

Obteve-se, para as amostras virgens de geomembranas, que foram perfurados individualmente, os seguintes resultados, mostrado na Figura 37

Figura 37 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras da geomembrana



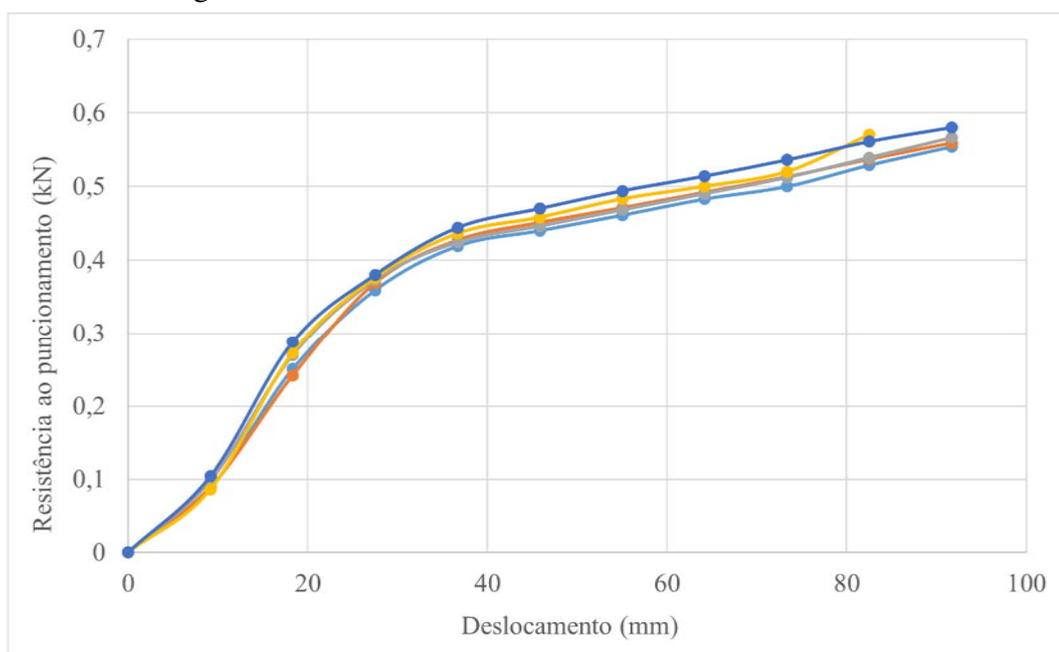
Fonte: Autora.

A geomembrana MacLine SDH, espessura 2,0 mm, apresentou valor médio de resistência ao puncionamento estático de 0,485kN e apresenta coeficiente de variação equivalente a 13%.

## II. Amostras após contaminação

Os resultados obtidos para as amostras de geomembranas, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo, podem ser vistos abaixo.]

Figura 38 – Resultado do ensaio de puncionamento estático das amostras da geomembrana após o processo de contaminação pelo efluente agressivo



Fonte: Autora.

A geomembrana MacLine SDH, espessura 2,0 mm, apresentou valor médio de resistência ao puncionamento estático de 0,556kN e coeficiente de variação equivalente a 3%, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo. Apresentando um aumento da resistência de 17% em relação as amostras virgens.

Ercolini & Lavoie (2019), ao analisarem as propriedades físicas e mecânicas de uma amostra de geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), exumada de uma lagoa de chorume após 5 anos e 2 meses, concluíram que o material avaliado apresentou um bom

comportamento diante da exposição, sem indícios de mudança de comportamento do polímero, com base em ensaios físicos e mecânicos que superam os valores mínimos requisitados pela norma GRI-GM13.

Segundo Maia (2001), em seu estudo sobre a influência de alguns agentes de degradação nas propriedades físicas e mecânicas de geomembranas, foi constatado um comportamento padrão para as amostras de geomembranas HDPE, exumadas de uma lagoa de chorume, de gramatura 1,5 mm e 1 mm, que consistia em um aumento da resistência ao puncionamento nos primeiros meses de contato com o agente degradante, podendo haver conservação de tal comportamento ao longo de todo o período de teste ou seguir uma queda gradativa da resistência.

De acordo com Bueno (2007), em sua análise da degradação de alguns geossintéticos em contato com fluidos agressivos, tais como, a gasolina comum, constatou que amostras de geomembranas, expostas a curto intervalo de contaminação, apresentaram aumento da resistência de suas propriedades mecânicas e, posteriormente, ocorre uma queda gradativa da mesma, à medida que o tempo de exposição era aumentado.

Lopes (2000) realizou um estudo do comportamento ao puncionamento estático de geotêxteis e geomembranas sob a ação de agentes de degradação. Para tal, foram selecionados para estudo três geotêxteis não tecidos, agulhados de filamento longo em polipropileno, com diferentes gramaturas (150g/m<sup>2</sup>, 235g/m<sup>2</sup> e 400g/m<sup>2</sup>) e três geomembranas lisas em polietileno de alta densidade com espessuras diferentes (1mm, 1,5mm e 2mm).

Os materiais foram submetidos por períodos de 5, 15 e 30 semanas à ação de quatro soluções: lixiviado de um aterro de RSU, solução ácida, solução alcalina e solução salina. Para cada agente de degradação e para cada um dos materiais foi definida a resistência ao puncionamento estático no final de cada período de exposição, tendo-se comparado os valores obtidos com os valores do mesmo parâmetro da amostra do material virgem. O objetivo foi avaliar a influência de uma solução na resistência ao puncionamento estático de diferentes materiais geossintéticos.

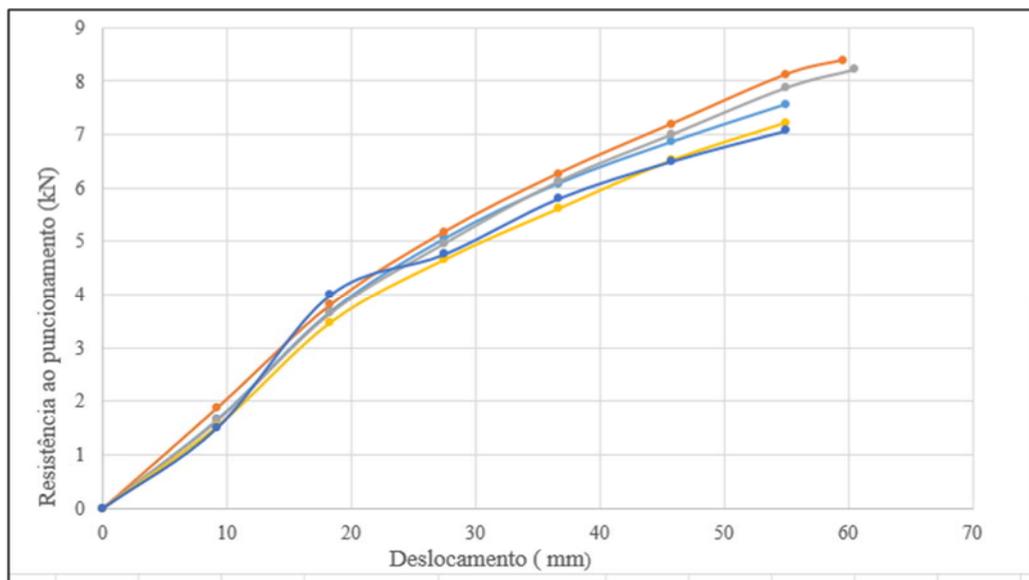
Os resultados indicaram que os agentes de degradação afetam mais significativamente os geossintéticos de menor gramatura. Os geotêxteis e as geomembranas apresentaram decréscimo na resistência ao puncionamento estático, com o aumento do tempo de exposição, quanto em contato com o lixiviado do RSU. Tal comportamento também foi observado no contato com o efluente ácido, porém a diminuição na resistência da geomembrana foi menor com a diminuição da gramatura, quando comparada com a exposição ao lixiviado do RSU.

