



**BEATRIZ MYDORI CARVALHO URASHIMA**

**MODELAGEM DA DURABILIDADE DE GEOTÊXTEIS  
EXPOSTOS ÀS INTEMPÉRIES**

**LAVRAS - MG**

**2019**

**BEATRIZ MYDORI CARVALHO URASHIMA**

**MODELAGEM DA DURABILIDADE DE GEOTÊXTEIS EXPOSTOS ÀS  
INTEMPÉRIES**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Me. Eduardo Souza Cândido

Orientador

Profa. Dra. Denise de Carvalho Urashima

Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2019**

## BEATRIZ MYDORI CARVALHO URASHIMA

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Urashima, Beatriz Carvalho.

Modelagem da durabilidade de geotêxteis expostos às  
intempéries / Beatriz Carvalho Urashima. - 2019.

54 p. : il.

Orientador(a): Eduardo Souza Cândido.

Coorientador(a): Denise de Carvalho Urashima.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Durabilidade. 2. Degradação. 3. Geossintéticos. I. Cândido,  
Eduardo Souza. II. Urashima, Denise de Carvalho. III. Título.

**BEATRIZ MYDORI CARVALHO URASHIMA**

**MODELAGEM DA DURABILIDADE DE GEOTÊXTEIS EXPOSTOS ÀS  
INTEMPÉRIES**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 05 de novembro de 2019

Eduardo Souza Cândido UFLA

Denise de Carvalho Urashima CEFET-MG

Carlos Alberto Carvalho Castro CEFET-MG

Raquel Mariano Linhares UFLA

---

Prof. Me. Eduardo Souza Cândido

Orientador

---

Profa. Dra. Denise de Carvalho Urashima

Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2019**

## **AGRADECIMENTOS**

Cada fase da vida tem sua beleza e seu tempo de ser vivida. Agora, mais uma etapa se encerra, muitas lembranças foram construídas e lições aprendidas com pessoas que transformaram minha realidade em motivos para sonhar. Não posso dizer que a busca por conhecimentos encerrou-se junto com esta etapa. Pelo contrário, a vontade de compreender este vasto universo apenas aumentou. Às pessoas que me incentivaram, apoiaram e inspiraram até aqui, o meu muito obrigada. Que todos vocês possam estar presentes neste caminho desconhecido que está à frente.

Aos meus pais, minha base que permitiu que eu conseguisse chegar até aqui, não tenho formas de expressar minha eterna gratidão. Ao meu irmão, companheiro de casa e de vida, cujo conhecimento me inspira, obrigada. Ao Mateus agradeço por todo o incentivo e ensinamentos, sem você minha graduação não seria a mesma.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para a minha formação, em especial ao meu orientador Prof. Eduardo Cândido e a minha co-orientadora Profa. Denise Urashima, conselheira, amiga e mãe. Ao Prof. Carlos Castro e à Profa. Mag Guimarães - minha irmã de coração - obrigada pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço a empresa HUESKER Ltda pelo fornecimento de material para pesquisa. Por fim, sou eternamente grata pela oportunidade de ter vivido meus melhores anos nessa universidade tão linda, a qual guardarei para sempre em meu coração, Universidade Federal de Lavras.

*Você pode alcançar tudo aquilo que deseja, basta apenas acreditar e se esforçar.*

*(Autoria própria)*

## RESUMO

Um dos aspectos de relevância quando se trata de geossintéticos é a sua durabilidade, uma vez que sua utilização é recente e, conseqüentemente, estudos que determinem o comportamento ao longo do tempo de vida de serviço do material tem sido temática de muitos pesquisadores. Esta monografia apresenta o estudo da durabilidade de dois distintos geotêxteis tecidos de polipropileno expostos a dois ciclos climáticos de exposição de campo (início do verão de 2016 e término da primavera 2017 e início do inverno de 2018 e término do outono 2019). A exposição ocorreu na cidade de Varginha, Sul de Minas Gerais, latitude de 21°33'05''S. A dinâmica atmosférica local foi monitorada por meio de dados de estação meteorológica, sendo a radiação ultravioleta (UV) estimada como 7,5% da radiação global acumulada medida. A análise da durabilidade foi realizada por meio da resistência à tração antes e após a exposição, individualmente, bem como o efeito acumulativo no tempo total de exposição. A relevância do trabalho está na avaliação da durabilidade, por meio da proposta de um modelo matemático do tipo exponencial, para materiais expostos em campo, visto que a exposição ao ambiente é de considerável complexidade, visto que depende não somente do material exposto, mas também da dinâmica atmosférica do local de exposição. O modelo ora proposto parece promissor, pois considera a dinâmica da atmosfera embutida ao longo do tempo de exposição. Ressalta-se que o somatório de perdas de resistência dos períodos isolados não pode ser considerado equivalente a perda de resistência para o período total de exposição, devido ao acúmulo de danos que o material é submetido ao longo de sua exposição.

**Palavras-chave:** Durabilidade, degradação, geossintéticos, geotêxtil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Aplicações em desaguamento (a), proteção de margem (b) e quebra mar (c).....	16
Figura 2.1 - Tipos de geotêxteis: tecido (a), não tecido (b) e tricotado (c). .....	17
Figura 2.2 - Tipos de geogrelhas: ligada (a), tecida (b), extrudada unidirecional (c), extrudada bidimensional (d).....	18
Figura 2.3 - Produto correlato aos geotêxteis: georrede (a), geomanta (b), geocélula (c), geocomposto (d) e geomembrana (e). .....	19
Figura 2.4 - Monômero etileno (a) e molécula de polietileno (b). .....	20
Figura 2.5 - Resumo da sintetização do gás propileno. ....	22
Figura 2.6 - Esquema da variação do efeito do aditivo em função da sua concentração. ....	22
Figura 2.7 - Propriedades dos geossintéticos desde seu armazenamento até seu uso final.....	24
Figura 2.8 - Esquema de um ensaio de tração. ....	27
Figura 2.9 - Direções longitudinal e transversal de um geotêxtil.....	27
Figura 2.10 - Curvas geradas pelo ensaio recomendado pela norma D5035 (ASTM, 2011a). ..	28
Figura 2.11 - Comprimentos de onda presentes no espectro solar. ....	29
Figura 2.12 - Comprimentos de onda da radiação ultravioleta nocivos a materiais poliméricos. ....	30
Figura 2.13 - Distribuição normal. ....	32
Figura 2.14 - Critérios para a escolha de qual análise estatística utilizar.....	33
Figura 3.1 - Sumarização das principais etapas da metodologia. ....	35
Figura 3.2 - Preparação dos corpos de prova para os ensaios de massa por unidade de área e determinação da espessura nominal. ....	36
Figura 3.3 - Equipamento utilizado para o corte à quente.....	37
Figura 3.4 - Corpo de prova para o ensaio de resistência à tração faixa estreita.....	37
Figura 3.5 - Equipamento utilizado para a determinação da espessura nominal.....	38
Figura 3.6 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência à tração faixa estreita. ....	39
Figura 3.7 - Peças metálicas utilizadas no ensaio de resistência à tração faixa estreita.....	39
Figura 3.8 - Esquema representativo das amostras de geotêxteis expostos. ....	40
Figura 3.9 - Área de exposição.....	41
Figura 3.10 - Pórticos utilizados para a exposição. ....	41
Figura 3.11 - Fixação dos geotêxteis nos pórticos.....	41
Figura 4.1 - Intervalos de confiança para os resultados de resistência à tração faixa estreita dos geotêxteis exposto no primeiro ciclo. A – Geotêxtil do tipo G2, B – Geotêxtil do tipo G1. ...	45



Figura 4.2 - Intervalos de confiança para os resultados de resistência à tração faixa estreita dos geotêxteis exposto no segundo ciclo. A – Geotêxtil do tipo G2, B – Geotêxtil do tipo G1.....	46
Figura 4.3 - Camada de poeira formada na superfície do material exposto. ....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Polímeros bases de geossintéticos.....	21
Quadro 2.2 - Nível de resistência dos polímeros frente a agentes de degradação.....	21
Quadro 2.3 - Comparação entre as metodologias (parâmetros) de ensaio de resistência à tração. .....	27
Quadro 3.1 - Períodos de exposição para cada ciclo. ....	42
Quadro 4.1 - Caracterização física. ....	43
Quadro 4.2 - Caracterização mecânica. ....	43
Quadro 4.3 - Perda de resistência em percentual dos geotêxteis expostos no primeiro ciclo. .	44
Quadro 4.4 - Perda de resistência em percentual dos geotêxteis expostos no segundo ciclo...44	
Quadro 4.5 - Valores de incidência de radiação UV estimada e de precipitação no primeiro ciclo de exposição. ....	47
Quadro 4.6 - Valores de incidência de radiação UV estimada e de precipitação no segundo ciclo de exposição. ....	47

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Dinâmica atmosférica do primeiro ciclo de exposição. ....	47
Gráfico 2 - Primeiro ciclo de exposição. ....	49
Gráfico 3 - Segundo ciclo de exposição. ....	49

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Contextualização.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Objetivo.. .....</b>	<b>16</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Geossintéticos.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 Geotêxtil.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2 Produto correlato aos geotêxteis .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3 Geocompostos .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.4 Geomembranas .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Polímeros constituintes dos geossintéticos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Propriedades dos geossintéticos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.1 Propriedades físicas.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.2 Propriedades hidráulicas .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.3 Propriedades mecânicas.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.4 Propriedades de durabilidade .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4 Exposição em campo .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5 Análise estatística dos resultados .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.1 Distribuição de probabilidade normal.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.2 Intervalo de confiança .....</b>	<b>32</b>
<b>2.6 Modelos matemáticos sobre acúmulo de danos .....</b>	<b>33</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1 Material empregado na pesquisa .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2 Preparação dos corpos de prova .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.1 Preparação dos corpos de prova para o ensaio de determinação de massa por unidade de área e espessura nominal.....</b>	<b>36</b>

3.2.2 Preparação dos corpos de prova para o ensaio de resistência à tração faixa estreita.....	36
3.3 Caracterização do material intacto.....	38
3.3.1 Ensaio de caracterização física de massa por unidade de área .....	38
3.3.2 Determinação da espessura nominal.....	38
3.3.3 Ensaio de resistência à tração faixa estreita.....	38
3.4 Exposição em campo .....	40
3.4.1 Preparação das amostras .....	40
3.4.2 Ensaio de exposição .....	40
3.5 Avaliação da durabilidade do material exposto .....	42
3.6 Avaliação dos dados meteorológicos .....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	43
4.1 Caracterização do material intacto.....	43
4.2 Avaliação da durabilidade após exposição.....	43
4.3 Avaliação dos dados meteorológicos (dinâmica da atmosfera) .....	46
4.4 Modelo matemático da durabilidade de geotêxteis expostos às intempéries .....	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
5.1 Conclusões .....	50
5.2 Proposta de trabalhos futuros .....	51
REFERÊNCIAS .....	51

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A terminologia *geossintético* é definida pela norma NBR ISO 10318-1 (ABNT, 2018) onde o prefixo *geo*, faz referência ao emprego destes materiais em obras de engenharia geotécnica e civil nas quais há contato com solos ou outros materiais. O sufixo *sintético* refere-se à composição polimérica, a qual pode ser de origem natural ou sintética, sendo a última mais frequente.

A importância e disseminação dos geossintéticos estão relacionadas à ampla gama de produtos com aplicações rápidas e normalmente de baixa complexidade em substituição a materiais convencionais em obras geotécnicas, civis e ambientais, ou mesmo atuando em situações em que métodos convencionais não podem ser empregados, aliado a redução de custos, prazos e impactos ambientais (BARBOSA, 2011).

Os geossintéticos podem ser agrupados em: geotêxteis, produto correlato aos geotêxteis, geomembranas (barreiras geossintéticas) e geocompostos. Esses produtos podem exercer uma ou mais funções dentro de uma aplicação, tais como: drenagem, filtração, proteção, reforço, separação, controle de erosão superficial, barreira e alívio de tensões, segundo a norma NBR ISO 10318-1 (ABNT, 2018).

Dentre os principais geossintéticos encontra-se o geotêxtil, um material têxtil plano, permeável e à base de polímero (sintético ou natural); que pode ser do tipo tecido, não tecido ou tricotado. Compostos por fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, os geotêxteis podem desempenhar várias funções em uma obra, devido as suas propriedades mecânicas e hidráulicas (VERTEMATTI, 2004).

Os geossintéticos surgiram com o geotêxtil tecido na década de 1960 nos Países Baixos. Porém, sua aplicação efetiva em obras de engenharia iniciou-se em meados de 1970, com o início da fabricação de geotêxteis não tecidos agulhados. No Brasil, a utilização destes materiais iniciou-se em meados da década de 1980. Assim sendo, o uso destes materiais em obras de engenharia ainda é recente, sendo necessários maiores estudos para a compreensão total do seu comportamento e durabilidade, principalmente frente a fatores adversos (LOPES; LOPES, 2010).

A durabilidade pode ser entendida como a capacidade do geossintético de manter suas propriedades requeridas e especificadas em projeto para seu tempo de vida de serviço (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012). Nesse contexto, a durabilidade engloba a

ocorrência de mudanças a nível micro e macroestrutural. O primeiro envolve mudanças nas moléculas dos polímeros constituintes, e o segundo abrange alterações em suas propriedades físicas e mecânicas.

A durabilidade depende de vários fatores, mas, principalmente, do ambiente a que estes materiais serão expostos ao longo do tempo. A exposição dos geossintéticos à radiação solar, fundamentalmente à parcela referente ao ultravioleta (UV), é considerada uma das principais causas de sua degradação quando expostos a intempéries, sendo esta situação agravada pela temperatura, umidade atmosférica e choques térmicos ocasionados por chuvas (LOPES; LOPES, 2010).