### 4.2.3 Geocompostos

#### I. Amostras virgens

Os resultados do ensaio de puncionamento estático nas amostras de geocompostos podem ser observados nas Figuras 39 a 41.

Figura 39 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT1)

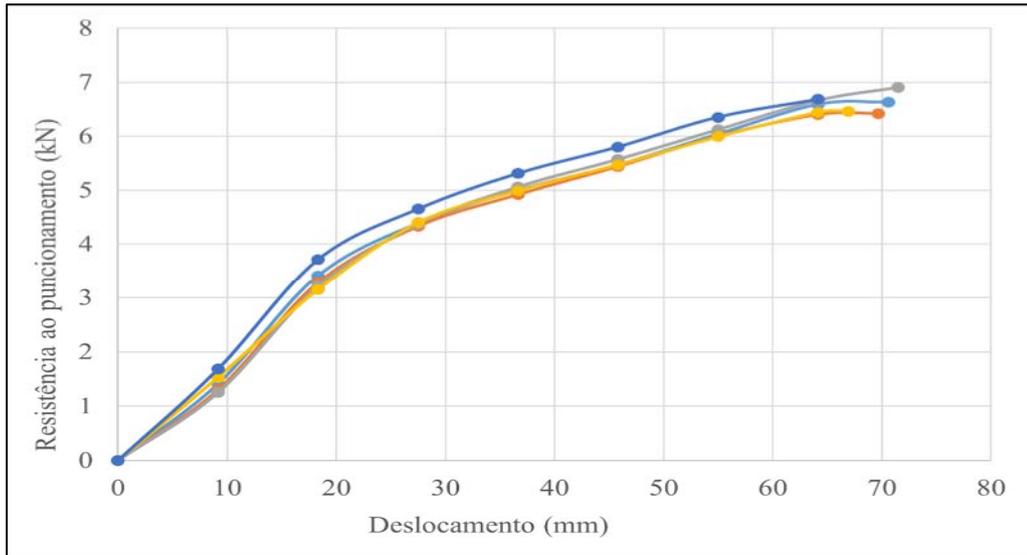


Fonte: Autora.

O composto com geotêxtil tipo 1 (GMB + GT1) atingiu a maior resistência a puntura, com valor médio de 7,69 kN e apresenta coeficiente de variação equivalente a 8%.

Percebe-se que, assim como nos resultados anteriores, cujas amostras compostas somente com geotêxtil, indicaram que o GT1, com menor gramatura, apresentou uma resistência maior, o geocomposto 1, constituído com o GT1, também apresentou resistência superior aos demais. E esse comportamento, indica a influência do processo de produção nas características do material.

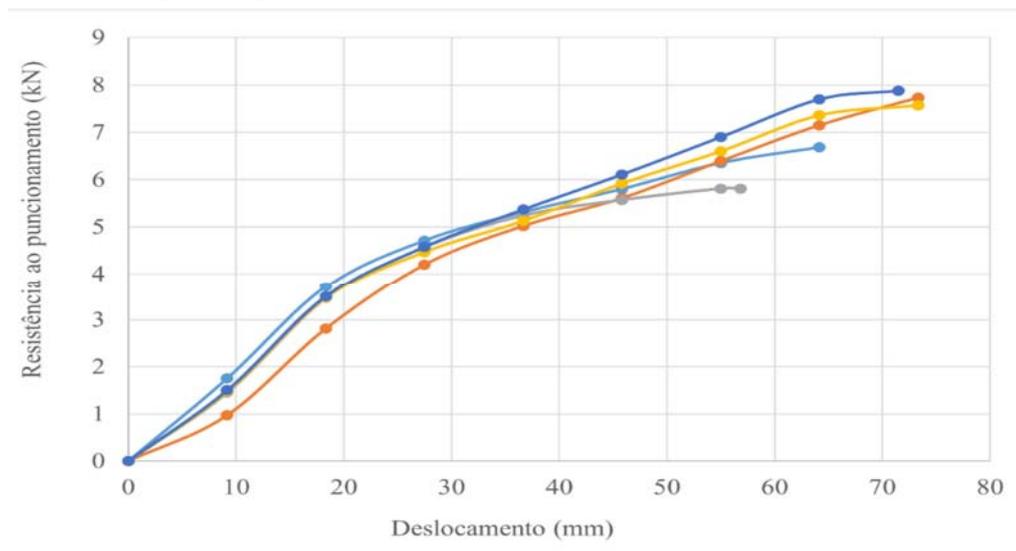
Figura 40 – Resultado do ensaio de punção estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT2)



Fonte: Autora.

O geocomposto (GMB+ GT2), composto com o geotêxtil tipo 2 de menor gramatura, apresentou uma resistência ao punção equivalente a 6,62 kN e apresenta coeficiente de variação equivalente a 3%.

Figura 41 – Resultado do ensaio de punção estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT3)



Fonte: Autora.