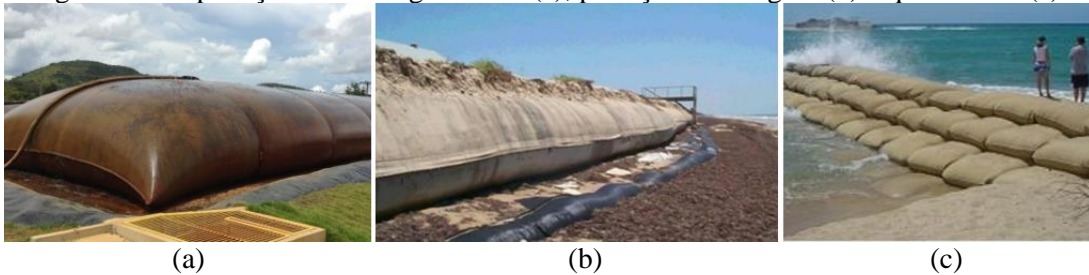
A ponderação da resistência à tração com o tempo e aplicação de geossintéticos em geral e, conseqüentemente, análise de sua durabilidade, pode ser realizada por meio de ensaios laboratoriais acelerados, os quais simulam fatores em que os geossintéticos podem ser expostos desde seu manuseio em estoque, instalação e exposição; ou por meio de exposição em campo (URASHIMA; URASHIMA; GUIMARÃES, 2018). Para a primeira opção, tem-se a vantagem da otimização do tempo de realização dos ensaios. Porém, os resultados obtidos envolvem aproximações, já que não é possível a reprodução fiel de todas as variáveis envolvidas no campo. Para a segunda opção, tem-se a desvantagem do longo tempo de exposição necessário, porém, todas as variáveis podem ser analisadas para o local, apresentando resultados mais próximos da realidade. Neste sentido, para o referido trabalho, escolheu-se a análise do tempo de serviço do material exposto em campo (URASHIMA et al., 2019).

Uma das abordagens de formulação da dependência das propriedades mecânicas de materiais com matriz polimérica, com relação ao tempo, é o acúmulo de danos, considerando a sinergia dos fatores atuantes sobre estes materiais que pode levar desde ao envelhecimento até à degradação do material, sendo esta última situação um estágio crítico.

## **1.2 Justificativa**

Geotêxteis tecidos podem ter diversas aplicações nas quais ficam expostos às intempéries, tais como em desaguamento, proteção de margens e quebra mar (FIGURA 1).

Figura 1.1 - Aplicações em desaguamento (a), proteção de margem (b) e quebra mar (c).



Fontes: Lima (2016), Greenwood; Schroeder; Voskamp (2012).

Observa-se que, nas obras supracitadas, o geossintético fica exposto às intempéries locais como chuva, sol, umidade, entre outras. Estas podem iniciar o processo de envelhecimento do material, culminando na sua degradação e interferindo negativamente no seu tempo de vida de serviço.

Sendo assim, baseando-se na função do material (temporária ou permanente) e no ambiente que estará exposto, a vida de serviço pode ser projetada para cinco, cem, ou mais anos. Nesse contexto, considerando a recente história do emprego destes materiais e as consequências que a ocorrência de falhas pode causar, é importante estudar e prever sua durabilidade considerando as situações as quais será submetido durante sua vida de serviço (ISO TS, 2008).

### 1.3 Objetivo

Considerando a importância da durabilidade na estimativa do tempo de vida de serviço de um geossintético, bem como as dificuldades atualmente encontradas para realizar esta previsão, o presente trabalho propõe avaliar a durabilidade de geotêxteis tecido de polipropileno em campo por meio da submissão destes às intempéries. Os resultados obtidos serão avaliados empregando ferramentas estatísticas e utilizados para validação de uma modelagem que considera o acúmulo de danos em geotêxteis expostos às intempéries ao longo do tempo.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

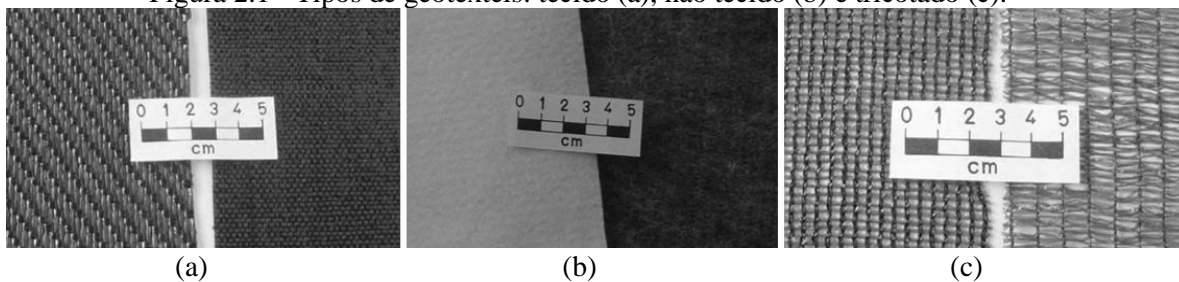
### 2.1 Geossintéticos

O termo *geossintéticos* abrange uma variada gama de produtos, alguns destes produtos são descritos a seguir.

#### 2.1.1 Geotêxtil

É caracterizado pelo seu formato planar, por sua permeabilidade e flexibilidade, sendo o tipo de geossintético que exerce o maior número de funções. Estes podem ser classificados, tomando como base o processo de fabricação, em tecido, não tecido e tricotado (FIGURA 2.1) (SHUKLA; YIN, 2006).

Figura 2.1 - Tipos de geotêxteis: tecido (a), não tecido (b) e tricotado (c).



Fonte: Shukla; Yin (2006).

O geotêxtil tecido é confeccionado por entrelaçamento de fitas (extrudidas ou cortadas), fios de tiras, monofilamentos ou multifilamentos, com um ângulo reto entre si. Nesse contexto, considerando também a utilização de teares mecânicos para a fabricação, a distribuição de poros da estrutura é relativamente constante. (SHUKLA; YIN, 2006; LOPES; LOPES, 2010).

O geotêxtil não tecido é um produto confeccionado por ligação de monofilamentos contínuos ou de fibras cortadas. Estes são dispostos, com orientação direcional ou aleatória, em uma malha solta. A ligação destes elementos constituintes pode ser realizada por meio mecânico (geotêxteis não tecido agulhados), químico (geotêxteis não tecido ligados quimicamente) ou térmico (geotêxteis não tecido termossoldados) (LOPES; LOPES, 2010).

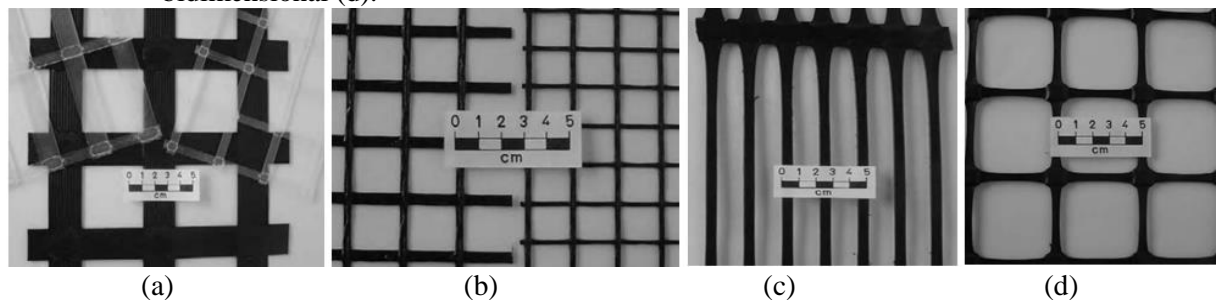
Já o geotêxtil do tipo tricotado é obtido pelo entrelaçamento de fios com o auxílio de uma máquina de tricotar, ao invés do tear de tecelagem. É pouco procurado no mercado devido às grandes deformações sofridas com a aplicação de cargas (SHUKLA; YIN, 2006; LOPES; LOPES, 2010).

### 2.1.2 Produto correlato aos geotêxteis

O produto correlato aos geotêxteis é um material plano, permeável, polimérico (sintético ou natural), utilizado em contato com o solo e/ou outros materiais em aplicações da engenharia geotécnica e civil, o qual não está em conformidade com a definição de um geotêxtil, tais como a geogrelha, georrede, geomanta e outros.

A geogrelha (FIGURA 2.2) é um produto polimérico com configuração de malha aberta planar, constituído por elementos de tração completamente conectados, que podem ser unidos por extrusão, solda ou entrelaçamento (*interlooping*), e cujas aberturas são maiores que os elementos constituintes (ABNT, 2018). Sua principal função é o de reforço e podem ser classificadas, em função do processo de fabricação, em: extrudada, tecida ou ligada (ISO TS, 2008; SHUKLA; YIN, 2006).

Figura 2.2 - Tipos de geogrelhas: ligada (a), tecida (b), extrudada unidirecional (c), extrudada bidimensional (d).



Fonte: Shukla; Yin (2006).

A georrede (FIGURA 2.3-a) é produto polimérico plano que consiste em uma rede de nervuras com ângulos variados. Seu conceito é muito próximo ao das geogrelhas, porém, sua principal função é a drenagem (SHUKLA; YIN, 2006).

A geomanta (FIGURA 2.3-b) apresenta estrutura tridimensional permeável (sintéticos ou naturais), interligados mecanicamente e/ou termicamente, e/ou quimicamente, e/ou outra forma (ABNT, 2018). Sua principal função é o controle de erosão.

A geocélula (FIGURA 2.3-c) é um produto tridimensional polimérico constituído por geomembranas ou geotêxteis ligados em uma estrutura em formato de favo de mel. Tem como principal função o reforço e controle de erosões (SHUKLA; YIN, 2006).

### 2.1.3 Geocompostos

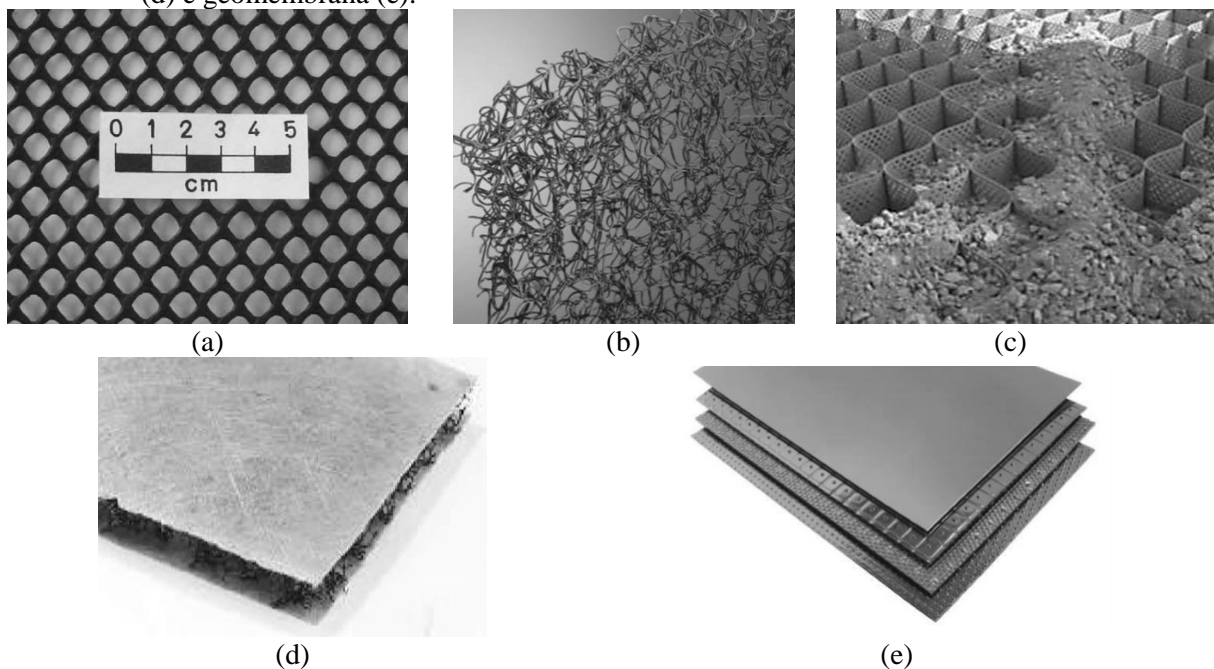
São materiais formados pela junção de pelo menos dois geossintéticos ou, pelo menos, um geossintético e outro material. Quando associados, estes exercem suas funções com maior

eficiência do que individualmente e são classificados conforme a função que irão desempenhar. Como exemplo de geocompostos tem-se o geocomposto bentonítico, de drenagem e de reforço (BARBOSA, 2011; LOPES; LOPES, 2010). A Figura 2.3-d mostra um exemplo de geocomposto formado pela combinação de geotêxtil não tecido e geomanta.

#### 2.1.4 Geomembranas

São materiais poliméricos, de permeabilidade extremamente baixa, que tem como principal função a separação e o controle da migração de fluídos. Podem ser obtidas por extrusão, espalhamento superficial ou calandragem. A depender do processo de fabricação, sua textura, espessura e flexibilidade podem variar. (SHUKLA; YIN, 2006; LOPES; LOPES, 2010). A Figura 2.3-e apresenta alguns tipos de geomembranas.

Figura 2.3 - Produto correlato aos geotêxteis: georrede (a), geomanta (b), geocélula (c), geocomposto (d) e geomembrana (e).



Fontes: Shukla; Yin (2006), Greenwood; Schroeder; Voskamp (2012).