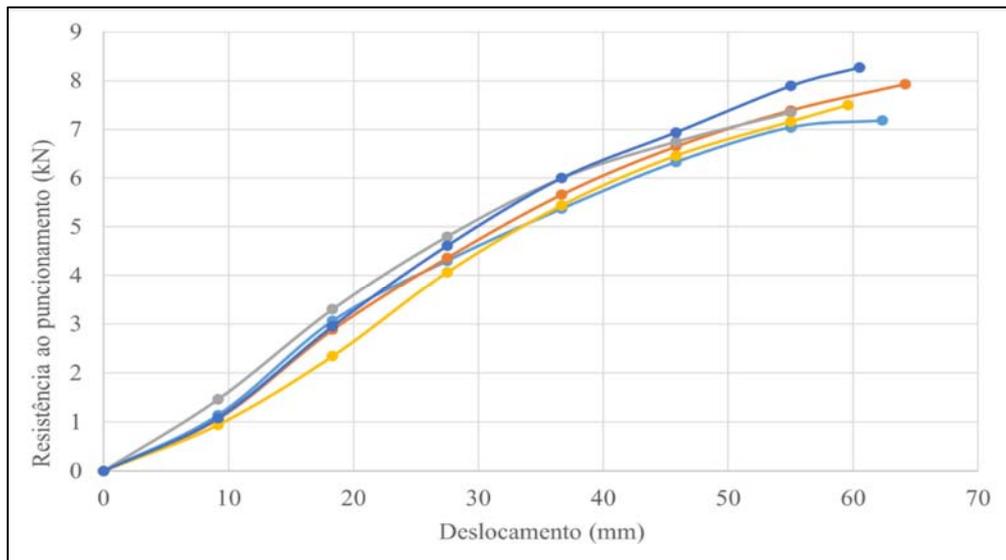
O composto com o geotêxtil tipo 2 de maior gramatura (GMB + GT3) obteve resistência média de 7,14 kN e apresenta coeficiente de variação equivalente a 22%.

Os resultados dos ensaios CBR, para amostras virgens de geocompostos, mostram que os coeficientes de variação atingiram valores inferiores aos 10%, com exceção do arranjo composto pelo geotêxtil 3 (GMB+GT3).

## II. Amostras após contaminação

Os resultados obtidos para as amostras de geocompostos, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo, podem ser vistos nas Figuras 42 a 44.

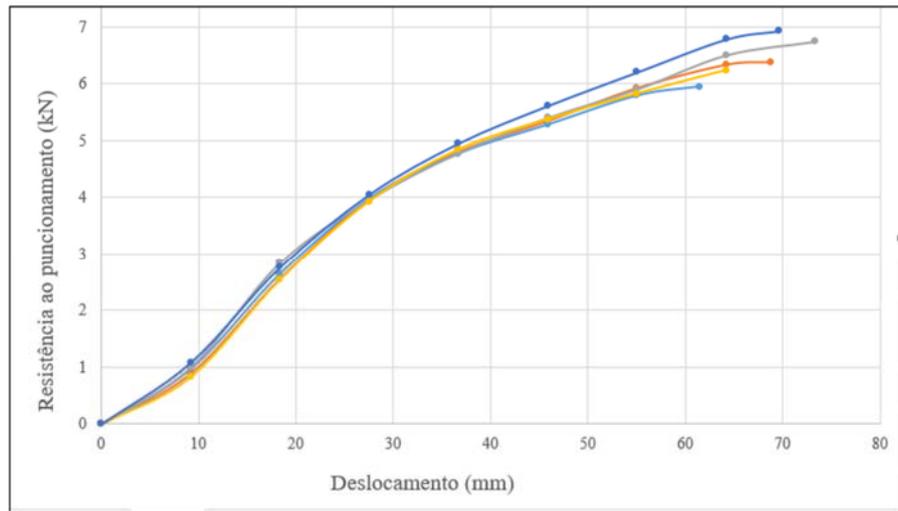
Figura 42 – Resultado do ensaio de punção estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT1) após o processo de contaminação pelo efluente agressivo



Fonte: Autora.

O composto com geotêxtil tipo 1 (GMB + GT1) atingiu valor médio de resistência ao punção estático de 7,65 kN e coeficiente de variação equivalente a 3%, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo. Demonstrando que praticamente não houve diferença em relação aos valores de resistência ao punção de amostras virgens com a mesma composição.

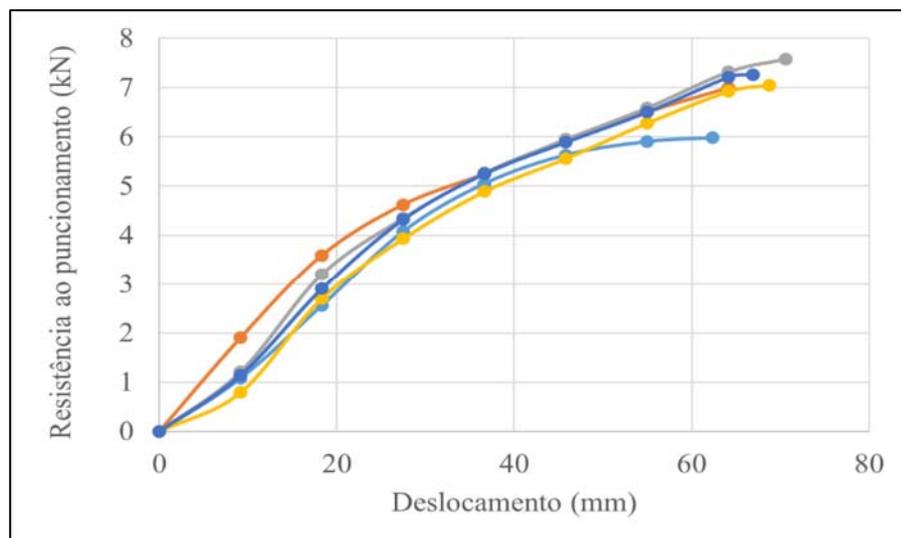
Figura 43 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT2) após o processo de contaminação pelo efluente agressivo



Fonte: Autora.

O geocomposto (GMB+ GT2), composto com o geotêxtil tipo 2 de menor gramatura, apresentou uma resistência ao puncionamento equivalente a 6,45kN e coeficiente de variação equivalente a 6%, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo. Dessa forma, observa-se que houve uma redução de 2,5% da resistência a punctura, quando comparado com amostra virgem.

Figura 44 – Resultado do ensaio de puncionamento estático nas amostras do geocomposto (GMB+ GT3) após o processo de contaminação pelo efluente agressivo



Fonte: Autora.

O composto com o geotêxtil tipo 2 de maior gramatura (GMB + GT3) obteve resistência média de 6,97kN e apresenta coeficiente de variação equivalente a 9%, após o processo de contaminação pelo efluente agressivo. Assim, observa-se uma queda de aproximadamente 3% na resistência a punctura, quando comparado com amostra virgem.

### 4.3 Discussões

A Tabela 12 traz os resultados médios e os respectivos coeficientes de variação de cada material, determinado nos ensaios de punção, nas amostras virgens e nas amostras expostas ao contaminante ácido.

Tabela 12 – Resultado dos ensaios de punção estático realizados.

Material	Resist. ao punção (kN)		Coeficiente de variação (%)	
	Amostra virgem	Amostra contaminada	Amostra virgem	Amostra contaminada
<b>Geotêxtil 1</b>	2,62	2,61	15	8
<b>Geotêxtil 2</b>	1,78	1,35	15	5
<b>Geotêxtil 3</b>	2,27	2,33	11	11
<b>Geomembrana</b>	0,485	0,556	13	3
<b>Geocomposto (GT1 + GMB)</b>	7,69	7,65	8	3
<b>Geocomposto (GT2 + GMB)</b>	6,62	6,45	3	6
<b>Geocomposto (GT3 +GMB)</b>	7,14	6,97	22	9

Fonte: Autora.

A análise geral das amostras revela que, para os geossintético que foram perfurados individualmente, os GT1 e GT3, tendem a conservar sua resistência ao punção estático após o contato com efluente ácido. Por outro lado, as geomembranas apresentaram enrijecimento, de cerca de 17%. Já o GT2 diminuiu sua resistência após o contato.

Também foi constatado que o geotêxtil 1, gramatura de 180g/m<sup>2</sup>, apresentou comportamento superior ao Geotêxtil 2, gramatura de 200g/m<sup>2</sup>, e isso pode ser explicado pelo processo de produção empregado na fabricação desse material, uma vez que ambos possuem como polímero base o poliéster.

Em paralelo a isso, constatou-se que o Geotêxtil 3, gramatura de 300g/m<sup>2</sup>, apresentou maior resistência ao puncionamento estático do que o Geotêxtil 2, gramatura de 200g/m<sup>2</sup>, e isso evidencia a influência da gramatura nessa propriedade mecânica.

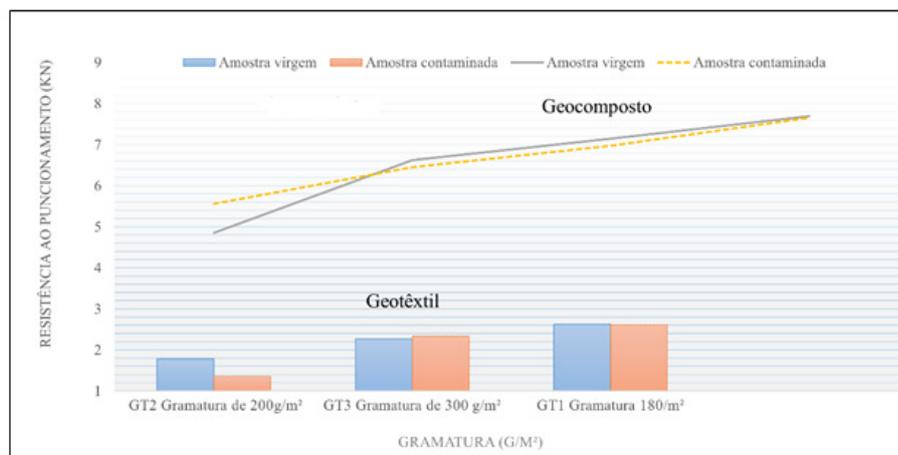
Verificou-se que a introdução de geotêxteis como camada de proteção proporcionou incrementos de resistência ao puncionamento em relação às geomembranas ensaiadas separadamente. Os resultados encontrados indicam que as propriedades que melhor refletem o acréscimo de resistência ao puncionamento do conjunto (Gmb + Gt<sub>n</sub>) de proteção são as propriedades de resistência mecânica, como a resistência à punção, dos materiais utilizados como camada de proteção, em consequência das propriedades como a gramatura, a espessura das camadas de proteção e aditivos utilizados.

O melhor desempenho no ensaio de puncionamento estático, em amostras virgens, foi verificado para o geocomposto de configuração GT1 + GMB, com acréscimo de resistência para geomembranas HDPE de gramatura 2 mm.

Associado a isso, a análise de resistência a perfuração de geocompostos mostrou baixa alteração após o contato com efluente ácido, uma vez que a geomembrana, que era responsável pela maior resistência do conjunto, manteve um comportamento com pequena variação.

A seguir, Figura 45, são comparados os resultados do ensaio de puncionamento estático nas amostras, antes e após o processo de contaminação pelo efluente agressivo.

Figura 45 – Comparação dos resultados do ensaio de puncionamento estático nas amostras, antes e após o processo de contaminação pelo efluente agressivo



Fonte: Autora.

Observa-se, que ao compararmos os geotêxteis com a mesma composição e mesmo processo de fabricação, porém com gramaturas diferentes, o aumento da gramatura resultou em uma maior resistência ao puncionamento, como descrito na literatura por Lopes (2000) e Cholewa (2019).

Também é possível constatar que o contato com o efluente ácido causou uma redução na resistência ao puncionamento somente para o geotêxtil de menor gramatura, e tal comportamento deve ser futuramente confirmado com amostras da mesma família, englobando uma maior diversidade de gramaturas.

Ademais, observa-se que alguns geotêxteis podem sofrer degradação em contato com o efluente ácido, considerando o tempo de exposição, que parece dependente da gramatura, do processo de fabricação e da composição química. No entanto, no caso dos geocompostos esse decréscimo não foi muito significativo, que pode ser devido ao efeito de enrijecimento da geomembrana em contato com o efluente agressivo.

Com relação ao GT1, de menor gramatura que os demais, apresentou maiores valores de resistência ao puncionamento e não sofreu alterações com o contato do efluente ácido para o tempo de exposição. Os melhores resultado devem ter ocorrido pela diferença no processo de fabricação empregado, como descrito na literatura por Lopes (1992). Salienta-se que, não foram disponibilizadas informações a respeito das porcentagens de propileno utilizadas na produção das amostras. E essas diferentes composições, explicam os diferentes comportamentos observados.

O geocomposto apresentou um aumento da resistência ao puncionamento da geomembrana, como descrito na literatura por Koerner (2010) e Cholewa (2019), e foi pouco influenciado pelo contato com o efluente ácido no GT1, sofrendo uma pequena perda de resistência no GT2 e GT3.

Com base na Figura 45, e tendo em vista que a ocorrência de danos na superfície dos materiais geossintéticos implica diretamente no desempenho das suas funções, indica-se a aplicação de um fator de segurança (Resistência ao puncionamento da amostra virgem/ Resistência ao puncionamento da amostra exposta) para garantir a adequação do geotêxtil para uma determinada aplicação, somente para alguns tipos de geotêxtil.

Nota-se, que apenas no caso do geotêxtil 2, seria necessário a um fator de correção de 1,3, no entanto, nos demais, para o tempo de exposição ensaiado, tipo de efluente e amostras utilizadas, não se recomenda a aplicação de um FS de correção.

Conclui-se que praticamente não existe a necessidade de correção dos geocompostos, uma vez que dentro das condições de ensaios aqui estabelecidas, a geomembrana, que é detém maior influência no conjunto, apresenta ganho de resistência ao puncionamento estático.

## 5. CONCLUSÕES

Conclui-se que, alguns geotêxteis estão suscetíveis a variações da resistência ao puncionamento estático, quando em contato com efluente ácido. Os resultados demonstraram que para os geotêxteis, perfurados individualmente, houve queda na resistência ao puncionamento para uma das amostras ensaiadas, após ao contato com efluente ácido, enquanto nas demais amostras a resistência praticamente não se alterou, provavelmente devido à diferença no processo de fabricação e da gramatura.