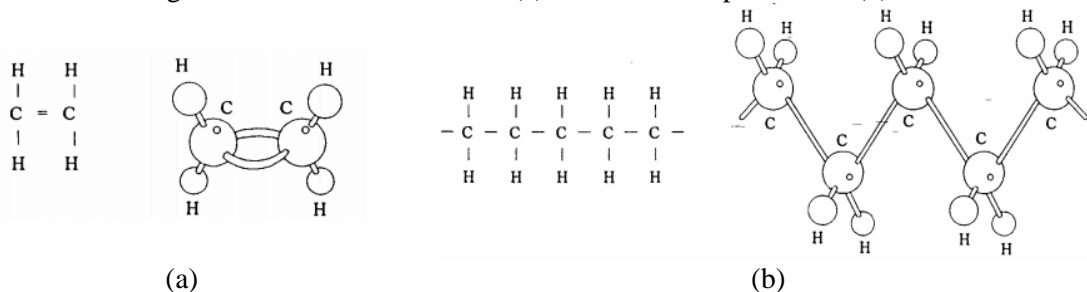
#### 2.2 Polímeros constituintes dos geossintéticos

Conceitualmente, são formados pela repetição de monômeros (pequenas unidades iguais ou quimicamente idênticas), que juntas constituem as cadeias poliméricas, podendo ter origem sintética ou natural (CARNEIRO, 2009). A Figura 2.4 apresenta um exemplo de monômero e a cadeia polimérica formada pela junção destes.

A base polimérica tem grande influência no comportamento e nas propriedades dos geossintéticos, uma vez que quanto maior o peso molecular do polímero (peso molecular do

monômero *versus* n° de vezes que se repetem), maior será a rigidez e a resistência à tração, ao impacto, ao calor e química. Além disso, concomitantemente, ocorre uma redução da fluência e trabalhabilidade, podendo ter influências sobre a durabilidade (CARNEIRO, 2009).

Figura 2.4 - Monômero etileno (a) e molécula de polietileno (b).



Fonte: Paula (2003).

É importante ressaltar a diferença de polímeros e plásticos. Polímeros são materiais puros obtidos pela polimerização. Quando ocorre o incremento de aditivos em sua composição, os polímeros passam a ser chamados de plásticos (LOPES; LOPES, 2010).

Os plásticos podem ser divididos em: termoplásticos e termorrígidos. Os termoplásticos possuem basicamente a capacidade de amolecer com o aumento da temperatura e endurecer com o resfriamento, sendo estes os mais utilizados na produção dos geossintéticos (MILAGRES, 2016).

Nesse contexto, os termoplásticos podem ser divididos em dois grandes grupos, tomando como base a maneira com que ocorre a organização da estrutura molecular, ou seja, a forma com que a cadeia polimérica está arranjada: amorfos (estrutura desordenada) e semi-cristalinos (estrutura molecular mais organizada) (MILAGRES, 2016).

O grau de organização da estrutura molecular também é determinante no comportamento dos polímeros e, conseqüentemente, dos geossintéticos. Quanto mais organizada for a estrutura, maior a resistência à tração e a durabilidade frente a fatores ambientais (ISO TS, 2008).

Segundo Shukla e Yin (2006) os polímeros de base mais utilizados na produção de geossintéticos são o poliéster, em particular o polietileno tereftalato (PET), polipropilenos (PP), polietilenos (PE) – (polietilenos de muita baixa densidade, PEMBD, polietilenos de média densidade, PEMD, polietilenos de alta densidade, PEAD, polietilenos clorinados, CPE, polietilenos clorossulfunados, PECS), poliamidas (PA), policloreto de vinilo (PVC), entre outros.

Dentre essas bases poliméricas, o polipropileno é o mais empregado (LOPES; LOPES, 2010) e por essa razão é a base polimérica do geossintético estudado na pesquisa. O Quadro

2.1 mostra os tipos de geossintéticos possíveis de serem fabricados a partir dos polímeros citados.

Quadro 2.1 - Polímeros bases de geossintéticos.

<b>Geossintéticos</b>	<b>Matérias-primas</b>
Geotextêis	PP, PET, PA, PE
Geogrelhas	PEAD, PET, PP
Georredes	PEMD, PEAD
Geomembranas	PE, PVC, CPE, PECS

Fonte: Adaptado de Shukla (2006).

Existem vários fatores ambientais que afetam a durabilidade dos polímeros. Dentre eles destacam-se os fatores atmosféricos, tais como a componente ultravioleta da radiação solar, calor, oxigênio e umidade, e os fatores existentes no próprio solo. O Quadro 2.2 apresenta os principais fatores que afetam a durabilidade dos polímeros mais empregados na fabricação dos geossintéticos (JOHN, 1987).

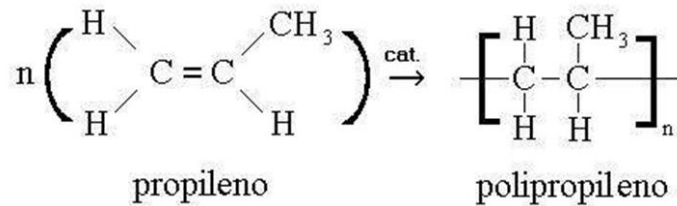
Quadro 2.2 - Nível de resistência dos polímeros frente a agentes de degradação.

<b>Fatores de degradação</b>	<b>PP</b>	<b>PET</b>	<b>PE</b>	<b>PA</b>
Luz ultravioleta (não estabilizado)	Médio	Alto	Baixo	Médio
Luz ultravioleta (estabilizado)	Alto	Alto	Alto	Médio
Meio Alcalino	Alto	Baixo	Alto	Alto
Meio Ácido	Alto	Baixo	Alto	Baixo
Meio Salino	Alto	Alto	Alto	Alto
Detergentes	Alto	Alto	Alto	Alto
Calor, seco (até 100°C)	Médio	Alto	Baixo	Médio
Vapor (até 100°C)	Baixo	Baixo	Baixo	Médio
Hidrólise	Alto	Alto	Alto	Alto
Microrganismos	Alto	Alto	Alto	Médio
Deformação	Baixo	Alto	Baixo	Médio

Fonte: Adaptado de John (1987).

O polipropileno é um polímero semi-cristalino que é sintetizado pela polimerização em cadeia do gás propileno (ISO TS, 2008). Essa sintetização é resumida pela Figura 2.5.

Figura 2.5 - Resumo da sintetização do gás propileno.



Fonte: Almeida (2010).

O carbono terciário que compõe a estrutura do polipropileno é sensível à oxidação, assim sendo, são incrementados aditivos em sua composição para evitar este processo e ainda melhorar a durabilidade do material e sua estabilidade frente à radiação ultravioleta (UV) (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012).

Os aditivos comumente utilizados são estabilizantes térmicos, negro de fumo (*carbono black*) e antioxidantes como o HALS - *hindered amine light stabilisers* ou simplesmente aminas estericamente bloqueadas. Porém, a concentração e combinação desses devem ser avaliadas levando em consideração os mecanismos de degradação do polímero em questão, sua forma de processamento, as dimensões da peça e suas condições de uso, visto que, geralmente, o aditivo se transforma em outro composto químico depois de ser consumido e sofrer mudanças devido ao processo de estabilização. Além disso, altas concentrações podem produzir pró-degradantes (MOL, 2014) conforme apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Esquema da variação do efeito do aditivo em função da sua concentração.



Fonte: Adaptado de Paoli (2008).

### 2.3 Propriedades dos geossintéticos

Para a especificação de uma obra que empregue geossintéticos, todos os aspectos referentes à escolha e à instalação destes devem ser considerados. Para tanto, deve-se analisar as condições de contorno e as solicitações as quais o material ficará submetido desde o armazenamento até o final da sua vida de serviço, assim como definir as suas funções: principal e secundárias.

Após esta etapa preliminar, torna-se viável escolher o método de dimensionamento mais apropriado e determinar as propriedades requeridas dos geossintéticos. Estas propriedades servirão de base para a especificação dos produtos a serem aplicados, devendo ser garantidas durante todo o período de vida de serviço (VIDAL; FABRIN; MONTEZ, 1999).

A especificação do produto no projeto básico deve apresentar as propriedades requeridas pelos critérios de dimensionamento adotados, as solicitações físico-químicas dos meios adjacentes, as condições ambientes e de instalação e o tempo de duração de cada solicitação.

Fatores intervenientes tanto no processo de execução da obra como durante sua vida de serviço podem alterar as propriedades índice ou características dos produtos. Os valores índice ou característicos têm por objetivo a caracterização dos produtos e não consideram as condições específicas da obra.

Como em outros produtos da engenharia, as condições de instalação e as solicitações mecânicas e ambientais durante a vida de serviço, impõem reduções às propriedades características dos produtos, e devem ser consideradas para estabelecer as propriedades funcionais.

Deste modo, um projeto com geossintéticos deve considerar as propriedades requeridas, funcional e índice (característica). As propriedades requeridas são calculadas no projeto para efeito de dimensionamento. As propriedades funcionais são parâmetros de comportamento do material sob as condições de utilização (por exemplo, análise da durabilidade em determinadas condições de uso). Já as propriedades índices (físicas, mecânicas, hidráulicas) são características de um geossintético, determinadas em ensaios que não levam em consideração as solicitações de campo.

As propriedades que um geossintético deve ter para determinada aplicação, devem ser definidas tomando como base o desempenho que se espera ao longo do tempo de vida de serviço, além das operações de transporte, armazenamento e instalação (PAULA, 2003).

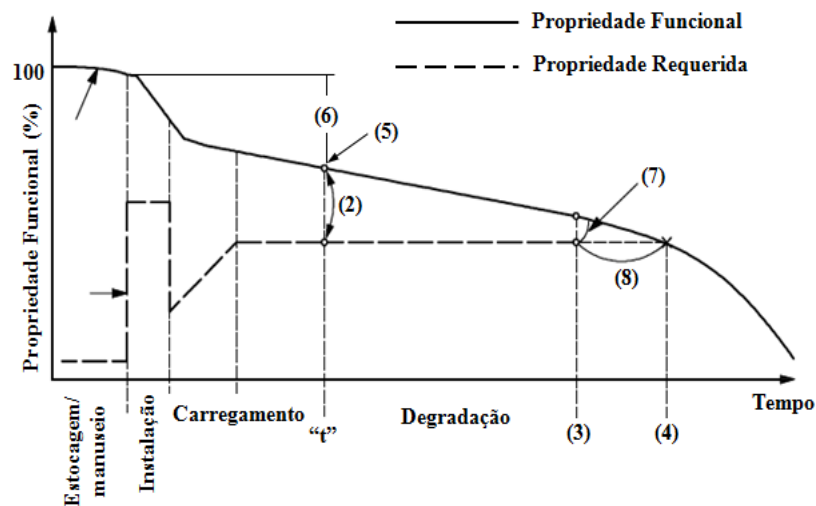
A norma ISO TS 13434 (ISO TS, 2008) fornece diretrizes para a avaliação da durabilidade dos geossintéticos, apresentando o conceito de fator de redução. Este parâmetro representa significativamente a durabilidade, pois considera as reduções nas propriedades do geossintético advindas da instalação e das solicitações durante a vida útil da obra.

Ainda, essa mesma norma estabelece o termo “vida de serviço requerida em projeto” para o tempo durante o qual o material deve apresentar propriedade funcional superior à propriedade requerida, como indicado no Ponto 3 da Figura 2.7.

A durabilidade dos geossintéticos está diretamente relacionada a sua estrutura física, constituição polimérica, condições de instalação e contato com elementos próprios do meio. Assim, torna-se importante ponderar e compreender os principais fatores e mecanismos de degradação dos geossintéticos em suas diversas aplicações.

Desta forma, os geossintéticos são projetados para funções específicas, porém, essas não podem ser exercidas de maneira efetiva se este material não possuir as propriedades exigidas para tal (MILAGRES, 2016). Por exemplo, a função de reforço está diretamente ligada às propriedades mecânicas, a função de filtro e drenagem, às propriedades hidráulicas (SARSBY, 2007).

Figura 2.7 - Propriedades dos geossintéticos desde seu armazenamento até seu uso final.



- (1) Propriedade Índice
- (2) Fator de Segurança no tempo "t"
- (3) Vida de Serviço Requerida no projeto
- (4) Vida de Serviço Prevista para as condições de projeto
- (5) Propriedade Funcional no tempo "t"
- (6) Redução da propriedade no tempo "t"
- (7) Segurança da propriedade ao final da Vida de Serviço Requerida
- (8) Segurança no tempo de falha ao final da Vida de Serviço Requerida

Fonte: Adaptada de ISO TS 13434 (ISO TS, 2008).

### 2.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas (massa por unidade de área, densidade relativa e espessura dos geossintéticos) estão diretamente relacionadas com a composição do geossintético (SARSBY, 2007). Assim sendo, são diretamente influenciadas pela temperatura e umidade do ambiente (CARNEIRO, 2009).



### **2.3.1.1 Massa por unidade de área**

É expressa por  $\text{g/m}^2$  e representa a uniformidade e qualidade de um geossintético (MILAGRES, 2016). A massa por unidade de área é normatizada pela NBR ISO 9864 (ABNT, 2013a), a qual preconiza que sejam cortados dez corpos de prova, quadrados ou circulares, do material estudado, com área conhecida de  $100 \text{ cm}^2$  cada. A partir da pesagem de cada corpo de prova, é possível determinar esta propriedade.

### **2.3.1.2 Densidade relativa**

É a relação entre a massa por volume do material em questão e da água em  $4^\circ\text{C}$ , ou seja, é uma medida adimensional. Esta propriedade tem grande importância para geossintéticos que serão aplicados em obras onde ficarão submersos, já que se esta resultar em valores inferiores a um, estes materiais, provavelmente, irão flutuar (CARNEIRO, 2009).

As normas D792-13 (ASTM, 2013) e D1505-18 (ASTM, 2018) apresentam recomendações de como realizar o ensaio para determinar esta propriedade.