Por outro lado, geomembranas aumentam sua resistência. Geocompostos mantêm sua resistência, independente do geotêxtil de proteção, com quedas não muito significativas quando estes são alterados. Assim, praticamente não existe necessidade de utilização de fator de correção, ao tratar-se das condições aqui estabelecidas.

Outrossim é possível inferir que, o processo de fabricação empregado, a gramatura do material e a sua composição química, influenciam nas propriedades mecânicas do material e na sua resistência a efluentes ácidos. Uma vez que, o GT1, embora de menor gramatura que os demais, apresentou maiores valores de resistência ao puncionamento e não sofreu alterações com o contato do efluente ácido para o tempo de exposição.

Verificou-se também, que a introdução de geotêxteis como camada de proteção proporcionou incrementos de resistência ao puncionamento em relação às geomembranas ensaiadas separadamente tanto nas amostras virgens quanto nas expostas, com baixa alteração após o contato com efluente ácido. Os resultados encontrados indicam que o acréscimo de resistência ao puncionamento do conjunto ( $G_{mb} + G_{t_n}$ ) de proteção, varia de acordo com as propriedades do geotêxtil utilizado, tais como, a gramatura, a espessura das camadas de proteção e os aditivos utilizados.

### 5.1 Desenvolvimentos Futuros

O trabalho realizado foi conclusivo e permitiu perceber algumas variações da resistência ao puncionamento estático de materiais geossintéticos de diferentes gramaturas, analisados individualmente e em associação, uma vez expostos a um efluente ácido. No entanto, não deixou de ser um procedimento laboratorial, e possivelmente os resultados que se obteriam se o dano tivesse sido provocado *in situ* seriam diferentes. Embora mais dispendioso, seria de

interesse realizar este mesmo trabalho in situ para se poder fazer uma comparação com os resultados obtidos em laboratório.

Seria também importante desenvolver um estudo com um período maior de exposição das amostras. Assim como, também se recomenda a utilização de um maior número agentes degradantes.

Seria de grande interesse realizar o mesmo trabalho com outros geossintéticos, com mais gramaturas diferentes e composição, por forma a ampliar o leque de amostras danificadas, permitindo assim retirar mais conclusões sobre a influência das propriedades dos geossintéticos no processo de contaminação por efluente ácido.

Por último, poder-se-iam expor os geossintéticos sucessivamente a vários agentes de degradação, uma vez que os geossintéticos quando aplicados em obra não ficam sujeitos apenas a degradação química.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 8419**:Apresentação de projetos de aterros de resíduos sólidos urbanos: procedimentos. 2º ed. Rio de Janeiro, 1996. 7p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9862**:Geossintéticos: amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios. 1º ed. Rio de Janeiro, 2013. 4 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9863-1**:Geossintéticos: determinação da espessura a pressões especificadas-parte 1: camada única. 2º ed. Rio de Janeiro, 2021. 6 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR ISO 9864**:Geossintéticos: método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos. 1º ed. Rio de Janeiro, 2013. 2 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR ISO 9895**:Solo:índice de suporte califórnia (isc): método de ensaio. 2º ed. Rio de Janeiro, 2016. 14p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318-1**:Geossintéticos - parte 1: termos e definições. 2º ed. Rio de Janeiro, 2021. 9 P.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318-2**:Geossintéticos - parte 2: símbolos e pictogramas. 2º ed. Rio de Janeiro, 2021. 6 P.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10319**: Geossintéticos: ensaio de tração faixa larga. 1º ed. Rio de Janeiro, 2013. 11 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR ISO 10320**:Geotêxteis e produtos correlatos: identificação na obra. 2º ed. Rio de Janeiro, 2013. 3 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR ISO 10321**:Geossintéticos: ensaio de tração de emendas pelo método da faixa larga. 1º ed. Rio de Janeiro, 2013. 11 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR ISO 11058**:Geotêxteis e produtos correlatos: determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento. 2º ed. Rio de Janeiro, 2021. 18 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR ISO 12236**:Geossintéticos: ensaio de punção estático (punção CBR) 1º ed. Rio de Janeiro, 2013. 7 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR ISSO 12956**:Geotêxteis e produtos correlatos: determinação da abertura de filtração característica.2º ed. Rio de Janeiro, 2022. 16 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR ISO 12957-1**:Geossintéticos: determinação das características de atrito - parte 1: ensaio de cisalhamento direto.2º ed. Rio de Janeiro, 2022. 13 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12957-2**:Geossintéticos: determinação das características de atrito - parte 2: ensaio de plano inclinado. 1º ed. Rio de Janeiro, 2013. 12 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12958-1**:Geotêxteis e produtos correlatos: determinação da capacidade de fluxo no plano-parte 1. 1º ed. Rio de Janeiro, 2022. 14p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12958-2**:Geotêxteis e produtos correlatos: determinação da capacidade de fluxo no plano- parte 2. 1º ed. Rio de Janeiro, 2022. 16 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13431**:Geotêxteis e produtos correlatos: determinação do comportamento em deformação e na ruptura por fluência sob tração. 1º ed. Rio de Janeiro, 2022. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13433**:Geossintéticos: ensaio de perfuração dinâmica (ensaio de queda de cone). 1º ed. Rio de Janeiro, 2013. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 15856**:Geomembranas e produtos correlatos: determinação das propriedades de tração. 1º ed. Rio de Janeiro, 2010. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 25619-1**:Geossintéticos: determinação do comportamento em compressão- parte 1: propriedades na fluência à compressão. 1º ed. Rio de Janeiro, 2013. 20 p

ASTM INTERNATIONAL D1435-20, Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics. West Conshohocken, PA, USA, 2020.

ASTM INTERNATIONAL D2228-04, Standard Test Method for Rubber Property - Abrasion Resistance (Pico Abrader). West Conshohocken, PA, USA, 2019.

ASTM INTERNATIONAL D4060-19, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser. West Conshohocken, PA, USA, 2019.

ASTM INTERNATIONAL D4833, Standard Test Method of Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes, and Relatex Products. West Conshohocken, PA, USA, 1988.

ASTM INTERNATIONAL D5322, Standard Practice for Laboratory Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids. West Conshohocken, PA, USA, 2009.

ASTM INTERNATIONAL D6241, Standard Test Method for The Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile-Related Products Using a 50 mm Probe, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA, 2022.

ASTM INTERNATIONAL D794, Standard Practice for Determining Permanent Effect of Heat on Plastics. West Conshohocken, PA, USA, 1993.

ASTM INTERNATIONAL G21-15, Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi. West Conshohocken, PA, USA, 2021.

ASTM INTERNATIONAL G22-76, Standard Practice for Determining Resistance of Plastic to Bacteria. West Conshohocken, PA, USA, 1996.

ACCORSI, John.; YU, Michael. Carbon black. **Plastics additives: an az reference**, Bristol, 1998. p. 153-161.

AFONSO, Manuel Ricardo Fernandes Lopes et al. **Ensaio de corte direto na caracterização da interface solo-geossintético: efeito da variação da tensão normal**. 2009. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

AMARAL, Nara Brasil do. **Geossintéticos aplicados a geotecnia ambiental**. 2019.

BACALHAU, J.; CUNHA, T.; AFONSO, C. Efeito do teor de Ni na temperabilidade de um aço bainítico para processamento de plásticos. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 24., 2017, Curitiba, Pr, Brasil. Anais [...]. Curitiba, Pr, Brasil, 2017.

BILLING, J., GREENWOOD, J., and SMALL, G. Durabilidade química e mecânica de geotêxteis. *In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL EM GEOTÊXTEIS, GEOMEMBRANAS E PRODUTOS RELACIONADOS*, 4., 1990, Balkema. Anais [...]. Holanda, vol. 2, 1990.p. 621-626.

BOFF, F. E. Estudo da seletividade iônica na interação solo-contaminante aplicado a liners. *In: SEMINÁRIOS GERAIS EM GEOTECNIA*, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998. Anais [...]. São Carlos: EESC/USP, 1998.

BONAPARTE, Rodolfo; DANIEL, D.; KOERNER, RM. **Avaliação e recomendações para melhorar o desempenho dos sistemas de contenção de resíduos**. Washington, Dc, EUA: EPA-Agência de proteção ambiental, 2002.

BOOKER, John R. et al. **Barrier systems for waste disposal facilities**. Abingdon: E & FN Spon, 2004.

BORGATTO, André Vinícius Azevedo. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. p. 174.

BORMA, Laura de Simone; SOARES, Paulo Sergio Moreira. **Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2002.

BOUAZZA, A. Geosynthetics in mining applications. *In: AFRICAN CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS*, 2., 2013, Accra, Ghana. Anais [...]. Accra, Ghana: Proceedings Geoafrika, 2013. p. 34.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015. p. 313

BROMS, B. B.; CHU, J.; CHOA, V. Measuring the discharge capacity of band drains by a new drain tester. *In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS*, 1994, Singapore. Anais [...]. Singapore: International Geotextile Society, 1994. p. 803-806.

BUENO, B. S.; BENVENUTO, C. E Vilar, O. M. Aplicações em barreira impermeabilizantes. *In: Manual brasileiro de geossintéticos*. São Paulo: Pini, 2004. p. 335-379.

BUENO, Maruska Tatiana Nascimento da Silva. Análise da degradação de alguns geossintéticos em contato com fluidos agressivos, 2007.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, v. 589, p. 249, 2002.

CARNEIRO, J. R. D.C. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de caráter ambiental**. A importância da incorporação de aditivos químicos. Tese (Doutorado em Engenharia do ambiente) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, p.108, 2009.

CARVALHO, Filipa Daniela Fernandes. **Resistência de um geocompósito de reforço à danificação durante a instalação e à abrasão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

CARVALHO, Miriam de Fátima. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CASSIDY, P. E.; MORES, M.; KERWICK, D. J.; KOECK, D. J.; VERSCHOOR, K. L.; WHITE, D. F. Chemical resistance of geosynthetic materials. **Geotextiles and Geomembranes**, Holanda, v.11, n.1, p. 61-96, 1992.

CEMPRE. Lixo Municipal. **Manual de gerenciamento integrado**. 3.ed, São Paulo, 2010.

CHOLEWA, Mariusz.; KUTIA, Tetiana. Analysis of puncture resistance of geomembranes and geotextiles. **Acta Scientiarum Polonorum**. Cracóvia: Formatio circumiectus, v. 18, n. 4, 2019.

CHRISTIE, R. M. Pigments for plastics. *In: Plastic additives: an az reference*. London: Chapman e Hall, 1998. p.485-498. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=Oa7d1BhGAJMC&oi=fnd&pg=PR13&ots=lowEMZ0mDR&sig=6l6Mju6QPcxVbHW-iwkAqj3lwsQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=Oa7d1BhGAJMC&oi=fnd&pg=PR13&ots=lowEMZ0mDR&sig=6l6Mju6QPcxVbHW-iwkAqj3lwsQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 18 de mar. de 2023.

COLMANETTI, Janaina Provásio. **Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

COOKE, Theodore F.; REBENFELD, Ludwig. Efeito da composição química e estrutura física dos geotêxteis na sua durabilidade. **Geotêxteis e Geomembranas**, v. 7, n. 1-2, p. 7-22, 1988.

DA GRAÇA LOPES, Maria et al. Experiência portuguesa na construção dos sistemas de confinamento de aterros de resíduos sólidos urbanos. **Geotecnia**, n. 95, p. 57-65, 2002.

DANIEL, David Edwin.; KOERNER, R. M. **Waste containment facilities**. 2 ed. Cincinnati: Laboratório de engenharia de redução de risco, 1993.

DANIEL, David Edwin.; KOERNER, Robert M. Sistemas de Cobertura. *In: Prática geotécnica para disposição de resíduos*. Boston, MA: Springer, EUA, 1993. p. 455-496.

DANIEL, David Edwin et al. **Instalações de contenção de resíduos**: orientação para garantia de qualidade de construção e controle de qualidade de construção de sistemas de revestimento e cobertura. Reston: Sociedade Americana de Engenheiros Civis, 2007.

DE MORAES, Natália Cristiane; DA SILVA, José Margarida; CURI, Adilson. Avaliação de cobertura seca de entulho de construção civil para remediação de drenagem ácida em mina. **Revista de Medio Ambiente y Minería**, n. 2, p. 13-24, 2017.

DIAS FILHO, José Luiz Ernandes et al. **Determinação indireta da tração de geotêxteis tecidos através de ensaios de punçionamento**. XVII Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. Goiânia, 2014.

DIAS FILHO, José Luiz Ernandes; CORRÊA, Brunne R Rabello Frazão; DE ALMEIDA, Paulo César Maia. Comportamento tensão-deformação do geotêxtil: uma proposta de novo cálculo indireto usando o teste de punção estática (teste cbr). **Geotêxteis e Geomembranas**, v. 50, n. 1, p. 163-173, 2022.

DIERICKX, W. P.; Van, D. B. Natural weathering of textiles used in agricultural applications. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 22, p.255-272, 2004.

DO ROSÁRIO, Cátia Sofia Roque. **Efeitos da ddi na aplicação de geossintéticos em aterros de resíduos**. Tese de Doutorado - Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.

DUARTE, A. S. **Aplicação de geossintéticos na impermeabilização e selagem de aterros**. Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.

ELK, A. G. H. P. Van. **Redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007

ENGEORPS. **Estado da arte dos aterros sanitários**: parte II. São Paulo, 1996. p.233.