### **2.3.1.3 Espessura**

Conceitualmente é a distância, expressa em milímetros entre as superfícies superior e inferior do geossintético, medida sob determinada pressão, que é preconizada por normas em função do tipo de geossintético, tais como a NBR ISO 9863-1 (ABNT, 2013b), D5199-01 (ASTM, 2001) e D1777-96 (ASTM, 2019a).

A espessura pode influenciar em outras propriedades, como por exemplo nas propriedades mecânicas destes materiais, uma vez que quanto maior a espessura, maior serão os valores das propriedades mecânicas em geral. Para os geotêxteis, a espessura costuma variar de 0,25 a 7,5 mm (CARNEIRO, 2009).

## **2.3.2 Propriedades hidráulicas**

Essas propriedades são diretamente influenciadas pelo processo de fabricação do material (CARNEIRO, 2009) e estão fortemente relacionadas com as funções de filtro e drenagem dos geossintéticos (SHUKLA; YIN, 2006). Podem ser divididas em abertura de filtração, condutividade hidráulica, transmissividade e permissividade (BARBOSA, 2011).

### 2.3.3 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são fundamentais para geossintéticos que irão desempenhar um papel estrutural na obra (SHUKLA, 2016) e podem ser divididas em: resistência à tração, resistência ao puncionamento e comportamento à fluência (BARBOSA, 2011). Essas propriedades indicam a resistência do material às tensões mobilizadas pelas cargas as quais estará submetido (KOERNER, 2005), que podem ser diretas e ao longo de todo o tempo da vida de serviço, ou devido aos procedimentos de instalação (MARG, 2012).

Tais cargas podem ser subdivididas em pontuais, de rasgamento e distribuídas, que podem gerar esforços de tração ou compressão (LOPES; LOPES, 2010). O tipo de carga que o geossintético estará submetido é diretamente influenciada pela função que este exercerá e com a operação de instalação realizada (MARG, 2012).

Nesse contexto, a importância das propriedades mecânicas está relacionada com o dano que pode vir a ocorrer se houver falhas nas especificações do material (MARG, 2012).

#### 2.3.3.1 Resistência à tração

A determinação da resistência à tração de um geossintético é importante principalmente quando este irá exercer a função de reforço (SHUKLA, 2016). Koerner (2005) destaca que independentemente da aplicação esta propriedade é a mais importante no emprego dos geotêxteis.

Existem diversas normas que apresentam recomendações de ensaios. Para os geotêxteis tecidos, as mais utilizadas são a EN ISO 13934-1 (UNE, 2013), NBR ISO 10319 (ABNT, 2013c) e D5035 (ASTM, 2019b). O Quadro 2.3 apresenta uma comparação entre os parâmetros preconizados para realização de ensaios de resistência à tração empregando as normas citadas. Para melhor entendimento dos parâmetros comparados no Quadro 2.3, apresenta-se a Figura 2.8.

Outro fator a ser destacado é a menor variabilidade dos resultados obtidos quando o ensaio é realizado em corpos de prova cortados na direção longitudinal do geotêxtil tecido, se comparado à direção transversal (FIGURA 2.9). Tal fato ocorre devido ao processo de fabricação, onde os fios dispostos na longitudinal permanecem os mesmos ao longo de todo o comprimento do rolo de geotêxtil do tipo tecido, enquanto os fios transversais que percorrem a largura do rolo de geotêxtil tecido e são alterados conforme a necessidade para complementar a trama, o que aumenta a variabilidade das propriedades mecânicas no sentido transversal (MILAGRES, 2016).

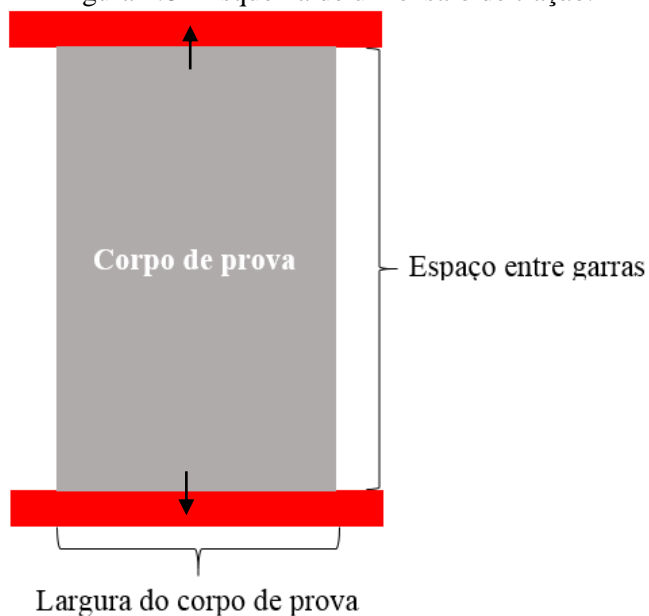
Quadro 2.3 - Comparação entre as metodologias (parâmetros) de ensaio de resistência à tração.

Parâmetro	Norma		
	EN ISO 13934-1	NBR ISO 10319	ASTM D5035-2011
Velocidade	100 mm/min	20 mm/min	300 mm/min
Espaço entre garras	200 mm	100 mm	75 mm
Largura do CP*	50 mm	200 mm	50 mm

Fonte: Do autor.

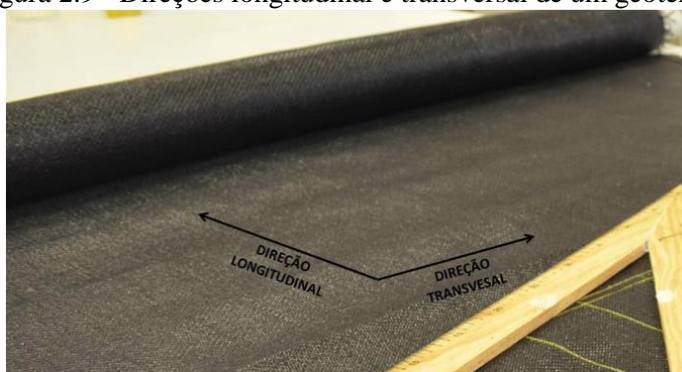
\*CP: Corpo de prova.

Figura 2.8 - Esquema de um ensaio de tração.



Fonte: Do autor.

Figura 2.9 - Direções longitudinal e transversal de um geotêxtil.

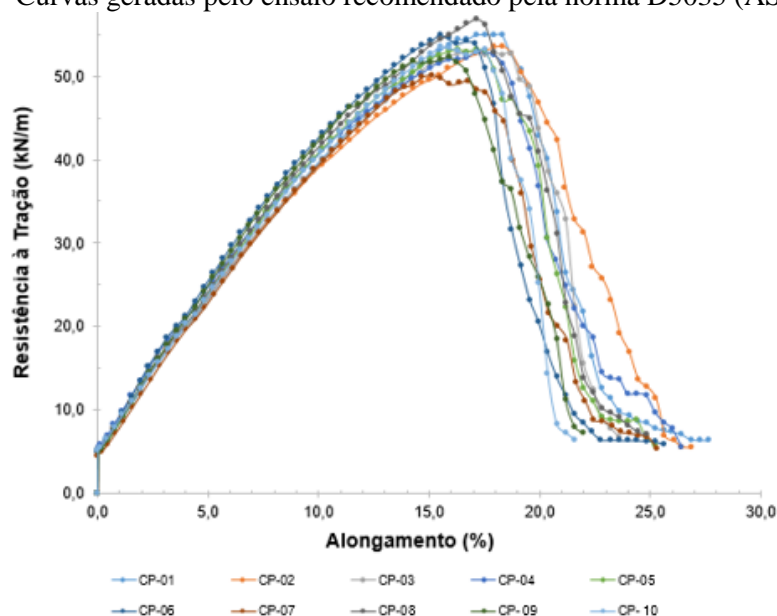


Fonte: Do autor.

Com a realização deste ensaio de tração, gera-se uma curva de carga (kN/m) por deformação (%). Por meio desta, é possível obter, entre outros dados, a resistência à tração (carga máxima suportada pelo material) e a deformação na ruptura (SHUKLA, 2016). A Figura 2.10 mostra um exemplo de curvas geradas por meio desta metodologia de ensaio.

Esta resistência e deformação são diretamente influenciadas pelas propriedades dos plásticos constituintes, a estrutura do geossintético estudado, a direção da força aplicada, a temperatura, entre outros fatores.

Figura 2.10 - Curvas geradas pelo ensaio recomendado pela norma D5035 (ASTM, 2011a).



Fonte: Do autor.

### 2.3.3.2 Resistência ao puncionamento

A resistência ao puncionamento, geralmente, é avaliada para geossintéticos que irão exercer a função de separação. O contato deste material com as partículas pode gerar uma carga concentrada (LOPES; LOPES, 2010), por exemplo, em uma situação em que este for instalado sobre uma superfície irregular com solo compactado acima (MARG, 2012).

### 2.3.3.3 Comportamento à fluência

A depender da aplicação e da forma de instalação do geossintético, este pode estar submetido a cargas de fluência, que está relacionada com a deformação sofrida por um material devido a aplicação de cargas constantes ao longo do tempo. Para um geossintético esta propriedade está diretamente relacionada com o tipo de plástico constituinte e a temperatura (CARNEIRO, 2009).

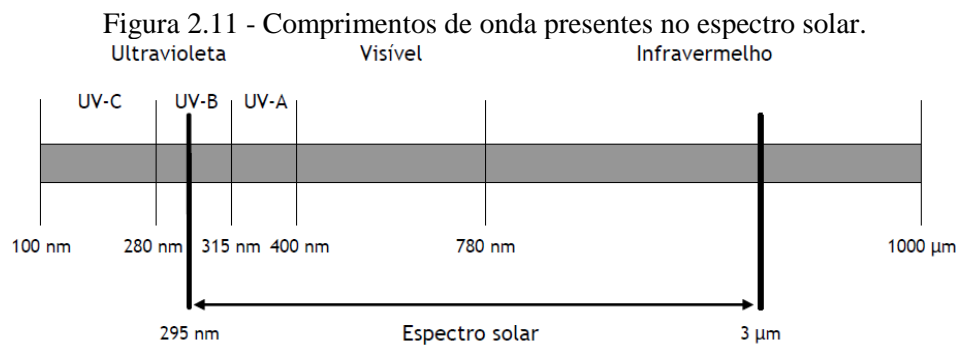
Durante a aplicação de carga constante não há alterações significativas na resistência do material, porém, em um dado momento, há o decréscimo súbito desta até atingir o valor da carga aplicada (momento de ruptura) (CARNEIRO, 2009).

### 2.3.4 Propriedades de durabilidade

Essas propriedades estão diretamente relacionadas com o comportamento do material durante seu tempo de vida serviço (SHUKLA, 2016; ISO TS, 2008). Existem diversas propriedades dos geossintéticos relacionadas com a durabilidade, porém, as que valem ser aprofundadas, tomando como base o desenvolvimento desta pesquisa, são: resistência à degradação fotoquímica e à degradação térmica.

#### 2.3.4.1 Resistência à degradação fotoquímica

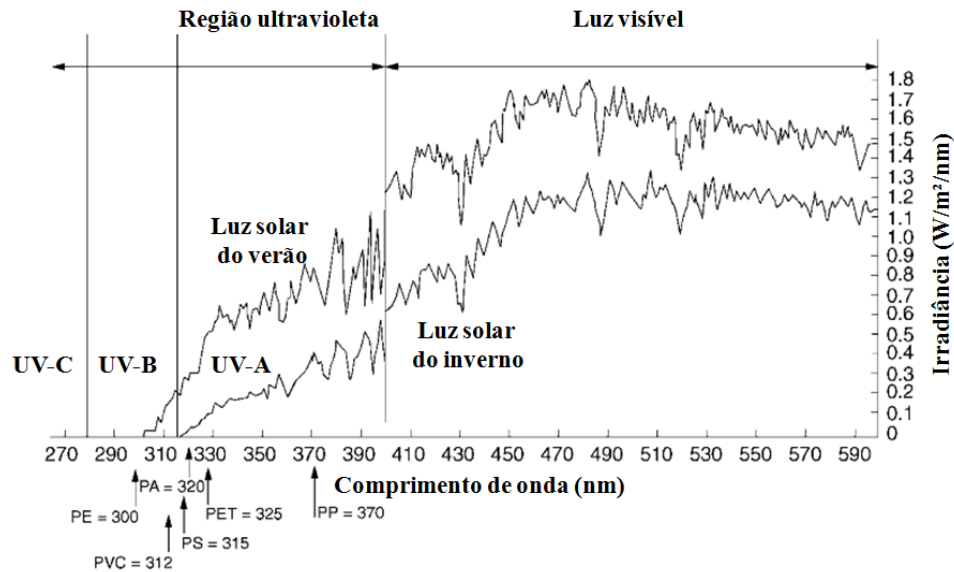
O espectro solar que incide sobre a Terra possui comprimentos de ondas variáveis, sendo o comprimento de onda inversamente proporcional ao nível de energia. Quanto mais energético, maior a degradação sofrida pelo geossintético (CARNEIRO, 2009). A Figura 2.11 apresenta os comprimentos de onda presentes no espectro solar.



Fonte: Carneiro (2009).

Como a radiação ultravioleta é a mais energética do espectro solar, esta possui a capacidade de quebrar as ligações químicas presentes nos plásticos constituintes do geossintético (FIGURA 2.12). As ações da temperatura, umidade, entre outros fatores ambientais, contribuem para este processo (SARSBY, 2007).

Figura 2.12 - Comprimentos de onda da radiação ultravioleta nocivos a materiais poliméricos.



Fonte: Adaptado de Sarsby (2007).

#### 2.3.4.2 Resistência à degradação térmica

Altas temperaturas do material possuem a capacidade de acelerar as reações de degradação dos geossintéticos, ou seja, a quebra de suas cadeias poliméricas.

A temperatura do material é fortemente influenciada pela temperatura atmosférica, umidade, pela sua cor, presença de poeira em sua superfície, presença de orvalho, entre outros fatores.

#### 2.4 Exposição em campo

Para a exposição, a norma ISO 877-1 (ISO, 2009a) recomenda que o material esteja voltado para o Equador, para garantir maior exposição à radiação solar. Além disso, a norma ISO 877-2 (ISO, 2009b) recomenda uma altura do solo e distância de objetos que possam produzir sombreamento maior ou igual a 0,5 m.

Já para o ângulo de exposição, a norma ISO 877-2 (ISO, 2009b) recomenda que este seja similar aquele do local de instalação. No entanto, ângulos entre 5° e 45° com relação à horizontal são frequentemente utilizados para plásticos. Para a escolha de qual ângulo utilizar pode-se tomar como base a latitude do local, se esta for inferior a 20° (ISO, 2009b).

Para o apoio da amostra exposta, segundo a norma ISO 877-1 (ISO, 2009a), pode-se escolher uma tela de arame com bitola entre 16 e 18 mm e abertura de 12 a 13 mm, ou um apoio fechado de material inerte. Porém, é possível que este último tenha interferência na temperatura do geossintético.

A vantagem da exposição com tela aberta é que as amostras estão em contato direto com os fatores intempéricos em ambos os lados, não possuindo interferência na temperatura do material.

A incidência de radiação ultravioleta não é medida pelas estações meteorológicas usuais, assim sendo, é necessário estimá-la a partir da radiação solar global medida por elas. Greenwood, Schroeder e Voskamp (2012) utilizam uma estimativa na faixa de 5 a 10%, tomando como base a média destes valores, tem-se uma estimativa da radiação ultravioleta de 7,5% da radiação solar global, sendo esta adotada na pesquisa.

## **2.5 Análise estatística dos resultados**

Análises realizadas por meio de ferramentas estatísticas viabilizam vários estudos onde é necessário tratar os dados como variável aleatória.

Para o tratamento dos dados obtidos por meio de ensaios laboratoriais foram empregadas ferramentas estatísticas que apresentam uma grande relevância para o planejamento de experimentos, observação e análise de resultados amostrais, bem como na obtenção de conclusões e tomadas decisões baseadas nas ponderações realizadas (TRIOLA, 2008).

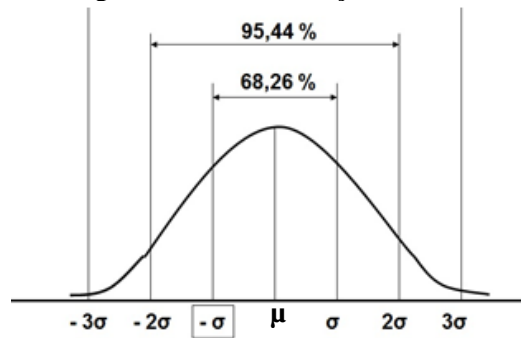
O presente trabalho utiliza ferramentas estatísticas para análise dos dados obtidos por amostragem, permitindo o estudo e retirada de resultados anômalos, aplicação de testes de aderência e construção de intervalos de confiança para uma melhor inferência quanto ao envelhecimento dos corpos de prova.

Os tópicos a seguir apresentam uma descrição sucinta das ferramentas estatísticas utilizadas nesta pesquisa, com objetivo de fornecer informações complementares para uma melhor interpretação dos resultados.

### **2.5.1 Distribuição de probabilidade normal**

Se uma variável aleatória contínua tem uma distribuição com um gráfico simétrico e em forma de sino (FIGURA 2.13), pode-se dizer que ela tem uma distribuição normal ou gaussiana, em que os parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  a representam a média e o desvio padrão populacional, respectivamente (TRIOLA, 2008).

Figura 2.13 - Distribuição normal.



Fonte: Triola, 2008.

A distribuição normal padrão é uma distribuição de probabilidade normal com média  $\mu = 0$ , desvio padrão  $\sigma = 1$ , e área total sob a curva de densidade 1 (TRIOLA, 2008).

Para verificar se os resultados amostrais obtidos em uma investigação laboratorial se comportam segundo uma distribuição normal, realiza-se um teste de aderência. Estes testes baseiam-se em testes de hipóteses, tais como tais como:

- Teste de Kolmogorov-Smirnov;
- Teste Qui-quadrado;
- Teste de Anderson Darling, dentre outros.

No caso de valores obtidos em ensaios de resistência à tração em geotêxteis, a aplicação destes testes de aderência mostra uma boa relação à distribuição normal (GUIMARÃES, 2012).

Em termos estatísticos, uma população é dita como a coleção completa de todos os elementos a serem estudados. Em termos práticos, estuda-se uma parte dos elementos pertencentes à população de interesse (amostra). O estudo amostral é realizado mediante extração de corpos de prova em quantidades estimadas no planejamento experimental, para que possam ser representativos dentro de um nível de significância (TRIOLA, 2008).

Assim sendo, se os dados amostrais são ajustados à distribuição normal, pode-se considerar que a média amostral ( $\bar{x}$ ) é uma boa aproximação para a média populacional ( $\mu$ ) e que o desvio padrão amostral ( $s$ ) é um bom estimador para o desvio padrão populacional ( $\sigma$ ) (TRIOLA, 2008).

### 2.5.2 Intervalo de confiança

Em termos conceituais, um Intervalo de Confiança (IC) ou estimativa intervalar é uma faixa (ou intervalo) de valores usados para se inferir sobre o valor de um parâmetro populacional (TRIOLA, 2008).

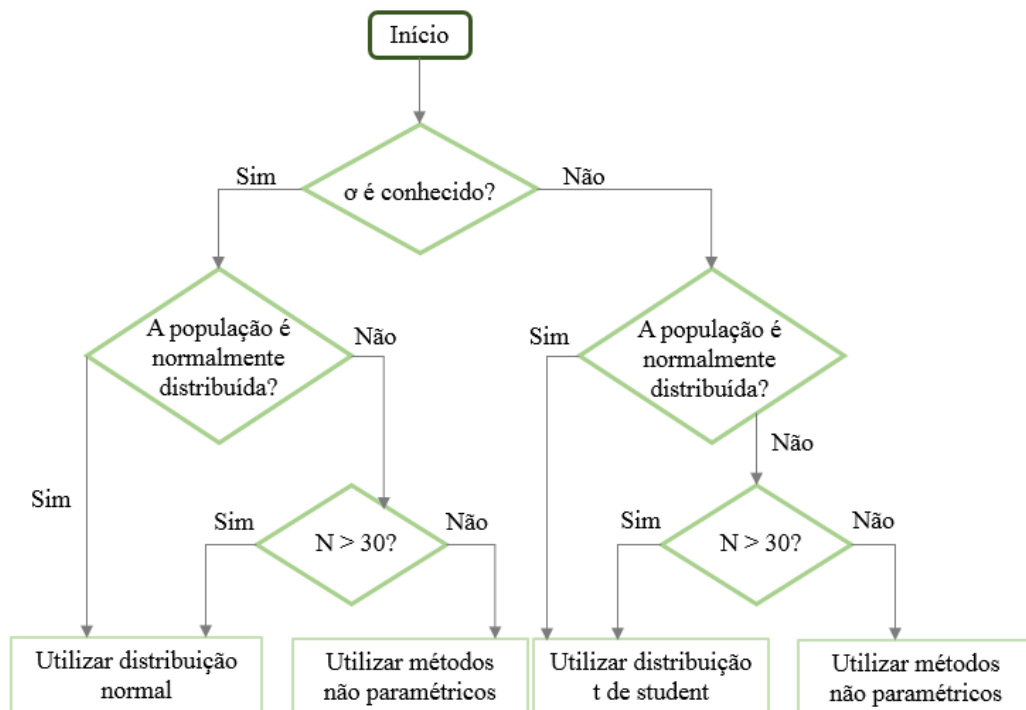


Para tanto, é necessário associar ao IC um nível de confiança, ou seja, a probabilidade  $(1 - \alpha)$  que o intervalo de confiança realmente contém o parâmetro populacional, supondo que o processo de estimação seja repetido muitas vezes. Segundo Triola (2008), o nível de confiança mais comum de escolha é de 95%, ou seja, com nível de significância  $(\alpha)$  igual a 5%.

A construção de intervalos de confiança é interessante para a inferência estatística, pois é a partir deste em conjunto com um estudo amostral que se torna possível estimar, dentro de um nível de confiança, e avaliar qual é a faixa de valores que tem certa probabilidade de conter no seu interior o verdadeiro valor do parâmetro populacional em análise. Então, o intervalo de confiança define os limites superior e inferior do conjunto de valores obtidos da amostragem representativa de uma população. A média amostral  $\bar{x}$  é a melhor estimativa pontual da média populacional  $\mu$ .

Ressalta-se que, para a construção do intervalo de confiança, utiliza-se ou a distribuição normal (Z) ou a distribuição t de Student, dependendo dos parâmetros que compõe a amostra, conforme critérios apresentados na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Critérios para a escolha de qual análise estatística utilizar.



Fonte: Adaptado de Triola (2008).

## 2.6 Modelos matemáticos sobre acúmulo de danos

Alguns modelos matemáticos têm sido apresentados na literatura para avaliar a degradação de materiais poliméricos, submetidos a ensaios de intemperismo em laboratório.

Vale ressaltar a importância na escolha do modelo a ser empregado em função das condições as quais o material foi submetido no ensaio (ASTM G 166 2011b; ASTM G 172 2010).

Exemplos de modelos matemáticos baseados no comportamento da durabilidade de materiais poliméricos são apresentados nas Equações 1, 2 e 3, conforme Maxwell et al (2005).

$$P = P_0 + b \cdot D \quad (1)$$

onde:

$P_0$ : propriedade inicial do material (por exemplo, resistência à tração do material intacto);

D: irradiância UV;

b: constante a ser determinada em função das condições específicas de exposição.

$$P = P_0 + b \cdot D^n \quad (2)$$

onde:

$P_0$ : propriedade inicial do material;

D: irradiância UV;

b e n: constantes.

$$P = P_0 + A \cdot e^D \quad (3)$$

onde:

$P_0$ : propriedade inicial do material;

A: constante;

D: irradiância UV;

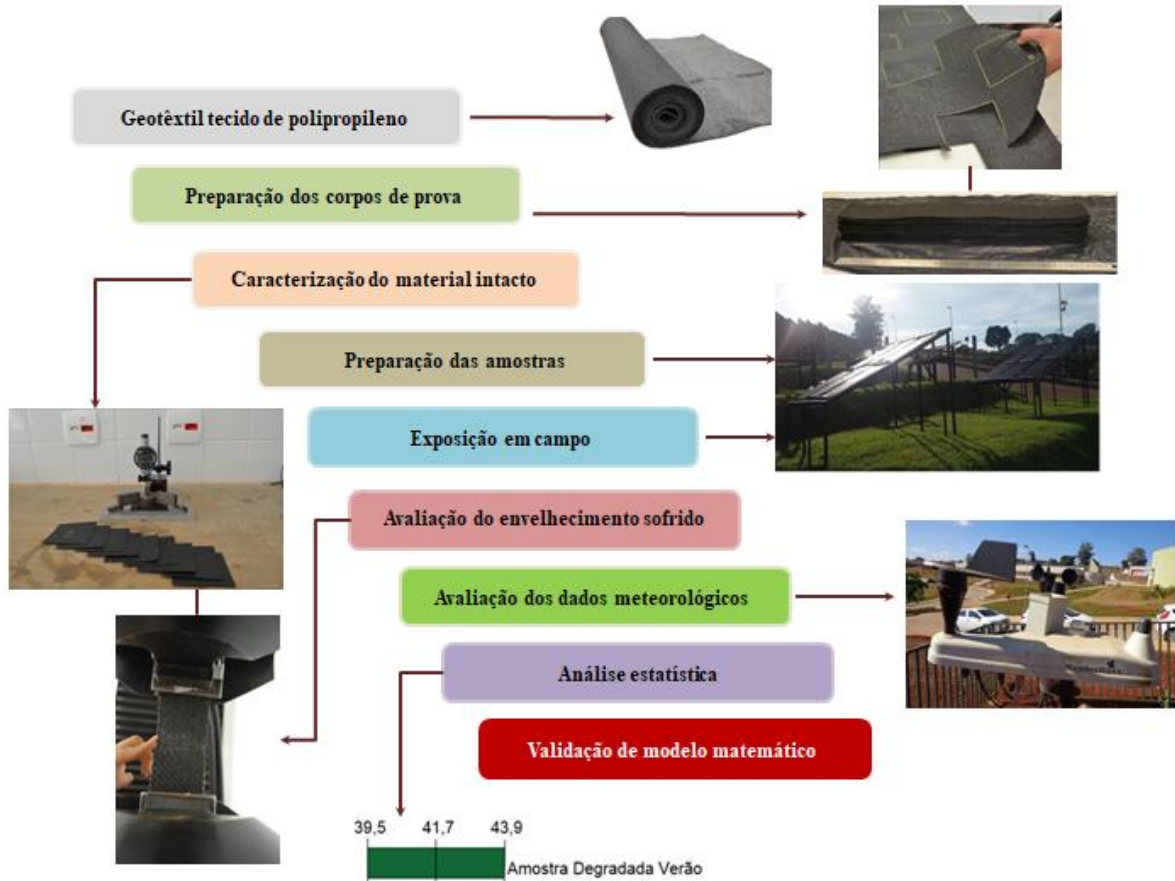
e: número de Euler.

Entretanto, nada foi encontrado na literatura sobre modelos para situações de exposição em campo, até porque esta situação é mais complexa, visto que as variáveis não são controláveis como em ensaios acelerados de laboratório.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho aborda ensaios de avaliação da durabilidade de geotêxteis tecido de polipropileno. A Figura 3.1 apresenta um esquema com a sumarização das principais etapas.