ENGEORPS-Corpo de Engenheiros Consultores. **Centro de tratamento de resíduos de Nova Iguaçu**. Nova Iguaçu, 2006. Arquivo fotográfico

ERCOLINI, Mayara Palácio; LAVOIE, Fernando Luiz. **Estudo sobre a durabilidade de geomembrana de pead aplicada em lagoa de chorume por meio de uma amostra exumada in situ**. Mauá-São Paulo: Escola de Engenharia Mauá, 2019.

EUROPEAN STANDARD. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 12236. **Geosynthetics**: static puncture test (cbr test). Geneva, Switzerland, 2006.

FERREIRA, Fernanda Bessa et al. **Comportamento das interfaces solo-geossintético**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

GARTUNG, E. Landfill Liners and covers. In: DE GROOT, M. B.; DEN Hoedt, G.; TERMAAT, R. J. (ed.). **Geosynthetics: Applications, Design and Construction**. Amsterdam, 1996. p. 55-70.

GAWLIK, F.; IZZO, RIs; NAGALLI, A.; MÜNNICH, K. Efeitos do plástico macio na resistência ao cisalhamento dos rsu. **A Revista Eletrônica de Engenharia Geotécnica**, v. 18, p. 5117-5124, 2013.

GEOFOCO. **Reforço de solo com geogrelha**. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <http://geofoco.com.br/reforcode-solo-com-geogrelha-2/>. Acesso em: 06 de mar. de 2023.

GIROUD, J. P. Quantification of geosynthetic behavior. **Geosynthetics International**, v. 12, n. 1, p. 2-27, 2005.

GISBERT, Th et al. Geosynthetics in french landfills: particular geotechnical aspects. In: PROCEEDINGS EUROPEAN CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 1., 1996, Maastricht. Anais [...]. Maastricht, 1996. p. 563-568.

GREENWOOD, J. H.; SCHROEDER, H. F. E.; VOSKAMP, W. **Durability of geosynthetics**. Gouda, Netherlands: Building e infrastructure, 2012. p. 295.

GRUBB, Dg; MORRE III, Nós; CHENG, Scj. Testes de exposição de geotêxteis em grandes altitudes nos andes peruanos. **Geossintéticos Internacional**, v. 2, p. 119-144, 1999.

GUIMARÃES, M. G. A. **Durabilidade de geotêxteis expostos a fatores climáticos e químicos simulados em laboratório**. 2012. Dissertação de Mestrado - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

GULEC, S. B.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H. Effect of acidic mine drainage on the polymer properties of an HDPE geomembrane. **Geosynthetics International**, v. 11, n. 2, p. 60-72, 2004.

HAXO, H.E. et al. Liner materials exposed to municipal solid waste leachate. **Geotêxteis e Geomembranas**. Holanda: Elsevier, 1982. p. 2-82.

HORROCKS, Arthur Richard; D'SOUZA, Jennifer A. Degradation of polymers in geomembranes and geotextiles. **Handbook of Polymer Degradation**, p. 434-505, 1992.

IGSBRAZIL. **Classificação dos geossintéticos**. Brasil, 2007. Disponível em: [https://igsbrasil.org.br/material\\_tecnico\\_-\\_IGS\\_Brasil](https://igsbrasil.org.br/material_tecnico_-_IGS_Brasil). Acesso em: 25 de mar. de 2022.

JAILLOUX, J.; ANDERSON, P.; THOMAS, R. Estudos de compatibilidade química de filamentos e jardas de poliéster para serem usados em geocompósitos. Fase 1: testes a 95°C. **Geotêxteis e Geomembranas**. Holanda: Elsevier, v. 11, n. 3, p. 277-290, 1992.

KOERNER, George R.; HSUAN, Grace Y.; KOERNER, Robert M. Degradação Fotoiniciada de Geotêxteis. **Revista de Engenharia geotécnica e Geoambiental**. Reston, v. 124, n. 12, 1998. p. 1159-1166.

KOERNER, R.M. **Designing with geosynthetics**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, p. 41, 2002.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**, 4. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990.

KOERNER, R. M.; HALSE, Y.; LORD, A. Stress cracking testing. Geomembranes: identification and performance testing. Reino Unido: Chapman and Hall, 1990. Chapter 11.

KOERNER, R. M. et al. Estudo de dez anos de punção por fluência de geomembranas de hdpe protegidas por geotêxteis não tecidos perfurados com agulha. **Geotêxteis e Geomembranas**. Holanda: Elsevier v. 28, n. 6, p. 503-513, 2010.

KOERNER, R. M. et al. **Projetando com geossintéticos**. Upper Saddle River, NJ, EUA: Pearson Prentice hall, 2005.

KULSHRESHTHA, A. **Degradação química**: manual do polímero degradado. Nova York: Dekker, p.55-95, 1992.

LAGREGA, Michael D.; BUCKINGHAM, Phillip L.; EVANS, Jeffrey C. **Gestão de resíduos perigosos**. Estados Unidos: Waveland Press, 2010.

LEITE, W. C. A. **Estudo do comportamento da temperatura, ph e teor de umidade na decomposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1991.

LENGEN, A.; SIEBKEN, J. **Geomembrane in the united state**: a brief discussion. Nova York: De Groat, Den Hoedt & Termaat, 1996.

LODI, Paulo César; BUENO, Benedito de Souza. Thermo-gravimetric analysis (tga) after different exposures of high density polyethylene (hdpe) and poly vinyl chloride (pvc) geomembranes. **Electronic journal of geotechnical engineering**, p. 3339-3349, 2012.

LOPES, M. L. et al. Análise do comportamento de um muro reforçado com geossintéticos. **Geotecnia**, n. 68, p. 47-63, 1993.

LOPES, M. L. **Muros reforçados com geossintéticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1992.

LOPES, M. Lurdes et al. Estudo do comportamento ao puncionamento estático de geotêxteis e geomembranas sob a ação de agentes de degradação. **Geotecnia**, n. 89, p. 77-90, 2000.

LOPES, M. P.; LOPES, M. L. A. **Durabilidade dos geossintéticos**. Porto: Feup edições, p. 294, 2010.

MACCAFERRI. **Manual técnico: critérios gerais para projeto, especificação e aplicação de geossintéticos**. São Paulo, Brasil, 2008.

MAIA, I. S. Avaliação da degradação de propriedades mecânicas de geomembranas de PEAD e PVC. 2001. 175 f. Dissertação (Mestrado em geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

MAIA, I. S. Influência de alguns agentes de degradação nas propriedades físicas e mecânicas de geomembranas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

MEDEIROS, Allan Pereira De. **Análise da aplicação de geossintéticos no aterro sanitário de Seropédica**. Rio de Janeiro, 2019.

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Orientações básicas para a operação de aterro sanitário**. Belo Horizonte, 2006.

MITCHELL, DH. Testes de compatibilidade de geomembranas usando lixiviado ácido de urânio. **Geotêxteis e Geomembranas**, v. 2, n. 2, p. 111-127, 1985.

MONTEIRO, António José Rodrigues Vieira et al. **Comportamento dos geossintéticos face a agentes presentes em aterros**: uma contribuição. 1998. Tese (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1998.