Figura 3.1 - Sumarização das principais etapas da metodologia.



Fonte: Do autor.

Nesta pesquisa, optou-se por realizar a avaliação de danos sofridos no material geotêxtil tecido de polipropileno por meio de exposição em campo, a qual apresenta uma orientação do efeito dos fatores intempéricos sobre o material, pois, para a realização desta são adotados métodos que irão expor o geossintético às condições severas, frequentemente mais danosas que as reais (ISO, 2009a).

#### 3.1 Material empregado na pesquisa

Para realização da pesquisa foram empregados dois tipos de geotêxteis de polipropileno confeccionados para esta pesquisa, ambos similares em relação as suas características físicas e mecânicas, entretanto diferindo no percentual de aditivo contra radiação UV do tipo HALS.

Assim, o material com menor percentual de aditivo de proteção contra radiação UV foi denominado nesta pesquisa de G1, e com maior percentual, denominado de G2, sendo o percentual do G2 duas vezes maior que a do G1 e ambos os percentuais inferiores a 1%.

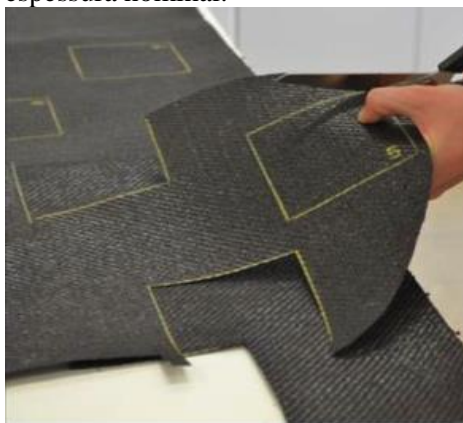
### **3.2 Preparação dos corpos de prova**

Para a caracterização do material estudado foram realizados ensaios de determinação de massa por unidade de área, seguindo a norma NBR ISO 9864 (ABNT, 2013a); de espessura nominal, seguindo a norma NBR ISO 9863-1 (ABNT, 2013b) e de resistência à tração faixa estreita, seguindo a norma D5035 (ASTM, 2011a).

#### **3.2.1 Preparação dos corpos de prova para o ensaio de determinação de massa por unidade de área e espessura nominal**

Para a realização do ensaio de caracterização física de massa por unidade de área e para a determinação da espessura nominal, foi necessário preparar dez corpos de prova do G1 e do G2 com superfícies de dimensões  $100 \pm 1 \text{cm}^2$ , conforme preconiza as normas NBR ISO 9864 (ABNT, 2013a) e NBR ISO 9863-1 (ABNT, 2013b). A Figura 3.2 reapresenta a preparação dos corpos de prova para determinação destes parâmetros físicos.

Figura 3.2 - Preparação dos corpos de prova para os ensaios de massa por unidade de área e determinação da espessura nominal.



Fonte: Do autor.

#### **3.2.2 Preparação dos corpos de prova para o ensaio de resistência à tração faixa estreita**

Nesta pesquisa, adotou-se a metodologia apresentada na norma D5035 (ASTM, 2011a), em detrimento às normas NBR ISO 10319 (ABNT, 2013c) e EN ISO 13934-1 (UNE, 2013), pois esta apresenta o menor tamanho de corpo de prova, viabilizando a extração de maior número de corpos de prova, após ensaios de exposição em campo.

Além disso, é importante ressaltar que no ano de 2019 esta norma foi atualizada, porém, nesta pesquisa, foram utilizadas as recomendações da norma D5035 (ASTM, 2011a), visto que os ensaios tiveram início no ano de 2017.

Para a realização do ensaio de resistência à tração faixa estreita foi necessário obter corpos de prova de dimensões 70x350 mm, segundo preconiza a norma D5035 (ASTM, 2011a). Estes foram cortados seguindo a direção longitudinal do material, com o objetivo de obter menor variabilidade dos resultados.

Posteriormente, para melhores resultados, essas amostras tiveram suas laterais cortadas à quente até que se chegasse na dimensão 50x350 mm. A Figura 3.3 mostra o equipamento utilizado para o corte à quente.

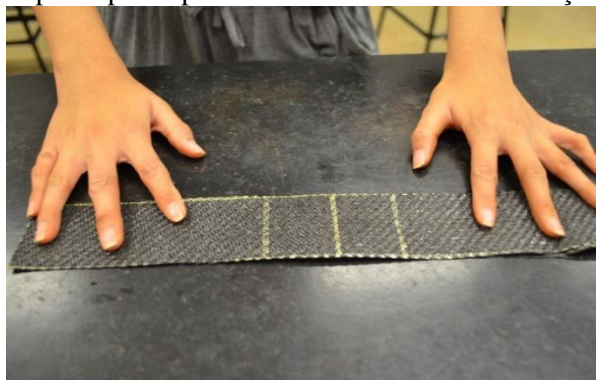
Figura 3.3 - Equipamento utilizado para o corte à quente.



Fonte: Do autor.

A Figura 3.4 mostra o corpo de prova após o corte à quente. Observa-se a marcação central do material, com o objetivo de delimitar o espaçamento de 75 mm entre garras, segundo a norma D5035 (ASTM, 2011a), e o centro do corpo de prova (região com maior probabilidade de ruptura).

Figura 3.4 - Corpo de prova para o ensaio de resistência à tração faixa estreita.



Fonte: Do autor.

### 3.3 Caracterização do material intacto

#### 3.3.1 Ensaio de caracterização física de massa por unidade de área

Primeiramente, realizou-se o ensaio de caracterização física de massa por unidade de área. A propriedade massa por unidade de área é determinada pela Equação 4.

$$\mu A = \frac{m}{A} \quad (4)$$

onde:

$\mu A$ : massa por unidade de área;

$m$ : massa de cada corpo de prova medida em balança analítica de precisão de 0,01g;

$A$ : área superficial.

As médias dos valores obtidos pelos dez corpos de prova com desvio padrão e coeficiente de variação expressam o resultado desse ensaio.

#### 3.3.2 Determinação da espessura nominal

O parâmetro físico de espessura nominal é obtido seguindo a NBR ISO 9863-1 (ABNT, 2013b). Primeiramente, aplica-se uma pressão de 2 kPa em corpos de prova de  $100 \pm 1 \text{ cm}^2$  do material estudado. A espessura deste é então medida com o auxílio de um relógio comparador com precisão de 1% (FIGURA 3.5).

Figura 3.5 - Equipamento utilizado para a determinação da espessura nominal.



Fonte: Do autor.

#### 3.3.3 Ensaio de resistência à tração faixa estreita

Os ensaios foram realizados em uma Máquina Universal para Ensaio de Tração e Compressão (FIGURA 3.6) instalada no Laboratório de Mecatrônica do Centro Federal de

Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET), Campus Varginha, com incerteza na calibração de 0,1%. Seguiu-se a preconização da norma D5035 (ASTM, 2011a).

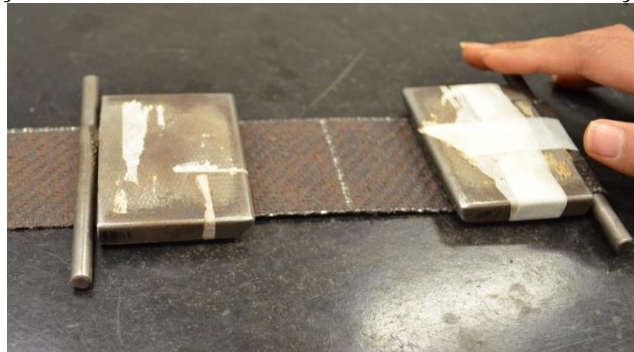
Figura 3.6 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência à tração faixa estreita.



Fonte: Do autor.

Na realização dos ensaios, como a máquina utilizada não era específica para ensaios de geossintéticos, para evitar o deslizamento dos corpos de prova quando tracionados, lançou-se mão de peças metálicas representadas na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Peças metálicas utilizadas no ensaio de resistência à tração faixa estreita.



Fonte: Do autor.

Observa-se a utilização conjunta de pinos metálicos, que foram empregados para favorecer a distribuição dos esforços, evitando assim o corte do material devido à aplicação da carga nas garras.

### 3.4 Exposição em campo

#### 3.4.1 Preparação das amostras

Para a realização dos ensaios de exposição em campo foi necessário cortar, para primeira estação climática de exposição, doze corpos de prova com dimensões superficiais de 110 x 450 mm, sendo seis do G1 e seis do G2 (FIGURA 3.8).

Figura 3.8 - Esquema representativo das amostras de geotêxteis expostos.



Fonte: Do autor.

#### 3.4.2 Ensaio de exposição

Para a realização deste ensaio foram utilizados pórticos de aço galvanizado com telas metálicas de bitola de 16 mm e abertura de 13 mm (ISO, 2009a) localizados no CEFET de Varginha/MG (Latitude: 21° 33' 05'' S), voltados para o equador (ISO, 2009a) e distantes de elementos que provocam sombra (ISO, 2009b). A Figura 3.9 mostra esta área de exposição.

Estes pórticos possuem inclinação de aproximadamente 22° com a horizontal (FIGURA 3.10), seguindo a latitude do local. Optou-se por seguir esta recomendação da norma ISO 877-2 (ISO, 2009b), já que a latitude da área de exposição é muito próxima a 20°. Além disso, eles estão a 0,5 m de altura do solo (ISO, 2009b).

Foram realizados dois ciclos de exposição. O primeiro iniciou-se no dia 21 de dezembro de 2016 (começo do verão) e encerrou-se dia 20 de dezembro de 2017 (fim da primavera). O segundo no dia 21 de junho de 2018 (início do inverno) até 20 de junho de 2019 (fim do outono).



Figura 3.9 - Área de exposição.



Fonte: GOOGLE MAPS (2019).

Figura 3.10 - Pórticos utilizados para a exposição.



Fonte: Do autor.

A Figura 3.11 mostra a fixação dos geotêxteis nos pórticos.

Figura 3.11 - Fixação dos geotêxteis nos pórticos.



Fonte: Do autor.

Observa-se que as exposições seguiram as estações climáticas de um ano. Assim sendo, os geotêxteis G1 e G2 foram expostos às intempéries de cada estação climática individualmente e de forma acumulada. O Quadro 3.1 apresenta os períodos de exposição para cada ciclo.

Quadro 3.1 - Períodos de exposição para cada ciclo.

Ciclo	Períodos de exposição				
	01	Individual	V*	O**	I***
Acumulado		V+O		V+O+I	V+O+I+P
02	Individual	I	P	V	O
	Acumulado	I+P		I+P+V	I+P+V+O

Fonte: Do autor.

\*Verão, \*\*Outono, \*\*\*Inverno, \*\*\*\*Primavera.

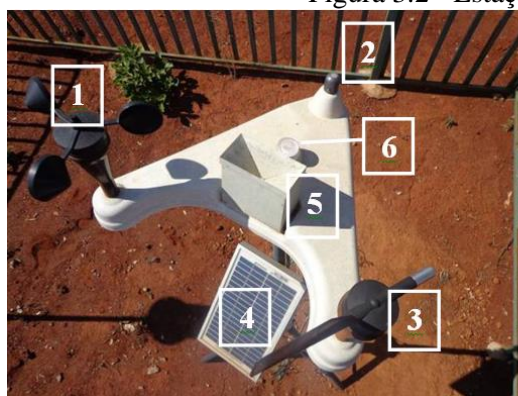
### 3.5 Avaliação da durabilidade do material exposto

Para avaliar a durabilidade dos geotêxteis expostos, foram realizados ensaios de resistência à tração faixa estreita, como realizado na caracterização dos mesmos, após cada período de exposição pré-determinado em projeto. Após a retirada da amostra exposta os corpos de provas foram extraídos e submetidos a ensaios de tração conforme D5035 (ASTM, 2011a) e a perda de resistência avaliada por ferramentas estatísticas.

### 3.6 Avaliação dos dados meteorológicos

Os dados meteorológicos dos períodos de exposição dos geotêxteis, particularmente a radiação solar total (MJ/m<sup>2</sup>), temperatura média diária (°C), umidade relativa do ar média (%) e precipitação diária acumulada (mm) foram obtidos por meio de uma estação meteorológica (FIGURA 3.12) instalada no CEFET – Campus Varginha. A incidência de radiação ultravioleta foi estimada em 7,5% da radiação solar global.

Figura 3.2 - Estação meteorológica.



1. Anemômetro (velocidade do vento)
2. Piranômetro (radiação Solar)
3. Anemômetro (direção do vento)
4. Painel Solar
5. Pluviômetro (resolução 1mm)
6. Nível bolha
7. Sensor de temperatura e umidade relativa do ar (Não visível)

Fonte: Do autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização do material intacto

O Quadro 4.1 apresenta os resultados obtidos pela caracterização física dos geotêxteis do tipo G1 e G2 e o Quadro 4.2 os resultados da caracterização mecânica. Pode-se observar por meio do Quadro 4.1 que o geotêxtil do tipo G2 apresentava maior espessura e maior massa por unidade de área, se comparado com o geotêxtil do tipo G1. Já por meio do Quadro 4.2 verifica-se uma maior resistência à tração longitudinal do geotêxtil do tipo G1, assim como menor coeficiente de variação.

Quadro 4.1 - Caracterização física.

<b>Propriedade física</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>
Massa por unidade de área	273,00 g/m <sup>2</sup>	458,00 g/m <sup>2</sup>
Coeficiente de variação	1,30%	0,80%
Espessura nominal	0,96 mm	1,62 mm
Coeficiente de variação	4,80%	1,50%

Fonte: Do autor.

Quadro 4.2 - Caracterização mecânica.

<b>Propriedade mecânica</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>
Resistência à tração longitudinal	57,52 kN/m	55,77 kN/m
Coeficiente de variação	1,70%	1,98%

Fonte: Do autor.

### 4.2 Avaliação da durabilidade após exposição

Para melhor visualização dos resultados no ensaio de resistência à tração faixa estreita dos geotêxteis expostos, construiu-se intervalos de confiança tomando como base a análise estatística de *t* de *student* com nível de confiança de 95%, o que também permite a extrapolação dos dados amostrais para a população, com o nível de significância de 5%. A Figura 4.1 e a Figura 4.2 contêm estes intervalos para os geotêxteis G1 e G2 expostos no primeiro ciclo e no segundo ciclo, respectivamente.

O Quadro 4.3 apresenta os valores de perda de resistência em percentual dos geotêxteis expostos no primeiro ciclo e o Quadro 4.4 dos geotêxteis expostos no segundo ciclo.

Quadro 4.3 - Perda de resistência em percentual dos geotêxteis expostos no primeiro ciclo.

<b>Período de exposição</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>
Verão	27,42%	14,56%
Out	5,04%	9,36%
Inv	6,19%	1,02%
Prima	5,55%	13,04%
Verão+Out	22,13%	13,57%
Verão+Out+Inv	28,56%	21,03%
Verão+Out+Inv+Prima	31,33%	22,11%

Fonte: Do autor.

Quadro 4.4 - Perda de resistência em percentual dos geotêxteis expostos no segundo ciclo.

<b>Período de exposição</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>
Inv	17,51%	16,10%
Prima	16,76%	20,76%
Verão	20,01%	19,71%
Out	15,30%	14,00%
Inv+Prima	32,61%	22,25%
Inv+Prima+Verão	40,07%	31,31%
Inv+Prima+Verão+Out	41,85%	34,34%

Fonte: Do autor.

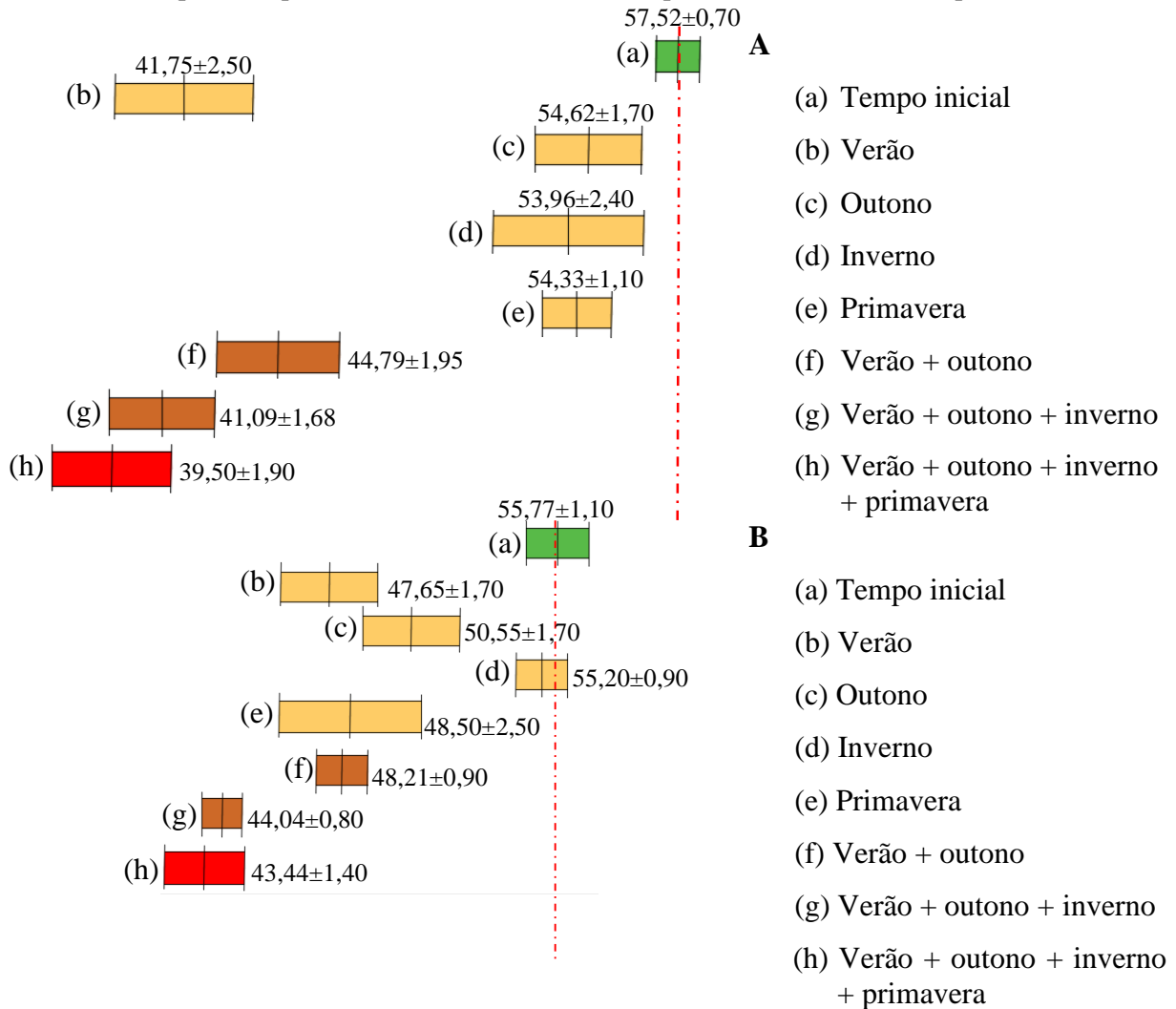
Observa-se pelo Quadro 4.3 e pela Figura 4.1 que após o primeiro ciclo de exposição os geotêxteis do tipo G2 apresentaram menor perda de resistência à tração do que do tipo G1 (considerando o tempo de exposição acumulado). O que condiz com os percentuais de aditivos contra radiação UV do tipo HALS empregados na composição dos geotêxteis em estudo.

No segundo ciclo de exposição (QUADRO 4.4 e FIGURA 4.2), os geotêxteis apresentaram também o comportamento esperado, ou seja, considerando o tempo acumulado de exposição, os geotêxteis do tipo G1 exibiram maior perda de resistência à tração, se comparado com o G2.

Ressalta-se o distinto comportamento dos geotêxteis frente a ambos os ciclos climáticos. Os geotêxteis G1 e G2, no primeiro ciclo, apresentaram uma grande perda de resistência no final da primeira estação climática (verão), entretanto, analisando o tempo total de exposição do ciclo, estas perdas foram menores se comparadas com o tempo total do segundo ciclo. Acredita-se que o valor de perda de maior magnitude tenha ocorrido no segundo ciclo, visto que danos na estrutura da matriz polimérica, já haviam sido acumulados durante o inverno e

primavera, e quando estas amostras foram expostas a dinâmica da atmosfera no período da estação do verão, como parte de sua estrutura já havia sido comprometida a perda de resistência foi significativamente superior do que no primeiro ciclo.

Figura 4.1 - Intervalos de confiança para os resultados de resistência à tração faixa estreita dos geotêxteis exposto no primeiro ciclo. A – Geotêxtil do tipo G2, B – Geotêxtil do tipo G1.



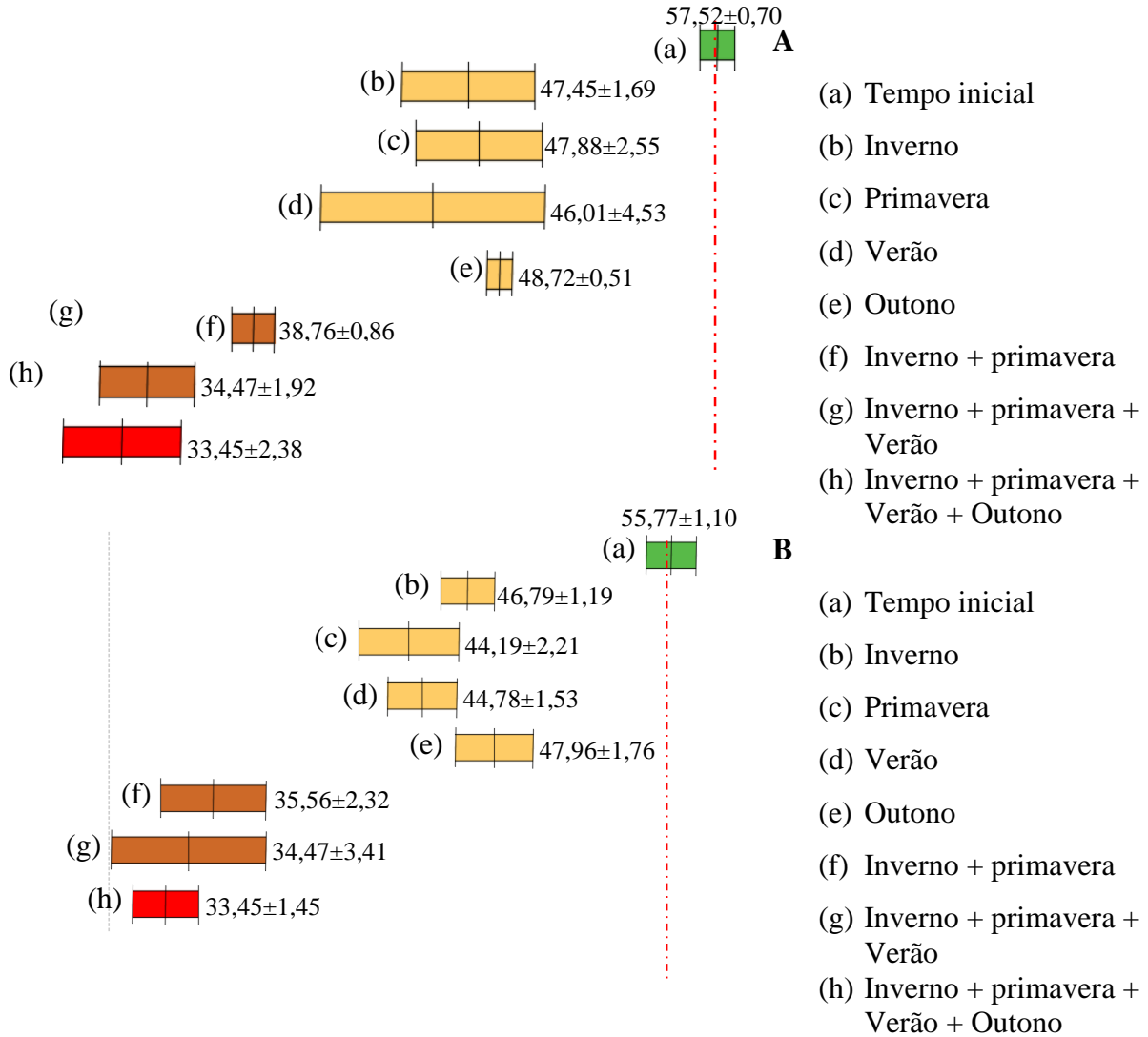
Fonte: Do autor.

Assim sendo, para ambos os ciclos, com relação a exposição às estações climáticas de forma individual, nota-se que as maiores perdas de resistência à tração ocorreram após o verão e a primavera. Além disso, percebe-se que as perdas percentuais após a exposição total não é equivalente à soma das perdas em cada estação climática. Este fato se deve provavelmente às mudanças na estrutura polimérica do material que ocorrem durante a exposição e têm influência direta no seu comportamento.

Conforme esperado, verificou-se que a durabilidade de geossintéticos intactos expostos a fatores intempéricos apresenta-se de forma diferente, se expostos aos mesmos fatores, porém

com dinâmicas atmosféricas distintas, visto que cada período ou estação apresentou suas peculiaridades.

Figura 4.2 - Intervalos de confiança para os resultados de resistência à tração faixa estreita dos geotêxteis exposto no segundo ciclo. A – Geotêxtil do tipo G2, B – Geotêxtil do tipo G1.



Fonte: Do autor.

### 4.3 Avaliação dos dados meteorológicos (dinâmica da atmosfera)

O Quadro 4.5 apresenta os valores de incidência de radiação UV estimada e da precipitação nas estações climáticas do primeiro ciclo e o Quadro 4.6 do segundo ciclo. Observa-se em ambos os ciclos que o verão e a primavera apresentaram elevados valores de radiação e precipitação, tal fato explica as maiores perdas percentuais de resistência à tração após a exposição nestes períodos individualmente.

É importante notar que, em ambos os casos, mesmo o inverno apresentando radiação UV similar ao verão e a primavera, as perdas percentuais de resistência foram menores. Ou

seja, a ação conjunta da radiação UV e da precipitação é fundamental no comportamento do material exposto. Assim sendo, o modelo de Maxwell (2005) torna-se menos preciso na estimativa do dano sofrido, já que considera apenas a ação da radiação UV isoladamente (Equações 1 a 3).

Quadro 4.5 - Valores acumulados de incidência de radiação UV estimada e de precipitação no primeiro ciclo de exposição.

<b>Período de exposição</b>	<b>Radiação UV (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>
Verão	135,62	342,40
Outono	69,92	165,40
Inverno	130,70	17,80
Primavera	115,31	545,80

Fonte: Do autor.