MUCELIN, Carlos Alberto; BELLINI, Marta. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Sociedade & Natureza**, v. 20, p. 111-124, 2008.

MUYLAERT, M. S. (coord). **Consumo de energia e aquecimento do planeta – análise do mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – estudos de caso**. Rio de Janeiro: Coppe, 2000.

PALMEIRA, Ennio et al. Geossintéticos em engenharia geotécnica e geoambiental: avanços e perspectivas. **Geotecnia**, n. 152, p. 337-368, 2021.

PALMEIRA, Ennio Marques. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de textos, 2018.

PIMENTEL, K. C. A. **Tubulações pressurizadas em aterros reforçados com geossintéticos**. Dissertação (Mestrado em geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2003. p. 271.

PIMENTEL, K. C. A.; PALMEIRA, E. M. Reabilitação de barreiras impermeabilizantes com geossintéticos. *In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, v. 7, 2011.

RIMAL, S.; ROWE, R. Kerry.; HANSEN, S. **Durability of geomembrane exposed to jet fuel A-1**. Canadá: Centro de geoengenharia, 2004.

RISSEUW, P.; SCHMIDT, H. Hidrolise de fios de poliéster ht em água à temperaturas moderadas. *In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL EM GEOTÊXTEIS GEOMEMBRANAS E PRODUTOS CORRELATOS*, 4.,1990, Balkema. Anais [...]. Barragem de Rotter, Holanda, v.2. p.691-696, 1990.

ROSA, D. S. **Correlação entre envelhecimentos acelerado e natural do polipropileno isotático (PPI)**. 1996. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1996.

ROSA, João Guimarães. **Grande sertão veredas**. Rio de Janeiro: Nova fronteira, 1986.

ROWE, R. Kerry et al. Durabilidade da geomembrana de polietileno fluorado de alta densidade no ártico. **Geotêxteis e Geomembranas**. Bathurst, v.28, n. 1, p. 100-107, 2010.

ROWE, R. Kerry. Desempenho a longo prazo de sistemas de barreira contra contaminantes. **Geotécnica**, v. 55, n. 9, p. 631-678, 2005.

ROWE, R. Kerry; RIMAL, S.; SANGAM, H. Envelhecimento de geomembrana de PEAD exposta ao ar, água e chorume em diferentes temperaturas. **Geotêxteis e Geomembranas**, v. 27, n. 2, p. 137-151, 2009.

SALMAN, A.; ELIAS, V.; JURAN, I.; LU, S.; PEARCE, E. Durabilidade de geossintéticos com base em testes laboratoriais acelerados. Proc., Geossintéticos 97. **Industrial Fabrics Associated International**, St. Paul, Minn., v.1, p. 217-234, 1997.

SANGAM, Henri P.; ROWE, R. Kerry. Effects of exposure conditions on the depletion of antioxidants from high-density polyethylene (hdpe) geomembranes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 39, n. 6, p. 1221-1230, 2002.

SALOMONS, Win. Impacto ambiental dos metais derivados das atividades mineiras: Processos, previsões, prevenção. **Revista de Exploração Geoquímica**, v. 52, n. 1-2, p. 5-23, 1995.

SHARMA, Hari D.; LEWIS, Sangeeta P. **Sistemas de contenção de resíduos, estabilização de resíduos e aterros sanitários: projeto e avaliação**. São José, Califórnia: John Wiley & Filhos, 1994.

SHUKLA, Sanjay Kumar. Aplicações geossintéticas. In: Aspectos gerais e estudos de caso selecionados. Geossintéticos e suas aplicações. Londres: Thomas Telford, 2002. p. 393-419. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/gata.31173.bm01>  
Acesso em: 22 de mar. de 2022.

STRUVE, Fred. Extrusion of geomembranes: proceeding. In: THE GRI CONFERENCE, GEOSYNTHETIC RESINS, FORMULATION AND MANUFACTURING, 8., 1994, St. Paul, Minn. Anais [...]. St. Paul, Minn: Edited by G. Hsuan and Rm Koerner, 1994. p. 94-112.

SILVA, Gilson Pereira et al. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p. 45-52, 2006.

SILVA, K. T. **Projeto de um aterro sanitário de pequeno porte**. 2016. Projeto de conclusão de curso de graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

SOARES, Anderson Borgetti et al. Coberturas secas aplicadas a rejeitos de carvão. **A Água de Mina e o Meio Ambiente**, v. 41, n. 3, p. 666-678, 2022.

SOARES, Paulo Sergio Moreira; SANTOS, Maria Dionísia Costa dos; Possa, Mário Valente. **Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente**, 2008.

SOUZA, V. P.; BORMA, L. S.; MENDONÇA, R. M. G. Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez. In: SEMINÁRIO BRASIL-

CANADÁ DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS MINERADAS, 2003, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis, 2003. p. 210-228.

TOUZE, N. Healing the world: a geosynthetics solution. **Geosynthetics International**, v. 28, n. 1, p. 1-31, 2021.

TOUZE-Foltz, N. et al. Uma revisão do desempenho dos geossintéticos para proteção ambiental. **Geotêxteis e Geomembranas**, v. 44, n. 5, p. 656-672, 2016.

TOUZE-Foltz, Nathalie; LUPO, João; BARROSO, Madalena. Aplicações geoambientais de geossintéticos. *In: PROCEEDINGS EUROGEO*, 4., 2008, Porto. Palestra principal. Porto: Universidade do Porto, v. 98, 2008.

UNITED STATES. Environmental protection agency. **Human Health and Environmental Damage from Mining and Mineral Processing Wastes**. Office of Solid Waste Washington, 1995.

VAN LANGENHOVE, L. Conclusões de um extenso programa de pesquisa brite sobre envelhecimento. *In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL EM GEOTÊXTEIS, GEOMEMBRNAS E PRODUTOS RELACIONADOS*, 4., 1990, Balkema. Anais [...]. Holanda. v. 2, 1990. p.703-707.

VERTEMATTI, J. C. Manual brasileiro de geossintéticos. Associação brasileira das indústrias de não tecidos e tecidos técnicos (ABINT). São Paulo: Blücher, 413, 2004.

VERTEMATTI, José Carlos. Manual brasileiro de geossintéticos. São Paulo: Blücher, 2015.

VILAR. O. Geossintéticos em aplicações ambientais. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS*, 4., 2003, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre, 2003. p.203-218.

VIOLANTE, Francisco Manuel Matos. **Caracterização da danificação mecânica de geossintéticos**. 2016.

WOODLEY, R. M., Pond liner s anyone? **Militar y Engineer**, v.70, n. 458, p. 392-395, 1978.

ZORNBERG, J. G; BOUAZZA, A; MCCARTNEY, J. S. Geosynthetic capillary barriers: current state of knowledge. **Geosynthetics International**, v.17, p.273-300, 2010.