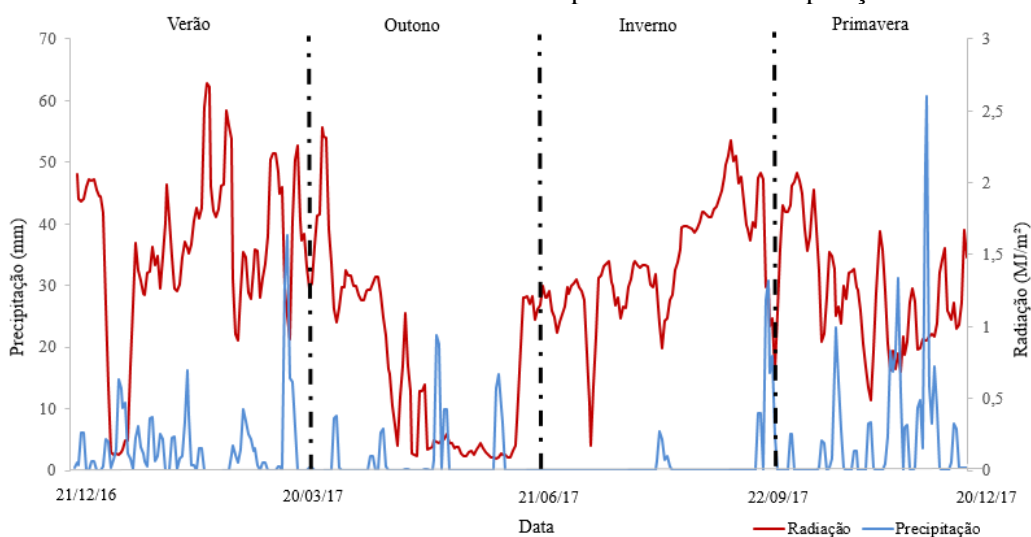
Quadro 4.6 - Valores acumulados de incidência de radiação UV estimada e de precipitação no segundo ciclo de exposição.

<b>Período de exposição</b>	<b>Radiação UV (MJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>
Inverno	115,83	169,00
Primavera	112,99	412,18
Verão	113,60	504,94
Outono	112,18	62,00

Fonte: Do autor.

O Gráfico 1 ilustra a dinâmica atmosférica, relativamente a radiação UV e precipitação, do primeiro ciclo de exposição. O segundo ciclo apresentou comportamento similar.

Gráfico 1 - Dinâmica atmosférica do primeiro ciclo de exposição.



Fonte: Do autor.

Outro ponto a ser notado é que durante as estações inverno e outono, para ambos os ciclos de exposição, predominou-se dias com pouca chuva, assim observou-se a formação de uma camada protetora de poeira nos materiais expostos (FIGURA 4.3).

Figura 4.3 - Camada de poeira formada na superfície do material exposto.



Fonte: Do autor.

#### 4.4 Modelo matemático da durabilidade de geotêxteis expostos às intempéries

Com os dados de resistência à tração ao longo do tempo de exposição foram traçados gráficos para validar uma modelagem de durabilidade, considerando o envelhecimento até a degradação do material, ou seja, final de sua vida de serviço. Conforme apresentado nos Gráficos 2 e 3, pode-se observar que a durabilidade de geotêxteis sujeito às intempéries poderia ser representada em termos de tempo *versus* resistência por um modelo matemático exponencial conforme Equação 5.

$$R = K e^{- (Y).X} \quad (5)$$

onde:

R: resistência à tração em função do tempo de exposição (kN/m)

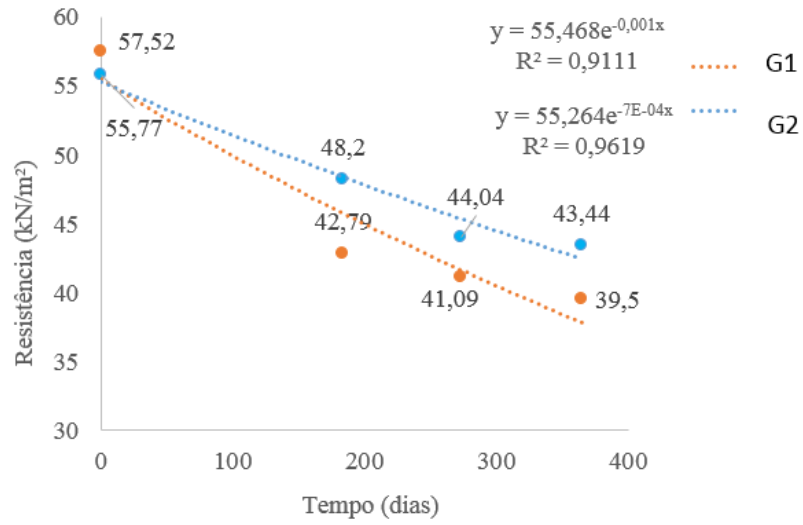
K: coeficiente dependente das características de resistência do material intacto (kN/m), ou seja, o valor médio, dentro de seus limites inferiores e superiores do IC.

X: tempo de exposição (em dias)

Y:  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  (em função do sinergismo das intempéries, acúmulo de danos e do nível de proteção da matriz polimérica do material – aditivos)

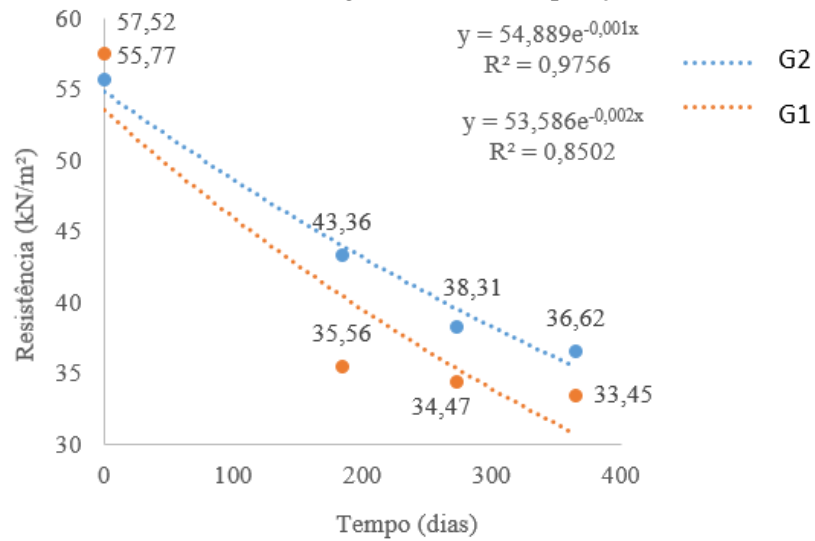


Gráfico 2 - Primeiro ciclo de exposição.



Fonte: Do autor.

Gráfico 3 - Segundo ciclo de exposição.



Fonte: Do autor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Os geossintéticos são materiais constituídos por matrizes poliméricas, com distintas aplicações dentro de obras geotécnicas ou ambientais, podendo ficar expostos e, conseqüentemente, sofrer degradação por ação de intempéries.

A manutenção das propriedades de materiais poliméricos frente a sua exposição a fatores que podem levar a sua degradação prematura precisa ser avaliada no desenvolvimento de projetos, viabilizando a eficácia e sucesso da obra.

Assim sendo, para o emprego adequado dos geossintéticos deve-se conhecer as variáveis que influenciam na degradação ao longo da vida de serviço, compreender de que forma esses agentes degradadores afetam a estrutura do material estudado, em cada realidade climática, assim como as propriedades mais relevantes deste.

No desenvolvimento do trabalho foi possível verificar uma maior degradação para a estação climática do verão se comparado as demais estações, mesmo quando não ocorreu a maior incidência de radiação UV nesta estação, como foi no segundo ciclo, onde a maior incidência se deu no inverno. Este fato ocorre devido ao sinergismo existente entre as intempéries precipitação e radiação UV.

Nesse contexto, no primeiro ciclo, mesmo com um maior volume de precipitação durante a primavera em relação ao verão, a incidência de irradiação UV foi menor e, conseqüentemente, a perda de resistência também. Ou seja, o comportamento de longo prazo de geossintéticos usados em situações expostas às intempéries pode ser diretamente influenciado pela dinâmica da atmosfera do local onde estes são expostos.

O geotêxtil do tipo G1 apresentou valores médios de perda de resistência à tração maiores que o G2, provavelmente devido a menor concentração de aditivo do tipo HALS.

A partir dos dados obtidos em dois ciclos com início em diferentes estações, pode-se determinar um modelo matemático do tipo exponencial para avaliar a durabilidade de geotêxteis expostos em campo, numa adaptação da proposta exponencial de Maxwell (2005), que tratava da resistência em função somente da radiação UV em ensaios acelerados. O modelo ora proposto parece promissor, considerando a dinâmicas atmosférica envolvida ao longo do tempo de exposição, ressaltando que o somatório de perdas de resistência dos períodos isolados não pode ser considerado equivalente a perda de resistência para o período total de exposição.

## **5.2 Proposta de trabalhos futuros**

Com o objetivo de aprimorar o trabalho desenvolvido nesta pesquisa, propõe-se a realização de análises estatísticas mais aprofundadas, como, por exemplo, testes de aderência para verificar a adequação dos dados a uma distribuição exponencial, tal como proposto.

Além disso, como nas exposições realizadas utilizou-se apoio de tela para os geotêxteis, sugere-se realizar novos ciclos de exposição com apoio fechado (situação mais crítica). Por fim, ainda visando as situações extremas, sujeitar o material a locais com clima caracterizado por intensa precipitação (região amazônica) e intensa radiação (região sudeste) e comparar os resultados obtidos com o modelo proposto.

## **REFERÊNCIAS**

ALMEIDA, R. S. **Influência da velocidade de rotação no processo de extrusão do polipropileno virgem e reciclado**. 2010. 86 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1505-18**: Standard test method for density of plastics by the density-gradient technique. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1777**: Standard test method for thickness of textile materials. West Conshohocken, 2019a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5035**: Standard test method for breaking force and elongation of textile fabrics (strip method). West Conshohocken, 2011a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5035**: Standard test method for breaking force and elongation of textile fabrics (strip method). West Conshohocken, 2019b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5199**: Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics. West Conshohocken, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 792**: Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement. West Conshohocken, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 166**: Standard Guide for Statistical Analysis of Service Life Data. West Conshohocken, 2011b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 172**: Standard Guide for Statistical Analysis of Accelerated Service Life Data. West Conshohocken, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318-1**: Geossintéticos - Parte 1: Termos e definições. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10319**: Geossintéticos — Ensaio de tração faixa larga. Rio de Janeiro, 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9863-1**: Geossintéticos — Determinação da espessura a pressões especificadas - Parte 1: Camada única. Rio de Janeiro, 2013b.

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. Rio de Janeiro, 2013a.

BARBOSA, J. A. **Análise laboratorial da eficiência de sistemas fechados de geotêxteis no desaguamento de lama de rocha fosfática**. 2011. 115 p. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CARNEIRO, J. R. DA C. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental - a importância da incorporação de aditivos químicos**. 2009. 602 p. Tese (Doutorado) – Universidade do Porto, Portugal, 2009.

EUROPEAN STANDARD. **UNE EN ISO 13934-1**: Textiles - Tensile properties of fabrics - Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method. Brussels, 2013.

GREENWOOD, J.H., SCHROEDER H.F. & VOSKAMP, W. **Durability of Geosynthetics**. CUR Committee C 187– Building & Infrastructure, 2012.

GUIMARÃES, M. A. **Durabilidade de Geotêxteis Expostos a Fatores Climáticos e Químicos Simulados em Laboratório**. 2012. 191 p. Dissertação (Mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 877-1**: Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 1: General guidance. Switzerland, 2009a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 877-2**: Plastics - Methods of exposure to solar radiation – Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass. Switzerland, 2009b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO TS 13434**: Geosynthetics - Guidelines for the assessment of durability. Switzerland, 2008.

JOHN, N.W.M. **Geotextiles**. Londres: Blackie, 1987.

KOERNER, R. M. **Design with geosynthetics**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2005.

LIMA, R. M. **Desaguamento do lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) 006 da cidade de Palmas-To, por meio de polímeros e filtração em geotêxtil**. 2016. 84 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

LOPES, M. P.; LOPES, M. L. **A durabilidade dos geossintéticos**. Porto: FEUP Edições, 2010.

MARG, L. B. S. **Handbook of geotextiles**. Mumbai: The Bombay Textile Research Association, 2012.

MAXWELL, A.S., BROUGHTON, W.R., DEAN, G., SIMS, G.D. **Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials**. National Physical Laboratory: NPL REPORT DEPC MPR 016, 2005.

MILAGRES, B. V. **Degradação de geotêxteis frente a elementos climáticos em ensaios de campo e laboratório: realidade climática local**. 2016. 173 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

MOL, A. S. **Preparação e funcionalização de nano fibras (whiskers) de quitina e sua aplicação como agente de recuperação de propriedades em polímeros reciclados**. 2014. 125 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

PAOLI, M. de. **Degradação e estabilização de polímeros**. 2. ed. São Paulo: Chemkeys, 2008.

PAULA, A. M. V. **Danificação durante a instalação – avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos**. 2003. 176 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2003.

SARSBY, R. W. **Geosynthetics in civil engineering**. Cambridge: 2007.

SHUKLA, S. K. **An introduction to geosynthetic engineering**. Londres: Taylor & Francis Group, 2016.

SHUKLA, S. K.; YIN, J. **Fundamentals of geosynthetic engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2006.

TRIOLA, M.F. **Introdução à Estatística**. 10º ed. Rio de Janeiro: LTC; 2008.

URASHIMA, B. M. C.; et al. Degradação de Geotêxteis Expostos às Intempéries. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 8., 2019, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EESC, 2019. p. 455-560.

URASHIMA, B. M. C.; URASHIMA, D. C.; GUIMARÃES, M. A. Degradação de geotêxteis de polipropileno expostos a intempéries. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais...** Salvador: Cobramseg, 2018. p. 250-257.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2004.

VIDAL, D.; FABRIN, T.; MONTEZ, F. O conceito de fatores de redução aplicados as propriedades dos geossintéticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 3., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, 1999.p. 189-198.